

97. Jahrgang Heft 3/2009

Österreichische Zeitschrift für

**Vermessung &
Geoinformation**

vgi

vgi 3/2009

**Wir schauen auf
unsere Erde**

TAGUNGSBAND



10. Geodätentag

Schladming 2009

Tagungsband: 10. Österreichischer Geodätentag



Trimble R8 GNSS +
Trimble Access



Tolle Funktionen allein bringen Sie nicht weiter!
Ihr effizientes Zusammenspiel ist der Schlüssel
zum Erfolg.



Schon als Rover allein spart der Trimble® R8 GNSS Empfänger Zeit und Geld.

Seine unerreichte Leistungsfähigkeit in der Satellitenverfolgung ermöglicht es Ihrem Messtrupp verlässliche Messergebnisse zu erzielen.

In Kombination mit der Trimble Access™-Software, erhalten Sie ein flexibles System, das Sie Ihren Bedürfnissen jederzeit anpassen können.

Beobachten Sie das neue Team bei der Arbeit: www.trimble.com/Access



Geodaesie Austria Gesellschaft m.b.H.
Ennsner Straße 83
A-4407 Steyr/Gleink
Tel.: +43 (0)7252 87165 20
Fax: +43 (0)7252 87165 40
office@geodaesie.at
www.geodaesie.at





Österreichische Zeitschrift für **Vermessung & Geoinformation**

**Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation
und der Österreichischen Geodätischen Kommission**

97. Jahrgang 2009

Heft: 3/2009

ISSN: 0029-9650

Schriftleiter: Dipl.-Ing. Stefan Klotz
Stellvertreter: Dipl.-Ing. Ernst Zahn
Dipl.-Ing. Andreas Pammer

A-1020 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

Internet: <http://www.ovg.at>

Tagungsband: **10. Österreichischer Geodätentag**

Grußworte

<i>R. Mitterlehner:</i>	
Grußworte des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend	287
<i>G. Steinkellner, G. Rabl:</i>	
Willkommen beim 10. Österreichischen Geodätentag	288
<i>J. Winter:</i>	
10. Österreichischer Geodätentag – „Ein Wort zuvor“	289

Tagungsbeiträge

Wir schauen auf die Erde und uns

<i>G. Hein:</i>	
Die aktuellen weltweiten Entwicklungen in der Satellitennavigation	291
<i>R. Pail, H. Sünkel:</i>	
GOCE-Schwerefeldmodellierung an der TU Graz	292
<i>S. Gadimova:</i>	
International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG): A System of Systems	300

<i>H. Kromp-Kolb:</i>	Wie gut verstehen wir den Klimawandel und seine Auswirkungen?	301
<i>G. Kirchengast:</i>	Geodesy aids climate: Monitoring von Treibhausgasen und Klimawandel mittels Intersatelliten-Atmosphärensondierung	310
<i>M. Urschler, A. Bornik, E. Scheurer, T. Pock, H. Bischof:</i>	Interactive 3D Segmentation as an Example for Medical Visual Computing	311

Die Erde und sie bewegt sich doch

<i>H. Ingensand:</i>	Alpenquerende Tunnelprojekte und die Herausforderungen an die Ingenieurgeodäsie	319
<i>T. Wunderlich:</i>	Terrestrisches Monitoring natürlicher Zielobjekte	325
<i>F. Brunner:</i>	Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie?	335

Die Erde und ein Bild von ihr

<i>H. Raggam, R. Perko, K. Gutjahr:</i>	Automationsgestützte Herleitung von 3D-Information aus hochauflösenden SAR-Bilddaten	343
<i>M. Gruber, A. Wiechert, R. Ladstädter:</i>	UltraCam – digitale Luftbildkameras für alle Fälle	353
<i>F. Leberl, M. Gruber:</i>	Aufbau und Nutzung einer virtuellen Erde im Internet	359

Die Erde und der belebende Blick

<i>W. Sulzer, G. Lieb:</i>	Die Gletscher im Wandel der Zeit – Gletschermonitoring am Beispiel der Pasterze	371
<i>M. Schardt:</i>	Einsatz von LIDAR für die Forstinventur	383

Impressum	290
Ausstellerverzeichnis	384
Sponsoren	400



Grüßworte des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend

Es gibt hierzulande nur wenige Vereine, die auf eine längere Tradition als die Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation zurückblicken können. Seit über 100 Jahren vertritt die OVG die berechtigten Interessen ihres Standes – also all jener, die sich mit Vermessung, Photogrammetrie, Geodäsie und Geoinformation beschäftigen. Die Gesellschaft informiert ihre Mitglieder über aktuelle Trends, fördert die Weiterbildung und unterstützt den Nachwuchs. Besonders freut mich, dass auch der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, öffentlichem Dienst, den freien Berufen und der Wirtschaft großes Augenmerk gilt.

Ich wünsche daher den Teilnehmern und Veranstaltern des 10. Geodätentages in Schladming einen gelungenen Kongress und eine erfolgreiche Messe. Angesichts der hochkarätigen Vortragenden aus dem In- und Ausland erwartet Sie wieder ein spannendes Programm. Darüber hinaus können Sie sich mit den neuesten Entwicklungen der Wirtschaft vertraut machen. Klar ist: Ein solcher Meinungs- und Erfahrungsaustausch auf höchster Ebene kann durch nichts ersetzt werden.

*Dr. Reinhold Mitterlehner
Bundesminister für Wirtschaft, Familie und Jugend*



Willkommen beim 10. Österreichischen Geodätentag

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

herzlich willkommen in Schladming! Die Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG) hat Schladming im Herzen Österreichs, in der grünen Steiermark als Veranstaltungsort des 10. Österreichischen Geodätentag 2009 gewählt, weil wir hier eine tolle Symbiose von Wissenschaft, Natur, Information und Gastfreundschaft vorfinden.

Unter dem Motto „Wir schauen auf unsere Erde“ vermittelt der Kongress den Besuchern einen Einblick in die nähere, weitere und benachbarte „Welt“ der Vermessung und Geoinformation, aber auch einen Blick auf uns.

Der Kongress hat fünf Themenschwerpunkte gewählt – Wir Schauen auf die Erde und uns; Die Erde - und sie bewegt sich doch; Die Erde - und ein Bild von ihr; Die Erde - und der belebende Blick; Die Erde - und das Eigentum – zu denen es neben dem Festvortrag, dreizehn Vorträge und sechs Impulsreferate geben wird. Neben dem Vortragsprogramm und den Fachexkursionen wird den Teilnehmern auch ein äußerst interessantes und unterhaltsames Rahmenprogramm angeboten, so darf der Geodätentreff nicht fehlen, ein festlicher gemütlicher Abend „Willkommen in Schladming“ begrüßt alle Gäste des Kongresses und verabschieden möchten wir uns mit einem zünftigen Almfest auf der Planai. Die begleitende Fach- und Firmenmesse informiert zusätzlich über die neuesten Entwicklungen, Produkte und Dienstleistungen der Vermessung und Geoinformation.

Die Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation als Veranstalter gemeinsam mit dem Organisationsteam freuen sich, Sie als Besucher des 10. Österreichischen Geodätentages vom 6. bis 8. Oktober 2009 in Schladming begrüßen zu dürfen.

Dipl.-Ing. Gert Steinkellner
Präsident der OVG

Dipl.-Ing. Gunther Rabl
Kongressdirektor



10. Österreichischer Geodätentag – „Ein Wort zuvor“

Sehr geehrte Damen und Herren!

Als Bürgermeister der Stadt Schladming freue ich mich ganz besonders alle Teilnehmer des „10. Österreichischen Geodätentages“ hier in unserer WM-Stadt im Herzen der Region Schladming – Dachstein willkommen heißen zu dürfen.

Unsere Heimat hat Geschichte und verwandelte sich im Lauf der Jahrhunderte von einer alten Bergbauregion, in der Erze, wie Silber, Kupfer, Nickel und Kobalt abgebaut wurden, zu einem heute weit über die Grenzen unseres Landes hinaus bekannten Wintersportzentrum, in dem zur Zeit alle Vorbereitungen für die Durchführung der Alpinen-Ski-WM 2013 auf Hochtouren laufen. Besucher werden aber nicht nur in der kalten Jahreszeit angelockt. Die reizvolle Landschaft rundum bietet den Besuchern viele Wander-, Sport- und kulturelle Möglichkeiten neben einem herrlichen Panorama.

Möge die Schönheit und die gemütliche Atmosphäre der Region alle Teilnehmer Ihres Kongresses erfreuen!

Schon heute wünsche ich einen erfolgreichen und guten Verlauf der Tagung und verbleibe mit herzlichen Grüßen,

Jürgen Winter
Bürgermeister der Stadt Schladming



Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation und der Österreichischen Geodätischen Kommission

97. Jahrgang 2009 / ISSN: 0029-9650
<http://www.ovg.at>

Herausgeber und Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze. Bankverbindung: Österreichische Postsparkasse BLZ 60000, Kontonummer PSK 1190933. ZVR-Zahl 403011926.

Präsident der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Gert Steinkellner, Tel. (01) 21110-2714, Fax (01) 21110-4624, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien.

Sekretariat der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Karl Haussteiner, Tel.(01) 21110-2311, Fax (01) 2167551, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien.

Schriftleitung: Dipl.-Ing. Stefan Klotz, Tel. (01) 21110-3609, Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Tel. (01) 21110-3209, Dipl.-Ing. Andreas Pammer, Tel. (01) 21110-5336, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. Fax (01) 2167551, Email: vgi@ovg.at.

Manuskripte: Bitte direkt an die Schriftleitung senden. Es wird dringend ersucht, alle Beiträge in digitaler Form auf Diskette oder per E-Mail zu übersenden. Genaue Angaben über die Form der Abfassung des Textteiles sowie der Abbildungen (Autoren- Richtlinien) können bei der Schriftleitung angefordert werden. Beiträge können in Deutsch oder Englisch abgefasst sein; Hauptartikel bitte mit einer deutschsprachigen Kurzfassung und einem englischen Abstract sowie Schlüsselwörter bzw. Keywords einsenden. Auf Wunsch können Hauptartikel einem „Blind-Review“ unterzogen werden. Nach einer formalen Überprüfung durch die Schriftleitung wird der Artikel an ein Mitglied des Redaktionsbeirates weitergeleitet und von diesem an den/die Reviewer verteilt. Artikel, die einen Review-Prozess erfolgreich durchlaufen haben, werden als solche gesondert gekennzeichnet. Namentlich gezeichnete Beiträge geben die Meinung des Autors wieder, die sich nicht mit der des Herausgebers decken muss. Die Verantwortung für den Inhalt des einzelnen Artikels liegt daher beim Autor. Mit der Annahme des Manuskriptes sowie der Veröffentlichung geht das alleinige Recht der Vervielfältigung und Wiedergabe auf den Herausgeber über.

Redaktionsbeirat für Review: Univ.Prof. Dr. Fritz K. Brunner, Univ.Prof. Dr. Norbert Pfeifer, Univ.Prof. Dr. Harald Schuh, Dipl.-

Ing. Gert Steinkellner, Prof. Dr. Josef Strobl, O.Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Hans Sünkel und Dipl.-Ing., Dr.iur., Univ.-Doz. Christoph Twaroch

Copyright: Jede Vervielfältigung, Übersetzung, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie Mikroverfilmung der Zeitschrift oder von in ihr enthaltenen Beiträge ohne Zustimmung des Herausgebers ist unzulässig und strafbar. Einzelne Photokopien für den persönlichen Gebrauch dürfen nur von einzelnen Beiträgen oder Teilen davon angefertigt werden.

Anzeigenbearbeitung und -beratung: Dipl.-Ing. Stefan Klotz, Tel. (01) 21110-3609, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. Unterlagen über Preise und technische Details werden auf Anfrage gerne zugesendet.

Erscheinungsweise: Vierteljährlich in zwangloser Reihenfolge (1 Jahrgang = 4 Hefte). Auflage: 2000 Stück.

Abonnement: Nur jahrgangsweise möglich. Ein Abonnement gilt automatisch um ein Jahr verlängert, sofern nicht bis zum 1.12. des laufenden Jahres eine Kündigung erfolgt. Die Bearbeitung von Abonnementangelegenheiten erfolgt durch das Sekretariat. Adressänderungen sind an das Sekretariat zu richten.

Verkaufspreise: Einzelheft: Inland 15 €, Ausland 18 €; Abonnement: Inland 50 €, Ausland 60 €; alle Preise exclusive Mehrwertsteuer. OVG-Mitglieder erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Satz und Druck: Buchdruckerei Ernst Becvar Ges.m.b.H., A-1150 Wien, Lichtgasse 10.

Offenlegung gem. § 25 Mediengesetz

Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze.

Aufgabe der Gesellschaft: gem. § 1 Abs. 1 der Statuten (gen. mit Bescheid der Sicherheitsdirektion Wien vom 08.04.2003): a) die Vertretung der fachlichen Belange der Vermessung und Geoinformation auf allen Gebieten der wissenschaftlichen Forschung und der praktischen Anwendung, b) die Vertretung aller Angehörigen des Berufsstandes, c) die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Kollegen der Wissenschaft, des öffentlichen Dienstes, der freien Berufe und der Wirtschaft, d) die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, e) die Herausgabe einer Zeitschrift mit dem Namen „Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation“ (VGI).

Erklärung Über die grundlegende Richtung der Zeitschrift: Wahrnehmung und Vertretung der fachlichen Belange aller Bereiche der Vermessung und Geoinformation, der Photogrammetrie und Fernerkundung, sowie Information und Weiterbildung der Mitglieder der Gesellschaft hinsichtlich dieser Fachgebiete.



ÖSTERREICHISCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

ÖGK



Die aktuellen weltweiten Entwicklungen in der Satellitennavigation

Günter W. Hein, Noordwijk

Kurzfassung

Positionierung, Navigation und Zeit haben von jeher das Interesse der Menschheit geweckt. Das Ziel war und ist noch immer, schneller und genauer diese Parameter zu bestimmen. Waren es früher die Sterne, die zu Hilfe genommen worden sind, so sind es heute die modernen Satellitensysteme, die uns Position, Navigation und Zeit in Echtzeit liefern. Nachdem in den 1970iger Jahren die USA und Russland mit dem Aufbau derartiger Systeme begonnen hatten, entschloss sich Europa im Jahr 2004, das Galileo-System zu entwickeln. Mit dieser Entscheidung der Europäischen Union hat ein weltweiter Wettlauf auf diesem innovativen Gebiet begonnen. Fünf globale Systeme, zwei regionale Systeme und mehr als ein Dutzend Ergänzungssysteme sind derzeit vorhanden bzw. in Entwicklung. Genaue Positionierung, Navigation und Zeit eröffnen neue Anwendungen und Märkte. Zum ersten Mal in der Raumfahrt gibt es Missionen, die uns allen im täglichen Leben Nutzen und Dienst bieten.

Vortragender

Prof. Dr.-Ing. Günter W. Hein

- 1971 Dipl.-Ing. (FH) Vermessungswesen, FH Mainz
- 1973 Dipl.-Ing. (univ.) Geodäsie, TH Darmstadt
- 1976 Dr.-Ing. in Physikalischer und Satellitengeodäsie, TH Darmstadt
- 1981 Habilitation (Dr.-Ing. habil.) und Ernennung zum Privatdozent in Physikalischer Geodäsie, TH Darmstadt
- 1983-2008 Universitätsprofessor für Erdmessung und Direktor des Instituts für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München
- 2000-2008 Gastprofessor im Executive Master Program "Space Systems Engineering", Fakultät für Luft- und Raumfahrt der Universität Delft, Niederlande
- seit 1.12.2008 Head of Galileo Operations and Evolution Department, European Space Agency

Auszeichnungen:

Johannes Kepler Award 2002 des US Institute of Navigation für "nachhaltige und bedeutende Beiträge zur Satellitennavigation" (weltweit höchste Auszeichnung in Satellitennavigation, einmal pro Jahr verliehen; bisher einziger Europäer)

Galileo Vertreter im Executive Committee des US Institute of Navigation.

Mehr als 300 Veröffentlichungen.



GOCE-Schwerfeldmodellierung an der TU Graz

Roland Pail, Hans Sünkel, Graz

Kurzfassung

GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) ist eine Satellitenmission des erdwissenschaftlichen "Living Planet"-Programms der europäischen Weltraumagentur ESA. Ziel dieser Mission ist die Bestimmung eines hochauflösenden Modells des Schwerfeldes der Erde mit bisher unerreichter Genauigkeit. Der Satellit wurde am 17. März 2009 erfolgreich in seine Umlaufbahn gebracht. Informationen über das Erdschwerfeld bilden die Basis für Anwendungen in den Bereichen Geophysik, Ozeanografie, Geodäsie, Eismassen- und Klimaforschung, uvm. Die wissenschaftliche Datenauswertung und Schwerfeldmodellierung wird im Auftrag der ESA von einem Konsortium aus 10 europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen im Rahmen des Projektes „GOCE High-Level Processing Facility (HPF)“ durchgeführt. Die TU Graz ist im Rahmen dieses Projekts für die Berechnung von globalen Schwerfeldmodellen aus GOCE-Orbit- und Gradiometriedaten hauptverantwortlich. In dieser Arbeit wird das an der TU Graz installierte Software-System vorgestellt und dessen Aufgaben anhand einer numerischen Fallstudie demonstriert. Weiters wird über den aktuellen Status der GOCE-Mission berichtet.

Schlüsselwörter: Erdschwerfeld, GOCE-Satellit, Gravitations-Gradiometrie, Schwerfeldmodellierung

Abstract

The dedicated satellite gravity mission GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) is the first Earth Explorer Core Mission in the context of ESA's Living Planet programme. It strives for a high-resolution global model of the Earth's static gravity field with unprecedented accuracy. The satellite was successfully launched on March 17, 2009. Gravity field information is applied in many geoscientific disciplines, such as geophysics, oceanography, geodesy, cryospheric and climate research, etc. The scientific data processing and gravity field modelling is performed by a consortium of 10 European universities and research institutes in the frame of the ESA project "GOCE High-Level Processing Facility (HPF)". In this context, Graz University of Technology is responsible for the computation of global gravity field models from GOCE orbit and gradiometry data. In this paper the software system, which has been installed at TU Graz during the development phase of HPF, is presented, and its main tasks are demonstrated on the basis of a numerical case study. Additionally, a brief report on the current status of the GOCE mission is given.

Keywords: Earth's gravity field, GOCE satellite, gravity gradiometry, gravity field modelling

1. ESA-Mission GOCE

GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer; Abb. 1) ist eine Satellitenmission des erdwissenschaftlichen "Living Planet"-Programms der europäischen Weltraumagentur ESA ([3]). Ziel dieser Mission ist die Bestimmung eines hochauflösenden Modells des Schwerfeldes der Erde mit bisher unerreichter Genauigkeit. Der Satellit wurde am 17. März 2009 um 15:21 MEZ vom Weltraumbahnhof Pleseck (Russland) erfolgreich in seine Umlaufbahn gebracht. (Abb. 1)

GOCE basiert auf einem Sensorfusionskonzept. Das Hauptinstrument des GOCE-Satelliten ist ein Gravitations-Gradiometer (Abb. 2, links), das weltweit erstmals eingesetzt wird. Dieses bildet gemeinsam mit einer kontinuierlichen, zentimetergenauen GPS-Ortung (Abb. 2, rechts) mit einer 3D-Positionengenauigkeit von 3 cm, sowie einer aktiven Lagekontrolle des Satelliten ein in-

tegriertes System höchster Sensitivität. Während aus den Daten der GPS-Bahnbestimmung (satellite-to-satellite tracking in high-low mode; hl-SST) die langwelligen Anteile des Schwerfeldes bestimmt werden können, werden mittels des Verfahrens der Satelliten-Gradiometrie (SGG) die mittel- bis hochfrequenten Anteile des Erdschwerfeldes gemessen. Die aktive Kompensation des auf den Satelliten wirkenden Luftwiderstands mittels Ionenstrahltriebwerken ermöglicht eine extrem niedrige Flughöhe von nur ca. 260 km und damit eine Messung möglichst nahe am Untersuchungsobjekt Erde, was die hohe räumliche Auflösung der Detailstrukturen des Erdschwerfeldes ermöglicht. (Abb. 2)

Informationen über das Erdschwerfeld bilden die Basis für Anwendungen in den Bereichen Geophysik, Ozeanografie, Geodäsie, Eismassen- und Klimaforschung, etc. Die GOCE-Daten liefern einen detaillierten Blick ins Erdinnere und tragen so

zum besseren Verständnis von geodynamischen Prozessen, die u. a. für Erdbeben und Vulkanismus verantwortlich sind, bei. Weiters ermöglichen sie die Erfassung von globalen Ozeanzirkulationssystemen, die neben der Atmosphäre einen großen Teil des Wärme- und Energieaustauschs auf unserer Erde bewerkstelligen, und von Meeresspiegeländerungen als Resultat z. B. von Abschmelzvorgängen großer Eismassen. Damit liefert GOCE wichtige Beiträge zur Erdsystem- und Klimaforschung. Daneben tragen GOCE-Schwerefeldmodelle zur weltweiten Vereinheitlichung von globalen Höhensystemen bei.

2. GOCE HPF

Die wissenschaftliche Datenauswertung und Schwerfeldmodellierung wird im Auftrag der ESA von einem Konsortium aus 10 europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen im Rahmen des Projektes „GOCE High-Level Processing Facility (HPF)“ durchgeführt ([14]). Pro-

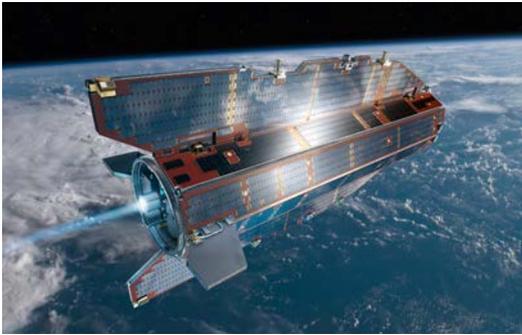


Abb. 1: GOCE-Satellit in seiner Umlaufbahn um die Erde (Quelle: AOES Medialab).

jektpartner der TU Graz in diesem „European GOCE Gravity Consortium“ (EGG-C) sind: TU München, SRON National Institute of Space Research, GFZ Potsdam, CNES, TU Delft, Politecnico di Milano, Universität Bern, Universität Bonn, Universität Kopenhagen. Im Rahmen von GOCE HPF ist die sogenannte „Sub-Processing Facility (SPF) 6000“, eine Kooperation von TU Graz (Leitung) und der Partnerinstitutionen Österreichische Akademie der Wissenschaften, Universität Bonn und TU München für die Berechnung eines hoch genauen, hoch auflösenden Schwerfeldmodells aus GOCE Orbit- und Gradiometriedaten verantwortlich.

In der ersten Projektphase wurde das Software-System entwickelt, integriert und umfangreichen Tests im Rahmen von jährlichen ESA „Acceptance Reviews“ unterzogen. Diese Arbeiten wurden im April 2004 begonnen und im Jahr 2008 erfolgreich abgeschlossen. Die operationelle Auswertung der GOCE-Daten beginnt Anfang September 2009 und wird bis mindestens 2011 andauern.

3. GOCE-Schwerefeldprozessierung

Während der mindestens zwei GOCE-Messphasen wird eine große Datenmenge von mehreren hundert Millionen Orbit- und Gradiometriedaten erfasst werden. Das mathematische Modell für die Parametrisierung des globalen Erdschwerefeldes basiert auf einer Reihenentwicklung in sphärische harmonische Funktionen. Das Gravitationspotential V kann in einem sphärischen Koordinatensystem (r, ϑ, λ) dargestellt werden als ([4]):

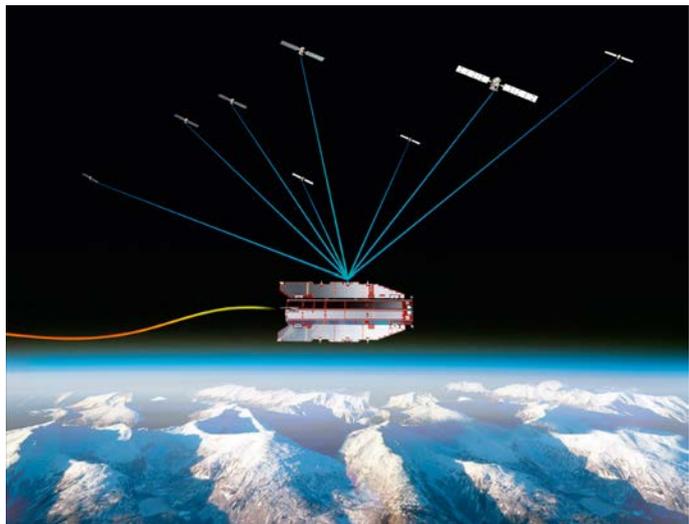


Abb. 2: links: Gravitations-Gradiometer; rechts: Positionsbestimmung mittels GPS (Quelle: AOES Medialab).

$$V(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \vartheta) \cdot [\bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{lm} \sin(m\lambda)] \quad (1)$$

G ist die Gravitationskonstante, M und R sind Masse und Referenzradius der Erde, \bar{P}_{lm} sind die vollständig normierten Legendre-Polynome von Grad l und Ordnung m , und $\{\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}\}$ die zugehörigen harmonischen Koeffizienten der Reihenentwicklung. Das GOCE-Gradiometer misst 2. Ableitungen des Gravitationspotentials $V_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}$ nach beliebigen Raumrichtungen x_i, x_j , wobei das Koordinatensystem sich nach dem lokalen System des Gradiometers orientiert.

Im Falle einer maximalen Auflösung dieser Reihenentwicklung von Grad/Ordnung $l_{\max} = 250$ ergeben sich ca. 63000 zu bestimmende Parameter $\{\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}\}$. Die Berechnung dieser Koeffizienten aus der oben erwähnten riesigen

Datenmenge ist ein sowohl numerisch als auch rechentechnisch höchst anspruchsvolles Problem. Es erfordert den Einsatz effizienter Prozessierungsstrategien, um die dabei auftretenden sehr großen Gleichungssysteme zu lösen. Während der letzten Jahre wurden unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt, z. B. [5], [9], [11], [12], [13], [15]. Ausgewählte Lösungsansätze sind in der SPF6000 integriert.

Abbildung 3 zeigt die modulare Architektur, die Hauptkomponenten, den Produktfluss durch das SPF6000-System, sowie die wichtigsten Produkte. Der Datentransfer zwischen SPF6000 und dem zentralen HPF-Datenserver CPF wurde mittels automatisierter Schnittstellen realisiert. Für den Datenfluss innerhalb des SPF6000 dient ein lokaler Datenserver mit zentraler Zugriffsmöglichkeit aller beteiligten Workstations.

Das Softwaresystem besteht aus zwei Hauptkomponenten:

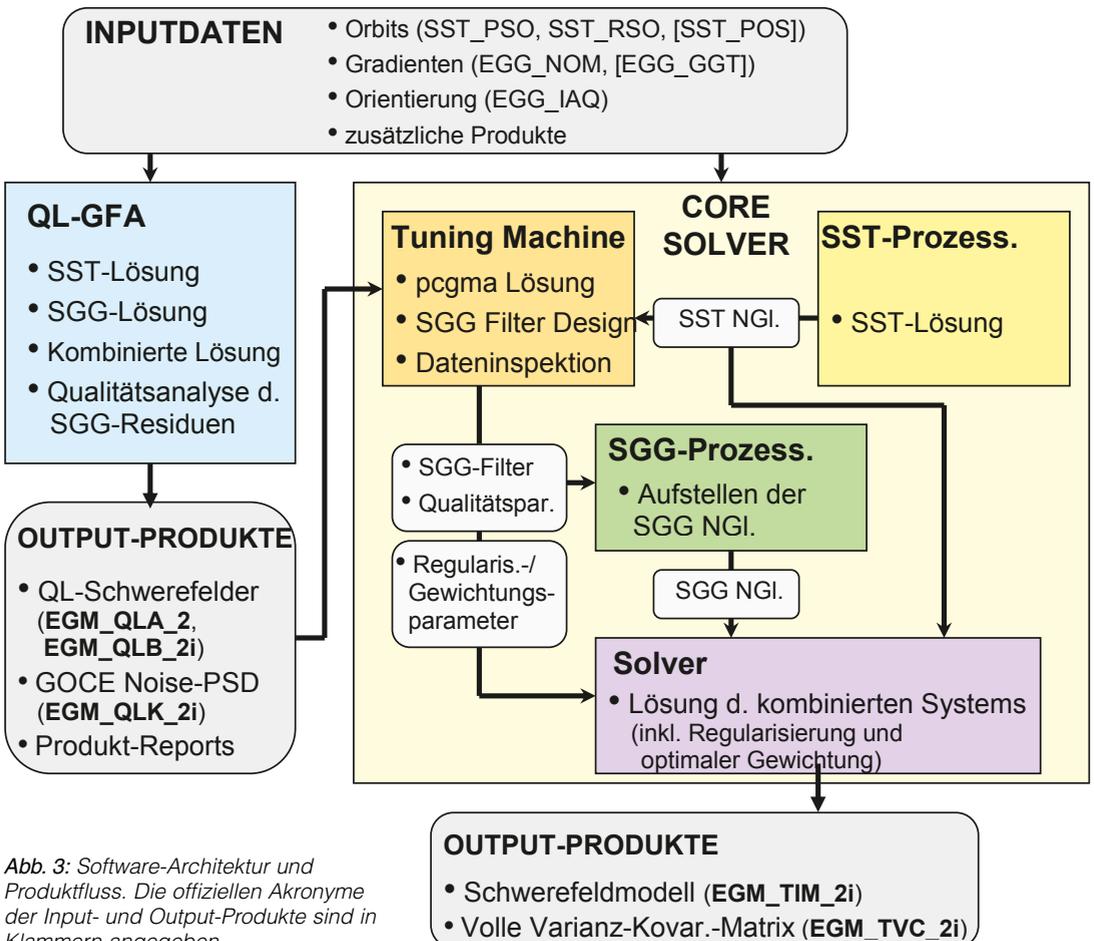


Abb. 3: Software-Architektur und Produktfluss. Die offiziellen Akronyme der Input- und Output-Produkte sind in Klammern angegeben.

- Core Solver: strenge Lösung der großen Normalgleichungssysteme unter Anwendung von parallelen Prozessierungsstrategien auf PC-Clusternsystemen;
- Quick-Look Gravity Field Analysis: schnelle Näherungslösungen, die schon parallel zur Mission berechnet werden und zur GOCE-Systemdiagnose und Qualitätskontrolle der GOCE-Beobachtungen dienen.

3.1 Core Solver

Das Hauptziel des Core Solvers ist die Berechnung eines hochauflösenden sphärischen harmonischen Erdschwerefeldmodells aus GOCE SST- und SGG-Beobachtungen. Die Parametrisierung soll zumindest bis Grad/Ordnung 200 (ca. 40000 Parameter) erfolgen, je nach Güte vor allem der SGG-Beobachtungen wird jedoch eine maximale Auflösung von zumindest Grad/Ordnung 250 (ca. 63000 Parameter) angestrebt.

Die Schwerefeldberechnung aus der GPS-Orbitinformation (SST-Prozessor) basiert auf dem Prinzip der Energieerhaltung in einem abgeschlossenen System ([1]). Der SGG-Prozessor stellt die vollen Normalgleichungssysteme basierend auf den Gradiometer-Beobachtungen auf und nutzt dabei die Rechen- und Speicherkapazitäten eines Linux-PC-Clusters (z.B. [12]). Die für eine hochgenaue Schwerefeldlösung essentielle Problematik der Behandlung des farbigen Rauschens des Gradiometers wird mittels rekursiver Filterprozesse im Zeitbereich gelöst ([15]). Letztlich werden die SST- und SGG-Normalgleichungen durch Addition kombiniert, wobei Gewichtungstrategien basierend auf der Varianzkomponentenschätzung ([6]) zur Berechnung der optimalen Gewichte der einzelnen Komponenten eingesetzt werden.

Die eigentliche Lösung des kombinierten Normalgleichungssystems erfolgt durch eine parallelisierte Cholesky-Reduktion. Die Instabilität der Normalgleichungen aufgrund der speziellen GOCE-Konfiguration eines sonnensynchronen Orbits (und damit nicht mit Messungen überdeckter Polkappen) können mittels maßgeschneiderter Regularisierungsmethoden ([8]) reduziert werden. Zusätzlich zur Lösung der Schwerefeld-Koeffizienten wird durch strenge Inversion des Gesamtsystems die volle Varianz-Kovarianz-Matrix als statistische Information der Ungenauigkeiten der geschätzten Koeffizienten berechnet. Die Bereitstellung dieser Kovarianzinformation, die für viele Schwerefeld-Anwendungen von essenzieller Bedeutung ist, war bei derzeit verfügbaren Schwerefeldmodellen bis-

lang unüblich, wird im Falle von GOCE jedoch realisiert.

3.2 Quick-Look Gravity Field Analysis

Hauptaufgaben der Quick-Look Gravity Field Analysis (QL-GFA) sind:

- Überprüfung der SGG- und SST-Daten während der Mission.
- Berechnung von schnellen Schwerefeldlösungen (Einzellösungen aus SGG bzw. SST, sowie kombinierte Lösung), mit dem Ziel, die Inputdaten auf der Basis einer daraus abgeleiteten Schwerefeldlösung zu validieren. Zusätzlich werden die resultierenden Schwerefeldlösungen statistisch gegen externe Referenzmodelle getestet.
- Analyse der Fehlercharakteristik des Gradiometers: Aus den Residuen der Schwerefeldlösung kann das Leistungsdichtespektrum des Gradiometer-Rauschens abgeschätzt werden (siehe auch: Abb. 4).
- Generierung von Testprotokollen, die wichtige Ergebnisse aus den oben genannten Tests zusammenfassen.

QL-GFA-Schwerefeldmodelle, aufgelöst z. B. bis Grad/Ordnung 250 (ca. 63000 Parameter), können innerhalb von 1 bis 2 Stunden auf einem handelsüblichen PC berechnet werden. Die Effizienz und hohe Geschwindigkeit von QL-GFA basiert hauptsächlich auf der Anwendung von FFT-Techniken (semi-analytischer Ansatz), der Annahme von blockdiagonalen Normalgleichungen und vereinfachten Filterstrategien, die im Frequenzbereich durchgeführt werden, um dem farbigen Rauschverhalten des Gradiometers Rechnung zu tragen. Fehlereinflüsse aufgrund von Abweichungen von diesen vereinfachenden Annahmen werden mit Hilfe einer iterativen Lösungsstrategie reduziert ([11]).

Details zu den einzelnen Berechnungsschritten und den dafür entwickelten Algorithmen sowie Referenzen zu weiterführender Literatur finden sich z.B. in [10].

4. Simulationsergebnisse

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wurden zur Validierung des operationellen HPF-Software-Systems in regelmäßigen Abständen offizielle Tests mit unabhängigen Testdaten durchgeführt. Die im Folgenden beschriebene numerische Studie basiert auf jenen Daten einer GOCE-Simulation der ESA ([2]), die ebenfalls für den offiziellen Abschlusstest der operationellen HPF-Software am Ende der HPF-Software-Entwicklungsphase

verwendet wurden. Der Testdatensatz umfasst Orbits, Gradienten, Lageinformation des Satelliten und weitere Hilfsprodukte für einen Zeitraum von 60 Tagen mit einer Abtastrate von 1 s. Die simulierten Orbits und Gradienten basieren auf dem Referenz-Schwerefeldmodell EGM96 ([7]). Alle Produkte enthalten realistisches Rauschen gemäß den jeweiligen Genauigkeits-Spezifikationen.

Die schwarze Kurve in Abb. 4 zeigt exemplarisch das frequenzabhängige Rauschverhalten des Gradiometers für die Komponente V_{xx} (zweifache Ableitung des Potentials V in Flugrichtung). Die rote Linie zeigt das in der Berechnung verwendete Filter zur Beschreibung der stochastischen Eigenschaften dieser Beobachtungen.

Nach Abarbeitung der gesamten Prozessierungskette (Abb. 3) resultiert ein globales

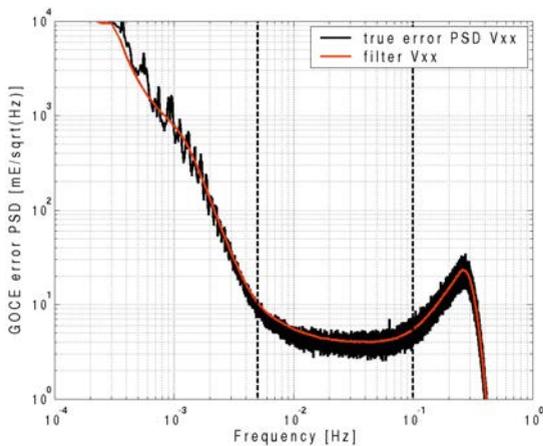


Abb. 4: Leistungsdichtespektrum des Gradiometerauschens der Komponente V_{xx} .

Schwerefeldmodell als kombinierte, strenge Lösung, im gegebenen Fall parametrisiert durch harmonische Koeffizienten bis Grad/Ordnung 200. Die Berechnungszeit (Aufstellen und Lösen der Normalgleichungen) auf dem PC-Cluster betrug ca. 4 Tage. Abbildung 5 (links) zeigt die Abweichungen der geschätzten Koeffizienten vom Referenzmodell EGM96, sowie die zugehörigen geschätzten Standardabweichungen (rechts). Offensichtlich sind die absoluten Abweichungen und die zugehörigen Fehlerschätzungen konsistent, was auf eine sehr gute Modellierung der Stochastik der verwendeten Beobachtungen schließen lässt.

Basierend auf der Koeffizientenschätzung der kombinierten strengen Lösung bis Grad/Ordnung 200 wurde ein globales Feld von Geoidhöhen berechnet und mit dem „wahren Feld“ basierend auf dem Referenzmodell EGM96 verglichen. Abbildung 6 (links) zeigt dieses Differenzfeld.

Die Standardabweichung des Differenzfeldes im geographischen Bereich $|\varphi| < 83,5^\circ$ beträgt für die Geoidhöhen $\sigma_N = 3,5$ cm, und für die Schwereanomalien (keine Abb.) $\sigma_{\Delta g} = 0,96$ mGal. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass diese Studie auf einem auf 2 Monate beschränkten Datenvolumen basiert, kann die für GOCE spezifizierte Genauigkeitsanforderung von 1-2 cm für die Geoidhöhe und 1 mGal für Schwereanomalien bei einer Auflösung von Grad/Ordnung 200 erreicht werden.

Neben der Koeffizientenschätzung ist auch die zugehörige volle Varianz-Kovarianzmatrix bis Grad/Ordnung 200 (ca. 20 GBytes in ASCII-Formatierung) Teil der Lösung. Um die Plausibilität dieses umfangreichen Produktes zu überprüfen,

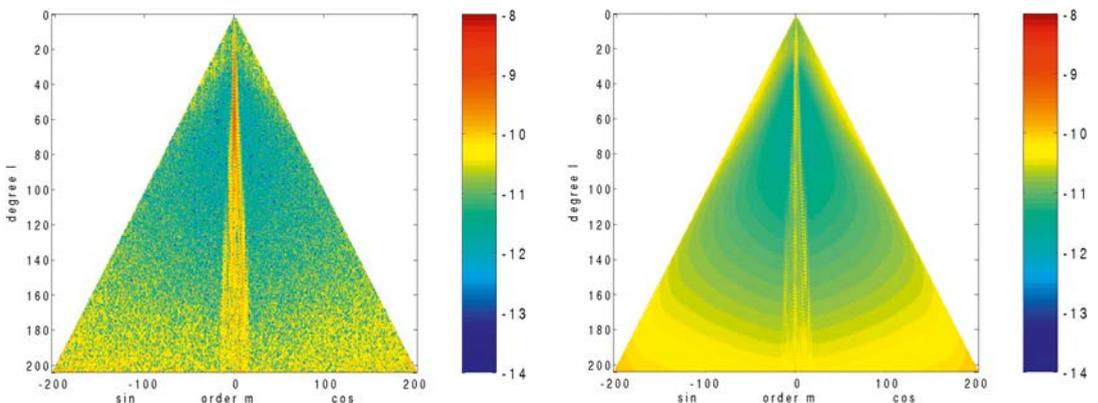


Abb. 5: Kombinierte Schwerefeldlösung: Koeffizienten-Differenzen zum Referenzmodell EGM96 (links) und Standardabweichungen (rechts). Skaliert in $\log_{10}(|\dots|)$.

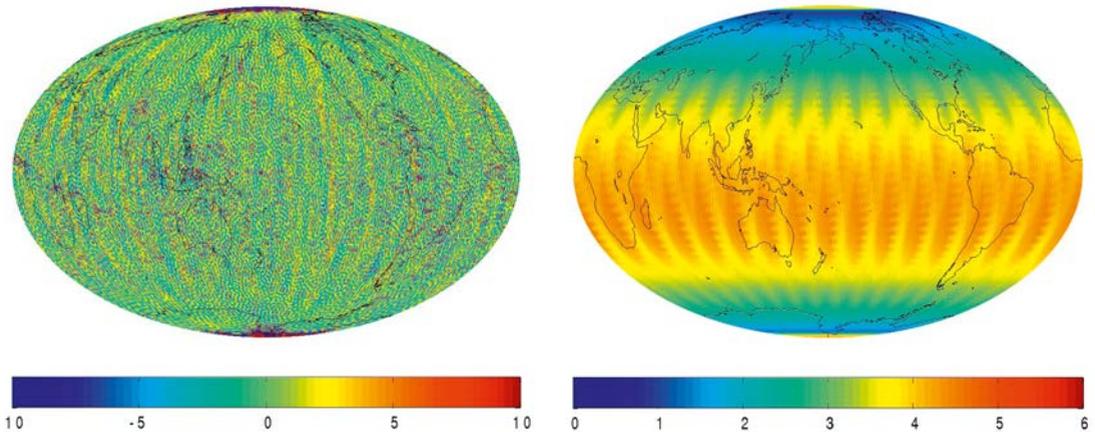


Abb. 6: Kombinierte Schwerfeldlösung: Geoidhöhen-Differenzen [cm] zu EGM96 (links) und zugehörige Standardabweichungen [cm] (rechts), Grad/Ordnung 200.

wurde eine strenge Kovarianzfortpflanzung gerechnet, um als Ergebnis Varianzen bzw. Standardabweichungen von Geoidhöhen auf einem globalen Raster zu erhalten. Abbildung 6 (rechts) zeigt die Struktur dieses Feldes. Verglichen mit den absoluten Abweichungen in Abb. 6 (links) stimmt die statistische Fehlerschätzung sehr gut überein und demonstriert neuerlich die Konsistenz der Ergebnisse dieser numerischen Studie.

5. GOCE-Status und Ausblick

Am 17. März 2009 um 15:21 MEZ wurde der GOCE-Satellit vom Weltraumbahnhof Plesetsk (Russland) mit dem Trägersystem EUROCKOT erfolgreich in die Umlaufbahn gebracht (Abb. 7).

Etwa 90 Minuten nach dem Start erfolgte die erste Signalakquisition. Die Sensoren wurden schrittweise aktiviert: GPS-Empfänger und Sternensensor (zur Messung der Orientierung im



Abb. 7: Start der EUROCKOT mit GOCE an Board (Quelle: ESA).

Raum) am 19. März, das Ionenstrahltriebwerk am 6. April, sowie das Gradiometer-Instrument am 8. April. Am 12. Mai wurde erstmals der „drag-free mode“, also die perfekte Kompensation der von außen angreifenden nicht-konservativen Kräfte, erreicht.

Die Kommissionierungsphase der Mission wurde bereits erfolgreich abgeschlossen. Derzeit (Status: 31. Juli) befindet sich der Satellit noch in der Kalibrierungsphase. Erste Analysen des Orbits, der Beschleunigungs- und Gradiometrie-Zeitreihen lassen auf ein nominelles Verhalten der Messinstrumente schließen.

Abbildung 8 zeigt das Missionsszenario sowie die für die Schwerfeldmodellierung an der TU Graz relevanten Meilensteine.

Die erste operationelle Messphase (Measurement Operation Phase; MOP) beginnt Anfang September 2009 und wird bis Mitte April 2010 andauern. Während dieser Periode werden fortlaufend Quicklook-Schwerefeldlösungen gerechnet und zur GOCE-Systemvalidierung verwendet werden. Dasselbe gilt für die MOP2. Die Core-Solver-Prozessierung läuft natürlich auch schon während der MOP 1 an. Kombinierte GOCE-Schwerefeldmodelle (Gravity Models; GM) sind jeweils ca. 6 Monate nach Beendigung der jeweiligen MOP zu liefern.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wird das an der TU Graz installierte Hardware- und Software-System zur operationellen Prozessierung von hochauflösenden Schwerfeldmodellen aus GOCE-Orbit- und Gradiometriedaten und dessen Integration in die europäische High-Level Processing Facility als Teil des GOCE Ground Segments vorgestellt.

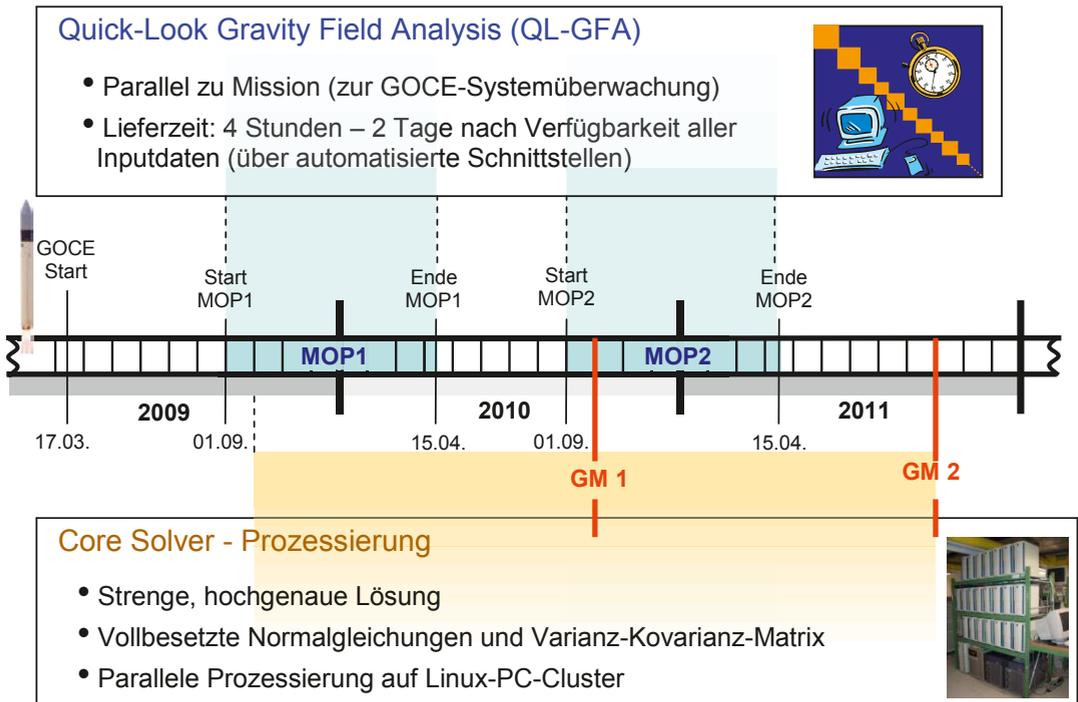


Abb. 8: Zeitlinie der GOCE-Prozessierung an der TU Graz und wichtige Meilensteine.

Dessen Funktionalität wird anhand einer numerischen Studie, basierend auf realistisch simulierten GOCE-Daten der ESA, demonstriert und diskutiert. Unter der Annahme eines nominellen Arbeitens der Messinstrumente können die für GOCE-Schwerfeldlösungen spezifizierten Genauigkeitsanforderungen von 1–2 cm für die Geoidhöhe und 1 mGal für die Schwerfeldanomalien bei einer räumlichen Auflösung von 100 km (Grad/Ordnung 200) erzielt werden.

Mittlerweile ist die Analyse der realen GOCE-Daten angelaufen, und erste Detailergebnisse sind sehr zufriedenstellend. Mit der Verfügbarkeit eines ersten GOCE-Schwerfeldmodells ist Mitte 2010 zu rechnen.

Danksagung

Wesentliche Teile dieser Studie wurden im Rahmen des ESA-Projektes „GOCE High-level Processing Facility“ (Kontrakt No. 18308/04/NL/MM) durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- [1] Badura, T., Sakulin, C., Gruber, C., Klostius, R.: Derivation of the CHAMP-only global gravity field model TUG-CHAMP04 applying the energy integral approach. *Stud. geophys. geod.*, 50, 59 – 74, 2006.
- [2] Catastini, G., Cesare, S., De Sanctis, S., Dumontel, M., Parisch, M., Sechi G.: Predictions of the GOCE in-flight performances with the end-to-end system simulator. In: 3rd GOCE User Workshop, 6-8 November 2006, Frascati, Italy, pp. 9-16, ESA SP-627.
- [3] European Space Agency: Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission. Reports for mission selection, The four candidate Earth explorer core missions. SP-1233(1), European Space Agency, Noordwijk, 1999.
- [4] Heiskanen, W. A., Moritz, H.: *Physical Geodesy*. Freeman, San Francisco, London, 1967.
- [5] Klees, R., Koop, R., Visser, P.N.A.M., van den Ijssel, J.: Efficient gravity field recovery from GOCE gravity gradient observations. *J. Geod.*, 74, 561-571, 2000.
- [6] Koch, K.-R., Kusche, J.: Regularization of geopotential determination from satellite data by variance components. *J. Geod.*, 76, 259-268, 2002.
- [7] Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H., Olson, T.R.: The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1998.
- [8] Metzler, B., Pail, R.: GOCE data processing: the Spherical Cap Regularization Approach. *Stud. Geophys. Geod.*, 49, 441-462, 2005.
- [9] Migliaccio, R., Reguzzoni, M., Sansó, F.: Spacewise approach to satellite gravity field determinations in the presence of coloured noise. *J. Geod.*, 78, 304 - 313, 2003.
- [10] Pail, R., Metzler, B., Lackner, B., Preimesberger, T., Höck, E., Schuh, W.-D., Alkathib, H., Boxhammer, Ch., Siemes, Ch., Wermuth, M.: GOCE gravity field analy-

- sis in the framework of HPF: operational software system and simulation results. Proceedings 3rd GOCE User Workshop, Frascati, ESRIN, November 2006, SP-627, 249-256, European Space Agency, 2006.
- [11] Pail, R., Metzler, B., Preimesberger, T., Lackner, B., Wermuth, M.: GOCE Quick-Look Gravity Field Analysis in the Framework of HPF. In: Proceedings 3rd GOCE User Workshop, ESRIN, Frascati, November 2006, SP-627, 325-332 European Space Agency, Noordwijk, 2007.
- [12] Pail, R., Plank, G.: Assessment of three numerical solution strategies for gravity field recovery from GOCE satellite gravity gradiometry implemented on a parallel platform. *J. Geod.*, 76, 462 – 474, 2002.
- [13] Rummel, R., van Gelderen, M., Koop, R., Schrama, E., Sansó, F., Brovelli, M., Migliaccio, F., Sacerdote, F.: Spherical harmonic analysis of satellite gradiometry. *Neth. Geod. Comm., Publications on Geodesy*, 39, Delft, The Netherlands, 1993.
- [14] Rummel, R., Gruber, T., Koop, R.: High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy. In: Proceedings 2nd International GOCE User Workshop, Frascati, 2004.
- [15] Schuh, W.-D.: Tailored Numerical Solution Strategies for the Global Determination of the Earth's Gravity Field. *Mitteilungen geod. Inst. TU Graz*, 81, Graz University of Technology, Graz, 1996.

Anschrift der Autoren

Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Roland Pail, Institut für Navigation und Satellitengeodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, A-8010 Graz.
E-mail: Roland.Pail@TUGraz.at

O.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn.HansSünkel, Rektor der Technischen Universität Graz, Rechbauerstraße 12/I, A-8010 Graz.
E-mail: Hans.Suenkel@TUGraz.at

Vortragende

Rektor Univ.-Prof. Dr. Hans Sünkel

- 1948 Rottenmann
1973 Graduierung zum Dipl.-Ing. (mit Auszeichnung)
1976 Promotion zum Dr.techn., TU Graz (mit Auszeichnung)
1981 Habilitation auf dem Gebiet der Numerischen Geodäsie, TU Graz
1983 O.Univ.-Prof. für Mathematische und Numerische Geodäsie und Leiter der Abteilung für Mathematische Geodäsie und Geoinformatik, TU Graz
seit 1990 Leiter der Abteilung für Satellitengeodäsie des Instituts für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW)

- 2000-2003 Vizerektor (Forschung) und stv. Rektor der Technischen Universität Graz
2001-2004 Direktor des Instituts für Weltraumforschung der ÖAW
seit 2003 Rektor der TU Graz
2005-2010 Wiss. Direktor am Institut für Weltraumforschung der ÖAW

Forschungsschwerpunkte:

Mathematische und numerische Geodäsie, Statistische Verfahren in der Geodäsie, Dynamische Satellitengeodäsie, Satellitengestützte Erdschwerefeldbestimmung, Satellitengestützte Geodynamik

Mehr als 150 Publikationen und 250 wissenschaftliche Vorträge.

Auszeichnungen:

W.A. Heiskanen - Award, USA (1985), Fellow der Internationalen Assoziation für Geodäsie (1991), Großes Ehrenzeichen für Verdienste um die Republik Österreich (1992), Distinguished International Research Fellow Award, Kanada (1998), Ehrenbürger der Stadt Rottenmann (2001), Ehrenmitglied des Rotary-Club Liezen-Rottenmann (2002), Wilhelm-Exner-Medaille, Österreich (2003), Namensnennung des Kleinplaneten 1992 RY durch die Internationale Astronomische Union auf "Sünkel" (2006), Preis des Universitätsprofessorenverbandes für Universitätsorganisation (2006)

Ao.Univ.-Prof. Dr. Roland Pail

- 1972 Mariazell
1995 Magister der Naturwissenschaften (Geophysik), Universität Wien
1999 Doktorat an der TU Graz, Promotion sub auspiciis praesidentis
2002 Habilitation: Lehrbefugnis in Theoretischer Geodäsie, TU Graz

Forschungsschwerpunkte:

Satellitengeodäsie, Satellitengradiometrie, globale und regionale Erdschwerefeldbestimmung

Mehr als 65 Publikationen.

Auszeichnungen:

Josef-Krainer-Förderungspreis 2000, Allmer-Löschner-Preis der Österreichischen Geodätischen Kommission (ÖGK), Young Authors Award 2005 der International Association of Geodesy (IAG)



International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG): A System of Systems

Sharafat Gadimova, Vienna

Abstract

Following the Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space (UNISPACE III), held in 1999, the United Nations General Assembly endorsed the "Vienna Declaration: Space Millennium for Human Development." The Vienna Declaration called for action to improve the efficiency and security of transport, search and rescue, geodesy and other activities by promoting the enhancement of, universal access to and compatibility among, space-based navigation and positioning systems. In response to that call, in 2001, the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) established the Action Team on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) to carry out those actions under the chairmanship of Italy and the United States of America.

The Action Team on GNSS, consisting of 38 member States and 15 inter-governmental and non-governmental organizations, recommended that an International Committee on GNSS (ICG) be established to promote the use of GNSS infrastructure on a global basis and to facilitate exchange of information. COPUOS included this recommendation in the Plan of Action proposed in its report to the United Nations General Assembly on the review of the implementation of the recommendations of UNISPACE III.

To implement the recommendation of UNISPACE III related to the use of global navigation and positioning systems and to support the work of the Action Team on GNSS, starting in 2001 the Office for Outer Space Affairs of the Secretariat organized regional workshops and international meetings focusing on capacity-building in the use of GNSS in various areas of applications that support sustainable development.

The International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG) held its first meeting in Vienna on 1 – 2 November 2006 to review and discuss matters relating to Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and their applications. The ICG adopted its terms of reference and work plan as developed in international meetings held since 2002. The current work plan included compatibility and interoperability; enhancement of performance of GNSS services; information dissemination; interaction with national and regional authorities and relevant international organizations; and coordination. All participants would cooperate, as appropriate, on matters of mutual interest related to civil satellite-based positioning, navigation, timing and value-added services. In particular, they would cooperate to the maximum extent practicable to maintain radio frequency compatibility in spectrum use between different GNSS systems in accordance with the International Telecommunication Union (ITU) Radio Regulations.

A Providers Forum was established at the second meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG) in Bangalore, India, with the aim to promote greater compatibility and interoperability among current and future providers of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The current members of the Providers Forum, including China, India, Japan, the European Community, the Russian Federation and the United States, addressed key issues such as ensuring protection of GNSS spectrum and matters related to orbital debris/orbit de-confliction.

The ICG, a forum for discussion on matters related to GNSS on a worldwide basis, will continue to meet regularly to address issues of common interest. The fourth meeting of the ICG will be held from 14 to 18 September 2009 in Saint Petersburg, Russian Federation. The fifth meeting will be jointly hosted by the European Commission and Italy, in 2010, in Italy.

Vortragende

Sharafat Gadimova

ICG Secretariat, Office for Outer Space Affairs, United Nations Office at Vienna

Sharafat Gadimova has been with the United Nations Office for Outer Space Affairs in Vienna since 2004. She is involved in the organization of the United Nations activities related to global navigation satellite systems (GNSS), particularly the development of the International Committee on GNSS (ICG) and the activities of the United Nations affiliated Regional Centres for Space Science and Technology Education. Previously, she worked for the Azerbaijan National Aerospace Agency (ANASA) in Baku, Azerbaijan and the Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, the Russian Federation as a researcher.



Wie gut verstehen wir den Klimawandel und seine Auswirkungen?

Helga Kromp-Kolb, Wien

Kurzfassung

Lange Zeit haben die Menschen die Augen vor dem sich anzeichnenden Klimawandel verschlossen. Jetzt sind die Beobachtungsdaten so eindeutig und das Verständnis für die dahinter liegenden Prozesse so weit gediehen, dass auch den errechneten Zukunftsszenarien Vertrauen entgegengebracht werden muss. Hinsichtlich der Abschätzung der Folgen des Klimawandels bleibt noch viel zu tun. Es gibt aber sehr gewichtige Gründe, warum man mit Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen nicht mehr zuwarten kann.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Unsicherheit, Klimapolitik

Abstract

For a long time people tried to ignore the signs of the evolving climate change. Meanwhile the observations have become so clear and the understanding of the underlying processes has progressed so far that model results for future climate scenarios can – in essence – be trusted. Regarding the assessment of possible impacts and consequences, much remains to be done. But there are good reasons why mitigation and adaptation measures can no longer be postponed.

Keywords: climate change, uncertainties, climate change policy

1. Einleitung

Das Klimasystem ist ein äußerst komplexes System, das Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre, einschließlich der Anthroposphäre, und deren Wechselwirkungen umfasst. Die Betrachtung der Atmosphäre allein genügt nicht, das, was landläufig als „Klima“ bezeichnet wird, zu verstehen.

Das Klimasystem bezieht seine Energie primär von der Sonne. Der Strahlungsfluss von der Sonne zur Erde beträgt rund 174.000 TW [Smil 1991], und nahezu ebenso groß ist der Fluss von der Erde ins Weltall. Im globalen Jahresmittel stellt sich daher langfristig eine ziemlich konstante Temperatur der Erdoberfläche und der Atmosphäre ein. Konkret hängt der solare Input von der Strahlungsintensität der Sonne und Bahncharakteristika der Erde ab. Wieviel Sonnenenergie dem System Erde-Atmosphäre zur Verfügung steht, wird aber auch von der Zusammensetzung der Atmosphäre, der Wolkenbedeckung und der Albedo der Erdoberfläche bestimmt, da sie das Ausmaß der ins Weltall zurückgestrahlten Energie beeinflussen.

Während der Großteil der eingestrahlten Energie infolge der hohen Temperatur der Sonne über kurzweilige Strahlung zugeführt wird, strahlt die erwärmte Erde langweilige Strahlung in den Weltraum ab. Dreiatomige Gase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Lachgas,

Ozon oder die synthetischen Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe – sogenannte Treibhausgase – haben die Eigenschaft, die kurzweilige Strahlung der Sonne vergleichsweise ungehindert durchzulassen, die langweilige Ausstrahlung der Erde aber in bestimmten Wellenlängenbereichen zu absorbieren. Die ungleiche Durchlässigkeit für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge führt zum sogenannten Treibhauseffekt. Der „natürliche“ Treibhauseffekt bedingt eine Erwärmung der Erde um rund 33° C, von –18° C (der Gleichgewichtstemperatur ohne Atmosphäre) auf +15° C.

Die Umsetzung der solaren Energie in Wärme und in atmosphärische und ozeanische Strömungen hängt von zahlreichen weiteren Faktoren, wie etwa der Land-Wasserverteilung und der Lage und Gestalt von Gebirgen ab. Charakteristisch für das Klimasystem sind positive und negative Rückkoppelungsprozesse. Beispiel für einen positiven Rückkoppelungsprozess ist die sogenannte Albedo-Rückkoppelung: Erwärmung führt zum Schmelzen von Teilen des Eises in den Polarregionen und in den Gebirgen und die geringere Albedo der eisfreien Zonen bedingt weitere Erwärmung. In der Natur greifen zahlreiche Rückkoppelungsprozesse ineinander, so dass eine Quantifizierung der Effekte nur durch Lösung komplexer mathematischer Gleichungen möglich ist.

2. Skalen, Unsicherheiten, Attribution

2.1 Zeitskala

Die externen Einflussgrößen des Klimas unterliegen zeitlichen Schwankungen, die teils zyklischen Charakter haben: Eiszeiten entstehen und vergehen in Zeiträumen von etwa 100.000 Jahren, entsprechend dem Pulsieren der Exzentrizität der elliptischen Erdbahn um die Sonne. Die Änderung der Neigung der Erdachse hat eine Zyklusdauer von etwa 41.000 Jahren, die Präzessionsbewegung der Erdachse eine von rund 26.000 Jahren. Deutlich kürzer sind die Perioden des Umlaufs um die Sonne (1° Jahr) und der Erdrotation (24° Stdh). Auch die Zahl der Sonnenflecken weist mit dem rund 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus eine gewisse Periodizität auf. Diese zyklischen Einflüsse sind in den meteorologischen Datenreihen deutlich zu erkennen. Daneben gibt es eine Vielzahl externer, nicht-zyklischer Einflüsse, wie etwa die Zunahme der Sonnenintensität, die Kontinentaldrift, die Gebirgsbildung und Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre oder Landnutzungsänderungen. Selbst bei konstanten externen Randbedingungen treten, bedingt durch interne Schwingungen des Klimasystems, Schwankungen auf.

Die öffentliche Diskussion um den Klimawandel bezieht sich auf die Klimaänderungen der letzten etwa 150 Jahre, aus wissenschaftlicher Sicht aber insbesondere auf die starken Veränderungen der letzten Jahrzehnte.

Im Gegensatz zum Wetter, das einen Momentanzustand der Atmosphäre darstellt, beschreibt Klima definitionsgemäß statistische Charakteristika des Wetters über eine größere Zeitspanne. In der Meteorologie werden zur Beschreibung des Klimas 30-jährige Perioden herangezogen (z.B. Klimanormalperiode 1961 – 1990). Demnach sind z.B. tageszeitliche und jahreszeitliche Unterschiede, ebenso wie z.B. Temperaturänderungen durch Vulkanausbrüche Bestandteile der Variabilität innerhalb des jeweiligen Klimas, während längerfristige Einflüsse Klimaänderungen verursachen.

Zurückblickend befasst man sich mit der Klimaentwicklung über Jahrtausende, Jahrhunderttausenden und im Zuge der Diskussion um den Klimawandel natürlich auch mit den letzten 1000, 100 und 50 Jahren. Vorausschauend ist das Zeitfenster wesentlich kürzer: die Globalen Klimamodelle (GCM) errechnen in der Regel Entwicklungen für die nächsten hundert Jahre, wenn der Ozean oder die Kryosphäre im Vordergrund

des Interesses stehen auch bis zu 1000 Jahren. Betrachtungen, die drüber hinaus gehen, gelten in der Regel einer bestimmten Fragestellung – etwa ob und wann die klimatischen Randbedingungen Photosynthese nicht mehr zulassen. Derartig lange Zeiträume können nur mit stark vereinfachten Modellen untersucht werden. Bei Betrachtung im Jahrhundertmaßstab dominieren die Signale der sich ändernden externen Faktoren (Treibhausgase, Landnutzung), so dass ein klarer Temperaturtrend zu erkennen ist, während im Dekadenmaßstab die interne Variabilität des Klimas das längerfristige Signal übertönen kann. Die Wissenschaft beginnt gerade, sich dennoch mit dieser Zeitskala zu befassen, weil sie dem Planungshorizont unserer Gesellschaft viel näher ist, und interdisziplinäre Studien, insbesondere mit sozio-ökonomischen Fragestellungen häufig an der Skalenkluff scheitern.

2.2 Räumliche Skala

Das Klima kann auf globaler Ebene beschrieben werden, es kann aber auch sehr kleinräumig betrachtet werden – etwa innerhalb eines Maisfeldes, wenn es um die Klimabedingungen für Maisschädlinge geht – und auf jeder Skala dazwischen. Die Prozesse, die sich auf den einzelnen Skalen abspielen, interagieren: die großräumigeren stellen für die kleinräumigeren Randbedingungen dar, die aber ihrerseits die großräumigeren beeinflussen können. Das breite Skalenspektrum stellt sowohl bei Messungen (für welchen Umkreis sind sie repräsentativ?) als auch bei Modellentwicklungen ein Problem dar. Globale Modelle können kleinräumige Prozesse nicht erfassen, weil es an Ausgangsdaten fehlt, vielmehr aber noch, weil die Leistungsfähigkeit der Computer, und damit die Zahl der verarbeitbaren Gitterpunkte beschränkt ist.

Aufgrund der groben räumlichen Auflösung (Gitterpunktweiten von einigen 100 km) sind die derzeitigen Globalen Klimamodelle (GCMs) in der Lage, Phänomene auf globaler bis kontinentaler Ebene und einer zeitlichen Periode von mindestens 30 Jahren sowohl in ihrem mittleren Zustand als auch in ihrer Variabilität zu reproduzieren [Stott et al. 1999]. Diese Größenordnung wird auch als „skillful scale“ eines GCM's bezeichnet. In dem topographisch sehr stark gegliederten Gelände der Alpen ist diese räumliche Auflösung unzureichend, da alle orographisch verursachten oder verstärkten Wettererscheinungen (z. B. Lee-Zyklogenese, konvektiver Niederschlag), nur grob parametrisiert oder gar nicht berücksichtigt werden können [Giorgi et al., 1991]. Um dennoch zu regionalen Aus-

sagen aus den GCM - Szenarien zu gelangen, wurden und werden seit Beginn der 90er Jahre verschiedene Regionalisierungs- (Downscaling-) Verfahren entwickelt. Sie beruhen teilweise auf statistischen Methoden, teilweise auf regionalen Klimamodellen, die in die Globalen eingebettet („genestet“) werden.

Bei statistischen Regionalisierungsverfahren werden GCM-Ergebnisse mit regionaler Information (z. B. Stationsmessungen, Seehöhe oder Landnutzung) statistisch konsistent verknüpft. Bei dynamischen Regionalisierungsverfahren werden „regionale Klimamodelle“ (RCM) auf ein begrenztes Gebiet angewendet. Die Ozeantemperaturen und die atmosphärischen Bedingungen an den Rändern des berechneten Gebiets werden dabei von einem GCM übernommen. Dies reduziert den Rechenbedarf und man kann – bei gleichem Computereinsatz – mit einer höheren räumlichen Auflösung rechnen. Die feinsten RCMs rechnen derzeit mit einer Auflösung von 10 x 10 km, die Tendenz geht zu noch höheren Auflösungen. Damit können zum Beispiel die Einflüsse der Alpen und der deutschen Mittelgebirge wesentlich realistischer abgebildet werden, als mit den GCMs.

2.3 Unsicherheiten

Unsicherheiten in Klimaaussagen können von verschiedenen Quellen herrühren. Bei der Rekonstruktion des vergangenen Klimas werden Mess- und Beobachtungsdaten mit statistischen Modellen kombiniert. Direkte Messungen von meteorologischen Größen in einer normierten Form, die Vergleiche zwischen verschiedenen Messstellen zu unterschiedlichen Zeiten ermöglichen, liegen erst seit etwa 150 Jahren, für die meisten Stationen erst seit einigen Jahrzehnten vor. Will man etwas über das Klima in früheren Zeiten wissen, muss man sich mit indirekten Informationen – sogenannten Proxidaten – begnügen. Einschlüsse von Fossilien in Sedimenten, die Zusammensetzung der in Gletschereis eingeschlossenen Luftbläschen, die Dicke und Abfolge von Baumringen, alte Felszeichnungen und Gemälde, Chroniken von Klöstern, alte Inschriften und Hochwassermarken können Aufschluss über vergangenes Klima geben, allerdings praktisch nie flächendeckend, d.h. im globalen Maßstab und immer mit großer Unschärfe und Unsicherheit. Je weiter man zurückblickt, desto geringer wird die erzielbare zeitliche Auflösung und desto größer wird die Unsicherheit. Demnach sind die Kenntnisse des Weltklimas der letzten 150 Jahre gut, wiewohl es selbstverständlich Unsicherheiten gibt; die letzten 1000 – 2000 Jahre können

für die Nordhemisphäre verhältnismäßig gut rekonstruiert werden, die Ergebnisse der verschiedenen damit befassten Gruppen unterscheiden sich in Details, nicht jedoch hinsichtlich der Einmaligkeit des extremen Temperaturanstieges der letzten Jahrzehnte. Der als Hokey Stick bekannte, vom IPCC 3. Sachstandsbericht 2001 als Leitabbildung verwendete Verlauf der Temperatur, war zwar eine Zeitlang mit dem Argument unter Beschuss geraten, dass die relativ geringe Variation der Temperatur während der 1000-jährigen Periode eine Folge des von den Autoren gewählten statistischen Modells zur Zusammenführung der für verschiedenen Orte zu verschiedenen Zeiten und mit sehr unterschiedlicher Unschärfe behafteten Proxidaten sei, doch hat diese Diskussion die Tatsache, dass der Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte frühere Schwankungen übertrifft, nicht in Frage gestellt, zumal alle anderen wissenschaftlich haltbaren Rekonstruktionen sich innerhalb der deklarierten Unsicherheit des ursprünglichen Hokey Sticks bewegen [Rutherford et al. 2005].

Bis zu 600.000 Jahre zurück führen die immer noch vergleichsweise verlässlichen Auswertungen von Eisbohrkernen – allerdings nur in extremen Regionen der Erde. Zeugen noch weiter zurück liegenden Klimas sind in erster Linie in der festen Erde zu suchen. Sie weisen auf erdgeschichtliche Perioden mit Klimaten hin, die teilweise auch wärmer waren, als unser derzeitiges Klima.

Bei diesen paläoklimatischen Betrachtungen verlieren 30-jährige Referenzzeiträume natürlich ihre Relevanz und der Klima-Zeitraum ergibt sich in der Regel aus der zeitlichen Auflösung, welche die jeweiligen Proxidaten ermöglichen. Die statistischen Kennwerte reduzieren sich auf Mittel- oder Extremwerte meist nur weniger Parameter.

Eine besondere Herausforderung stellen die klimatologische Betrachtungen zu Extremereignissen dar. Aufgrund der Seltenheit dieser Ereignisse ist es naturgemäß schwierig, statistisch signifikante Trends hinsichtlich der Häufigkeit oder Intensität in Datenreihen festzustellen. Man kann sich dem Problem annähern indem man die Schwellenwerte in der Definition der Ereignisse herabsetzt oder das betrachtete Gebiet erweitert, um eine größere Stichprobe zu gewinnen, man kann statistische Überlegungen allgemeiner Art anstellen, man kann Detailanalysen einzelner Fälle durchführen oder physikalische Plausibilitätsüberlegungen heranziehen. Die Tendaussagen extremer Ereignisse bleiben aber

mit größerer Unsicherheit behaftet, als Trends mittlerer Verhältnisse.

Die zur Beschreibung des rezenten Klimas, vor allem aber für die Berechnung künftiger Klimaszenarien eingesetzten Klimamodelle weisen ebenfalls zum Teil erhebliche Unsicherheiten auf: Das Verständnis vieler Prozesse im Klimasystem ist noch mangelhaft, die Datenlage für viele Zwecke zu dürftig, und die räumliche und zeitliche Auflösung, die unsere Computer erlauben, zu gering um alle Prozesse und deren Wechselwirkungen darstellen zu können. Ein besonderes Problem stellen Rückkoppelungen dar, die häufig von den Modellen noch nicht erfasst sind. So wird erst die kommende Generation von Modellen routinemäßig wesentliche Rückkoppelungen des Klimas auf den Kohlenstoffkreislauf enthalten. Testläufe lassen hier, wie auch bei anderen Rückkoppelungsmechanismen erwarten, dass diese Prozesse auf den Klimawandel eher eine beschleunigende Wirkung haben werden. Praktisch alle Modelle haben einen Bias, der beim sogenannten „hindcasting“, der Anwendung der Modelle auf Perioden der Vergangenheit, für die hinreichend gute Daten vorliegen, um Abweichungen zwischen Modellergebnissen und „Realität“ quantifizieren zu können, in seiner räumlichen Verteilung ermittelt werden kann. Damit ist es möglich, Fehler dieser Art weitgehend zu eliminieren.

Auch die räumlich und zeitlich höher aufgelösten Regionalmodelle weisen die angeführten Schwächen auf. Sie sind darüber hinaus, ebenso wenig wie die statistischen Downscalingsätze, in der Lage, Mängel oder Fehler der GCMs zu korrigieren. Die Qualität der Ergebnisse hängt damit wesentlich von der Qualität des GCMs ab. So führen z.B. einige GCMs derzeit zuviel Feuchte mit der Atlantikluft in den Alpenraum. Dies spiegelt sich in allen auf diesen GCMs aufsetzenden kleinräumigen Ergebnissen wieder, und kann derzeit nur durch Expertenwissen „kompensiert“ werden. Eine sachkundige Interpretation von Modellergebnissen ist daher essentiell.

Extremereignisse stehen häufig in Zusammenhang mit eher kleinräumigen meteorologischen Prozessen, die von den Globalen Klimamodellen nicht hinreichend gut erfasst werden können, und auch bei der Regionalisierung oft nicht in befriedigender Weise berücksichtigt werden können. Auch in den Modellen ist daher die Unsicherheit hinsichtlich Extremereignissen besonders groß.

Trotz aller Schwächen und Unsicherheiten sind die Modelle in der Lage, die vergangene Klimaentwicklung ziemlich gut wiederzugeben [Rahmstorf et al. 2007]. Verbesserungen sind jedoch notwendig und möglich. Das IPCC hat für seinen 4. Sachstandsbericht ein eigenes System entwickelt, um Unsicherheiten zum Ausdruck zu bringen [IPCC 2007]. Dies betrifft einerseits eine Terminologie für die Wahrscheinlichkeiten des Eintritts von Ereignissen, denen Attribute wie „Praktisch sicher“, entsprechend >99% Wahrscheinlichkeit, „wahrscheinlich“ mit über 66% Wahrscheinlichkeit oder „sehr unwahrscheinlich“ mit weniger als 10% Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Daneben wird aber auch noch das Vertrauen in die Aussagen quantifiziert: „Sehr hohes Vertrauen“ bedeutet, dass eine Chance von 9 aus 10 dafür besteht, dass die Aussage richtig ist, „mittleres Vertrauen“ bedeutet eine 5 aus 10 Chance und „sehr geringes Vertrauen“ eine 1 zu 10 Chance für Richtigkeit der Aussage.

2.4 Attribution

Eine wichtige Frage vor allem in der politischen Debatte ist, in welchem Ausmaß die Klimaänderungen anthropogen bedingt (Attribution) sind, weil die Antwort auf diese Frage entscheidend für die Wirksamkeit von Maßnahmen und für die moralische Verpflichtung zu Maßnahmen ist. Aus erkenntnistheoretischer Sicht muss die Wissenschaft einen strenger Beweis für die Ursachen des Klimawandels schuldig bleiben. Dies gilt im übrigen auch für viele andere wissenschaftliche Aussagen, deren Gültigkeit in der Praxis nicht in Zweifel gezogen wird.

Klimawandel kann verschiedene Ursachen haben, so dass in jedem Einzelfall die konkret wirkenden Mechanismen analysiert werden müssen, im Falle der Erwärmung des 20. Jahrhunderts betrifft dies vor allem den Einfluss solarer Veränderungen, Treibhausgaskonzentrationszunahmen und vulkanische Aktivitäten, deren Auswirkungen mit den zeitlichen und räumlichen Mustern des Klimawandels übereinstimmen müssen. Dazu wird eine breite Palette von Methoden eingesetzt. Einfache Analogieschlüsse von Ursachen früherer Klimaänderungen sind nicht zulässig. Übereinstimmend kommen diese Analysen zu dem Ergebnis, dass die dominante Ursache für die Erwärmung im 20. Jahrhundert die anthropogenen Treibhausgase sind. Das IPCC schrieb 2001 im 3. Sachstandsbericht, dass „der Großteil der beobachteten Erwärmung der letzten 50 Jahre wahrscheinlich menschlichen Aktivitäten zuschreibbar ist“, während es sechs Jahre später im 4. Sachstandsbericht 2007 schon heißt, dass

„der Großteil der Erwärmung sehr wahrscheinlich auf Treibhausgase zurückzuführen ist.“ Während das Vertrauen in die erste Aussage mit 2 aus 3 angegeben wurde, stieg es im 4. Sachstandsbericht auf 9 aus 10 [IPCC 2001, IPCC 2007].

Berechnet man den globalen Temperaturverlauf der letzten 150 Jahre mit einem GCM unter ausschließlicher Berücksichtigung der natürlichen Einflussgrößen, wie etwa Vulkanausbrüchen, so fällt die Temperatur in den letzten 30 Jahren leicht. Wenn nur die von Menschen gemachten Veränderungen berücksichtigt werden, wird der beobachtete, starke Temperaturanstieg reproduziert. Die beste Übereinstimmung über den gesamten Zeitraum erhält man, wenn beiden – natürlichen und anthropogenen Einflussgrößen – Rechnung getragen wird.

Die Globalen Klimamodelle geben auch Aufschluss darüber, welchen Beitrag verschiedene natürliche und anthropogene Faktoren zum Treibhauseffekt leisten. Die Unsicherheit ist für die einzelnen Faktoren unterschiedlich groß und das derzeitige Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse verschieden gut. So gilt der Beitrag der Treibhausgase als gut erfasst und als abgesichert. Er überwiegt die Beiträge der anderen Faktoren deutlich. Aerosole können sowohl verstärkend als auch dämpfend wirken, wobei vor allem hinsichtlich der indirekten Effekte (z.B. Wolkenbildung) die Unsicherheit sehr groß ist. Der Beitrag der Zunahme der Strahlungsintensität der Sonne ist deutlich kleiner als jener der Treibhausgase – das Verständnis wird jedoch als gering eingeschätzt, weil einerseits die historische Entwicklung der solaren Aktivität nicht gesichert ist, vor allem aber, weil verschiedene indirekte Effekte der Sonnenstrahlung noch nicht hinreichend untersucht sind. [IPCC 2007]

Aus diesen Analysen folgt, dass der fortgesetzte Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen durch menschliche Aktivitäten aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu einer weiteren Beeinflussung des Strahlungshaushaltes und zur Zunahme der Temperatur der bodennahen Luftschichten führen muss. Nur wenn die sogenannte Klimasensitivität, d.h. der Gleichgewichtstemperatur, die sich bei einer Verdoppelung der Treibhausgaskonzentration einstellen würde, wesentlich unter dem vom IPCC zugrunde gelegten Wertebereich zwischen 1.5 und 4.5 °C läge, könnte angenommen werden, dass die Klimaprojektionen des IPCC unzutreffend seien.

3. Klimawandel auf globaler und regionaler Ebene

Der Klimawandel war auf der Basis vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse absehbar und wurde von der Wissenschaft tatsächlich schon vor mehr als 100 Jahren beschrieben und vor 70 Jahren, als ein erster, noch unspektakulärer Temperaturanstieg schon bemerkbar war, auch bereits quantitativ abgeschätzt. Inzwischen ist die globale atmosphärische Konzentration des wichtigsten anthropogenen Treibhausgases, Kohlendioxid, als Folge menschlicher Aktivitäten von einem Wert von etwa 280 ppm auf einen Wert von 380 ppm im Jahr 2008 markant angestiegen: das ist ein Anstieg von etwa 35% gegenüber dem vorindustriellen Wert. Dieser Anstieg ist primär auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe und zu einem kleineren Teil auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen [IPCC 2007].

Kohlendioxid ist nur eines von mehreren Gasen, die den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit das Klima der Erde beeinflussen, aber es ist das bedeutendste der anthropogen emittierten. Es ist zu mehr als der Hälfte an der beobachteten globalen Erwärmung von 0,76°C zwischen den Perioden 1850/1899 und 2001/2005 beteiligt [IPCC 2007].

Die Verstärkung des Treibhauseffektes hat nachweisbare Auswirkungen – so ist etwa die Temperatur im letzten Jahrhundert im globalen Mittel um etwa 0,7°C gestiegen [IPCC 2007], während der Temperaturunterschied zwischen dem mittelalterlichen Optimum und der kleinen Eiszeit nur etwa 0,2°C betrug.

Die globale Erwärmung wird sich wegen der Trägheit und der Interaktionen der beteiligten Systeme noch über Jahrhunderte hinweg fortsetzen, selbst wenn die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre stabilisiert würden. Der Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 1) wird im günstigsten Fall bei 1,8°C gegenüber dem Mittel der Periode 1980 – 1999 liegen, ohne tiefgreifende Minderungsmaßnahmen bei 4°C, und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der GCM bei bis zu 6,4°C [IPCC 2007]. Dies bedingt eine Fülle anderer Veränderungen im Klimageschehen und in der Natur, auf die einzugehen hier nicht möglich ist¹⁾.

1) Für eine umfassende Darstellung siehe z.B. den 4. Sachstandsbericht des IPCC [IPCC 2007 A,B,C]

IPCC Temperatur-Szenarien

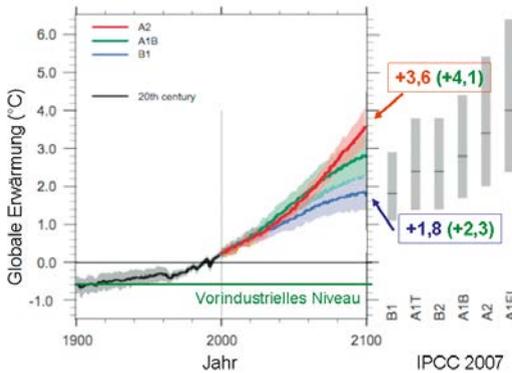


Abb. 1: Temperaturanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts für verschiedene Szenarien nach IPCC 2007

Im alpinen Raum beträgt der Temperaturanstieg in den letzten 150 Jahren bis zu 2 °C (Abbildung 2), davon rund die Hälfte in den letzten 30 Jahren.

Trotz der Unsicherheiten in der regionalen Klimaszenarienmodellierung können gewisse regionale Aussagen speziell hinsichtlich der Temperaturentwicklung getroffen werden. Für die Wintermonate Dezember, Jänner und Februar ergeben die Berechnungen im Rahmen von reclip:more 2007 bis Mitte des 21. Jahrhunderts gegenüber der Periode 1981 bis 1990 eine Erwärmung für Österreich von +1,3 bis 2 °C, für das Frühjahr um +1,8 bis 2,5 °C. Der Westen und der gesamte Alpenraum kann sogar mit einem Temperaturplus von +2 bis 3 °C rechnen. Die

Sommermonate Juni, Juli und August werden +2 bis 2,5 °C wärmer sein als heute. Auch hier stehen der Westen und der gesamte Alpenraum mit einem Plus von bis zu +3 °C heraus. Der Herbst wird mit einer allgemeinen Erwärmung von rund +2,5 bis 3 °C die höchste Temperatursteigerung erfahren [Loibl et al., 2007]. Der stärkere Temperaturanstieg im Sommer und Herbst ist hauptsächlich auf den Niederschlagsrückgang in diesen Jahreszeiten zurück zu führen.

Abbildung 3 zeigt die mittlere Temperaturentwicklung für ganz Österreich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, basierend auf dem sogenannten A1B-Szenario des Klimamodells ECHAM5 [Röckner et al., 2006], einer Zukunftsentwicklung ohne starke Treibhausgasemissionsreduktionen. Verglichen werden die Sommer-, Winter- und Jahrestemperaturen. Bis zum Ende 2100 wird es nach diesen Berechnungen im Jahresdurchschnitt mehr als 4 °C wärmer sein als noch heute. Im Jahresgang werden die höchsten Erwärmungen im Sommer und Winter erwartet. Eine Überschreitung der 5 °C bis zum Jahrhundertwechsel ist nicht auszuschließen. Anders als bei den reclip:more Ergebnissen zeigen die ECHAM5 Szenarien einen stärkeren Temperaturanstieg im Winter und Sommer und einen geringeren in den Übergangsjahreszeiten.

Die für Österreich berechneten Niederschlagsmuster bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zeigen saisonale und regional unterschiedliche Tendenzen auf. Nach den Ergebnissen von reclip:more 2007 werden die Niederschläge insgesamt abnehmen, vor allem im Osten. Den stärksten Nie-

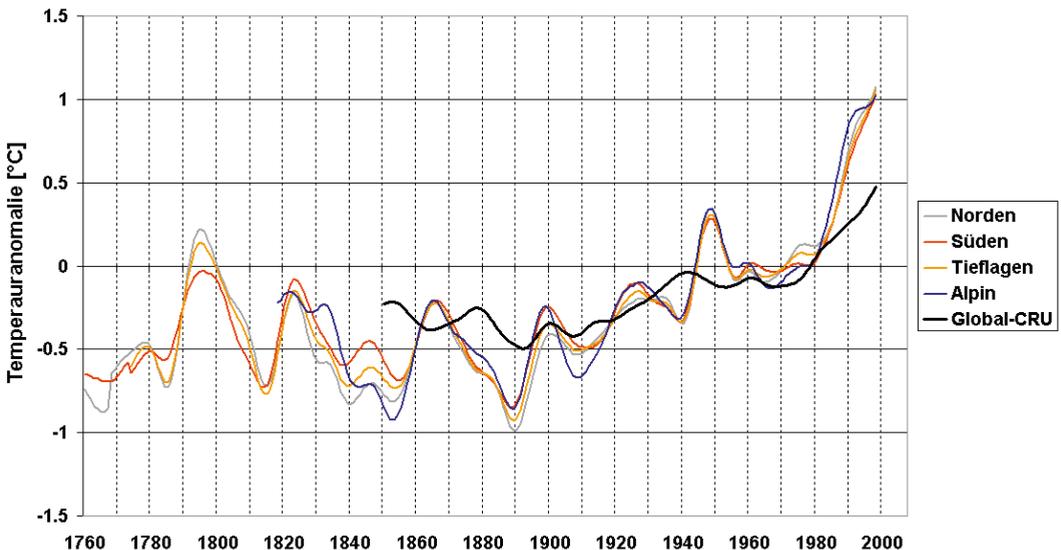


Abb. 2: Temperaturverlauf im Alpinen Raum und im globalen Mittel (Datenquelle: ZAMG)

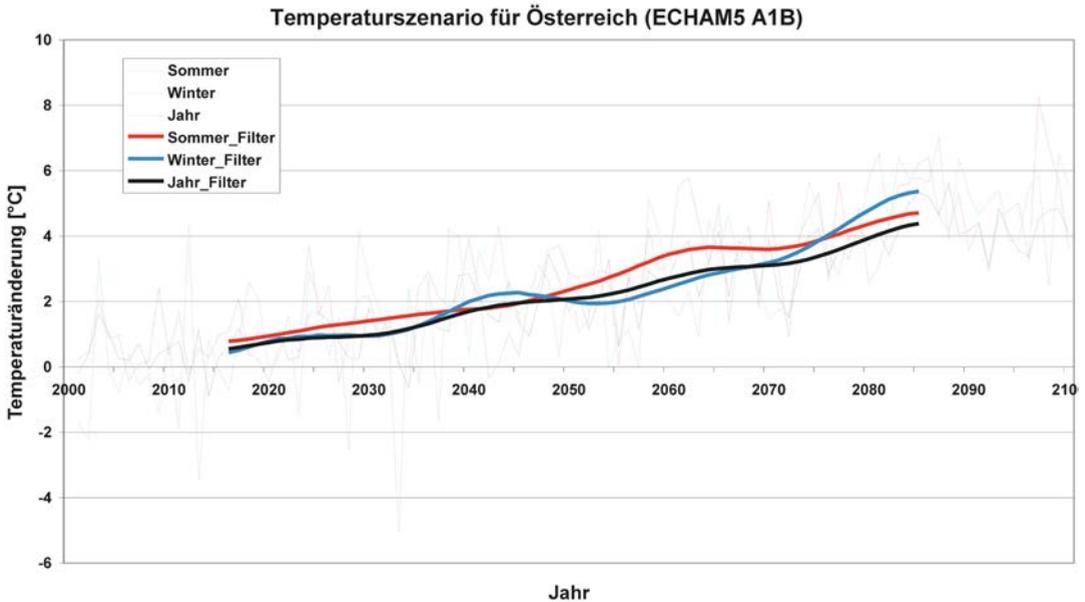


Abb. 3: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperaturen in Österreich nach dem A1B Szenario bis Ende 2100. (Niedermair et al., 2007)

derschlagrückgang verzeichnen die Jahreszeiten Sommer und Herbst. Allerdings zeigen die Modelle nicht alle den gleichen Trend. Im Osten Österreichs kann es z.B. im Sommer je nach Modell von einer Abnahme um -15 % bis zu einer Zunahme um +15 bis 30 % kommen. In den Wintermonaten ist mit einer Niederschlagszunahme von +15 bis 30 % zu rechnen [Loibl et al., 2007].

Die Unsicherheiten bei der Niederschlagsentwicklung sind wesentlich größer als bei der Temperatur. Speziell die kleinräumigen Niederschlagstrends in den Gebirgsregionen können in verschiedenen Regionalmodellen deutlich unterschiedlich aussehen. Was jedoch alle regionalen Klimaszenarien für den Ostalpenraum zeigen ist eine Verlagerung des Niederschlags aus den Sommermonaten in den Winter. Bis Ende des Jahrhunderts werden, verglichen zu derzeitigen Niederschlagssummen, im Sommer die Niederschläge bis zu 50 % abnehmen, im Winter hingegen rund 40 % zunehmen. Die größten Unsicherheiten bestehen in den Übergangsjahreszeiten. Fast alle Modelle zeigen eine Zunahme der Niederschlagsintensität, sogar in den Sommermonaten, trotz Abnahme der Niederschlagsmenge.

Infolge des Temperaturanstiegs ist im Winter mit einem höheren Regenanteil am Niederschlag zu rechnen; speziell im Flachland wird

es daher seltener eine Schneedecke geben. Dies hat Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die Wasserwirtschaft, die Tourismuswirtschaft und das Verkehrswesen. Nach Formayer et al. (2009) ist die Seehöhe, bis zu welcher der Niederschlag als Schnee fällt, regional sehr verschieden, wobei sie im Osten Österreichs wegen der Kaltlufteinbrüche aus Norden und Osten niedriger liegt. Eine Temperaturerhöhung um 1° C führt zu einer Verlängerung der Wachstumsperiode der Vegetation um etwa 11 Tage. Die größere Wärme führt zu rascherer Reife von Getreide und Früchten, häufig verbunden mit einem Rückgang des Ertrages. Die Häufigkeit von Temperaturen über 30°C wird sich in allen Seehöhen mindestens verdoppeln. Die Zunahme der Hitzeperioden stellt in den Städten eine Herausforderung an die Stadtplaner, die Bauvorschriften, die Architekten, und viele andere, bis hin zum Pflegepersonal in Krankenhäusern und Pensionistenheime dar. Diese wenigen Beispiele mögen als Hinweis genügen, dass die Auswirkungen des Klimawandels vielfältig sind und viele Wirtschaftssektoren betreffen.

Aussagen zur Veränderung der Häufigkeiten oder Intensitäten von Extremereignissen sind noch nicht wirklich belastbar. Hinsichtlich atlantischer Stürme zeigen die Klimamodelle kein eindeutiges Signal: Zwar verstärkt sich in einigen Klimamodelle die Sturmhäufigkeit am Atlantik, gleichzeitig verlagern sich die Zugbahnen wei-

ter nach Nordwesten. Wie sich dieser kombinierte Effekt auf Atlantische Stürme in Österreich auswirkt ist unklar. Aus physikalischen Gründen scheint eine Veränderung des Hochwasserrisikos wahrscheinlich, quantifizieren lässt sich das jedoch nicht (Formayer und Kromp-Kolb 2007). Die Gefahr von Dürreperioden steigt.

4. Maßnahmen

Die Kosten für den Klimawandel sind hoch, unabhängig davon, wie sie ausgedrückt werden: in Geld, Menschenleben, Gesundheit, verlorener Infrastruktur oder Artenverlust, und sie werden progressiv höher, je weiter der Klimawandel fortschreitet. Bei einem Temperaturanstieg von mehr als 2°C im globalen Mittel besteht, jenseits der systematischen Änderungen mittlerer Werte und extremer Ereignisse, die Befürchtung, dass sogenannte Kipp-Punkte des Klimasystems überschritten werden [Lenton 2008], das heißt dass Prozesse mit sogenannten positiven Rückkopplungen auf die Temperatur, also Klimawandel verstärkende Prozesse, oder solche mit großräumig katastrophalen Auswirkungen in Gang gesetzt werden, die nicht, oder nur mehr sehr schwer zu bremsen sind. Das Überschreiten dieser Kipp-Punkte zu verhindern ist gegenwärtig das Ziel der europäischen Klimaschutzpolitik.

Um den globalen Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert mit 2° C zu begrenzen [WBGU 2003, EU 2007] muss innerhalb weniger Jahre eine Trendumkehr bei den globalen Treibhausgasemissionen erreicht und eine Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2020 in den Industriestaaten um 15 - 30%, bis 2050 weltweit um 60% - 80% erzielt werden [Stern 2006]. Selbst wenn die Industrienationen ihre Emissionen um 90% bis 2050 senken, müssen die Schwellen und Entwicklungsländer die ihren noch um 50% gegenüber dem Stand von 2000 reduzieren [Stern 2006]. Unter diesen Voraussetzungen kann die Treibhausgaskonzentration voraussichtlich bei etwa 450 ppm stabilisiert werden. Dann besteht etwa eine 50:50 Chance, die 2°C Temperaturerhöhung in diesem Jahrhundert nicht zu überschreiten.

Neben diesen Maßnahmen, die das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Wandels mindern sollen, sind auch Maßnahmen zur Anpassung an die klimabedingten Veränderungen (Adaptation) unumgänglich. Unter „Anpassung an den Klimawandel“ werden alle Aktivitäten zusammengefasst, welche die gegenwärtigen oder erwarteten zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf menschliche Gesellschaften abmildern sol-

len bzw. die dazu dienen, sich eventuell aus dem Klimawandel ergebende Chancen zu nützen [AustroClim 2008]. Anpassungsmaßnahmen reichen von der Planung und der zeitgerechten Errichtung von Dämmen zum Schutz gegen den Anstieg des Meeresspiegels, über Umstellungen in Produktpaletten und Leistungsangeboten von Firmen und Kommunen, von geänderter Frucht- und Sortenwahl, Bearbeitungsmethoden und -zeiten in der Landwirtschaft und den Veränderungen in den Ökosystemen, etwa der Baumartenzusammensetzung der Schutzwälder in alpinen Tälern, bis hin zu Hochwasserschutz und Hitzevorwarnung. Dabei ist jeweils die lokale Ausprägung des globalen Klimawandels ausschlaggebend, und, weil der Klimawandel ein dynamischer Prozess ist, genügt Anpassung an die jeweils gegenwärtige Situation nicht.

In zunehmendem Maße wird auch „geo-engineering“ ins Spiel gebracht. Dabei geht es um großtechnologische Lösungen, wie etwa das Ausbringen von Aerosolen in die Stratosphäre zur gezielten Reflexion der Sonnenstrahlung. Auch die sogenannte Sequestrierung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage) in ausgeförderten Erdöl- oder Erdgaslagern, Kohlegruben oder Aquiferen kann zu dieser Kategorie von Maßnahmen gerechnet werden. Den bisher vorgebrachten geo-engineering Ansätzen wird entgegengehalten, dass sie, anders als die Minderungsmaßnahmen, in der Regel ausschließlich das Klimaproblem ansprechen, ohne einen Beitrag zu anderen Problemen, wie etwa der Energieverknappung zu leisten, und dass noch zu klären ist, ob neue Probleme als Folge ausgeschlossen werden können.

5. Schlussbetrachtung

Wiewohl das Klimaproblem aus Sicht der Klimatologie hinreichend gut verstanden wird, um politische Maßnahmen – auch einschneidende Maßnahmen – zu rechtfertigen, lohnt es sich doch, das Klimaproblem auch einmal als reines Risikomanagementproblem vor unsicheren naturwissenschaftlichen Voraussetzungen zu betrachten. In diesem Fall muss man unterscheiden zwischen vier möglichen Situationen, die sich daraus ergeben, dass die Warnungen der Klimatologen entweder berechtigt sind (A) oder – z.B. in Folge ungenügenden Verständnisses der Prozesse – nicht (B) und dass die Staatengemeinschaft entweder Maßnahmen im Sinn der von den Wissenschaftler vorgeschlagenen setzt (J) oder nicht (N) [Craven 2008]. Wenn Maßnahmen gesetzt werden (J) entstehen die wirtschaftlichen Kosten der Klimaschutzmaßnah-

men, von denen zahlreiche aber auch aus anderen Gründen, wie Energieeinsparung oder Luftreinhaltung sinnvoll sind. Der Schaden ist also im Fall BJ nicht groß, und im Fall AJ sind die Kosten nach allen Berechnungen des IPCC, von Stern und anderen klein gegenüber dem vermiedenen Schaden. Werden keine Maßnahmen gesetzt (N) so entsteht bei der Kombination BN (auf ein nicht existentes Problem wurde nicht reagiert) weder Schaden noch Nutzen, bei AN (auf ein existentes Problem wurde nicht reagiert) erreicht die Klimaänderung jedoch Maximalausmaße deren Folgen noch nicht in vollem Umfang abschätzbar sind. Selbst wenn man der gängigen Klimatheorie nicht folgt, ergibt sich daher allein aus Sicht des Risikomanagements der logische Schluss, dass die geforderten Maßnahmen zu setzen sind. Umso mehr muss man zu diesem Schluss kommen, wenn man sich von der Glaubwürdigkeit der wissenschaftlichen Aussagen überzeugt hat.

Literaturverzeichnis

AustroClim 2008: „Anpassungsstudie“. Ist-Stand-Erhebung zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Kurzbericht an das BMLFUW. www.austroclim.at

EU 2007: Commission Staff Working Document. Accompanying document to the Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius. The way ahead for 2020 and beyond. Impact Assessment. Brussels January 10th 2007

Craven, Greg (2008): You tube: How it all ends. (Zugriffsjahr: 2008) <http://www.youtube.com/watch?v=6A58X73GnzE&feature=channel>

Formayer H und P. Haas, 2009: Einfluss von Luftmasseigenschaften auf die Schneefallgrenze. In: Prettenhaler F., H. Formayer, N. Vetter, P. Haas, C. Habsburg-Lothringen, 2009: Der sozio-ökonomische Einfluss des Klimawandels auf den Winter- und Sommertourismus in Österreich. Endbericht des Forschungsprojektes der ÖAW.

Formayer H. und H. Kromp-Kolb, 2007: Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Oberösterreich. Forschungsbericht im Auftrag von Umweltlandesrat Rudi Anschöber

Giorgi, F. and L.O. Mearns (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Rev. Geophys.*, 29, 191-216.

IPCC, 2001: Climate Change: the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge UK.

IPCC, 2007: Fourth IPCC Assessment Report. Working Group I. [www.ipcc.ch]

Kromp-Kolb, H. und H. Formayer (2005): Schwarzbuch Klimawandel. Ecowin Verlag Salzburg

Lenton, Timothy M., Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim W. Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf and Hans Joachim Schellnhuber (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS* vol. 105, no. 6, pp. 1786–1793, February 12, 2008

Loibl W., Beck A., Dorninger M., Formayer H., Gobiet A., und Schöner W. (2007). Research for Climate Protec-

tion: Model Run Evaluation - Final Report. ARC systems research GmbH.

Niedermaier M., Lexer M. J., Plattner G., Formayer H., und Seidl R. (2007). Klimawandel & Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? Österreichische Bundesforste AG.

Rahmstorf, Stefan, Anny Cazenave, John A. Church, James E. Hansen, Ralph F. Keeling, David E. Parker, and Richard C. J. Somerville (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* Vol 316 4 May 2007.

Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Habermann, L. Kornblüeh, E. Manzini, 266 U. Schlese, and U. Schulzweida (2006), Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model, *J. Climate*, 19, 3771–3791, 268 doi: 10.1175/JCLI3824.1.

Rutherford, S., Mann, M.E., Osborn, T.J., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Hughes, M.K., Jones, P.D., Proxy-based Northern Hemisphere Surface Temperature Reconstructions: Sensitivity to Methodology, Predictor Network, Target Season and Target Domain, *Journal of Climate*, in press, 2005.

Smil, Vaclav (1991). *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*. Wiley. pp. 369. ISBN 0471629057

Stern, (2006): STERN REVIEW: The Economics of Climate Change. (Zugriffsdatum: 23.10.2006)

http://www.hm-treasury.gov.uk/Independent_Reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.c

Stott, P. A., S. F. B. Tett, G. S. Jones, W. Ingram, J. F. B. Mitchell and M. R. Allen (1999): Natural and anthropogenic causes of twentieth century temperature change. Oral presentation at: Conference on "Detection and Modeling of Regional Climate Change", 9 – 12 June 1999. ICTP, Trieste.

WBGU (2003): Über Kioto hinaus denken. Klimastrategie für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen. Berlin 2003

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr. Helga Kromp-Kolb, Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordanstr. 82, A-1190 Wien.

E-Mail: helga.kromp-kolb@boku.ac.at

Vortragende

Univ.-Prof. Dr. Helga Kromp-Kolb

- 1971 Promotion, Universität Wien
- 1982 Habilitation in Meteorologie, Universität Wien
- 1995 ordentliche Professur an der BOKU
- 2004-2006 Vorsitzende des Senates der BOKU
- 2007-2011 Expertenbeirat des Klima- und Energiefonds der Österreichischen Bundesregierung
- 2008-2013 Universitätsrat der Karl Franzens Universität Graz
- 2008-2011 Potsdam- Institut für Klimafolgenforschung e.V., Wissenschaftskoordination

Auszeichnungen:

Un Bosco per Kyoto (2009), Goldenes Ehrenzeichen für Verdienste um das Land Wien (2006), Wissenschaftlerin des Jahres; Preis der WissenschaftsjournalistInnen Österreichs (2005), Konrad Lorenz-Preis, BMUJF (1991)



Geodesy aids Climate: Monitoring von Treibhausgasen und Klimawandel mittels Intersatelliten-Atmosphärensondierung

Gottfried Kirchengast, Graz

Kurzfassung

Wie stark ist die globale Erwärmung heute schon und wie entwickelt sie sich in Zukunft? Wie betrifft sie die Alpenregion und Österreich? Wie sieht es mit der Entwicklung der Treibhausgasmengen aus und wie viel kommt von welcher Region der Erde? Besonders geeignet für den weltweiten Blick zur Antwort auf solche Fragen ist eine elegante geodäsie-nahe Methode zur Beobachtung von Atmosphäre und Klima: die Okkultationstechnik mittels Intersatelliten-Signalen von globalen Navigationssatelliten (wie GPS und Galileo) zu Low Earth Orbit (LEO) Satelliten und, noch ertragreicher, zwischen LEO Satelliten. Ich werde zuerst die GPS-LEO Atmosphärensondierung vorstellen und wie wir kürzlich in Graz (als erste Gruppe weltweit) die globale Erwärmung unabhängig von klassischen Bodenwetterdaten und eichfehler-anfälligen Daten von Wetterballonen und Satellitenradiometern mit Hilfe dieser erstaunlichen geodätisch fundierten Daten detektiert haben. Und wie auch die europäische Wettervorhersage profitiert. Die Zukunft geodätischer Hilfe für bestmögliches Klima-Monitoring hält aber noch mehr bereit: Ich werde die (selbst erdachte) LEO-LEO Atmosphärensondierung vorstellen, derzeit im Rahmen der ESA weiter entwickelt, die mit einer Kombination von Mikrowellensignalen und Infrarot-Lasersignalen gleichzeitig mit bisher ungekannter Genauigkeit und Konsistenz Treibhausgasmengen (Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Ozon, etc.), die thermodynamischen Größen (Druck, Temperatur, Feuchtigkeit) und den Wind in der freien Atmosphäre messen kann. Die Methode hat das Potenzial, der wichtigste Benchmark für die globale Überwachung von Treibhausgasen und Klimawandel in unserer Lufthülle im 21. Jahrhundert zu werden – dank seiner fundamentalen Einbettung in Zeit- und Frequenzstandards und dank Geodäsie!

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Gottfried Kirchengast

- 1992 Promotion an der Universität Graz
- ab 1992 Universitätsassistent
- 1992-1994 Max-Planck Research Fellow am MPI für Aeronomie in Lindau
- 2003 Ordentlicher Professor für Geophysik an der Universität Graz (Gründungsinhaber Alfred Wegener, 1924-1930)
- 2005 Leiter des Wegener Zentrums für Klima und Globalen Wandel an der Universität Graz

Forschungsschwerpunkte:

Geophysik und Klimaforschung; Erdbeobachtung mittels Satelliten und Klimawandel; Satelliten-Klimatologie

Auszeichnungen:

START-Preis (1998), Josef-Krainer Würdigungspreis (1999)

Interactive 3D Segmentation as an Example for Medical Visual Computing



*Martin Urschler,
Alexander Bornik,
Eva Scheurer,
Thomas Pock,
Horst Bischof, Graz*

Kurzfassung

Aufgrund der Vielfalt an potentiellen klinischen Anwendungsgebieten ist die Segmentierung medizinischer, volumetrischer Datensätze ein wichtiges Forschungsgebiet. Um klinische Relevanz und praktische Akzeptanz unter Radiologen und Ärzten zu erreichen, müssen generische, interaktive 3D Segmentierungsalgorithmen einfach zu bedienen und akkurat sein. Weiters ist ständiges und in Echtzeit dargestelltes Feedback für den Benutzer essenziell. In dieser Arbeit präsentieren wir einen neuartigen 3D-Segmentierungsansatz der mithilfe moderner 3D Grafikkarten Benutzerinteraktion, Segmentierung und volumetrische Visualisierung in ein gemeinsames Rahmenwerk integriert. Dies ist ein Beispiel für das Zusammenwirken von Computer Grafik und Computer Vision in einem Gebiet, das auch als Visual Computing bezeichnet wird. Direkte 2D und 3D Interaktion mit großen, volumetrischen Datensätzen wird mit einem Segmentierungsalgorithmus kombiniert, der als konvexes Energieminimierungsproblem definiert ist. Dieses global optimale Segmentierungsergebnis und dessen Ausbreitung und Entwicklung während des Minimierungsprozesses wird kontinuierlich über eine hardware-beschleunigte Volume-Rendering-Engine visualisiert. Durch die integrierte Implementierung dieser Komponenten auf der Grafikkarte erhält man ein interaktives Echtzeit 3D Segmentierungssystem, welches Benutzerinteraktion auf das Nötigste reduziert. Die Einsatzfähigkeit des Systems zur Lösung praktischer Segmentierungsaufgaben wird anhand quantitativer und qualitativer Auswertungen gezeigt.

Schlüsselwörter: Interaktive 3D Segmentierung, Echtzeit Volumsvisualisierung, Volumens-Raycasting, Intuitive 3D Segmentierung

Abstract

Segmentation of medical volume data sets (i.e., partitioning images into a set of disjoint regions representing different semantic objects) is an important research topic due to its large number of potential clinical applications. In order to get accepted by physicians and radiologists a generic, interactive 3D segmentation algorithm has to be simple-to-use, accurate, and show immediate feedback to the user. In this work we present a novel 3D segmentation paradigm that effectively combines interaction, segmentation and volumetric visualization in a single framework integrated on a modern graphics processing unit (GPU). This is an example of the fruitful combination of computer graphics and computer vision, a field nowadays called visual computing. Direct interaction with a large volumetric data set using 2D and 3D painting elements is combined with a segmentation algorithm formulated as a convex energy minimization. This globally optimal segmentation result and its evolution over time is continuously visualized by means of a hardware accelerated volume rendering along with the original data. By implementing all of these components on a GPU, a highly responsive interactive 3D segmentation system requiring minimal user interaction is achieved. We demonstrate quantitative and qualitative results of our novel approach on liver and liver tumor segmentation data where a manual ground truth is available.

Keywords: interactive 3D segmentation, real-time volume rendering, volume raycasting, immediate feedback 3D segmentation

1. Introduction

Visual computing is a discipline that views computer graphics and computer vision, historically two separate disciplines, from a common perspective. The confluence of these two fields has led to many new insights and applications. Medical visual computing is a prototypical example that profits significantly from this convergence. In this paper we report on the re-

cent work on an interactive segmentation system. The application requires computer graphic methods for 3D volume rendering and computer vision for segmentation. Since the system is designed to be used in an interactive manner, all these tasks have to be achieved at interactive framerates (10–15 fps). We accomplish this challenging problem by implementing all algorithms on modern graphics hardware. The re-

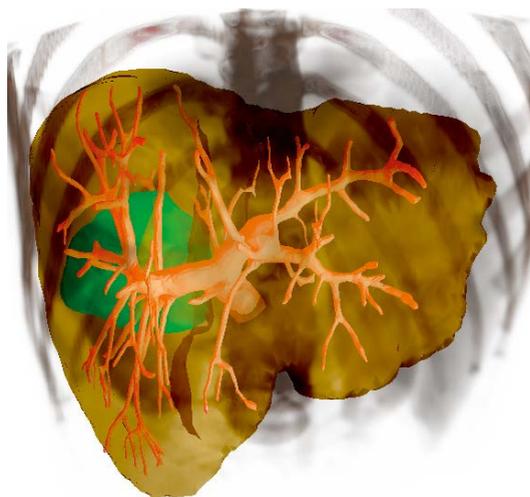


Fig. 1: Volume rendering of segmentation results from a liver CT data set. The segmented liver (yellow) is shown alongside the original volume data set, the extracted liver vessel tree (red) and a tumor (green).

sulting system is the first one that solves this complex task for realistic volume sizes. See Figure 1 for an example segmentation result.

Image segmentation is one of the key problems in computer vision with applications in a large number of domains. Medical image analysis is one such domain, where the delineation of different anatomical structures is a topic of significant research and clinical interest. Applications involving medical volume data sets exhibit a high degree of difficulty due to anatomical and pathological variations. Thus, fully automatic segmentation algorithms are seldom feasible in practice. Additionally, the routine way of diagnosis is centered around human operators. Thus, segmentation algorithms are required to assist physicians. As a consequence a lot of research in medical image segmentation is focusing on semi-automatic and interactive systems, where feedback is given to the physician during diagnostic investigations.

In interactive segmentation methods, users are required to highlight some regions as a prior, mostly drawing some kind of seeds or boundaries into an image. The LiveWire segmentation approach [1] is an early work for two-dimensional boundary delineation based on edge information. Later algorithms like GrabCut [2] combined color and edge information to separate image fore- and background using a Graph-Cut approach [3]. Very recently Sinop and Grady have proposed a related approach unifying graph cuts

and the random walker algorithm for seeded image segmentation [4]. These works as well as our previous work in [5] were developed for 2D image segmentation applications. Some authors like Falcao and Bergo [6] or Poon *et al.*[7] have investigated an extension of the LiveWire methodology to 3D. Both approaches are restricted to boundary information and 3D user interaction is very hard. An example of recent work closely related to our method can be found in [8], who showed an interactive graph-cut based 3D segmentation approach called Live Surface. Their method uses innovative 3D interaction and provides immediate segmentation feedback. However, their approach loses flexibility due to their watershed-like pre-processing step. Errors at this stage cannot be corrected in the interactive setup. Moreover, their approach does not benefit from a parallel implementation, a possibility current consumer GPUs offer.

In this paper we show a novel, flexible 3D segmentation paradigm that integrates user interaction, segmentation and volumetric visualization into a single framework. This framework profits from the recent technological advances in processing power of modern GPUs and from their flexible programmability, e.g., using the CUDA framework [9]. This flexibility allows us to combine a segmentation algorithm based on a convex energy minimization formulation and a direct volume rendering (DVR) algorithm based on ray-casting into a single implementation on the GPU. User interaction is required to define constraints in the segmentation functional. These constraints lead to a globally optimal solution of the convex energy with respect to the user inputs which is calculated at interactive frame-rates. Immediate feedback of the current segmentation result is provided by combining the original volume and the segmentation in the volume rendering implemented on the same GPU. Thus, to our knowledge, we present the first interactive, state-of-the-art three-dimensional segmentation algorithm providing immediate feedback on the segmentation result that allows segmentation refinement and works on volume data sets of practical size.

2. System Description

In this section we develop our interactive, volume rendering based segmentation system. The framework implements 3D and 2D visualization views on 3D medical datasets and segmented structures, together with a segmentation algorithm including user interaction on the GPU. The software consists of three major components,

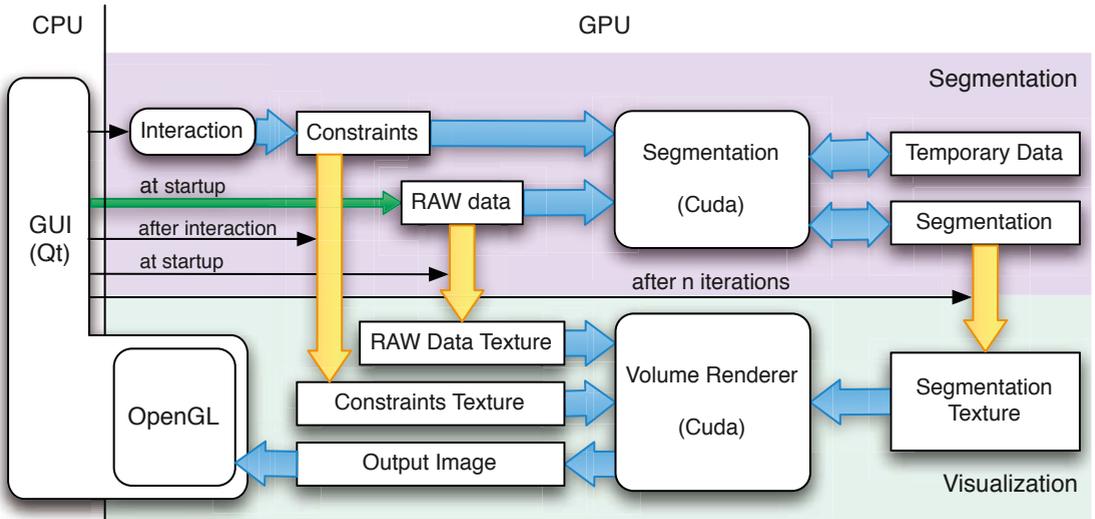


Fig 2: System Overview: The two main components segmentation and visualization run entirely on the GPU. Data transfers between the CPU based GUI are limited to system startup (file I/O), as indicated by the green arrow. Data access by the algorithmic components (rounded boxes) is shown using broad blue arrows, indicating the higher memory bandwidth. Inter-component data transfer triggered from the GUI (thin arrow) is indicated by yellow arrows.

the segmentation part, the visualization part and the GUI. An overview of the system is shown in Figure 2. Due to the GPU implementation, slow (2 GB/s) system bus data transfers occur only in the startup phase, when the 3D data is transferred to GPU memory. All further memory access happens on the GPU, where transactions are around 30 times faster than on the CPU. Even user interaction, like specification of foreground and background seed regions or segmentation refinement is performed on the GPU by triggering CUDA kernel functions, e.g., drawing a line from point A to B by painting into a 3D constraint data structure.

During the segmentation process the segmentation component runs continuously, reads data from the raw and the constraint dataset, as well as temporary and segmentation data. The latter two volumes are also modified during segmentation. The visualization component requires raw data, constraints and the segmentation as input and computes a 2D output image which is passed to the GUI component and visualized using OpenGL. Both components run independently but sequentially, since CUDA does not support concurrent kernel calls. Scheduling prioritizes rendering for the sake of interactivity.

All of the data used by visualization and algorithmic component is stored twice, which maximizes the efficiency of each algorithm since one can use optimal memory representation schemes

for each task. However, memory redundancy requires copying, which is triggered by the controlling GUI component, predominantly after changes in the segmentation. Due to the very high GPU memory bandwidth copying is not a limiting factor in practice.

2.1 3D Volume Segmentation

For our 3D segmentation component we use an energy minimization model formulated in a variational framework. Given an input image in the domain $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ we seek u , a binary labeling of the image into foreground ($u = 1$) and background ($u = 0$). Our minimization model is defined as

$$\min_u \left\{ \int_{\Omega} g |\nabla u(\mathbf{x})| d\mathbf{x} + \lambda \int_{\Omega} u(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right\} \quad (1)$$

The first term is a weighted total variation (TV) term penalizing discontinuities in the segmentation via the gradient of the labeling. The weighting g is related to edges in the input image $I(\mathbf{x})$ by $g(|\nabla I(\mathbf{x})|) = \exp(-\eta |\nabla I(\mathbf{x})|^\kappa)$ according to [10]. Here η and κ are chosen such that edges of interest from the gradient image $|\nabla I(\mathbf{x})|$ are selected. Prior to edge calculation we use a ROF denoising scheme [11] implemented according to [12] to remove noise. With $u \in \{0, 1\}$ the TV term is equivalent to the geodesic active contour (GAC) problem [13] minimizing the geodesic length of the segmentation interface with respect to the isotropic Riemannian metric g , a fact which was proven by Bresson et al. in [14]. A similar func-

tional for segmentation has already been proposed in [15]. Note that minimizing the geodesic length can also be established by investigating the discrete binary labeling problem leading to Graph-Cut approaches [3]. The weight g restricts regularization of u to regions where the image gradient is low. The second term of (1) is a pointwise data-term inspired by Mumford-Shah-like energies [16], where a positive $f(\mathbf{x})$ forces $u(\mathbf{x})$ to be background, and a negative $f(\mathbf{x})$ forces $u(\mathbf{x})$ to be foreground.

Equation (1) is a convex energy formulation, however, our optimization domain, the binary labeling $u \in \{0, 1\}$, is not a convex set. Thus, the optimization problem is not convex. A standard approach to achieve convexity is to relax u to the continuous domain $u \in [0, 1]$. Since the TV energy satisfies the generalized co-area formula [17], thresholding the relaxed problem for any threshold $\mu \in (0, 1)$ solves the original binary problem. The benefit of this convex formulation is that it allows to compute the binary labeling result u as the single global minimum of (1) after thresholding with any $\mu \in (0, 1)$. We use $\mu = 0,5$ in our implementation. This way we arrive at a globally optimal segmentation algorithm w.r.t. the user constraints. We use the constraint term f of our convex functional to model different types of constraints on the labeling. Besides the case of $f = 0$ (which corresponds to a trivial global solution of the pure GAC energy) four different cases, which we use to drive our interactive segmentation, can be distinguished. With $f = -\infty$ we model a hard foreground constraint, where the algorithm forces $u = 1$. For a hard background constraint, we use $f = \infty$, such that the algorithm forces $u = 0$. Using $f < 0$ models a weak foreground constraint, where the data term tries to make $u = 1$, however, depending on λ , the regularization can still force $u = 0$. A weak background constraint $f > 0$ works equivalently.

In our framework prototype, interactively specified weak constraints determine the gray value distribution of fore- and background objects, respectively. The details of calculating f make use of a simple histogram matching procedure, where we compare each voxel to the fore- and background distributions modeled as histograms. Here, of course different constraint terms are possible, e.g., texture features, similarity to pre-learned gray value distributions or prior shape and appearance models. Hard constraints may be specified to remove or add certain parts of a segmentation result for interactive refinement.

Our GUI component provides the user with a 3D view and optional 2D views (axial, coronal or sagittal) on the data. Interaction, e.g., specification of the weak and hard constraints, selection of regions of interest, and segmentation refinement is possible using painting tools. Figure 3 shows 3D and 2D views with examples of constraint painting.

2.1.1 Numerical Implementation

To solve our energy minimization problem (1), we make use of a primal-dual algorithm inspired by [18] where a gradient descent on the primal and a gradient ascent on the dual variable are combined to find the global minimizer as a saddle point in the primal-dual formulation. The resulting numerical scheme can very efficiently be implemented in parallel on a GPU. We introduce a dual variable \mathbf{p} defined as

$$g(\mathbf{x})|\nabla u| = \max_{\|\mathbf{p}\| \leq g} \{\mathbf{p} \cdot \nabla u\}. \quad (2)$$

By reformulating Equation 1 using \mathbf{p} we arrive at the primal-dual formulation of energy 1:

$$\min_u \max_{\|\mathbf{p}\| \leq g} \left\{ \int_{\Omega} \mathbf{p} \cdot \nabla u dx + \lambda \int_{\Omega} u \cdot f dx \right\}. \quad (3)$$

This is an optimization problem in two variables which has to be solved by alternately minimizing with respect to u and \mathbf{p} until convergence. This leads to a projected gradient descent scheme, additional details about this optimization procedure and its parallelized GPU implementation can be found in [18].

1. **Primal update:** For the primal update we have to derive Equation 3 according to u :

$$\frac{\partial}{\partial u} \left\{ - \int_{\Omega} u \nabla \cdot \mathbf{p} dx + \lambda \int_{\Omega} u \cdot f dx \right\} = - \nabla \cdot \mathbf{p} + \lambda f, \quad (4)$$

where we used the integral theorem, stating $\int_{\Omega} \mathbf{p} \cdot \nabla u = - \int_{\Omega} u \nabla \cdot \mathbf{p}$. Performing a gradient descent update scheme this leads to

$$u^{n+1} = \Pi_{[0,1]} \left(u^n - \tau_P \left(- \nabla \cdot \mathbf{p} + \lambda f \right) \right) \quad (5)$$

where the projection Π towards the binary set $[0, 1]$ can be done with a simple thresholding step, and τ_P denotes the timestep.

2. **Dual update:** Deriving Equation 3 according to \mathbf{p} we get:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \left\{ \int_{\Omega} \mathbf{p} \cdot \nabla u dx + \lambda \int_{\Omega} u \cdot f dx \right\} = \nabla u \quad (6)$$

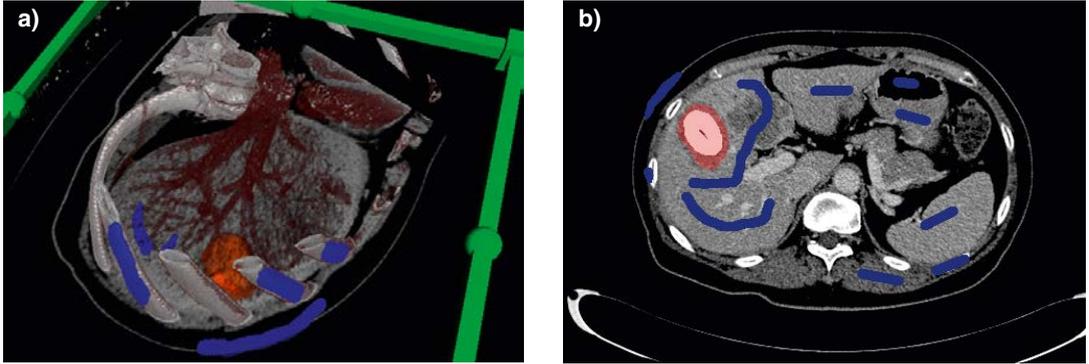


Fig. 3: User Interface Screenshots: (a) 3D DVR of the original dataset, isosurface rendered segmented liver tumor (brown) and segmentation constraints (blue) interactively painted on the DVR surface and the cutting plane. (b) 2D axial view of the same dataset with additional segmentation constraints and tumor.

with the additional constraint $\|\mathbf{p}\| \leq g$. This results into a gradient ascent method with a traileed reprojection to restrict the length of \mathbf{p} to the weight g :

$$\mathbf{p}^{n+1} = \Pi_{B_0^g}(\mathbf{p}^n + \tau_D \nabla u) \quad (7)$$

Here B_0^g denotes a d -dimensional ball centered at the origin with the radius g . The reprojection onto B_0^g can be formulated with

$$\Pi_{B_0^g}(q) = \frac{q}{\max\{1, \frac{\|q\|}{g}\}} \quad (8)$$

The result of this stage is a segmentation achieved after thresholding u . The numerical primal-dual scheme of the segmentation procedure can be easily parallelized and entirely implemented on the GPU using the CUDA programming language, which is our first component of the interactive segmentation algorithm.

2.2 Volume Rendering

To visualize medical 3D data direct volume rendering is a commonly used technique offering high image quality. We use volume ray-casting [19], an image-based technique, which can nowadays be implemented on the GPU. Unlike most existing GPU ray-casters we use a CUDA implementation, allowing greater flexibility on combination of data from different sources (i.e., raw data and segmentation) than previous shader based approaches like [20]. Our proposed ray-caster first renders bounding boxes of all regions obtained by splitting the raw dataset, segmentation and constraints into e.g., 32^3 voxel regions, where the application of transfer functions indicates impact on the visual output. Bounding box calculation also uses CUDA while OpenGL is only used in a rasterization stage to obtain

two depth buffers from which ray entry and exit points can be calculated. In future implementations this rasterization of the bounding boxes will be done in CUDA, too, avoiding some copying overhead.

Since volume rendering is the process of visualizing data sampled from a scalar function, a ray traversal is started for each pixel and values are obtained by evaluating the transfer function of the raw datasets. The segmentation and the constraint datasets are visualized using iso-surface ray-casting, therefore, the results evaluating the raw dataset transfer function are intermixed with the iso-surface value. In addition, all different representations of the dataset can be clipped individually, using a cutting plane showing the underlying volume data. Clipping can also be done with a user-defined offset, which makes it easier to visually verify the segmentation progress and the final result. We use a stochastic sampling to avoid fringe artifacts.

3. Experimental Results

We implemented a first prototype of our proposed framework on the GPU using the CUDA programming language [9]. All results were calculated on a desktop PC (Intel 3.16 GHz Dual Core2-Duo with 3GB RAM) under 64-bit Linux. The PC contains two separate graphics units, a GeForce GTX 280 with 1 GB of graphics RAM used for visualization and a Tesla C1060 Computing Processor with 4GB of graphics RAM. The large amount of graphics RAM allows to work with data sets of practical size from 256^3 up to sizes of around $512 \times 512 \times 200$ voxels. For these volume sizes we achieve an interactive frame-rate of around 15-20 frames per second without concurrent segmentation and 5-10 frames per second with activated segmentation. This

depends, of course, on the window size of the rendering, the values are given for a resolution of 800×800 pixels

We performed experiments on two segmentation problems with annotated ground truth taken from the two recent MICCAI Segmentation Challenge workshops [21, 22]. In both experiments, segmentations were performed by a non-radiologist user experienced with medical image analysis. Our setup consisted of the segmentation framework and a 2 minute time-limit for segmentation per dataset. The user was allowed to draw weak and hard constraints and to perform segmentation refinement on the data.

In our first experiment we segmented the 20 liver datasets from the training data of the 2007 Grand Challenge. Since the ground truth segmentation for this data is readily available we compared our segmentation with it using the provided evaluation tool. Five measures are calculated by this tool, the volumetric overlap error (VOE), the relative absolute volume difference (RVD), the average symmetric surface distance (ASD), the root-mean-square surface distance (RMSSD), and the maximum symmetric surface distance (MSD)[21]. All of these values are zero for perfect agreement of segmentation and ground truth. Furthermore, a score for each measure is calculated by comparing it to a reference value of a human operator. The mean of these five scores is the total score of a data set, where 75 is a reference value for a human segmentation (see [21] for further details). In Table 1 we present our results compared to the reference values. These results indicate a reasonable performance, although we are not as good as the best approaches from the competition [21]. This is due to our tight time-limit and especially since we have not yet optimized our parameters of the segmentation framework to the task, but simply used our preliminary prototype with default settings.

Our second experiment consisted of 4 data sets containing a total of 10 liver tumors. This data from the 2008 Grand Challenge [22] was more

difficult to segment since some of the tumors were very hard to distinguish from the liver tissue visually. The evaluation measures were the same as in the first experiment. The human observer reference score is 90 in this experiment, which is hard to achieve in practice as can be seen by the results of the workshop attendees ranging between 38 and 73 points. With our system we get a mean score of 50 points. Currently the main bottleneck in our approach is the histogram matching in the segmentation, which is not very well suited for this type of problem. Figure 4 shows a qualitative result from the liver segmentation.

To underline the generic applicability of our approach we now show some more qualitative segmentation results from different application areas. In Figure [1] a liver, vessel tree and liver tumor segmentation of an abdominal CT data set (256³) is visualized as a DVR together with the original data. Figure 5 depicts a brain surface segmentation result from a CT data set together with the volume rendering focusing on the skull. Finally, we also produced a segmentation result on a very challenging segmentation task in the context of clinical forensic imaging. We used a T2-weighted MRI data set (512×512×30) of a human thigh showing a subcutaneous hematoma, with the segmentation result shown in red in Figure 6.

4. Conclusion and Future Work

In this paper we presented a first prototype of a segmentation framework, which combines a state-of-the-art segmentation algorithm and 3D visualization into a highly interactive framework. Even though neither the user interface, nor the algorithmic and the visualization parts have been optimized yet, the system already delivers reasonable results in terms of segmentation quality and interaction time. Nevertheless, future work will be directed towards optimization of the components. In the algorithmic part we intend to develop a new adaptive numerical solver, which should speed up the segmentation process by avoiding unne-

Experiment	VOE		RVD		ASD		RMSSD		MSD		Total Score
	[%]	Score	[%]	Score	[mm]	Score	[mm]	Score	[mm]	Score	
<i>liver reference</i>	6.4	75	4.7	75	1	75	1.8	75	19	75	75
<i>liver</i>	6.6	74	4.7	75	1	74	2.1	71	23	70	73
<i>tumor reference</i>	12.9	90	9.6	90	0.4	90	0.7	90	4.0	90	90
<i>tumor</i>	37	29	24.1	37	0.8	49	1.2	59	3.9	75	50

Tab. 1: Quantitative segmentation results of our first prototype on the liver and liver tumor grand challenge data sets. For details on the evaluation metrics refer to [21, 22].

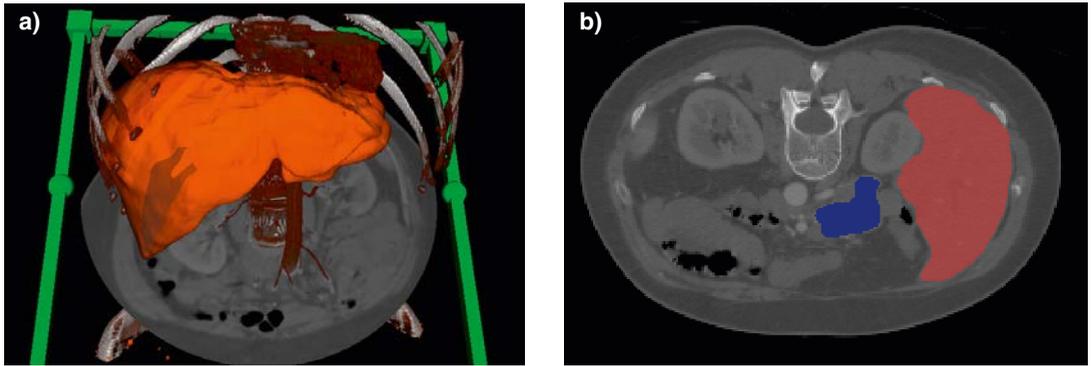


Fig. 4: Liver segmentation example: (a) DVR emphasizing bones combined with isosurface rendering of the segmented liver and cutting plane showing original CT data. (b) 2D view of the same dataset with segmented liver in red and constraints in blue.

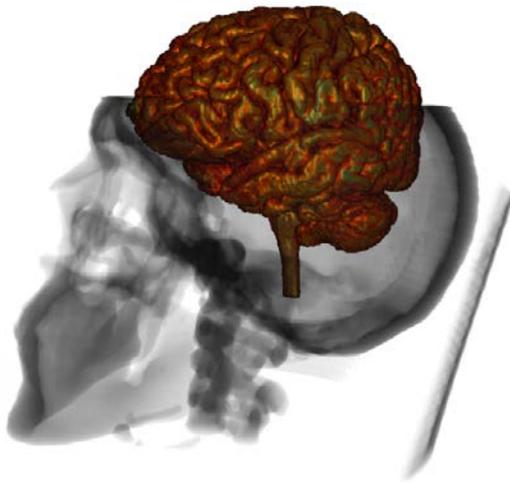


Fig. 5: Segmentation result from a CT data set showing the brain surface together with the volume rendering focusing on the skull.



Fig. 6: Segmentation result from an MRI data set of a human thigh containing a subcutaneous hematoma (red).

cessary calculations in certain without losing the convexity property. Having more time for volume visualization the core framework could be integrated into a VR setup with true 3D user interaction, which would be helpful for segmentation refinement in particular. Furthermore, it would be interesting to incorporate prior shape knowledge into the whole system.

Literatur

- [1] E. N. Mortensen and W. A. Barrett. Interactive Segmentation with Intelligent Scissors. *Graphical Models and Image Processing*, 60(5):349–384, Sep 1998.
- [2] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake. “Grab-Cut”: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):309–314, 2004.
- [3] Y. Y. Boykov and M.-P. Jolly. Interactive Organ Segmentation using Graph Cuts. In *MICCAI*, volume LNCS 1935, pages 276–286. Springer Verlag, 2000.
- [4] A. K. Sinop and L. Grady. A seeded image segmentation framework unifying graph cuts and random walker which yields a new algorithm. In *Proc. IEEE 11th International Conference on Computer Vision ICCV 2007*, pages 1–8, 14–21 Oct. 2007.
- [5] M. Unger, T. Pock, W. Trobin, D. Cremers, and H. Bischof. Tvseg – interactive total variation based image segmentation. In *British Machine Vision Conference 2008*, Leeds, UK, September 2008.
- [6] A. X. Falcao and F. P. G. B ergo. Interactive volume segmentation with differential image foresting transforms. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 23(9):1100–1108, Sept. 2004.
- [7] M. Poon, G. Hamarneh, and R. Abugharbieh. Efficient interactive 3D Livewire segmentation of complex objects with arbitrary topology. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 32:639–650, 2008.
- [8] C. J. Armstrong, B. L. Price, and W. A. Barrett. Interactive segmentation of image volumes with live surface. *Computers & Graphics*, 31:212–229, 2007.
- [9] NVidia. NVidia CUDA Compute Unified Device Architecture programming guide 2.0. Technical report, NVIDIA Corp., Santa Clara, CA, USA, 2008.

- [10] J. Huang and D. Mumford. Statistics of natural images and models. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:541–547, 1999.
- [11] L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Phys. D*, 60(1-4):259–268, 1992.
- [12] A. Chambolle. An algorithm for total variation minimizations and applications. *Journal of Math. Imaging and Vision*, 20(1–2):89–97, 2004.
- [13] V. Caselles, R. Kimmel, and G. Sapiro. Geodesic Active Contours. *International Journal of Computer Vision*, 22(1):61–79, February 1997.
- [14] X. Bresson, S. Esedoglu, P. Vandergheynst, J.-P. Thiran, and S. Osher. Fast global minimization of the active contour/snake model. In *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, volume 28, pages 151–167, Norwell, MA, USA, 2007.
- [15] S. Leung and S. Osher. Fast global minimization of the active contour model with TV-inpainting and two-phase denoising. In *3rd IEEE Workshop Variational, Geometric, and Level Set Methods in Computer Vision*, pages 149–160, 2005.
- [16] D. Mumford and J. Shah. Optimal approximations by piecewise smooth functions and variational problems. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, XLII(5):577–685, 1988.
- [17] W. Fleming and R. Rishel. An integral formula for total gradient variation. *Arch. Math.*, 11:218–222, 1960.
- [18] T. Pock, T. Schoenemann, G. Graber, H. Bischof, and D. Cremers. A convex formulation of continuous multi-label problems. In *Proc European Conference Computer Vision (ECCV 2008)*, volume 5304 of LNCS, pages 792–805, 2008.
- [19] M. Levoy. Display of surfaces from volume data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(5):29–37, 1988.
- [20] J. Beyer, M. Hadwiger, S. Wolfsberger, and K. Bühler. High-quality multimodal volume rendering for preoperative planning of neurosurgical interventions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6):1696–1703, 2007.
- [21] B. van Ginneken, T. Heimann, and M. Styner. 3D Segmentation in the Clinic: A Grand Challenge. In *Proceedings of the 3D Segmentation in the Clinic: A Grand Challenge Workshop of MICCAI 2007*, Brisbane, AU, 2007.
- [22] X. Deng and G. Du. 3D Segmentation in the Clinic: A Grand Challenge II – Liver Tumor Segmentation. In *Proceedings of the 3D Segmentation in the Clinic: A Grand Challenge II Workshop of MICCAI 2008*, New York, US, 2008.

Acknowledgements

This work has been funded by the Ludwig-Boltzmann Institute for Clinical-Forensic Imaging, Graz, Austria. Dr. Pock was funded by the Austrian Science Fund (FWF) under the doctoral program Confluence of Vision and Graphics W1209. In addition, we want to thank DI Bernhard Kainz and DI Markus Unger from the Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology for helping with the evaluations of the liver and liver tumor data.

Contact

Dr. Martin Urschler, Institut für Maschinelles Sehen u. Darstellen, TU Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz. Ludwig-Boltzmann Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung, Universitätsplatz 4, A-8010 Graz.

E-mail: urschler@icg.tugraz.ac.at

Dr. Alexander Bornik, Institut für Maschinelles Sehen u. Darstellen, TU Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz. Ludwig-Boltzmann Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung, Universitätsplatz 4, A-8010 Graz.

E-mail: bornik@icg.tugraz.ac.at

Dr. Eva Scheurer, Ludwig-Boltzmann Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung, Universitätsplatz 4, A-8010 Graz.

E-mail: Eva.Scheurer@cfi.lbg.ac.at

Dr. Thomas Pock, Institut für Maschinelles Sehen u. Darstellen, TU Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.

E-mail: pock@icg.tugraz.ac.at

Prof. Horst Bischof, Institut für Maschinelles Sehen u. Darstellen, TU Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.

E-mail: bischof@icg.tugraz.ac.at

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Horst Bischof

1967 Saanen (Schweiz)

1985-1990 Studium der Informatik, TU Wien

1993 Dr. techn. TU-Wien

1993 Ruhr Universität Bochum

1998 Habilitation aus Angewandter Informatik, TU-Wien

2001-2003 Gastprofessor an der TU Graz

Seit 2004 Prof. für Computer Vision, TU Graz

Auszeichnungen:

12 Preise (Best Paper Awards) für wissenschaftliche Arbeiten, darunter Preis der Deutschen und Britischen Gesellschaft für Mustererkennung.

Insgesamt mehr als 400 begutachtete Veröffentlichungen.



Alpenquerende Tunnelprojekte und Herausforderungen an die Ingenieurgeodäsie

Hilmar Ingensand, Zürich

Kurzfassung

Der neue Gotthard-Basistunnel als Teil des AlpTransit-Projektes ist mit 57 km der derzeit längste Eisenbahntunnel, der sich im Bau befindet. Die Fertigstellung ist für 2017 geplant. Dieses Bauwerk hat damit Vorbild- und Pionierfunktion für weitere alpenquerende Tunnel, die zurzeit in Planung sind. Die technischen Herausforderungen bestanden dabei nicht nur in Bauverfahren unter speziell schwierigen geologischen Bedingungen, sondern auch in der Lösung der ingenieurgeodätischen Vermessungsaufgaben. Toleranzen im Dezimeterbereich, die Risiken und Baukosten reduzieren sollen, erforderten ebenso neue Wege in der geodätischen Messtechnik. Insbesondere die hochgenaue Richtungsübertragung in dem 800 m tiefen Vertikalschacht von Sedrun stellte eine spezielle messtechnische Herausforderung dar, da vom Schachtfuss aus der Tunnel nach beiden Seiten mehrere Kilometer vorgetrieben wird. Da sich im Bereich des Tunnels mehrere Staumauern befinden, wurden grossräumige Überwachungskonzepte realisiert, die auch auf andere Tunnelprojekte übertragen werden können.

Schlüsselwörter: Tunnelbau, Absteckung, Monitoring, Inertialmesstechnik, Kreismessungen, GPS-Netze, Präzisionslotung, AlpTransit

Abstract

At the moment the new 57 km Gotthard base-tunnel is the longest railway tunnel of the world, which is under construction. It represents the kernel of the AlpTransit project which will be completed in 2017, approximately. This projects acts as template and pioneer for future alp-crossings. The challenges result not only in construction technologies under risky geological conditions but also in finding solutions for high precision geodetic tasks. Decimeter tolerances at 57 km which had to reduce risks and costs asked for new approaches in geodetic metrology. Especially the high precision direction transfer in a 800 m vertical shaft of the intermediate attack at Sedrun required sophisticated technologies, as this direction transfer gives the direction to both sides at the bottom of the shaft. As there are three concrete dams located above the tunnel large area monitoring concepts had to be established which can conceptually be transferred to other tunneling projects in alpine regions.

Keywords: tunneling, setting out, monitoring, inertial navigation systems, gyroscopic measurements, GPS networks, precision plumbing, AlpTransit

1. Einleitung

Eine Betrachtung der Tunnelbauwerke der letzten Jahrhunderte zeigt, dass nach einer ersten Serie von Eisenbahntunneln im 19. Jahrhundert in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zahlreiche Strassentunnel folgten. Im 21. Jahrhundert wird wiederum auf die Eisenbahn als leistungsfähiges Verkehrsmittel gesetzt. Die alpenquerenden Bahnprojekte werden heute als so genannte Flachbahnen mit einer an die hohen Geschwindigkeiten angepassten Trassierung realisiert. Dadurch verlängern sich die Tunnelstrecken beträchtlich. Neben dem Bau und den ingenieurgeodätischen Anforderungen an Tunnelprojekte diesen Ausmasses sind die Folgen eines derartiger Eingriffs in die Alpen, die sich immer noch in einem neotektonischen Faltungsprozess befinden, zu berücksichtigen. Die von der Schweizerischen Landestopographie 1997/99 im Vergleich zu 1970 beobachteten Senkungen über dem Gotthard-Strassentunnel erreichten einen Betrag von 12 cm, der für Staumauern, die sich im Be-

reich des AlpTransitprojektes befinden, nicht tolerierbar war. Geologen haben dieses Phänomen inzwischen als Entwässerungsprozess erkannt. Die Korrelation von so genanntem Kluftwasser und zyklischen Senkungen und sogar Hebungen gilt als erwiesen [1].

Während Dehnungen und Stauchungen der Talquerschnitte mit einer Toleranz im Zentimeterbereich (siehe Tabelle 1) von den elastischen Betonbauwerken ertragen werden können, sind vor allem Scherungen für diese Bauwerke gefährlich und erfordern neben dem geodätisch-geometrischen Monitoring auch geotechnische Überwachungsmessungen.

Als Konsequenz dieser Beobachtungen müssen die bestehenden Stauanlagen permanent mit einer Sensitivität im Millimeterbereich beobachtet werden.

2. Die geodätischen Herausforderungen

Mit diesen extrem langen und tiefen Tunneln für Hochgeschwindigkeitsbahnen ergaben sich

Erwartete Oberflächenbewegungen (Abschätzung)	Zulässige Verformung auf Kronenhöhe („Elastische Grenze“)	Toleranzen für die Vermessung
Talverbreiterung < 50 mm	10 mm	4 mm
Talverengung < 25 mm	50 mm	4 mm

Tabelle 1: Toleranzen für die zulässige Verformung von Staumauern

auch für die Vermessung Herausforderungen, die nur mit eigens entwickelten Messmethoden gelöst werden konnten. Als Durchschlagstoleranz wurden im AlpTransitprojekt von dem Bauherrn in der Lage 25 cm und in der Höhe 12,5 cm auf 57 Km vorgegeben. Daraus leiten sich Standardabweichungen von 10 cm für die Lage bzw. 5 cm für die Höhe ab, die in einem entsprechenden Lage- und Höhenbezugsrahmen abgestützt werden müssen.

2.1 Lage- und Höhenetze

Für den Gotthard-Basistunnel wurde ein neues Lagefixpunktnetz mit 31 Hauptpunkten und Portalbereichspunkten erstellt und 1995 mit GPS neu bestimmt und im Jahr 2005 erneut überprüft [2]. Dieses Netz weist eine innere Genauigkeit von 5 mm auf. Als Höhenfixpunktfeld wurde das bestehende amtliche Höhensystem LV02 als unzureichend angesehen, da bisher weder orthometrische Korrekturen, die im Tunnelbereich bis zu 1 dm betragen können, noch die Hebungen der Alpen von ca. 1 mm pro Jahr berücksichtigt wurden. Ein neues Nivellement wäre jedoch zu aufwendig gewesen. Für das Höhenfestpunktfeld im Bereich des Projektes wurden die folgenden Maßnahmen beschlossen: Die vorhandenen Nivellementdaten wurden durch strenge orthometrische Reduktion der Höhen unter Berücksichtigung von tektonischen Bewegungen neu aufbereitet. Zusätzlich wurde die Nord-Süd-Verbindung sowohl durch Nivellementmessungen über den Gotthardpass, als auch mittels eines Nivellements durch den Gotthard-Straßentunnel neu gemessen.

Messgrößen	Standardabweichungen
Richtungen	0.3 mgon
Kreiselazimute	1.5 mgon
Distanzen	(0.5 mm + 1 ppm)
Zentrierung	0.3 mm
GPS-Koordinaten	10 mm
Lotung in Vertikal-schächten	3.0 mm/100 m

Tabelle 2: Standardabweichungen der a-priori Berechnungen

Basierend auf den vorgenannten Grundlagenetzen wurde mit den nachfolgenden a-priori Standardabweichungen (siehe Tabelle 2) eine Präanalyse durchgeführt, um den Nachweis für die geforderten Durchschlagstoleranzen zu erbringen.

2.2 Richtungsübertragungen in einem 800m Vertikalschacht

Während die Koordinaten- und Höhenübertragung nach anfänglichen Schwierigkeiten durch Nebelbildung mit optischen Methoden und einer Kontrollmessung mit den aus dem Markscheidewesen bekannten Mehrgewichtsdrahtlotungen gelöst werden konnte, gab es zunächst keine Methode, um die richtungsbestimmenden Kreiselmessungen durch eine andere unabhängige Methode zu überprüfen. Auch nach dem Bau eines zweiten Schachts war eine Richtungsübertragung durch Doppellotung wenig erfolgversprechend. Aufgrund der Genauigkeitsforderungen musste man davon ausgehen, dass es keine Alternative zu Kreiselmessungen gab. Aber auch die Kreiselmessungen sind bei den hohen Genauigkeitsforderungen $\sigma < 1.5$ mgon nicht ganz unproblematisch. Die genauigkeits- und zuverlässigkeitsbestimmenden Faktoren der Kreiselmessung in alpinen Regionen können in die zwei Hauptbereiche mit äußeren und inneren Faktoren eingeteilt werden (siehe Tabelle 3).

Bei den äußeren Faktoren hat im Wesentlichen die O-W-Lotabweichungskomponente bzw. deren Differenz zwischen dem Ort der Referenzmessung, dem Schachtkopf und dem Schachtfuß einen systematischen Einfluss:

$$C_{\text{Lotabweichung}} = \eta \cdot \tan(\phi) + (\xi \sin \alpha_M - \eta \cos \alpha_M) \operatorname{ctg} z$$

η = Ost-West-Lotabweichungskomponente

ϕ = Breite (Sedrun $\phi = 46.4^\circ$)

Die Lotabweichungsdifferenz beträgt 0,1 mgon zwischen Referenzmessung und Schachtkopf, bzw. 0,5 mgon zwischen Schachtkopf und Schachtfuß. Es kann dabei eine Genauigkeit der Lotabweichungskomponenten von $\sigma = 0,3$ mgon angenommen werden, die unterirdisch nur durch Modelle und punktuelle Schweremessungen im Schacht ermittelt wurde. Bei den systematischen instrumentellen Fehlereinflüssen ist vor

Äußere Faktoren	Innere, instrumentelle Faktoren
Netzgenauigkeit	Genauigkeit des Theodoliten und damit der Richtungsmessung
Kenntnis der Lotabweichung (Ost-Westkomponente)	Genauigkeit des Kreisels
Meridiankonvergenz	Zeitliche Stabilität der Referenzmessung
Richtungsreduktion	Temperaturkorrektur für das Gesamtsystem Kreisel und Theodolit
Refraktion	Zentrierung

Table 3: Innere und äußere Faktoren von Kreiselmessungen

allem der Temperatureinfluss der Kreisel-Theodolit-Kombination zu erwähnen, der durch jährliche Kalibrierung und eine möglichst geringe Temperaturdifferenz zwischen Referenzmessung im Fixpunktfeld und der untertägigen Azimutbestimmung reduziert werden kann.

2.3 Inertialsystemmessungen als unabhängige Kontrolle

In Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der TU München wurde 2006 eine Richtungsübertragung mit einem modifizierten Honeywell Inertialsystem der Firma IMAR in München gezeigt [3], dass die Rotationskomponente während der Schachtfahrt mit gleicher Genauigkeit wie mit nordsuchenden Kreiseln ermittelt werden kann. Nach diesen ermutigenden Versuchen wurden in zwei Kampagnen mit mehreren Auf- und Abfahrten Richtungsübertragungen

über den 800 m Vertikalschacht durchgeführt. Bei dieser Messanordnung wurde mittels mehrfacher Autokollimation die Richtung des Tunnelnetzes im Zugangstollen auf das Inertialsystem übertragen (siehe Abbildung 1). Anschließend wurde zur Reduzierung der zeitlichen Driften das Inertialsystem möglichst schnell vom Schachtkopf zur Sohle mit ca. 18 m/sec gefahren, da durch äußere und innere Störungen zeitlich abhängige Sensordriften entstehen. Diese Driften können nur schwer rechnerisch berücksichtigt werden, da sie keiner Systematik unterliegen. Bei Laserkreiseln ist mit Driften von $0.002^\circ/\text{Stunde}$ zu rechnen. Eine Möglichkeit der Modellierung der Driften ist das so genannte Zero Velocity Update (ZUPT). Dabei wird das Driftverhalten der Sensoren in der Ruhelage, d.h. bei Geschwindigkeit = Null und bei Drehrate = Null erfasst. Für die im Zwischenangriff Sedrun durchgeführten Messun-

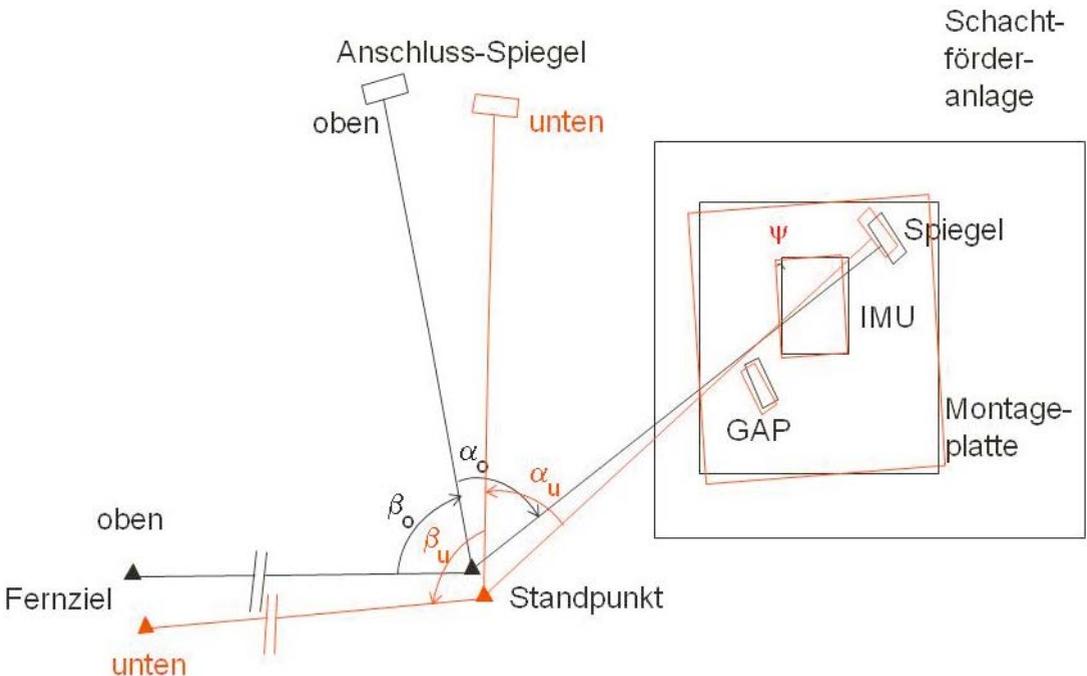


Abb. 1: Prinzip der Richtungsübertragung mittels Autokollimation und Inertialsystem [3]

gen war vor allem die Genauigkeit der Rotation um die z-Achse ω_z von Interesse. Die Messungen der anderen Kreisel und der Beschleunigungssensoren können eliminiert werden.

Das Azimut (Richtungswinkel) ergibt sich in dieser Messanordnung zu:

$$a_u = t_o + \beta_o + \alpha_o + \psi - (\beta_u + \alpha_u)$$

Diese Messungen wurden mehrmals wiederholt und in einer zweiten Kampagne mit einem verbesserten Aufbau durchgeführt. Die Gesamtdifferenz zwischen Kreismessungen und Inertialsystem betrug nach beiden Kampagnen 2,2 mgon. Weitere Untersuchungen an der ETH Zürich zeigten ein Verbesserungspotential durch eine ausschließliche Modellierung der ω_z -Komponente [4].

3. Monitoring der Stauanlagen im Bereich des Basistunnels

Da sich im Bereich des Basistunnels auf der Höhe von Sedrun die Staumauern Curnera, Nalps und Santa Maria befinden, wobei die Staumauer Nalps nahezu über der Tunnelachse liegt, wurde ein grossflächiges Monitoring vorgesehen. Die permanenten Messungen im Bereich

der Staumauern wurden so konzipiert, dass die Messinstrumente auf der Staumauer installiert wurden. Diese Standpunkte bewegen sich aber ihrerseits aufgrund von Wasserstandshöhe und geologischen und baubedingten Deformationen. Durch eine Einzelpunkteinschaltung bzw. freie Stationierung wurde der Standpunkt der Tachymeter jeweils neu bestimmt und anschließend die gesuchten Veränderungen der Talquerschnitte aus den Netzmessungen abgeleitet. Bei den Messungen war vor allem die Modellierung der meteorologischen Einflüsse eine Herausforderung. Da in der Nähe der Staumauer mit großen Temperaturgradienten zu rechnen war, hat sich die Methode der integralen Korrektur bewährt, bei der die meteorologisch bedingten Distanzänderungen der als unveränderlich zu bezeichnenden Strecken auf die anderen zu beobachtenden Distanzen übertragen werden. Eine Analyse der Daten hat gezeigt [5], dass Tagesmessungen aufgrund der inhomogenen meteorologischen Einflüsse für die gestellte Aufgabe nahezu unbrauchbar waren und inzwischen nur noch die Nachtmessungen ausgewertet werden.

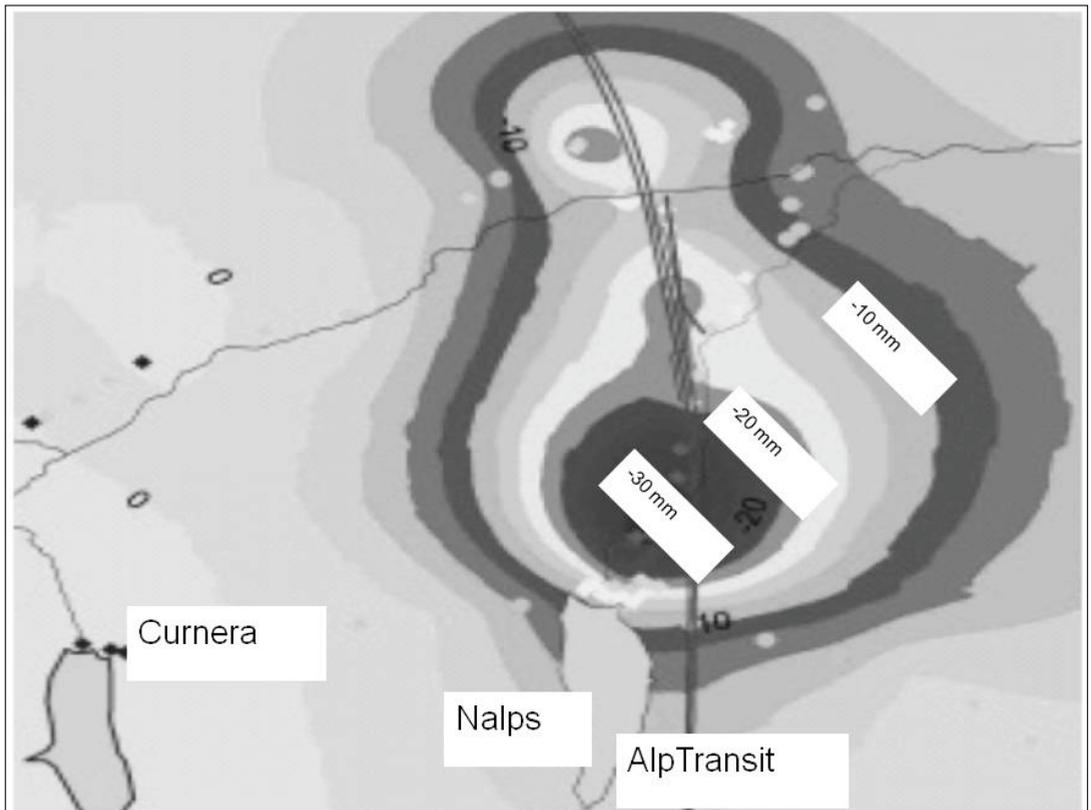


Abb. 2: Senkungen im Bereich der Staumauern Nalps und Curnera [5]

Während der Unterquerung der Staumauer Nalps wurden – wie erwartet – Senkungen festgestellt, die durch eine Abdichtung des Tunnels in vertretbaren Rahmen gehalten werden konnten (siehe Abbildung 2).

Zusammenfassung

Das Projekt Gotthard-Basistunnel hat bisher alle Ingenieurdisziplinen herausgefordert, innovative Technologien zu entwickeln. Nicht nur im Baubereich, wo insbesondere in der Kakiritzone von Sedrun mit deformierbaren Spannbögen Neuland beschritten wurde oder auch die Entwicklung des so genannten Raise Boring Verfahrens, sondern auch im Bereich der Vermessung mussten neben bewährten Technologien auch neue unkonventionelle Wege gegangen werden. So entstand ein großräumiges permanentes Monitoring-System mit Tachymetern und GPS-Einzelpunkten [6]. Der Einsatz eines Inertialsystems zeigte die Möglichkeiten dieser Technologie in Ingenieurprojekten. Auch wenn die Hauptaufgaben der Vermessung weitgehend gelöst sind, so stellen sich nun neue Herausforderungen bei der Absteckung des Hochgeschwindigkeitsschiennetzes in einem derartig langen Tunnel. Ebenso zeichnen sich neue Technologien zur großräumigen Deformationsbestimmung wie Radarinterferometrie ab.

Viele dieser neuen Technologien können nun auch auf andere alpenquerende Projekte übertragen werden. Die geplanten Projekte, wie Brenner Basistunnel und Mt. Cenis werden auch in den nächsten Jahrzehnten eine Herausforderung für alle Ingenieurdisziplinen bleiben.

Literaturverzeichnis

- [1] Zangerl, C.; Evans, K.F.; Eberhardt, E.; Loew, S. Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 45, Issue 8, December 2008, Pages 1195-1210.
- [2] Ryf, A.; Haag, R.; Schätti, I. AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingeniergeodätische Aspekte; XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, Mün-

chen 2000. Herausgeber: Schnädelbach, Schilcher, Wittwer Verlag, Stuttgart.

- [3] Neuhierl, T.; Ryf, A.; Wunderlich, T.; Ingensand, H. AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik, *Geomatik Schweiz*, 6/2006.
- [4] Szabo, G. Inertialmesstechnische Richtungsübertragung in einem Vertikalschacht mit der Hilfe von Laserkreis-Zeitreihenanalyse, *Int. Kurs für Ingenieurvermessung an der TU Graz*, April 2007.
- [5] Studer, M.; Bräker, F. Kombiniertes Einsatz von automatischen und manuellen Messmethoden bei einem Langzeitmonitoring, *Int. Kurs für Ingenieurvermessung an der TU Graz*, April 2007.
- [6] Ingensand, H. Mit Geodäsie 1000 Meter unter dem Gotthard hindurch, *Akademie der Geowissenschaften zu Hannover, Veröffentlichungen Heft 24*, S. 33-39, Hannover 2004:

Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand, Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, HIL D 43.3, Wolfgang-Pauli-Strasse 15, CH-8093 Zürich.
E-Mail: ingensand@geod.baug.ethz.ch

Vortragender

Prof. Dr. Hilmar Ingensand

- 1975 Dipl. Ing. Geodäsie, Universität Bonn
1984 Dr.-Ing. Universität Bonn
bis 1993 Leiter der Abteilung Grundlagen und Applikationen der Leica AG, Heerbrugg
seit 1993 Ordentlicher Professor für Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie an der ETH Zürich

Forschungsschwerpunkte:

Geodetic Monitoring Systems; High Precision Laser Scanning, Range Imaging, Hydrostatic Systems (HLS/PSI), Monitoring Tasks and Navigation of Construction Machine in the AlpTransit Project (57 km tunnel), Machine Guidance and Indoor Positioning

Inhaber von 3 Patenten im Bereich GPS-Theodolite, GPS-EDM-Kombination und Range Imaging.

Auszeichnungen:

Honorary Guest Professor of the University of Wuhan and the Three Gorges University Yichang, China 



Österreichische Gesellschaft für
Vermessung und Geoinformation

Austrian Society for
Surveying and Geoinformation

Österreichische
Geodätische
Kommission
ÖGK

Einladung

zur öffentlichen Sitzung der Österreichischen Geodätischen Kommission
mit dem Vortrag von

Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Woschitz

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz

Dr. Karl Rinner Preisträger 2008

„HOCHPRÄZISE FASEROPTISCHE MESSUNGEN IN EINEM RUTSCHHANG“

Die Sensoren faseroptischer Messsysteme können direkt in ein Objekt eingebettet werden und liefern dann Informationen über das Verhalten aus dem Inneren des Objektes. Für eine Anwendung zum Monitoring eines Rutschhanges wurde mit Sensoren vom Typ SOFO eine langarmige Strain-Rosette entwickelt und diese in den Rutschhang eingebettet. Ziel ist es mit statischen und dynamischen Messungen Informationen über die Verformung der tieferreichenden Massenbewegung zu erhalten, die bei der Erforschung der Ursache der Rutschung wichtig sind.

Herausforderungen sind die hohe Präzision der SOFO Systeme, die Einbettung der Sensoren in den Untergrund, und die dadurch bedingte mangelnde Möglichkeit durchgreifender Kontrollmessungen im Feld. Gezeigt werden insbesondere sensor-technische Aspekte und die neuen Möglichkeiten, die diese hochpräzisen faseroptischen Messsysteme bieten.

Zeit: Mittwoch, 4. November 2009, 16:00 Uhr c.t.

Ort: Technische Universität Wien
1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, 1.Stiege, 3. Stock
Hörsaal für Geodäten, Raum E111

Dipl. Ing. Gert Steinkellner

Dipl. Ing. Norbert Höggerl

Gäste sind herzlich willkommen



Terrestrisches Monitoring natürlicher Zielobjekte

Thomas A. Wunderlich, München

Kurzfassung

Reflektorlose Distanzmessung, Radartechnik und digitale Bilderfassung bereiten neue Möglichkeiten der Deformationsmessung natürlicher Zielobjekte. Im Fokus stehen aktuelle Entwicklungen für die Bestimmung von Ortsbrustdeformationen in der NÖT mit terrestrischem Laserscanning, Rutschhangüberwachung mit GB-SAR oder bildgebenden Tachymetern sowie Rissortung und -dokumentation mittels Digitalkameras.

Schlüsselwörter: Natürliche Zielobjekte, Ingenieurgeodäsie, Überwachungsmessung

Abstract

Prismless EDM, radar ranging and digital image capture create new possibilities for deformation measurement of natural objects. The investigation focusses on recent developments concerning determination of tunnel face deformations by terrestrial laserscanning for the NATM, on landslide monitoring by GB-SAR or by image assisted total stations as well as on crack locating and documentation by digital cameras.

Keywords: natural targets, engineering surveying, monitoring

1. Natürliche Zielobjekte

Die geodätische Aufnahme und Überwachung natürlicher Objekte stellt seit jeher eine Domäne der Photogrammetrie, in jüngerer Vergangenheit auch der Fernerkundung dar. Künstliche Ziele auf Einzelpunkten werden dabei nur zu Zwecken der Orientierung oder zur Steigerung der Genauigkeit installiert (farblich besonders gekennzeichnete Passpunkte, große Corner-Reflektoren). Im Gegensatz dazu haben sich die entsprechenden Verfahren der Ingenieurgeodäsie lange Zeit ausschließlich auf die hochpräzise Einmessung signalisierter Ziele gestützt und solchermaßen vorwiegend punktbezogene Auswertestrategien genutzt. Linien- und flächenmäßige Bearbeitungen konnten erst mit Aufkommen der reflektorlosen Distanzmessung und weiter durch das terrestrische Laserscanning (TLS) einsetzen. Mit Hinzutreten der Bildinformation interner Zielkameras modernster Servotachymeter haben sich die Möglichkeiten – insbesondere durch Nutzung photogrammetrischer Algorithmen der Bildverarbeitung – deutlich erweitert und zu einem konstruktiven Zusammenrücken der beiden Disziplinen geführt. Die Brauchbarmachung der flugzeug- oder satellitengetragenen Radartechnik für die terrestrische Anwendung in Form des ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) empfiehlt schlussendlich eine nutzbringende Allianz mit der Fernerkundung.

Die Erweiterung des Methodenspektrums und die technischen Fortschritte bei bestehenden

Verfahren werden natürlich von der Ingenieurgeodäsie unmittelbar aufgegriffen, um wichtige Messaufgaben neu oder verbessert zu lösen, wofür auch deutliche Nachfrage aus der Praxis besteht. Verstärktes Interesse richtet sich dabei auf die Erzielung höherer Informationsdichte durch Deformationserfassung in der Fläche und auf das möglichst weitgehende Verzicht auf Signalisierung. Dies erfordert jedoch die Entwicklung neuartiger Auswertungs- und Analysealgorithmen, was Gegenstand der aktuellen Forschung an vielen Universitäten ist. Der Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München widmet sich in diesem Feld gezielt der Deformationserfassung natürlicher Zielobjekte; solche werden als Untergruppe der nicht kooperativen Ziele verstanden, welche darüber hinaus nicht signalisierte Bauwerke, Maschinen, Anlagen oder Teile derer umfassen. Zur Bearbeitung letzterer Gruppe sind im letzten Jahrzehnt bereits sehr effiziente, praxisreife Ansätze geschaffen worden. Kennzeichnend ist dort, dass analytisch auf eine Sollgeometrie zurückgegriffen werden kann, wohingegen bei mehrfach erfassten natürlichen Zielobjekten eher triangulierte Ersatzflächen, markante Umrisse oder Strukturen die Grundlage für neue Monitoringprozesse bilden.

2. Ausgewählte Monitoringaufgaben

Angeregt durch konkrete Bedarfsmeldungen von interdisziplinären Partnern wie Bauingenieuren und Ingenieurgeologen, hat der Lehrstuhl für Geodäsie konsequent die Lösung ausgewähl-

ter Monitoringaufgaben bezüglich natürlicher Zielobjekte in Angriff genommen. In allen Fällen sind dazu Forschungsprojekte formuliert worden, von welchen einige die Zuerkennung einer öffentlichen oder industriellen Förderung erringen konnten.

Der erste Bereich betrifft – teilweise zeitkritische – Deformationsbestimmungen im Tunnelbau nach der NÖT, der zweite das längerfristige Monitoring von Rutschhängen und der dritte die wiederholte Auffindung und Vermessung von Rissbildungen an Bauwerken.

3. Monitoring von Deformationen im Tunnelbau

Die Anwendung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) bedingt sofort nach dem jeweiligen Hohlraumausbruch eine Primärsicherung durch Spritzbeton bevor in einer späteren Phase des Bauablaufs die eigentliche Innenschale errichtet wird. Die dabei anfallenden Profil- und Rauigkeitskontrollen sowie Schichtdicken- und Massenbestimmungen werden schon seit geraumer Zeit in der Regel mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) flächendeckend ausgeführt. Es ist naheliegend, dass aus wirtschaftlichen Erwägungen der dazu notwendige Scanner auch weitergehend genutzt werden soll, in erster Linie zur Ablösung der bislang nur profilweisen, über programmierte Beobachtung mit Servotachymetern durchgeführten, optoelektronischen Konvergenzmessungen durch dicht gerasterte Abtastung mittels TLS. Dies ist, auf Tunnelbau spezialisierten, Vermessungsunternehmen bereits recht erfolgreich gelungen. Problematisch erweisen sich bei der praktischen Umsetzung die Einflüsse der Oberflächenrauigkeit und von Störelementen (Ankerköpfe, Leitungen, Lutte), besonders wenn solche nur in einem von zwei aufeinanderfolgenden Scans enthalten sind.

Hier ist es mit Unterstützung der Firma *Geodata, Leoben* (Datensätze, Beratung) in München gelungen, ein Auswerteverfahren zu entwickeln, das nahezu vollautomatisch flächendeckend Deformationen der Tunnellaibung aus multitemporalen Scans zu bestimmen erlaubt [1]. Die von Herrn *Ohlmann* im Rahmen seiner Diplomarbeit [2] entwickelte Software *TunnelDefo* beschränkt sich dabei auf die Ableitung der radialen Deformationskomponente im Tunnelquerprofil. Dazu werden die Punktwolken zweier Aufnahmezeitpunkte zunächst mittels feingescannten, tachymetrisch vorbestimmten, Reflektorpunkten vom lokalen Scannersystem in das Projektkoordinatensystem transformiert, von wo sie weiter durch

längentreue Abwicklung des Korbbogenprofils in ein ebenes Tunnelband abgebildet werden. Dort erfolgt eine zweistufige Filterung. In der ersten Stufe verringert ein Binomialfilter das globale Rauschniveau (Messrauschen, Oberflächenrauschen) und quantifiziert das Resultat. Diese Maßzahl dient dann in der zweiten Stufe dazu, Intervallgrenzen eines Konfidenzbereichs festzulegen, gegen welche ein regional adaptiver Filterprozess Deformationsniveaus innerhalb von Kacheln eines beliebig festlegbaren Rasters testet, um so Pseudodeformationen (durch Störobjekte oder größere Unebenheiten bei flachem Inzidenzwinkel verursacht) aufzuspüren und zu eliminieren. Die bereinigten Punktwolken zeigen danach anhand von Gitterpunkten, die durch regelmäßige Delauney-Interpolation nach der von *Schäfer* [3] eingeführten Strategie ermittelt werden, die signifikanten Deformationen.

Die Visualisierung erfolgt farbkodiert; ein Beispiel in Abb.1 vermittelt einen Eindruck, welchen Informationsgewinn der flächendeckende TLS-Ansatz verschaffen kann. Natürlich muss für jedes Bauvorhaben spezifisch abgewogen werden, ob der Konvergenzmessung auf Reflektoren (punktweise in Profilen, hochgenau, räumliche Deformation) oder direkt auf die ausgebrochene respektive torkretierte Tunnellaibung (flächendeckend, genau, radiale Deformationskomponente) der Vorzug gegeben wird. Tatsächlich sollten die beiden Verfahren am besten Hand in Hand arbeiten, alleine schon wegen der Georeferenzierung. Verzichtet man, etwa zur beschleunigten Konvergenzmessung kurzfristig nach dem Ausbruch, auf die Einpassung in das Projektkoordinatensystem, so kann zur Registrierung auf im Scan identifizierbare Singularitäten (z.B. Ankerköpfe) zurückgegriffen oder nach dem Folgescan über die an solchen Stellen auftauchenden Pseudodeformationen versucht werden.

Wollte man aus Laserscans alle drei Komponenten der Konvergenz (vertikal, quer, längs) gewinnen, könnte man am besten zur Erzeugung von Shape-Modellen auf NURBS-Basis greifen, deren gegenseitige (relative) Abweichungen sich dann über einen Compare-Prozess bestimmen ließen. Auf Basis der Software *Geomagic* ist so ein Ansatz in München bereits erfolgreich getestet worden [2]. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit liegt jedoch derzeit auf der Entwicklung eines echtzeitnahen Verfahrens zum Ortsbrustscanning für die NÖT.

In Zusammenarbeit mit dem Zentrum Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt) der Technischen Universität München wird eine Methode erar-

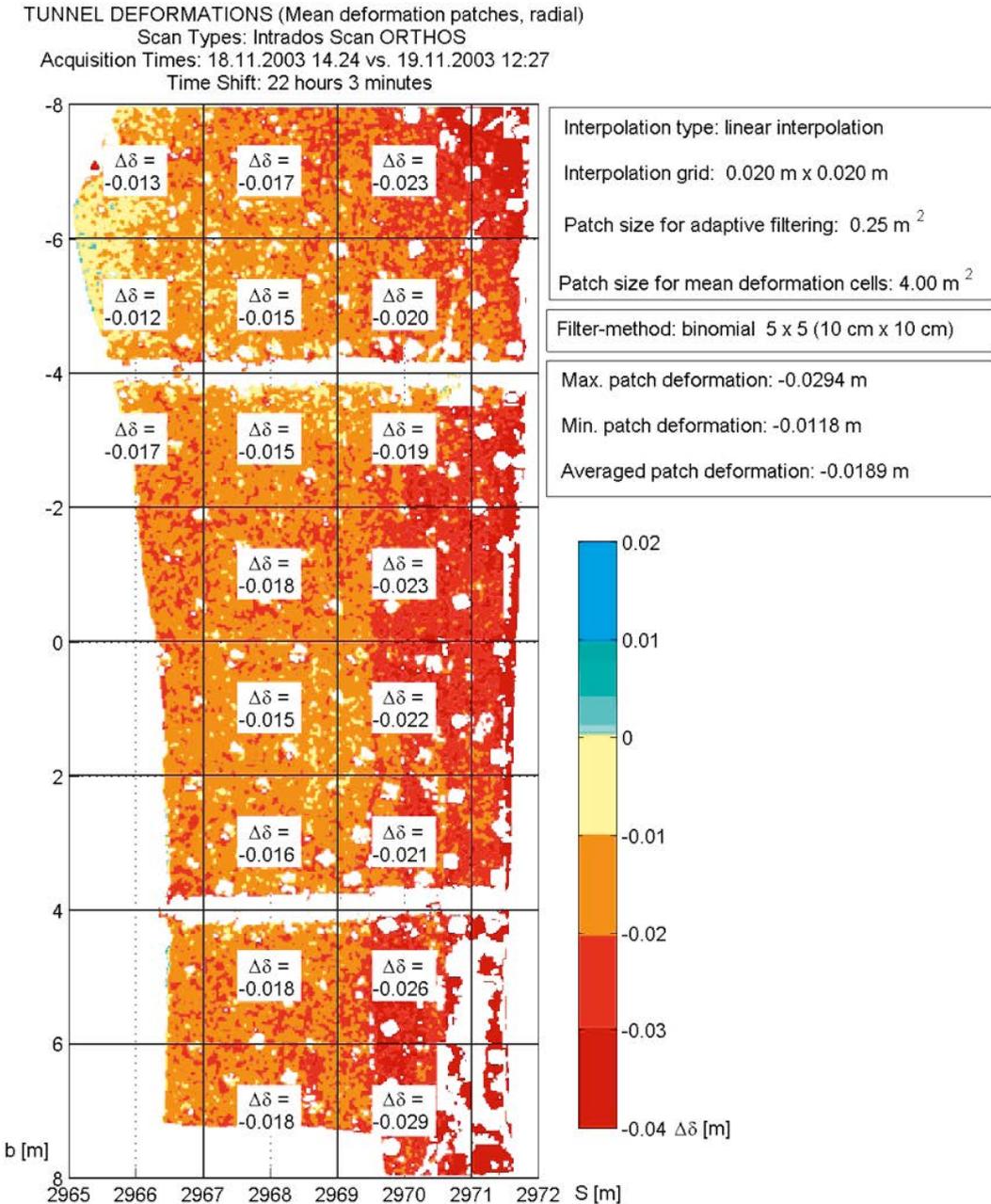


Abb.1: Auswertung einer TLS-Konvergenzmessung für die NÖT (Quelle: Dipl.-Ing. Johannes Ohlmann-Bartusel, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

beitet, Ortsbrustdeformationen flächendeckend und unter Einhaltung vorgegebener Stillstandzeiten zu bestimmen (Abb.2). Insbesondere bei Tunnelvortrieben mit geringer Überdeckung, wie sie für innerstädtische Verkehrswege die Regel sind, ist es für den Bauingenieur äußerst wichtig, die Standfestigkeit der Ortsbrust so sicher wie

möglich zu beurteilen, um einerseits einem Versagen vorzubeugen, andererseits die Beträge von bauwerksrelevanten Oberflächensetzungen realistisch prognostizieren zu können. In Ermangelung eines Maßes für die Standsicherheit sind die Deformationsermittlungen aus Laserscans von höchstem praktischem Wert [4].



Abb.2: Deformationsbestimmung einer NÖT-Ortsbrust mit TLS (Quelle: Dipl.-Ing. Johannes Ohlmann-Bartusel, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

Tatsächlich ist es mittlerweile gelungen, die Vorgangsweisen aus dem Monitoringsystem *TunnelDefo* so aufzubereiten, dass damit Ortsbrustdeformationen ausgewiesen werden können. Die Aufnahme erfolgt mit einem schnellen, hochauflösenden Phasenscanner aus etwa 10 Metern Entfernung mit einer Rasterweite von 3,1 Millimetern; zur Registrierung werden seitlich Passkugeln und Passmarken angebracht. Nach den beiden Filtervorgängen (gerade die Pseudodeformationen durch Ortsbetonsicherung, temporäre Anker und Materialumlagerungen müssen beseitigt werden) können dann zur örtlichen Tunnelachse parallele Verformungen über Gitterpunkte berechnet und visualisiert werden (Abb.3). Praxistests, die logistisch in einen laufenden Tunnelvortrieb eingepasst werden konnten, haben überzeugend bewiesen, dass die vorgegebene Stillstandzeit von maximal 15 Minuten niemals überschritten worden ist. Unter Verwendung eines Leica HDS6000 Phasenscanners war es möglich, in 7 Minuten die Punktwolke mit der gewünschten Punktdichte aufzunehmen und mit den verbleibenden 2 * 4 Minuten Geräteeinrichtung und -abbau sowie alle Bedienungsschritte zu bewerkstelligen [5].

4. Monitoring von Rutschhängen

Die Entfestigung alpiner Räume durch das klimawandelbedingte Ansteigen der Permafrostgrenze und durch an Zahl und Heftigkeit zunehmende Unwetterereignisse schreitet in extrem beunruhigender Art und Weise fort. Rutschungen, Felsstürze und Muren sind laufend an der Tagesordnung. Inzwischen treten aber auch im sanften Hügelland unter Einfluss von Starkregen oder Dauerniederschlägen massenweise Erdbeben auf, wie in diesem Sommer die steirischen Bezirke Feldbach und Fürstenfeld leidvoll erfahren mussten.

Für den Ingenieurgeodäten bedeutet diese unheilvolle Entwicklung, dass er immer öfter und an immer mehr Orte zu Überwachungsmessungen gerufen wird. Eine spürbare Erleichterung und Beschleunigung seiner Monitoringmissionen würde sich einstellen, wenn die Vermarkung und Signalisierung von Zielpunkten entfallen könnten und stattdessen natürliche Objekte direkt beobachtbar wären. Der erste Gedanke führt naturgemäß wieder zu TLS, allerdings mit Instrumenten, welche über Impulslaufzeitmessung sehr große Reichweiten erzielen lassen. Ein einziger Scanner, der Riegl LPM-321, erfüllt die hochgesteckten Erwartungen von Experten und Verantwortli-

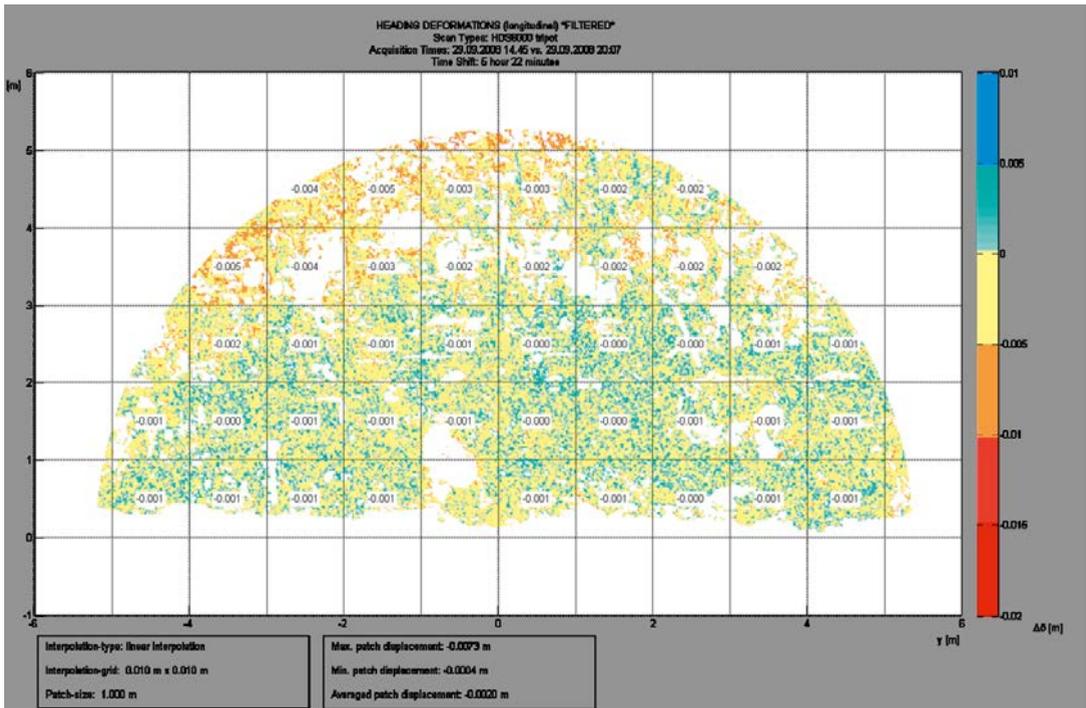


Abb.3: Auswertung der Ortsbrustdeformationen mit TunnelDefo (Quelle: Dipl.-Ing. Johannes Ohlmann-Bartusel, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

chen des Naturgefahrenmanagements mit einer Werksangabe von bis zu 10 Kilometern auf gut reflektierende Oberflächen. Die dazu notwendige Sendeleistung muss aber zur unbedenklichen Anwendung in freier Natur mit einer erheblichen Strahlaufweitung kompensiert werden [6]. Das führt am Objekt zu großflächigen Footprints, die die Auswertung bei stark strukturierten, vielleicht auch noch bewachsenen, Zielbereichen schwierig gestalten. Erst die komplexe Analyse mit der Full Wave Form Technik wird hier zukünftig Verbesserungen erbringen. Vom Gesichtspunkt der Genauigkeit her hat sich das Interesse deshalb zwischenzeitlich der differentiellen interferometrischen Radartechnik und bildgebenden Servotachymetern zugewandt.

4.1 Ground-based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)

In den letzten sechs Jahren ist es mehreren Forschungsinstituten in Italien (Systeme LiSA, IBIS), Frankreich (Prototyp UWBR) und der Schweiz (System GAMMA) geglückt, das von der Fernerkundung entwickelte Radarverfahren SAR erfolgreich für die terrestrische Anwendung zu modifizieren [7]. Die sonst durch zwei Satelliten (Tandembetrieb) oder durch verschiedene Positionen eines Satelliten nach mehreren Erdumrun-

dungen erzeugte Aufnahmebasis wird durch motorgesteuerte Bewegung des Radartransceivers auf einer 2 bis 5 Meter langen, mechanischen Linearbasis ersetzt. Durch eine extrem große Bandbreite der Mikrowellenstrahlung erreicht man entfernungsunabhängig eine Auflösung von weniger als einem Meter in Strahlrichtung und, abhängig von der Basislänge, quer dazu von mehreren Metern auf Distanzen von 2 bis 4 Kilometern. Innerhalb dieser „Pixel“ kann dann durch Bildung der Phasendifferenz der rückgestreuten Strahlung zwischen zwei zeitversetzten Aufnahmen eine LOS-Distanzänderung (line of sight) bis in den Submillimeterbereich detektiert werden. Über die Aufnahmegeometrie (Strahlevation, Hangneigung) lässt sich daraus lotbezogene Deformationsinformation ableiten und damit ein ganzer Hang flächendeckend (außer topographisch abgeschattete Bereiche) überwachen. [8].

Beachtet werden muss, dass das Phasenverfahren natürlich eine Mehrdeutigkeit enthält. Je nach verwendeter Mittenfrequenz beträgt diese ein bis mehrere Zentimeter. Die Aufnahmezeit muss daher der mittleren Bewegungsgeschwindigkeit angepasst werden. Wie bei der satellitengestützten Technik behindern Kohärenzab-



Abb.4: GB-SAR im EU-Forschungseinsatz von ENVEO (Quelle: Homepage EU Project N. 018409 – GALAHAD, Arbeitspaket ENVEO, Austria)

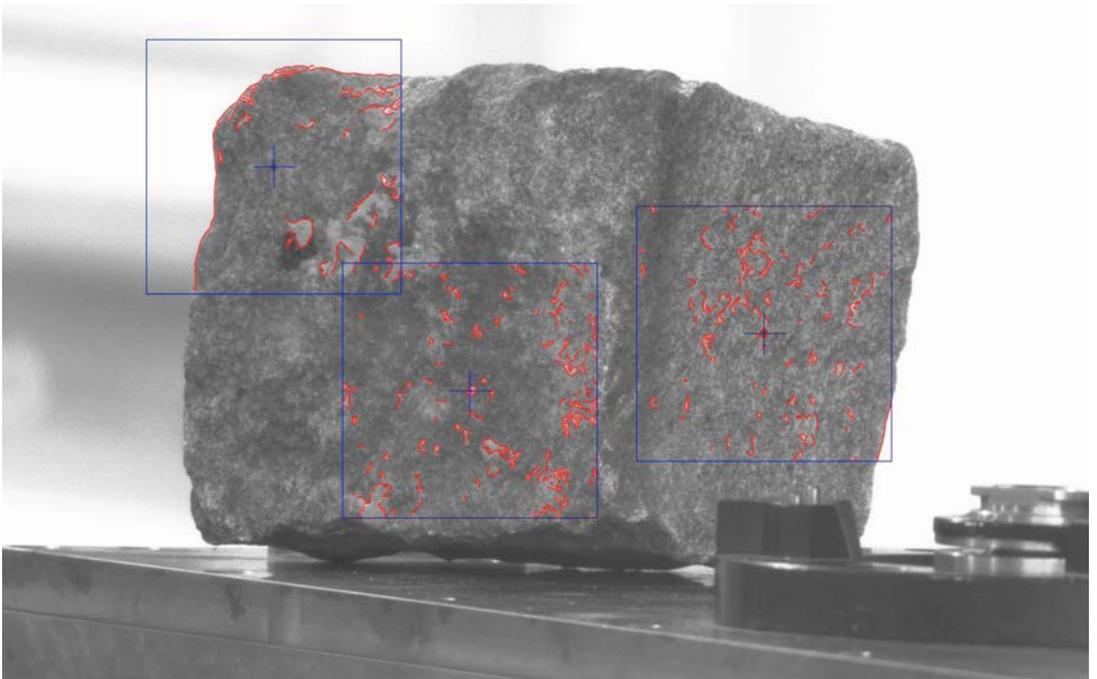


Abb.5: Videotachymetrische Strukturaufnahme eines Pflastersteins (Quelle: Dr.-Ing. Peter Wasmeier, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

schwächungen durch Vegetation oder deren Veränderung die Auswertung [9]. Bevorzugt geeignet sind daher unbewachsene Hänge, womit sich der derzeit überwiegende Einsatz im hochalpinen Gelände oder an Vulkanflanken erklärt (Abb.4). Vorteilhaft ist wegen der großen Wellenlänge die Operabilität auch bei schlechten Sichtbedingungen; zur Sicherung höchster Genauigkeit darf nicht auf die atmosphärischen Korrekturen, insbesondere jene wegen Luftfeuchtigkeit, vergessen werden.

Der Lehrstuhl für Geodäsie konnte sich bisher mit der vielversprechenden Methode im Zuge der Teilnahme am EU-Projekt „ClimChAlp“ [9] erst theoretisch auseinandersetzen. Derzeit ist aber in der BMBF-Fördermaßnahme „Nachhaltiges Landmanagement“ ein gemeinsamer Antrag mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie in Begutachtung (im Verbundprojekt: „Differenziertes Landnutzungsmanagement in (vor-)alpinen Verflechtungsräumen zur Minderung von Klimafolgen, hydrologischer und geogener Gefahren“), der GB-SAR enthält.

4.2 Videotachymetrie

Hohes Potential für Überwachungsmessungen auf natürliche Ziele eröffnet auch die Videotachymetrie, also die Nutzung des Kamerabildes bildgebender Tachymeter. Solche sind in Nachfolge der Videotheodolite von Kern (E2-SE) und Wild (TM3000V) inzwischen in unterschiedlichen Ausprägungen als Tachymeter auf dem Markt. Während die einen eine Fixfokus-Kamera zur automatischen Zielung auf Reflektoren nutzen (Leica), stellen die anderen mit fokussierbarer Kamera Bildinformation hauptsächlich zu Zwecken der Dokumentation, des Overlays von Bild- und Mess-/Plandaten oder der komfortablen Auswahl von Bearbeitungsbereichen (etwa zum grobmaschigen Scannen) zur Verfügung (Sokkia, Topcon, Trimble) [10]. Um jedoch die Bildinformation der zweiten Gruppe zu Messzwecken nutzen zu können, müssten zwei fundamentale Bedingungen erfüllt sein: eine umfassende Kalibrierung der Kamera bezüglich des Trägerinstruments unter Einbezug der Achsfehler und über den gesamten Fokussierbereich einerseits und andererseits eine offene Schnittstelle zur Kommunikation mit Tachymeter und Kamera; beides ist derzeit noch zu vermissen.

Aufhorchen ließ aber *Walser* [11] mit dem Prototyp einer ‚Image Assisted Total Station‘ (IATS) auf Basis eines Leica TCRA1100, der erstmals eine, das Okular ersetzende, CMOS-Kamera entsprechend kalibrierte und mit Algorithmen zur

Merkmalsextraktion koppelte. Damit gelang versuchsweise die Aufnahme und Auswertung von Fassadenelementen. Der Prototyp wurde dankenswerterweise Nachwuchswissenschaftlern der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie der TU Wien und des Lehrstuhls für Geodäsie der TU München zeitweise für eigene Versuche überlassen. Angeregt durch das erkannte hohe Potential eines solchen Videotachymeters, haben beide Institute die Firma Leica bestürmt, ihre Pionierarbeiten doch durch Fertigung einer verbesserten Version zu unterstützen, was schließlich tatsächlich in Form einer Kleinserie auf Grundlage des TCRA1201+R1000 geschehen ist. Seither laufen in Wien und München mehrere Forschungsvorhaben zur Videotachymetrie mit solchen Geräten.

Für die nähere Betrachtung im Rahmen dieser Abhandlung relevant ist der Einsatz der IATS2 im Forschungsprojekt „alpEWAS – Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D-Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge“ [12], welches im Rahmen der Fördermaßnahme „Geotechnologien II“ des BMBF seit 2007 gefördert wird. Der Anteil der Videotachymetrie an der Gesamtaufgabe umfasst die Bestimmung der Verlagerung und Rotation von über den Rutschhang verstreuten Felsblöcken, um die Installation von Reflektoren zu vermeiden. In seiner Dissertation [13] hat *Wasmeier* die IATS2 im Geodätischen Prüflabor dazu hochwertig kalibriert und effiziente Algorithmen zur wiederkehrenden Erkennung und Vermessung natürlicher Strukturen mit Hilfe von Bildverarbeitungsoperationen entwickelt. Ein Beispiel im Labor zeigt Abb.5. Kalibrierung und Subpixelinterpolation liefern extrem hohe Genauigkeit.

Inzwischen ist das Instrument im Untersuchungsgebiet Aggenalm auf dem bayerischen Sudelfeld installiert (Abb.6) und meistert seine ersten praktischen Tests im Gelände. Den größten Störeinfluss bewirken naturgemäß die Refraktion und ihre kurzperiodische Änderung, die Szintillation. Diese führen zu Unschärfereffekten sowie scheinbaren Verformungen und Positionsänderungen, welche sich aber über geeignete Mittelungsprozesse begrenzen lassen. Für den hier im zentralen Blickpunkt des Vorhabens stehenden Monitoringzweck [14] werden zahlreiche, kleinräumige natürliche Strukturen periodisch angemessen, um in der Summe ein möglichst detailliertes Modell der Hangbewegung aufbauen zu können. Laterale Bewegungen werden überwiegend durch die Kamerabilder, radiale durch reflektorlose Distanzmessung bestimmt. Dabei hat *Wasmeier* auch besondere Ansätze verfolgt, welche auf ein Minimum notwendiger Distanz-



Abb.6: Bildgebender Tachymeter IATS2 beim Rutschhangmonitoring (Quelle: Dr.-Ing. Peter Wasmeier, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

messungen abzielen. Bei Schneebedeckung der Zielobjekte wird Zuwachs und Abnahme aufgenommen, um damit eine wichtige Triggergröße zu erfassen.

Eine offenkundige Einsatzbeschränkung der Videotachymetrie besteht im Sichtbedarf; bei Dunkelheit oder Schlechtwetter sind keine Messungen möglich. Demgegenüber offenbart sich jedoch auch noch ein hervorragendes Vermögen, das in anderen Monitoringprojekten genutzt werden soll: unter Berücksichtigung der Synchronisationssignale und der Austaktlücken sind die 5 Megapixel Kamerabilder mit 6 Frames pro Sekunde verfügbar. Das bedeutet, dass alle Veränderungen des Bildinhaltes (bei unbewegter Ausrichtung des Instruments) mit dieser beachtlichen Rate zumindest im Post Processing hochgenau auswertbar sind und dadurch das Nachbrechen von Abrisskanten oder die Bewegung von Schuttströmen direkt messbar werden.

5. Ortung und Dokumentation von Rissbildungen

Auch Risse an Bauwerken können als natürliche Ziele auf künstlicher Struktur aufgefasst werden. Im letzten Kapitel soll ein Zukunftsfeld des Monitorings angesprochen werden, welches noch zu-

wenig Beachtung in der ingenieurgeodätischen Gemeinde findet. Risse sind immer ein Zeichen dafür, dass ein Bauwerk bestimmten Spannungszuständen unterliegt, die von der Auslegung abweichen. Sie werden daher vom Bauingenieur, der ja für die Standsicherheit verantwortlich ist, sehr sorgsam registriert und in ihrer Entwicklung beobachtet. Dazu existieren zahlreiche, recht einfache, Werkzeuge zur Rissbreitenmessung.

Eine Neuerung auf Basis einer digitalen Kamera und photogrammetrischen Methoden stellt das Digitale Rissmesssystem (DRS) des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig dar [15], welches höchste Genauigkeit mit Objektivierung vereint. Im Kern besteht das DRS aus einer kalibrierten Riss-Kamera mit festem Tubus und Passmarken, gleichmäßiger Ausleuchtung sowie mono- und multispektralen Erfassungsoptionen. Rissbreiten sind mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05$ mm bestimmbar, wobei die zugehörige Auswertesoftware auch eine automatische Rissverfolgung nach dem Polyline-Fly-Fisher Algorithmus und ein virtuelles Zusammenschieben detektierter Rissufer erlaubt.

Zur Überwachung der Rissentwicklung müssen die Risse wieder aufgefunden werden, was sich bei zahlreichen Rissen auf einem ausgedehnten Bauwerk recht mühsam gestalten kann. Wünschenswert ist daher eine Rissverortung bei der Erstaufnahme; an Methoden dazu arbeitet man in Braunschweig. Aus Münchner Sicht ergibt sich durch die IATS2 nun aber eine völlig neue Möglichkeit, nämlich das Monitoring mittels bildgebendem Tachymeter. *Wasmeier* hat dazu in seiner Dissertation [13] zukunftsrichtige Vorversuche durchgeführt (Abb.7). Für den Bauingenieur bleibt dann nur mehr ein Wunsch unerfüllt: die Erfassung der Risstiefe.

6. Ausblick

Monitoring stellt generell eines der attraktivsten, verantwortungsvollsten, aber auch lohnendsten Aufgabenfelder der Ingenieurgeodäsie dar. Immer mehr Objekte gilt es messtechnisch zu überwachen und das immer öfter. Wenn dies in näherer Zukunft für bestimmte Anwendungen auch ohne herkömmliche Vermarkungen und Signalisierungen erfolgen kann, eröffnen sich neue Strategien und Märkte. Der Fachgemeinde und potentiellen interdisziplinären Partnern einen Überblick über entsprechende Anwendungen, Instrumente und Methoden aus Sicht der aktuellen Forschung zu verschaffen, war Ziel dieses Aufsatzes.

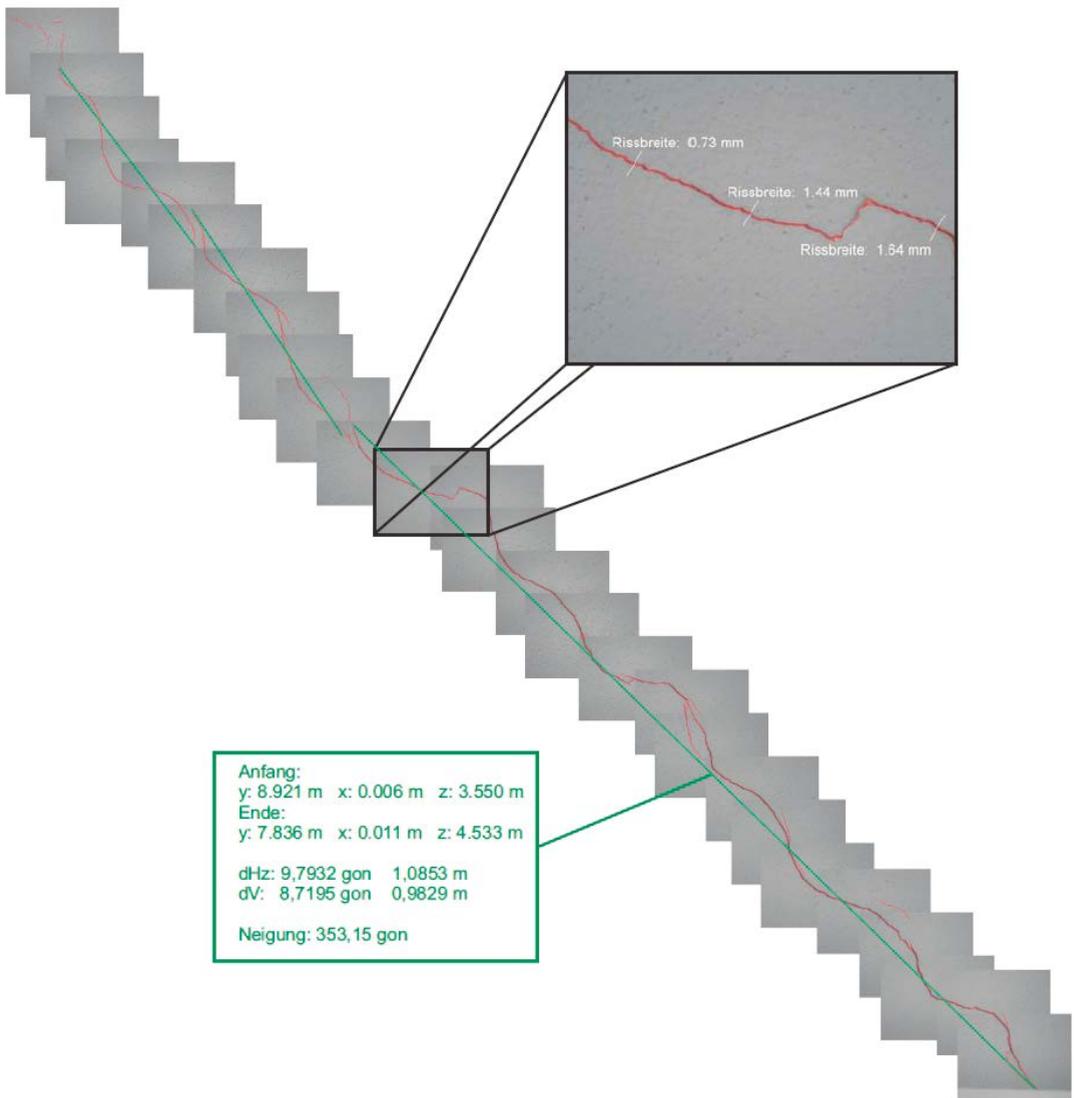


Abb.7: Rissverortung und -monitoring mit der IATS2 (Quelle: Dr.-Ing. Peter Wasmeier, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

Literaturverzeichnis

- [1] Ohlmann-Bartusel, J.: Bestimmung flächenhafter Deformationen einer ausgebrochenen Tunnelaibung mit multitemporalen Laserscanning-Daten. Tagungsband zu den 8. Oldenburger 3D-Tagen, Verlag Wichmann, Heidelberg, 2009.
- [2] Ohlmann-Bartusel, J.: Innovative determination of areal deformations of an excavated tunnel intrados by multitemporal laser scanning data. Diplomarbeit, TU München, 2008.
- [3] Schäfer, Th.: Deformationsmessung mit Laserscanning am Beispiel eines Schleusentores des Donaukraftwerks Gabčíkovo. Tagungsband zu den 3. Oldenburger 3D-Tagen, Verlag Wichmann, Heidelberg, 2004.
- [4] Ohlmann-Bartusel, J., Weber, Th., Schäfer, Th., Rauch, S.: 3D-Laserscanning in der Ingenieurgeodäsie. Tagungsband zum 3. forum3D, Eigenverlag, Fachgebiet CAAD, TU München, 2009.
- [5] Ohlmann-Bartusel, J., Höfle, R., Fillibeck, J.: Ortsbrustdeformationen – Ortsbruststandsicherheit. Forschungsbericht, Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Eigenverlag, TU München, 2009.
- [6] Wunderlich, Th., Staiger, R.: „Schneller, weiter, effizienter, ...“ – Aktuelle Entwicklungen der Scannertechnik. In: DVW-Mitteilungen, Bd.54, Wißner Verlag, Augsburg, 2008.
- [7] Schäfer, Th.: Bodengestützte interferometrische SAR Radarsysteme (GB-SAR) – ad hoc Marktübersicht. Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Eigenverlag, TU München, 2009.
- [8] Bernardini, G., Ricci, P., Coppi, F.: A ground-based microwave interferometer with imaging capabilities for re-

mote measurements of displacements. Proceedings of the GALAHAD Workshop, 7th Geomatic Week, Barcelona, 2007.

- [9] ClimChAlp: Slope Monitoring Methods – A State of the Art Report (Compilation: Th. Schäfer). Final Report of WP6 Project 'ClimChAlp' Interreg III B Alpine Space, EU, 2008
- [10] Wasmeier, P.: Videotachymetrie – Sensorfusion mit Potential. AVN, 116.Jg., Heft 7, Verlag Wichmann, Heidelberg, 2009.
- [11] Walser, B.: Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Dissertation, Mitt. d. Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie Nr. 87, ETH Zürich, 2005
- [12] Thuro, K., Wunderlich, Th., Heunecke, O.: Development and testing of an integrative 3D early warning system for alpine instable slopes (alpEWAS). Geotechnologies Science Report, S.101-112, BMBF, 2007.
- [13] Wasmeier, P.: Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, DGK Reihe C, Nr. 638, 149 S., TU München, 2009.
- [14] Thuro, K., Wunderlich, Th., Heunecke, O., Singer, J., Schuhbäck, S., Wasmeier, P., Glabscg, J., Festl, J.: Low cost 3d early warning system for instable slopes – the Aggenalm Landslide monitoring system. Geomechanics and Tunneling, Vol.2, No.3, p.221-237, Ernst & Sohn, Berlin, 2009.
- [15] Niemeier, W., Riedel, B., Neuß, H., Stratmann, R., Ziem, E., Fraser, C.: Digitales Reißmaßsystem (DRS) – Ein neues Instrument für die Bauwerksüberwachung. Homepage Geotec, Laaten, 2007.

Anschrift des Autors

Univ.Prof. Dr.-Ing.habil. Thomas A. Wunderlich, Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, D-80290 München.

E-mail: th.wunderlich@bv.tum.de

Vortragender

Prof. Dr.-Ing. Thomas Alexander Wunderlich

- 1955 Wien
- 1974–1979 Studium des Vermessungswesens an der TU Wien
- 1980–1997 Universitätsassistent an der TU Wien am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
- 1983 Promotion zum Dr.techn. an der TU Wien
- 1984 Forschungsaufenthalt am IGP der ETH Zürich
- 1987–1988 Alexander v. Humboldt-Forschungsstipendium am Geodätischen Institut der Universität Hannover
- 1992 Habilitation an der Universität Hannover
- 1993 Habilitation an der TU Wien
- 1997–1999 tit. a.o. Universitätsprofessor an der TU Wien
- 2000 Ordinarius für Geodäsie an der TU München
- 2002 Friedrich-Hopfner-Medaille der ÖGK; Ordentliches Mitglied der DGK
- 2004 Korrespondierendes Mitglied der ÖGK
- 2006 Ehrennadel der Fakultät BI der UPT Timisvar
- 2008 Ehrenmedaille der Fakultät BV der STU Bratislava; Mitglied der Bayer. Komm. f. d. int. Erdmessung
- 2009 Ständiger Sekretär der DGK

vgi



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

An der Fakultät für Mathematik und Geoinformation der Technischen Universität Wien ist am Institut für Geodäsie und Geophysik die Stelle für eine/n

Universitätsprofessor/in für Geophysik

in Form eines zeitlich unbefristeten vertraglichen Dienstverhältnisses
ab 01.01.2011 zu besetzen.

Der/Die Stelleninhaber/in soll das Fach Geophysik in Forschung und Lehre vertreten. Schwerpunkte der Professur sind die Physik und Dynamik der festen Erde, die darin ablaufenden Prozesse und die zu ihrer Erfassung geeigneten geophysikalischen Verfahren, wobei die Integration geophysikalischer Methoden (Seismologie, Geoelektrik, Magnetik, Gravimetrie, ...) mit geodätischen Daten wesentlich ist. Ein Bezug zu aktuellen gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen (z. B. Naturkatastrophen und globale Umweltveränderungen) ist von Vorteil.

Von den Bewerberinnen und Bewerbern wird vorausgesetzt, dass sie als hervorragende Wissenschaftler/innen auf dem Gebiet der Geophysik ausgewiesen sind und eine international führende Rolle innehaben. Erwartet wird Erfahrung im Einwerben und der Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten sowie die Fähigkeit zur integralen Modellbildung in Kooperation mit Partnern aus wissenschaftlichen Nachbardisziplinen. In der Lehre wird von einer angemessenen Beteiligung bei der Ausbildung von Studierenden der Fachrichtung „Vermessung und Geoinformation“ ausgegangen.

Nähere Informationen finden Sie unter: <http://info.tuwien.ac.at/dekzent/Ausschreibungen.html>

Bewerbungen mit ausführlichem Lebenslauf, Publikationsliste, Vortragsliste, Darstellung der eigenen Pläne zur Forschungstätigkeit und deren Einbindung an der TU Wien sowie Kopien der fünf wichtigsten Veröffentlichungen sind bis **15. November 2009** (Datum des Poststempels) an den **Dekan der Fakultät für Mathematik und Geoinformation der Technischen Universität Wien, Getreidemarkt 9, A-1060 Wien**, zu richten. Der schriftlichen Bewerbung sollte eine CD-ROM beigelegt werden, welche die kompletten Bewerbungsunterlagen enthält.



Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie?

Fritz K. Brunner, Graz

Kurzfassung

Wegen ihrer herausragenden Eigenschaften werden faseroptische Sensoren (FOS) immer häufiger für Messaufgaben, so auch in der Baumesstechnik, eingesetzt. In erster Linie werden Längenänderungen, die oft noch wegen der temperaturinduzierten Effekte korrigiert werden müssen, gemessen. Zuerst wird die Lichtausbreitung in einer optischen Faser betrachtet. Anschließend daran werden ganz kurz die physikalischen Grundlagen der wichtigsten faseroptischen Messmethoden für Längenänderungen zusammengefasst. Es werden zwei unterschiedliche Realisierungen der Niedrig-Kohärenz Interferometer im Detail für das Monitoring eines Bauwerks und eines Rutschhanges vorgestellt. Die Kombination vom ingenieurgeodätischen Monitoring mit den eingebetteten FOS Messungen könnte einen Paradigmenwechsel für die Ingenieurgeodäsie bedeuten.

Schlüsselwörter: Faseroptische Sensorik, Ingenieurgeodäsie, Paradigmenwechsel

Abstract

Fiber optical sensor technology: A topic for engineering geodesy?

The unique features of fiber optical sensors (FOS) make them useful for many measurement tasks including those in civil engineering. Here distance changes are measured which often need to be corrected for temperature induced effects. This paper starts with the light propagation in an optical fiber, leading to a brief review of the most important FOS methods for the measurement of length changes. Two different realisations of low-coherence interferometers are presented for the monitoring of a civil engineering structure and a landslide. The combination of continuous measurements using embedded FOS with monitoring data from geodetic measurements could mean a fundamental change of paradigm in engineering geodesy.

Keywords: fiber optical sensors, engineering geodesy, paradigm shift

1. Einleitung

Beim letzten Österreichischen Geodätentag wurde überzeugend die wachsende Bedeutung des Monitorings als exklusive Aufgabe der Ingenieurgeodäsie betrachtet [1]. Der Einsatz von faseroptischen Sensoren für Monitoringaufgaben nimmt ständig zu. Daher wurde ein Jahr später in zwei eingeladenen Beiträgen zum Internationalen Ingenieurvermessungskurs die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Sensoren (FOS) betrachtet ([2], [3]). Die wachsende Bedeutung von FOS für das Monitoring kann zum Beispiel bei den jährlichen Veranstaltungen von ISHMII (International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure) verfolgt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch ein neues Fachgebiet CIVIONICS identifiziert, welches die Kombination von Civil Engineering und Photonics bedeutet.

In diesem Beitrag werden fast voraussetzungslos einige Grundeigenschaften der FOS gebracht und dann die wichtigsten Messmethoden mit FOS von Längenänderungen zusammengefasst. Zwei Realisierungen von nieder-kohärenter Interferometrie werden ausführlicher betrachtet, da diese Messsysteme bei interes-

santen Monitoringaufgaben von IGMS (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz) eingesetzt werden.

Es stellt sich die Frage, welche Bedeutung die ingenieurgeodätischen Messungen in Zukunft haben, wenn FOS hochpräzise Daten der Verformungen von Bauwerken oder geotechnischen Objekten liefern. Die Zukunft liegt in der Kombination beider Messmethoden, was ausführlich diskutiert werden soll. Ein Paradigmenwechsel zeichnet sich dadurch für die Ingenieurgeodäsie ab, indem die bisherige, natürliche Grenze ingenieurgeodätischer Messungen, gegeben durch die Oberfläche der Objekte, in der gemeinsamen Auswertung mit den FOS Messungen aufgehoben wird. Die Bedeutung dieser Entwicklungen soll diskutiert werden.

2. Faseroptische Sensorik

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen der faseroptischen Sensorik vereinfacht zusammengestellt. Der motivierte Leser findet die physikalischen und mathematischen Details in der entsprechenden Fachliteratur, z. B. [4], [5] oder [6].

Die Faseroptik hat fundamentale Bedeutung für die Kommunikationssysteme auf Grund der

herausragenden Übertragungseigenschaften. Schon sehr früh wurde entdeckt, dass die Faseroptik viele Vorteile auch für die Sensorik bietet: FOS haben ein kleines Volumen, können direkt in das Objekt eingebettet werden, die Daten können in der Faser auch über sehr lange Distanzen übertragen werden, hochfrequente Messungen sind möglich, viele Sensoren können auf eine Faser verteilt aufgebracht werden und sie sind immun gegen elektromagnetische Störungen. Gerne wird das faseroptische Monitoring mit dem menschlichen Nervensystem verglichen.

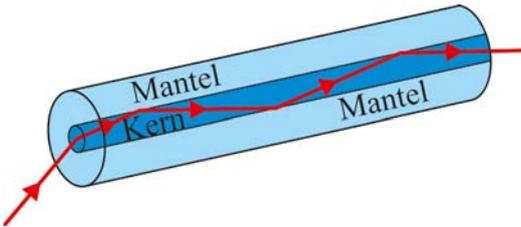


Abb. 1: Lichtausbreitung in einer optischen Faser

Die optische Grundlage für die Faseroptik ist die Totalreflexion, die an der Grenze zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes auftritt, allerdings nur für den Strahl, der aus dem optisch dichteren Medium auf die Grenze zum optisch dünneren Medium trifft. Der häufigste verwendete Fasertyp besteht aus einem Kern und einem Mantel, der auch beschichtet wird, Abb. 1. Abhängig vom Durchmesser des Kerns und den benutzten Wellenlängen bezeichnet man die Faser als Einmoden (9µm) oder Vielmoden (62,5µm) Faser. Der Durchmesser des Mantels kann variieren, z. B: 125 µm.

Viele der bekannten optischen Elemente können auch mit Faseroptik gebaut werden. Für die

nachstehenden Betrachtungen ist der 50 : 50 (3 dB) Strahlteiler wesentlich (Abb. 2), der auch zum Mischen von zwei Lichtsignalen verwendet wird.

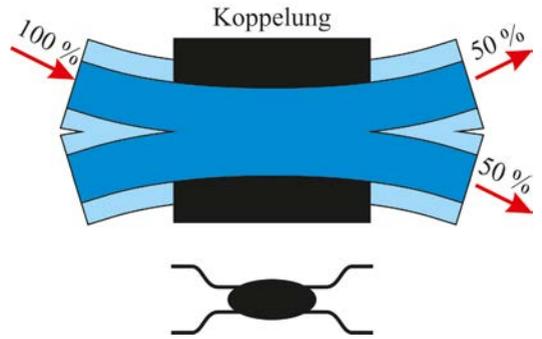


Abb. 2: Faseroptischer Strahlteiler (3 dB, oben) mit entsprechendem Symbolbild (unten)

Eine gemessene Längenänderung ΔL der Faser kann durch Änderung der angreifenden Kräfte oder Temperaturänderungen ΔT erzeugt werden. Zumeist tritt eine Kombination beider Effekte auf

$$\Delta L = L\varepsilon_1 + L\alpha\Delta T \quad (1)$$

wobei L die Länge der Faser, ε_1 der Strain in Richtung der Faser und α der thermische Ausdehnungskoeffizient ist. Zur Messung von ε_1 ist daher eine entsprechende Kompensation für ΔT vorzusehen.

Wenn sich ein Lichtpuls in einer Faser fortpflanzt, so wird ein Teil dieser Strahlung von den Inhomogenitäten des Materials, eigentlich des Brechungsindex, zurückgestreut. Im Spektrum des rückgestreuten Lichtes lassen sich verschiedenen Komponenten (Rayleigh, Brillouin und Raman) unterscheiden, Abb. 3.

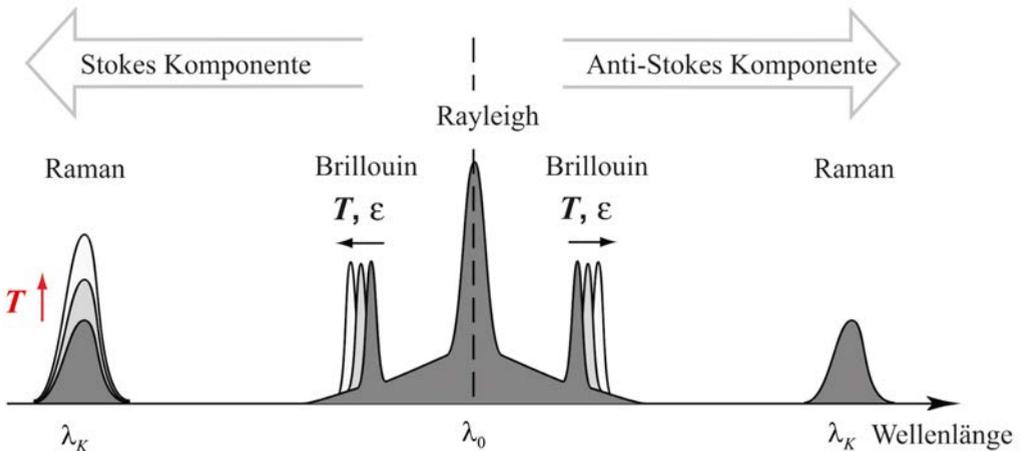


Abb. 3: Spektrum des rückgesteuerten Laserlichtes mit den Stokes und Anti-Stokes Komponenten [Quelle: Smartec]

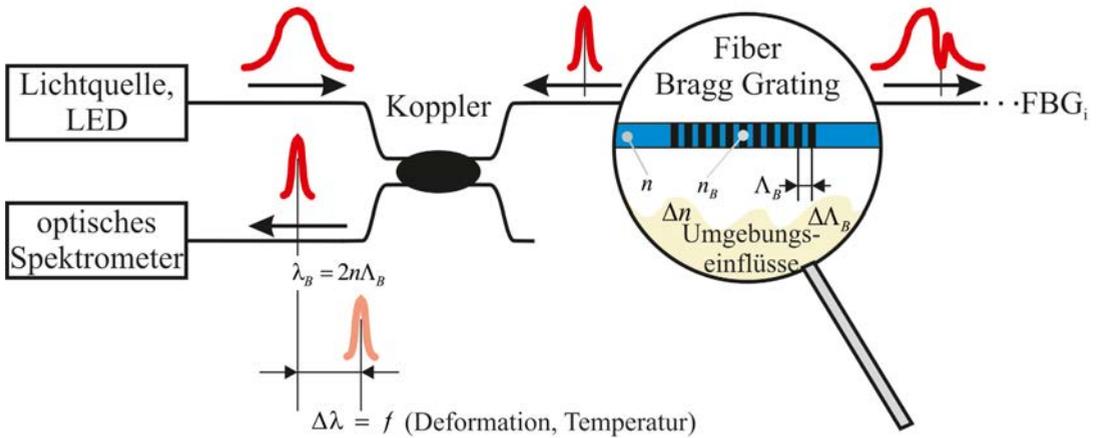


Abb. 4: Faseroptischer Bragg Gitter (FBG) Sensor

Diese schwachen Signale lassen sich aber durch die Verwendung eines entsprechenden Lasers verstärken. Die Position der Rückstreuung kann durch die Laufzeit des Laserpulses bestimmt werden. Somit kann die örtliche Verteilung der Temperatur und des Strains entlang der Faser bestimmt werden. Die großen Vorteile dieser Methode sind die Verwendung von Standardfasern und die mögliche große Länge (mehrere km) der Faser. Durch die zeitliche Mittelung des Signals kann eine Auflösung von z. B. $5\mu\epsilon$ für den Strain und $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ für die Temperatur mit zirka 1 m Positionsgenauigkeit erreicht werden. Es gibt viele Anwendungen, wofür diese Messmethode besonders gut geeignet ist, z. B. die Leckageortung von Wassereinbrüchen bei Dämmen. Die Verbindung von Geotextilien mit eingewebten optischen Fasern ist ein neues, vielversprechendes Messmittel in der Geotechnik.

Für eine andere Messmethode wird in die optische Faser eine regelmäßige Struktur mit der Wellenlänge Λ_B eingebrannt, die faseroptisches Bragg Gitter (FBG) genannt wird. Breitet sich breitbandiges Licht, von einer LED erzeugt, längs der Faser aus, dann wird durch das FBG ein Lichtanteil mit der Wellenlänge λ_B rückge-

strahlt, der im funktionalen Zusammenhang mit der Gitterperiode Λ_B steht. Damit wird eine durch mechanische oder thermische Einflüsse erzeugte Änderung von Λ_B messbar, Abb. 4. Eine Temperaturkompensation ist notwendig, wenn nur der mechanische Strain gemessen werden soll.

Die Sensorlänge beträgt üblicherweise einige Millimeter. Ein besonderer Vorteil der FBG Technologie ist, dass viele Sensoren zu einer durchgehenden Faser zusammengeschlossen werden können. Bei Verwendung unterschiedlicher $\Lambda_{B,i}$ ist trotz simultaner Messung die Unterscheidung der einzelnen Sensoren leicht möglich.

Am IGMS wird die FBG Technologie zur Messung der Strainverteilung in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Firma Getzner verwendet. Der Kraftfluss zwischen Schiene und Schwelle wird durch eine elastische Zwischenlage gedämpft. Häufig werden aber diese Zwischenlagen zerstört. Für eine ausführliche Untersuchung der Gründe dafür werden in einige Zwischenlagen jeweils 9 FBG Sensoren eingebettet, [7].

Natürlich können alle bekannten optischen Interferometer in Faseroptik ausgeführt werden, wobei sich immer Vorteile bei der Realisierung

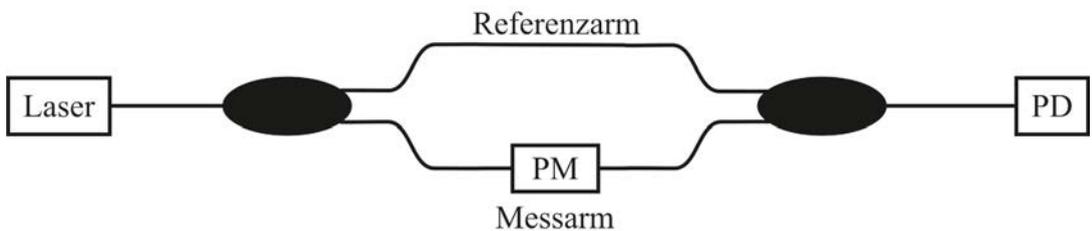


Abb. 5: Mach-Zehnder Interferometer, PD ist die Photodiode, Messarm mit Phasenmodulationseinheit PM

ergeben, da vor allem die Luftwege durch die Faseroptik ersetzt werden. Speziell soll das Fabry-Perot Interferometer (FPI) erwähnt werden, das bei der präzisen Messung von Strain in Bauteilen, z. B. Rotorblätter von Windanlagen, mit großem Erfolg eingesetzt wird. Ein FPI Sensor besteht im Prinzip aus einer Kapillare, in der zwei Glasfasern geführt werden, um eine Lücke von wenigen μm zu erzeugen. Die Änderung des Abstandes zwischen den beiden Fasern ist interferometrisch sehr präzise messbar, [3].

Das Mach - Zehnder Interferometer (MZI) hat eine besonders einfache Struktur, Abb. 5, da die beiden Umlenkprismen des konventionellen Designs durch die Verwendung von Fasern wegfallen. Eine steuerbare Längenänderung kann durch die Verwendung eines Phasenschiebers PM im Messarm erzeugt werden. Diese Variante des MZI kommt beim Nieder - Kohärenz Interferometer zur Anwendung, das im nächsten Kapitel separat beschrieben wird.

3. Nieder - Kohärenz Interferometrie

3.1 Grundlagen und SOFO

Die Nieder - Kohärenz Interferometrie hat durch die Entwicklung der langarmigen Strain Sensoren SOFO von Smartec besondere Bedeutung erlangt, [8]. Nachstehend werden zwei IGMS Projekte, bei denen SOFO Sensoren verwendet werden, vorgestellt. Daher erscheint es sinnvoll, die in der Ingenieurgeodäsie weniger bekannte Nieder - Kohärenz Interferometrie etwas ausführlicher darzustellen.

Niederkohärentes Licht wird von einer LED mit einer Kohärenzlänge $\Delta\lambda$ von $30\ \mu\text{m}$ erzeugt und wird durch einen optischen Koppler (K2) aufgespalten. Die beiden Signale breiten sich im Sensor längs der Referenzfaser und der Messfaser aus, Abb. 6. Von den verspiegelten Enden dieser Fasern reflektiert, werden beide Lichtteile vom gleichen Koppler wieder vereinigt, wobei wegen der geringen Kohärenzlänge keine Interferenz auftreten kann, sofern $\Delta\lambda/2 < \Delta L_I$ ist. Dabei

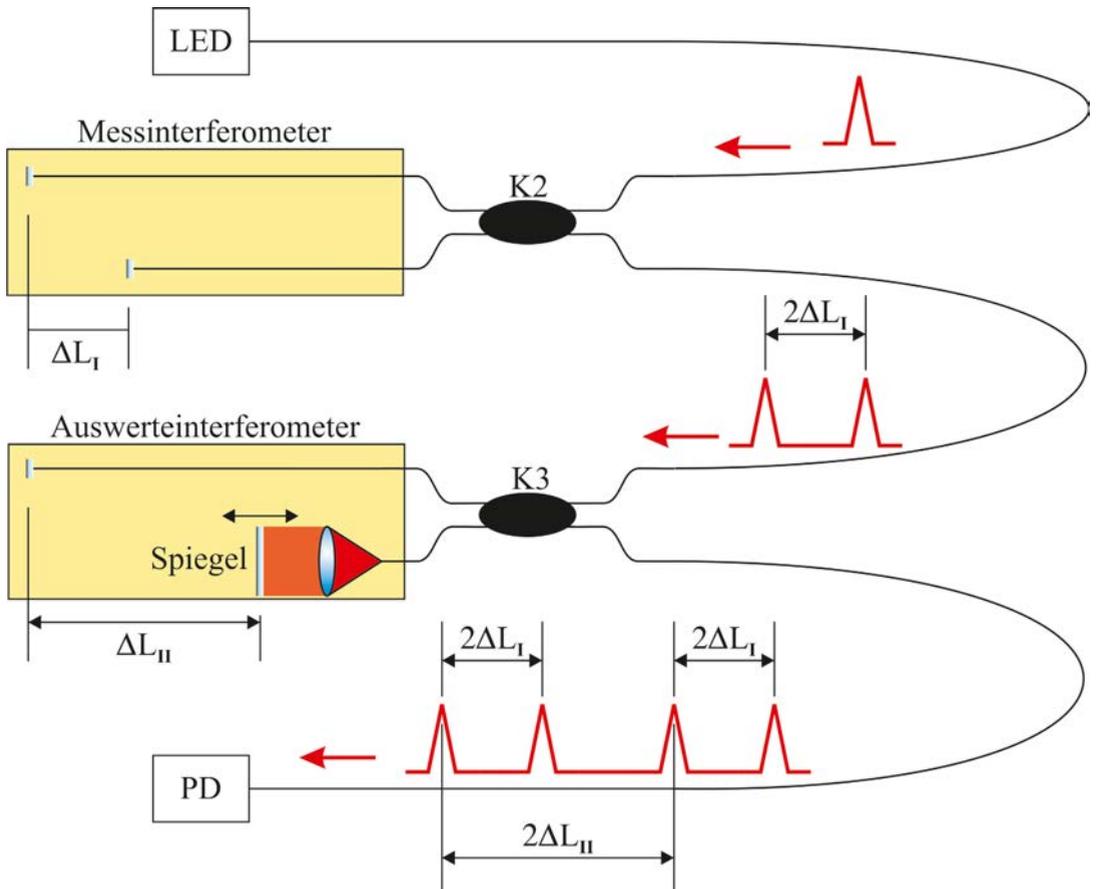


Abb. 6: Schematische Darstellung des Tandem - Interferometers mit nieder-kohärentem Licht einer LED (links) und die dabei entstehenden Signale (rechts)

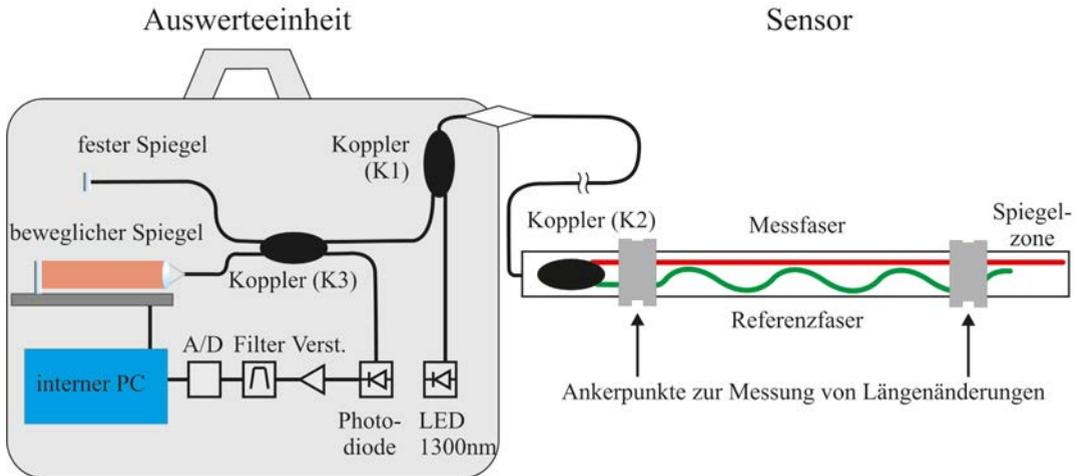


Abb. 7: Realisierung des Tandem-Interferometers als SOFO – Static von Smartec, [8]

ist ΔL_I der Wegunterschied beider Fasern im Messinterferometer I. Nun wird das Signal wieder von einem Koppler (K3) aufgespalten und breitet sich längs einer fixen Referenzfaser (verspiegelt) und eine Strecke, deren Länge variiert werden kann, aus, Abb. 6. An der Photodiode kann Interferenz nur durch einen Abgleich beider Signale entstehen (Variation von ΔL_{II} durch Verschiebung des Spiegels) und dann zur Messung der Distanz ΔL_I benutzt werden. Als Messsignal ergibt sich durch die Variation von ΔL_{II} ein Interferenzbild mit drei Spitzen für die Intensität. Die zentrale Spitze bedeutet, dass beide Arme im Auswerteferometer gleich lang sind ($\Delta L_{II} = 0$). Die seitlichen Spitzen entsprechen den Spiegelpositionen, wo die Längendifferenz im Auswerteferometer identisch ist mit der Längendifferenz im Messinterferometer ($\Delta L_{II} = \Delta L_I$). Der Vorteil der Verwendung von Interferometrie mit niedriger Kohärenz gegenüber Interferometrie mit hoher Kohärenz besteht darin, dass absolute Messungen möglich sind, denn die absolute Information trägt die Spindel des verschiebbaren Spiegels im Auswerteferometer. Daher ist es nicht erforderlich, eine permanente Verbindung zwischen Auswerteeinheit und Sensor aufrecht zu erhalten.

Wie bereits beschrieben, besteht jeder SOFO Sensor aus zwei Glasfasern, Abb. 7. Die vorgespannte Messfaser wird mit zwei Ankerpunkten am Messobjekt fixiert und folgt daher den Verformungen von z. B. einem Bauwerk. Zusätzlich ändern sich der Brechungsindex und die Länge dieser Faser aufgrund von Temperaturänderungen. Mit Hilfe der zweiten, losen Referenzfaser ist es möglich, diesen Temperatureinfluss automatisch zu kompensieren. Die Sensoren werden

von der Fa. Smartec gefertigt und sind mit Längen von bis zu 10 m verfügbar.

Die Tandemkonfiguration wird im SOFO - Static System von Smartec verwendet, siehe Abb. 7. Die motorgetriebene Verschiebung des Spiegels braucht etwa 6 s, was für statische Messungen ausreichend schnell ist. Das SOFO - Static wurde für Langzeitbeobachtungen konzipiert, wofür absolute Distanzänderungen gemessen werden können, auch wenn das Gerät zwischendurch abgeschaltet wird. Eine Längenänderung kann mit SOFO - Static mit einer Standardabweichung von $2 \mu\text{m}$ gemessen werden. Dieser Wert wurde in vielen Projekten erhärtet [8] und auch durch Labormessungen von IGMS bestätigt [9]. Damit ergibt sich z. B. für eine Sensorlänge von 5 m die relative Präzision von $4 \cdot 10^{-7}$. Mit der Verwendung eines faseroptischen Multiplexers können mehrere Sensoren sequentiell gemessen werden.

Für dynamische Messungen wurde von Smartec SOFO - Dynamic entwickelt [8]. Im Prinzip wird das Auswerteferometer durch ein Mach-Zehnder Interferometer ersetzt. Die Interferenz im MZI wird mit einem Phasenmodulator, der mit 50 kHz betrieben wird, erzeugt. Es können mehrere Sensoren simultan gemessen werden, indem das Licht der LED aufgespalten wird und jeder Sensor ein eigenes MZI hat. Laut Herstellerangabe kann mit dem SOFO - Dynamic eine Auflösung von 10 nm mit 1 kHz erreicht werden. Messungen im Labor und beim Feldeinsatz von IGMS haben diese Werte voll bestätigt und gezeigt, dass diese Angaben sogar als sehr konservativ einzuschätzen sind. Da die SOFO - Dynamic Auswerteeinheit jedoch die Referenzwerte verliert, wenn es vom SOFO Sensor getrennt

wird, kann es das SOFO - Static nicht ersetzen, sondern stellt eine wertvolle Ergänzung zu diesem dar.

3.2 Zwei Beispiele

An Hand von zwei Beispielen von eingebetteten SOFO Sensoren sollen deren Eigenschaften und Vorteile besprochen werden. Die beiden Beispiele zeigen auch die Verbindung mit der Ingenieurgeodäsie.

a) Betonplatte. Zur Erweiterung einer Straße im Gebirge wurde eine monolithische Hängebrücke gebaut. Die 150 m lange Betonplatte (ohne Dehnungsfugen) wird mit 30 Ortbetonpfählen mit dem felsigen Boden verbunden. Aufgrund der alpinen Lage der monolithischen Betondecke sind interne Temperaturänderungen zwischen Sommer und Winter von mehr als 40 K möglich. Bei freier Ausdehnung und geradem Straßenverlauf würde sich das Betondeck um ca. 7 cm ausdehnen. Dies würde Probleme, insbesondere im Übergangsbereich zwischen Hangbrücke und Straße, bringen, die durch wartungsintensive Arbeiten behoben werden müssten. Durch die Verankerung mit 30 Ortbetonpfählen und aufgrund des geschwungenen Trassenverlaufs sollten die Deformationen aber wesentlich geringer sein. Zur Untersuchung des tatsächlichen Verhaltens wurde ein Monitoringprogramm entworfen, das aus traditionellen geodätischen Messungen (Präzisionspolygonzug, Präzisionsnivellement), geotechnischen Messungen (Inklinometermessungen), faseroptischen Messungen (SOFO - Static) und Temperaturmessungen bestand [9], [10]. Die Bewegungen der gesamten Betonplatte sind kleiner als 5 mm im Beobachtungsintervall gemessen worden.

8 SOFO Sensoren von 5 m Länge wurden beim Bau der Betondecke einbetoniert. Die Anzahl der Sensoren war durch das Budget diktiert. Ein Sensor wurde schon bei der Fertigstellung der Brücke zerstört, zwei weitere Sensoren wurden seither unbrauchbar. 5 eingebettete SOFO Sensoren sind nach fünf Jahren noch voll nutzbar, wie kürzlich festgestellt werden konnte. Alle Messungen haben die Standardabweichung von 2 μ m für die SOFO - Static Messungen bestätigt.

b) Rutschhang. GPS Überwachungsmessungen am Rutschhang Gradenbach haben starke Beschleunigungen der Hangbewegung mit einem abrupten Stopp dieser Beschleunigungen gezeigt [11]. Dieses Phänomen tritt häufig bei tiefen Massenbewegungen auf und ist für die Vorhersage von Hangbewegungen besonders kritisch. Daher wird die Massenbewegung Gra-

denbach von der TU Wien (Prof.Dr. E. Brückl) auf Mikroseismik untersucht. Zusätzlich wurde von IGMS eine faseroptische Strainrosette in den Hang eingebettet. Die Strainrosette besteht aus drei SOFO Sensoren, die 5 m lang sind und einen Orientierungsunterschied von 120° haben. Die SOFO Sensoren wurden ungefähr 2 m unterhalb der Oberfläche eingegraben. Mit SOFO - Dynamic wurde ein umfangreicher Funktionstest der Strainrosette mit Hammerschlagseismik durchgeführt, wobei die erreichbare Auflösung für SOFO - Dynamic mit ungefähr 1 nm festgestellt wurde [11]. Mit SOFO - Static werden die lokalen Deformationen regelmäßig erfasst. Die Position der Strainrosette wird im GPS Netz mitbestimmt. Zusätzlich wurde im Bereich der Strainrosette ein lokales Monitoringnetz aufgebaut und dieses wird zu bestimmten Epochen mit terrestrischen geodätischen Messungen vermessen. Die neu entwickelte Strainrosette eignet sich auch mit großen Vorteilen für andere Monitoringaufgaben in der Geotechnik, siehe [11].

4. Die Rolle der ingenieurgeodätischen Messungen

Die beiden Projekte haben gezeigt, dass faseroptische Sensoren direkt in ein Bauwerk beim Bau eingebettet oder in ein bereits existierendes Objekt nachträglich eingebettet werden können. Die erreichbare Präzision dieser faseroptischen Messungen ist 2 μ m, also wesentlich höher als es mit geodätischen Messungen machbar ist. Aber die FOS geben nur sehr lokale Informationen, während die geodätischen Messungen globale Informationen über das Objekt liefern. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass die geodätischen Präzisionsmessungen meistens nur epochenweise ausgeführt werden, wogegen die faseroptischen Messungen kontinuierlich durchgeführt werden können.

Die Analyse der Monitoringmessungen führt auf die Parameterschätzung der hybriden geodätischen Messungen, die allerdings zeitlich und räumlich inhomogen vorliegen. Um nun auch die Messungen mit den eingebetteten faseroptischen Sensoren in die Parameterschätzung aufnehmen zu können, muss eine (geometrische) Verbindung zwischen diesen beiden Messsystemen hergestellt werden, wofür ein Modell des Objektes zu erstellen ist. Ein Finites Element Model (FEM) ist dafür bestens geeignet, wobei bestimmte Nodalpunkte des Modells mit den Endpunkten der SOFO Sensoren und den geodätischen Netzpunkten übereinstimmen sollten [9], [10]. Für die Berechnung mit dem FEM müssen Kräfte und Materialeigenschaften fest-

gelegt werden. Da diese im Allgemeinen nicht ausreichend bekannt sind, werden diese durch iterative Abstimmungen der FEM Berechnungen und der Parameterschätzung bestimmt.

Die externen geodätischen Messungen – auch wenn sie weniger präzise sind als die FOS Messungen – liefern eine wichtige Schranke für die internen Messungen mit eingebetteten FOS und den notwendigen Modellen, vor allem, um die Daten der beiden unterschiedlichen Messungen zu vereinen. Erst diese Kombination liefert neue Informationen über das Objekt und das Materialverhalten. Die angesprochene Berechnungsmethode wurde (erstmal) für die Auswertung der Messungen der monolithischen Betondecke entwickelt [9], [10]. Diese integrale und iterative Auswertemethode wird IAM bezeichnet [10].

5. Ein Paradigmenwechsel?

Dieses Kapitel möchte ich in der Ich-Form schreiben, um den persönlichen Charakter der zum ersten Mal vorgestellten Ansichten zu betonen.

In [12] wurde bereits ein „Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen“ besprochen. Es wurden die folgenden vier Wechselzonen erkannt: (1) Extraktion von Geometrie, (2) Kalibrierung eines Strukturmodells, (3) Zeit – kontinuierliche Aufgaben und (4) Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Die Frage stellt sich: Sind das bereits echte Paradigmen-

wechsel oder Weiterentwicklungen? Die Wechselzone (2) ist sehr eng verbunden mit den in diesem Beitrag vorstellten faseroptischen Messungen und der Modellierung der Messungen. Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings darin, dass die Messungen mit FOS mit eingebetteten Sensoren geschehen.

Die Messungen der heutigen Ingenieurgeodäsie mit dem beachtlichen Leistungsspektrum sind aber durch die Oberflächen der Erde und Objekte eingeschränkt. Daher umfassen auch die unbekannt Parameter der Parameterschätzung keine objektinternen Informationen, keine Kräfte und keine Materialeigenschaften. Wie im vorhergehenden Kapitel argumentiert wurde, ändert sich diese Situation durch die Hinzunahme der Messungen mit in ein Objekt eingebetteten Sensoren, siehe Abb. 8, wobei FOS große Vorteile bieten und bereits eine durchaus beachtliche Reife erreicht haben. Die Verbindung der klassischen ingenieurgeodätischen Messungen mit den Messungen mit eingebetteten FOS kann mit Hilfe eines FEM geschehen. Mit dem FEM werden das Verhalten der Objektstruktur und das Objektmaterial modelliert. Es führt schlussendlich auf die integrierte Analyse (IAM) aller Messungen, [9] und [10]. Damit verschwindet die bisherige Grenze der Ingenieurgeodäsie.

Jetzt möchte ich die Definition eines Paradigmas bringen, die von Thomas S. Kuhn [13]

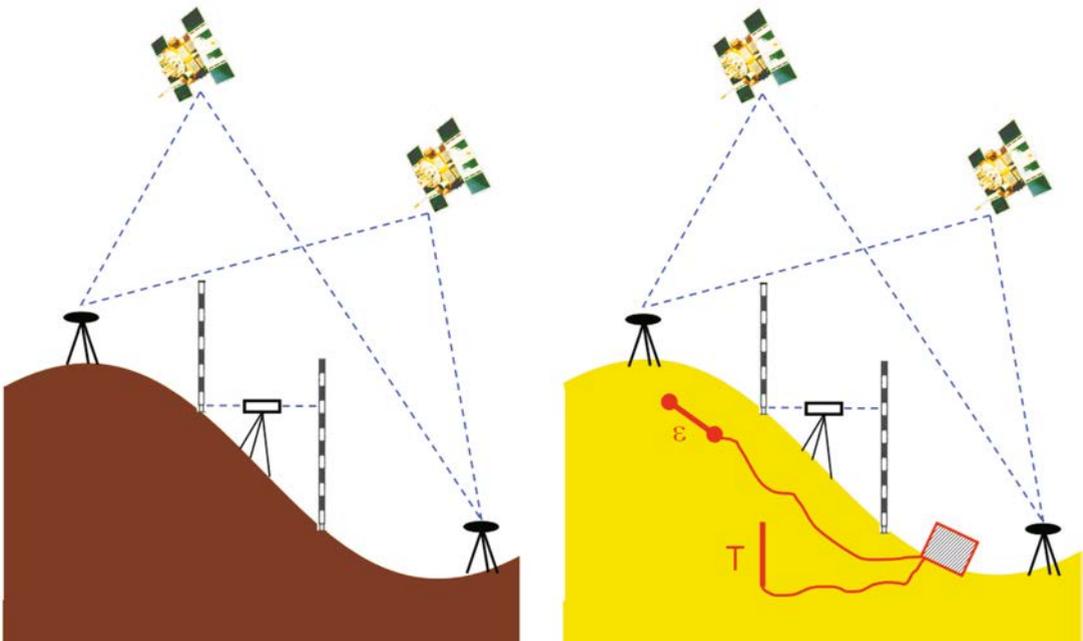


Abb. 8: Die Grenze der Erdoberfläche für ingenieurgeodätische Messungen (links) verschwindet durch die Verwendung von eingebetteten faseroptischen Messungen (rechts)

stammt. Er schreibt: „Unter Paradigma verstehe ich allgemein anerkannte wissenschaftliche Leistungen, die für eine gewisse Zeit einer Gemeinschaft von Fachleuten maßgebende Probleme und Lösungen liefern“ [13, Seite 10]. Die Ingenieurgeodäsie klassifiziere ich als angewandte Wissenschaft. Dann bedeutet das Fallen der Oberfläche als jahrtausend lange Grenze der Messungen und Informationen durch die Hinzunahme von Messungen mit in ein Objekt eingebetteten Sensoren einen echten Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie. Es würde unser Fachgebiet stärken und es noch intensiver mit den Bauingenieurwissenschaften verbinden. Ich möchte abschließend betonen, dass dafür noch weitere Forschungsarbeiten notwendig sind. Aber es wird sich lohnen.

Literaturverzeichnis

- [1] Wunderlich, T., Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit, *Öst. Z. f. Verm. & Geoinf.* 94 (2006): 50 – 62.
- [2] Inaudi, D., Glišić, B., Overview of Fiber Optic Sensing Technologies for Structural Monitoring, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 271 – 279.
- [3] Habel, W., Dantan, N., Hofmann, D., Krebber, K., Schallert, M., Ausgewählte Anwendungsbeispiele faseroptischer Sensoren im Ingenieurbau und in der Geotechnik, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 281 – 294.
- [4] López-Higuera, J.M. (Ed.), Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, John Wiley & Sons, Ltd (2002).
- [5] Measures, R.M., Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic Press (2001).
- [6] Thyagarajan K., Ghatak, A., Fiber Optic Essentials, John Wiley & Sons, Ltd (2007).
- [7] Woschitz, H., Entwicklung eines Rail Strain Pads unter Verwendung von Faser-Bragg Gitter Sensoren, In Wunderlich T. (Hg.) „Ingenieurvermessung 10“, Wichmann Verlag (2010): in Vorbereitung.
- [8] Glišić, B., Inaudi, D., Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, Ltd (2007).
- [9] Lienhart, W., Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Series "Engineering Geodesy – TU Graz", Shaker Verlag Deutschland (2007).
- [10] Lienhart, W., Brunner, F.K., Integrierte Auswertung von inhomogenen Überwachungsdaten am Beispiel einer monolithischen Brücke, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 295 – 309.
- [11] Brunner, F.K., Woschitz, H., Langarmige eingebettete Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges, 24. Christian Veder Kolloquium „Stabilisierung von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten“, Mitt. Gruppe Geotechnik, TU Graz, 35 (2009): 263-278.
- [12] Heunecke, O., Niemeier, W., Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen: Konzepte, Herausforderungen, Trends, In Ingensand H. (Hg.) „Ingenieurvermessung 04“, Verlag ETH Zürich (2004): 131 – 142.
- [13] Kuhn, S. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp Verlag (1976).

Anschrift des Autors

o.Univ.Prof.Dr. Fritz K. Brunner, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.
E-mail: fritz.brunner@tugraz.at

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Fritz K. Brunner

- 1943 Wien
- 1972 Promotion zum Dr.techn. an der TH Wien
- 1969-74 Hochschulassistent an der TH Wien
- 1974-82 Lecturer an der School of Surveying, University of New South Wales
- 1981 AvHumboldt-Stipendiat an der Universität Stuttgart
- 1982-86 Gruppenleiter bei Wild Heerbrugg AG, Schweiz
- 1986 Berufung als Professor und Direktor an die School of Surveying, University of New South Wales
- 1990 Verleihung der Friedrich Hopfner Medaille der Österreichischen Geodätischen Kommission
- 1992 DFG Gastprofessor an der UBW München
- 1994 Verleihung des AvHumboldt Forschungspreises
- 1994 Berufung als Professor für Ingenieurgeodäsie an die Technische Universität Graz
- 1995 Korrespondierendes Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission
- 1995-99 Präsident der Sektion 1 "Positioning" der IAG
- 2001-07 Präsident der Österreichischen Geodätischen Kommission 



Automationsgestützte Herleitung von 3D-Information aus hochauflösenden SAR-Bilddaten

Hannes Raggam, Roland Perko und
Karlheinz Gutjahr, Graz

Kurzfassung

Im Juni 2007 wurde die erste deutsche Raumfahrtmission TerraSAR-X gestartet. Dieser SAR-Sensor kann im Spotlight-Aufnahmemodus hochauflösende Bilddaten mit einer Bodenauflösung von 1 Meter aufnehmen, wobei die Aufnahme unter verschiedenen Aufnahmewinkeln erfolgen kann. Diese Umstände eröffnen neue Perspektiven zur Prozessierung von SAR-Stereo-Bildpaaren und versprechen in diesem Zusammenhang ein hohes Genauigkeitspotential. Im aktuellen Beitrag wird dieses Potential für ausgewählte Testgebiete und Fallbeispiele näher durchleuchtet. Die verwendeten Methoden zur Generierung von Oberflächenmodellen werden aufgezeigt und beispielhaft auf TerraSAR-X Stereodaten angewandt. Die erzielten Ergebnisse und erstellten Produkte werden durch Vergleich mit verfügbaren Referenzdaten validiert.

Schlüsselwörter: TerraSAR-X, Sensormodell, Genauigkeitsanalyse, Stereo-Radargrammetrie, Oberflächenmodell.

Abstract

In June 2007 the first German space mission TerraSAR-X was launched. In the Spotlight mode, this SAR sensor can acquire high-resolution image data at a pixel resolution of about 1 meter, moreover operating at different off-nadir viewing angles. These characteristics open new perspectives for SAR stereo data processing, proposing a high accuracy potential in this context. In this paper this potential is analyzed for selected test sites and test cases. The methods being used to generate surface models are presented and applied to TerraSAR-X stereo data sets. The achieved results as well as generated products are validated by comparison to available reference data.

Keywords: TerraSAR-X, sensor model, accuracy analysis, stereo-radargrammetry, surface model.

1. Einleitung

Die deutsche TerraSAR-X-Mission wurde im Juni 2007 gestartet. Mit diesem vielseitigen und hochauflösenden X-Band SAR-Sensor wurde quasi ein neues Zeitalter der SAR-Fernerkundung eröffnet. SAR-Bildprodukte können im ScanSAR-, Stripmap- und Spotlight-Modus aufgenommen werden, wobei letztere eine hohe Bildpunktauflösung von nominell 1 Meter bieten [1]. Aus geometrischer Sicht ist darüber hinaus die Möglichkeit, Bilddaten unter verschiedenen Off-Nadir-Blickwinkeln aufzunehmen, von Bedeutung.

Diese Umstände führten – zumindest am Institut für Digitale Bildverarbeitung – zu einer Wiederbelebung der Prozessierung von SAR-Stereobilddaten, da aus derartigen Bildpaaren berechtigterweise Genauigkeiten wie zuvor nie dagewesen erwartet werden können. Stereotaugliche Langzeit-SAR-Missionen vor der TerraSAR-X Ära waren lediglich die kanadische Radarsat- oder die europäische Envisat-Mission, welche allerdings Daten mit wesentlich schlechterer Bildpunktauflösung lieferten. Für erstere wurden im Rahmen des „Applications Development and Research Opportunity“-Programms der kanadischen Raumfahrtagentur entsprechende Stereo-Experimente durchgeführt [2].

Mittlerweile wurden auch zwei alternative SAR-Missionen mit vergleichbarer Charakteristik gestartet. Dies sind die italienische COSMO-SkyMed SAR-Mission¹⁾, im Rahmen welcher vier X-Band SAR-Sensoren simultan betrieben werden, sowie die kanadische Radarsat-2-Mission²⁾ mit einem C-Band SAR und einer Bildpunktauflösung von bis zu 3 Metern.

Die Stereo-Radargrammetrie ist ein traditionelles Betätigungsfeld am Institut. Demzufolge wurden auch für TerraSAR-X entsprechende Untersuchungen hinsichtlich des Stereo-Potentials dieser Daten lanciert. Im Rahmen der Beteiligung am „Science-Programm“ des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurden TerraSAR-X Daten für ausgewählte, vorwiegend österreichische Testgebiete akquiriert. Im gegenständlichen Rahmen werden hiervon ausgewählte Daten von 2 Testgebieten verwendet, um die 2D- wie auch die 3D-Geolokalisierungsgenauigkeit von TerraSAR-X Daten zu untersuchen. Beispiele zur 3D-Rekonstruktion und Generierung von Oberflächenmodellen aus unterschiedlichen Stereo-Dispositionen werden aufgezeigt. Neben

1) Homepage of COSMO-SkyMed: <http://www.cosmo-skymed.it>

2) Homepage of Radarsat-2: <http://www.radarsat2.info>

der Stereodaten-Prozessierung wird in den gegenständlichen Untersuchungen auch die Möglichkeit der Verwendung von mehr als einem Bildpaar zur 3D-Rekonstruktion sowie der damit verbundene Benefit aufgezeigt. Eine Validierung der generierten Oberflächenmodelle wurde durch visuellen und ansatzweise durch numerischen Vergleich mit den verfügbaren Referenzdaten durchgeführt.

2. Testgebiete, Testdaten und Referenzdaten

2.1 TerraSAR-X Bilddaten

Für einige ausgewählte österreichische Testgebiete wurden verschiedene TerraSAR-X Bilddaten im Spotlight-Modus bestellt. Hierbei war ein Fokus auf bewaldete Gebiete und Waldanwendungen ausgerichtet. Generell können im Spotlight-Modus Bild-Triplets, also drei unter unterschiedlichen Off-Nadir-Aufnahmewinkeln aufgenommene Szenen im „Full-Performance-Range“ akquiriert werden. Eine schematische Darstellung eines derartigen Aufnahmeszenarios zeigt Abbildung 1. Im gegenständlichen Zusammenhang werden die nachstehend beschriebenen Testgebiete und Testdatensätze verwendet.

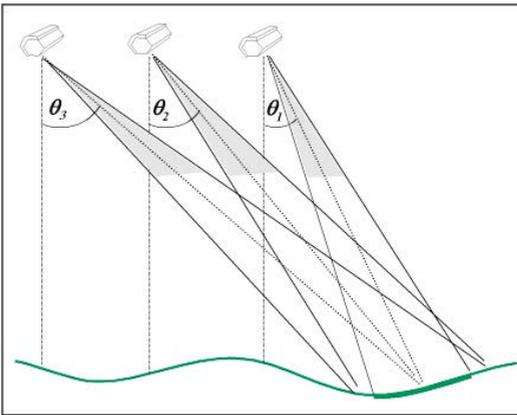


Abb. 1: Aufnahmeszenario der TerraSAR-X Spotlight-Daten

Testgebiet „Burgau“: Dieses ländliche Gebiet deckt landwirtschaftliche wie auch bewaldete Flächen ab und zeigt flaches und leicht hügeliges Gelände mit Geländehöhen im Bereich von 270 bis 445 Metern. Für diese Untersuchungen wurden ein Triplet von MGD-Produkten (multi-look ground range detected) aus dem Zeitraum März 2008 sowie ein Triplet von SSC-Produkten (single-look slant-range complex), aus dem Zeitraum Juni 2008 verwendet.

Die Bilddaten wurden vom aufsteigenden (ascending/ASC) Orbit aufgenommen und die

Zuordnung zu den unterschiedlichen Off-Nadir-Blickwinkeln erfolgt in weiterer Folge durch die Bezeichnungen ASC1, ASC2 und ASC3. Ein Anaglyphenbild in Form einer Überlagerung der SSC-Szenen ASC3 und ASC1 in rot bzw. grün zeigt die Abbildung 2.



Abb. 2: TerraSAR-X SSC Anaglyphenbild (Burgau)

Testgebiet „Baernbach“: Dieses Gebiet zeigt eine bergige Charakteristik mit Geländehöhen im Bereich von 430 bis 1150 Metern. Es umfasst ländliche Bereiche mit ausgedehnter Waldbedeckung. Das Testgebiet wurde im Jänner 2008 von schweren Sturmschäden erfasst und wurde u.a. aus diesem Grund heraus ausgewählt. Jeweils drei MGD Spotlight-Szenen wurden vom aufsteigenden wie auch vom absteigenden (descending/DSC) Orbit im Zeitraum Oktober 2008 akquiriert. Diese beiden Triplets werden in weiterer Folge mit ASC1, ASC2 und ASC3 bzw. DSC1, DSC2 und DSC3 den unterschiedlichen Off-Nadir-Blickwinkeln zugeordnet. Ein Anaglyphenbild in Form einer Überlagerung der MGD-Szenen ASC3 und ASC1 in rot bzw. grün zeigt die Abbildung 3.

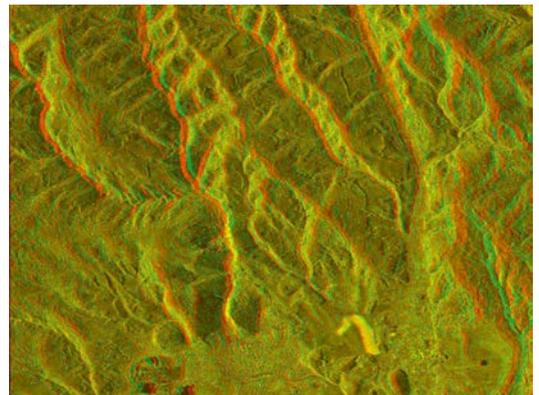


Abb. 3: TerraSAR-X MGD Anaglyphenbild (Baernbach)

Sämtliche Bildprodukte wurden mit dem „Science-Orbit“, also der genauesten verfügbaren Flugbahn-Information bestellt.

2.2 Passpunkte

Eine Reihe von lage- und höhenmäßig verteilten Passpunkten (GCPs) wurde für die beiden Testgebiete gemessen, um

- die Qualität der initialen TerraSAR-X Sensormodelle zu validieren,
- diese Sensormodelle durch Least-Squares Ausgleichsverfahren zu verbessern bzw. adaptieren und
- die aus Stereopaaren oder Triplets erzielbare 3D-Genauigkeit zu analysieren.

Die Lagekoordinaten der Passpunkte wurden aus Ortho-Photos (Pixelgröße 1 Meter) gemessen, während die Höhen aus dem für diese Zwecke verfügbaren BEV-Höhenmodell (Maschenweite 10 Meter) abgegriffen wurden. Natürliche Objekte wie Straßenkreuzungen, Wasserflächen oder Feldgrenzen wurden als Passpunkte verwendet. Wie in Abbildung 4 anhand einer Straßenkreuzung gezeigt wird, sind solche Objekte weder im TerraSAR-X Bild noch im Referenz-Ortho-Photo pixelgenau lokalisierbar und es kann durchaus mit einer Lokalisierungsunsicherheit in der Größenordnung von 1 bis 2 Pixel gerechnet werden. Weiters ist zu bedenken, dass auch weder die Ortho-Photos noch das Referenz-DHM absolut lage- bzw. höhengenaue sind und auch hier durchaus der eine oder andere Meter an Passpunkt-Ungenauigkeit induziert werden kann.

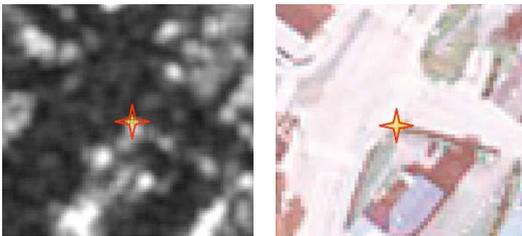


Abb. 4: Passpunktmessung an einer Straßenkreuzung im TerraSAR-X Bild (links) und im Ortho-Photo (rechts)

3. Validierung und Optimierung des TerraSAR-X Sensormodells

3.1 TerraSAR-X Sensormodell

Ein gängiger Ansatz zur Abschätzung der Geolokalisierungs-genauigkeit besteht in der Berechnung von Punktresiduen der Azimut- und Range-Bildkoordinaten (in und quer zur Flugrichtung) mittels einer Rückwärtstransformation der zuge-

hörigen Kartenkoordinaten. Für diese Transformation wird das aktuelle physikalische Sensormodell verwendet. Das seitens des Instituts für Digitale Bildverarbeitung implementierte Sensormodell basiert auf den gängigen Range- und Dopplergleichungen [3]. In diese mussten den Spezifikationen des DLR folgend einige TerraSAR-X spezifische Notwendigkeiten eingearbeitet werden, wie zum Beispiel die Berücksichtigung der atmosphären-bedingten Verzögerungen für die Laufzeitmessungen sowie die Verwendung von Polynomen bis zur 5. Ordnung zur Konvertierung von SAR-Schrägdistanzen auf Grunddistanzpixel (slant-to-ground-range). Die Stimmigkeit mit dem seitens des TMSP-Prozessors des DLR vorgegebenen Sensormodell wurde anhand eines mit den Daten mitgelieferten Kontrollpunktgitters [1] geprüft und ergab eine Übereinstimmung im verschwindenden Subpixel-Bereich.

Dies ist auch eine Grundvoraussetzung für die Rolle des Instituts im Rahmen des kommerziellen Vertriebs von TerraSAR-X Produkten seitens Infoterra Deutschland, für welchen das Institut Software zur Generierung sogenannter wertveredelter (value-added) TerraSAR-X Produkte beisteuert [4].

3.2 A-priori Geolokalisierungs-genauigkeit

Seitens des DLR gibt es eine Untersuchung mittels Corner-Reflektoren, welche naturgemäß eine hohe Identifizier- und Messgenauigkeit im SAR-Bild garantieren [5]. In dieser wird die Geolokalisierungs-genauigkeit für TerraSAR-X Spotlight-Produkte in der Größenordnung von weniger als einem Meter angegeben.

Für die Abschätzung der Geolokalisierungs-genauigkeit der vorliegenden Testdaten mussten natürliche Objekte verwendet werden. In der Regel wurden mehr als 20 Passpunkte gemessen. Für die verwendeten Testdaten sind die RMS-Werte und Mittelwerte der mit dem initialen Sensormodell errechneten Azimut- und Range-Punktresiduen in der Tabelle 1 zusammengefasst. Auf den ersten Blick übersteigen die über die RMS-Werte interpretierbaren Lagegenauigkeiten die Angaben des DLR. Die initialen RMS-Werte sind in der Größenordnung von einem bis zu 3 Pixel, und im Falle der DSC-Daten von „Baernbach“ sogar bis zu 6 Pixel. Darüber hinaus ist aus den Mittelwerten der Residuen ein erheblicher systematischer Fehleranteil mit einer ähnlichen Streuung abzulesen. In früheren Untersuchungen mit anderen Testgebieten und Daten konnten ähnliche Effekte beobachtet werden [6].

Zum einen können diese Punktlagefehler durch die Ungenauigkeiten der für die Passpunktmes-
sungen verwendeten Referenzdaten hervorgerufen
werden worauf beispielsweise die relativ kon-
stanten Residuen-Mittelwerte der Burgau-SSC
Daten schließen ließen. Die Streuung der RMS-
und Mittelwert-Residuen der Baernbach-Daten
legt aber zusätzlich den Verdacht nahe, dass
auch die Sensormodelle dieser Daten nicht im-
mer den DLR-Genauigkeitsspezifikationen ent-
sprechen und diese insbesondere bei der Auf-
nahme der DSC-Daten nicht erfüllt sind.

3.3 Modell-Optimierung

Ein Least-Squares Parameterausgleich wurde auf
die TerraSAR-X Sensormodelle angewandt, um
diese zu optimieren bzw. mit den Referenzdaten
konsistent zu machen. Untersuchungen haben
hierbei ergeben, dass der Ausgleich auf die Azi-
mut- und Rangeparameter eingeschränkt werden
kann, während der „Science-Orbit“ ausreichend
genau scheint. Für SSC-Produkte umfassen die-
se Parameter lineare Beziehungen zwischen den
physikalischen Zeitmessungen in Azimut/Range
sowie den Spalten/Zeilen-Pixelkoordinaten, also
je 2 bzw. in Summe 4 Parameter für den Para-
meterausgleich. Für MGD-Produkte ist hingegen
ein Polynom 5. Ordnung, also 6 Parameter, für
die Konvertierung der Range-Laufzeitmessung
in eine Pixelcoordinate zu berücksichtigen, was
in 8 auszugleichenden Parametern resultiert.

Durch den Parameterausgleich werden zumin-
dest allfällige systematische Fehler des Sensor-
modells eliminiert. Die RMS-Werte, der sich nach
dem Ausgleich (a-posteriori) ergebenden Punkt-
residuen, sind ebenfalls in der Tabelle 1 ange-
führt. Diese sind nunmehr in Azimut wie auch in
Range in der Größenordnung eines Pixels. Hier

erschöpfen sich auch die Genauigkeitsaussagen
bedingt durch die generelle Lokalisierungs- und
Mess-ungenauigkeit der Passpunkte.

In diversen Ausgleichs-Experimenten wurde
auch festgestellt, dass die SSC-Produkte be-
dingt durch die Einschränkung auf 4 auszuglei-
chende Parameter ein sehr robustes Verhalten
zeigen, was den Passpunktbedarf deutlich senkt.
Im Gegensatz dazu zeigen die MGD-Produkte
und das für diese auszugleichende Polynom 5.
Ordnung ein sehr instabiles Verhalten, welches
die Verfügbarkeit einer ausreichend großen und
speziell in Range-Richtung ausgewogen verteil-
ten Anzahl von Passpunkten erfordert.

4. Abschätzung des 3D-Genauigkeits- potentials

Die Passpunkte wurden grundsätzlich in 2 oder 3
Bildern der Triplets gemessen. Aus diesen Mes-
sungen können mittels eines auf Least-Squares
beruhenden räumlichen Vorwärtsschnitts die
Boden-(Karten-)Koordinaten berechnet werden.
3D Punktresiduen ergeben sich in weiterer Folge
im Vergleich zu den gemessenen Kartenkoordin-
aten. Dies wurde für die einzelnen Stereo-Mo-
delle wie auch für die Triplets der verwendeten
Datensätze gemacht. Die RMS-Werte der für
Ost-, Nord- und Höhenkoordinaten resultieren-
den Punktresiduen sind in Tabelle 2 zusammen-
gefasst. Weiters ist in der Tabelle der jeweilige
Stereo-Schnittwinkel bzw. das „Winkel-Spektrum“
als maßgeblicher Parameter angeführt.

Die RMS-Werte können als Repräsentativwer-
te für die mittels TerraSAR-X Stereo-Bildpaaren
oder Triplets erreichbare 3D Rekonstruktions-
genauigkeit angesehen werden und führen zu
folgenden Rückschlüssen:

Testdaten	Szene	Off-Nadir (Θ)	Pixel- Größe (m)	GCPs	RMS initial		Mw initial		RMS opt.	
					Az	Rg	Az	Rg	Az	Rg
Burgau MGD	ASC1	22.4°	1.25	23	1.04	2.03	-0.50	0.40	0.81	1.18
	ASC2	37.3°	1.50	23	1.34	1.61	-0.87	-0.43	1.02	1.02
	ASC3	48.6°	1.50	23	1.00	1.53	-0.34	-0.48	0.78	0.71
Burgau SSC	ASC1	22.2°	—	22	0.94	1.38	-0.17	-0.86	0.75	0.82
	ASC2	37.2°	—	22	0.85	1.79	-0.16	-1.56	0.68	0.68
	ASC3	48.5°	—	22	1.08	3.03	-0.17	-0.86	0.85	0.64
Baernbach MGD ASC	ASC1	30.5°	0.75	34	1.51	2.20	-0.56	1.27	0.98	1.28
	ASC2	43.5°	0.75	46	2.15	2.08	-0.08	0.78	1.01	1.09
	ASC3	53.2°	0.75	46	1.71	1.90	-0.77	-1.08	0.78	0.80
Baernbach MGD DSC	DSC1	28.9°	1.00	26	1.62	6.58	-1.30	6.20	0.93	0.83
	DSC2	42.3°	0.75	32	0.87	5.64	0.34	5.49	0.67	1.04
	DSC3	52.3°	0.75	36	1.15	5.12	0.57	4.97	0.97	0.93

Tabelle 1: A-priori und a-posteriori-Analyse der 2D-Geolokalisierungsgenauigkeit der TerraSAR-X Spotlight-Daten

Testdaten	Modell/Triplett	Stereo-Schnittwinkel $\Delta\theta$ (°)	GCPs	RMS (m)			
				Ost	Nord	Höhe	I3DI
Burgau MGD	ASC1 – ASC2	14.9	20	3.06	1.12	1.55	3.61
	ASC2 – ASC3	11.3	23	3.79	1.03	3.65	5.37
	ASC1 – ASC3	26.2	20	1.63	0.94	1.06	2.17
	ASC Triplett	14.9 + 11.3	23	1.50	0.86	1.07	2.03
Burgau SSC	ASC1 – ASC2	15.0	22	1.78	1.65	1.33	2.77
	ASC2 – ASC3	11.3	22	3.08	1.92	2.98	4.69
	ASC1 – ASC3	26.3	22	1.42	1.71	1.30	2.57
	ASC Triplett	15.0 + 11.3	22	1.31	1.61	1.33	2.46
Baernbach MGD ASC	ASC1 – ASC2	15.0	34	1.98	0.70	1.38	2.34
	ASC2 – ASC3	11.3	46	2.37	0.62	2.79	3.71
	ASC1 – ASC3	26.3	34	1.13	0.47	1.03	1.61
	ASC Triplett	15.0 + 11.3	44	1.33	0.51	1.30	1.93
Baernbach MGD DSC	DSC1 – DSC2	13.4	25	1.50	0.48	0.99	1.86
	DSC2 – DSC3	10.0	32	2.01	0.64	2.23	3.07
	DSC1 – DSC3	23.4	26	1.18	0.60	0.83	1.56
	DSC Triplett	13.4 + 10.0	31	1.41	0.46	1.39	2.03

Tabelle 2: Ergebnisse der 3D-Genauigkeitsanalyse der TerraSAR-X Spotlight-Daten

- Die 3D Geolokalisierungsgenauigkeit steigt generell mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel und ist demzufolge für die Bildpaare, welche sich aus den Bildern ASC1/ASC3 bzw. DSC1/DSC3 zusammensetzen und den größten Stereo-Schnittwinkel abdecken, am höchsten.
- Für diese Stereo-Paare sind die individuellen RMS-Fehler in der Größenordnung von bis zu 1.5 Metern, und jene der Residuenlängen in der Größenordnung von 2 bis 2.5 Metern.
- Für kleine Stereo-Schnittwinkel, wie zum Beispiel etwas über 10 Grad für die ASC2/ASC3-Bildpaare, ist die 3D Geolokalisierungsgenauigkeit deutlich schlechter und führt zu RMS-Punktresiduen bis zu 5 Metern.
- Die Bild-Triplets decken den gleichen Off-Nadir-Winkelbereich wie die Stereopaare ASC1/ASC3 bzw. DSC1/DSC3 ab und ergeben demzufolge auch in etwa die gleiche Geolokalisierungsgenauigkeit.

Grundsätzlich sind diese prognostizierten Genauigkeiten durchaus akzeptabel, insbesondere wenn man die Sensitivität eines Fehlers in der Range-Bildkoordinate berücksichtigt. Ein solcher führt generell zu einem Fehler der Schrägdistanz und weiterführend zu einem Range-Versatz Δr . Wie bereits von anderen Autoren, wie z.B. [7], aufgezeigt, schlägt sich ein solcher Fehler nach

folgenden Beziehungen in einem entsprechenden Lagefehler Δp und einem Höhenfehler Δh wie folgt zu Buche:

$$\Delta p = \Delta r \cdot \cos \Theta_1 / \sin \Delta \theta$$

$$\Delta h = \Delta r \cdot \sin \Theta_1 / \sin \Delta \theta$$

Es ist offensichtlich, dass bei einem kleinen Stereo-Schnittwinkel $\Delta \theta$ auch der Nenner dieser Beziehungen klein wird und resultierende Lage- und Höhenfehler unmittelbar ein Vielfaches eines Schrägdistanzfehlers Δr ausmachen können.

5. Methoden zur Oberflächenrekonstruktion

5.1 Prozessierung von Stereo-Daten

Basierend auf den physikalischen Sensormodellen für die TerraSAR-X Bilddaten werden in der Regel die folgenden Prozessierungsschritte zur Erstellung eines Oberflächenmodells aus Stereo-Bildpaaren angewandt:

- **Grobregistrierung** eines der beiden Bilder in Bezug auf seinen Stereo-Partner.
- **Bild-Matching** (oder Bild-Korrelation) zum automatischen Auffinden einander entsprechender Bildpunkte.
- **Räumlicher Vorwärtsschnitt** zur Berechnung der zugehörigen Bodenkoordinaten.
- **Oberflächenmodell-Erstellung** durch Interpolation eines regelmäßigen Höhenrasters aus den errechneten Bodenkoordinaten.

5.2 Bild-Matching

Ein gängiges Matching-Kriterium basiert auf dem Kreuzkorrelations-Koeffizienten. Dieses wurde auch für die gegenständlichen Untersuchungen in einer erweiterten Form angewandt. Dem Matching liegt ein hierarchischer Algorithmus basierend auf einer Bildpyramide [8,9] mit den folgenden Prozessierungsschritten zu Grunde: (1) Prädiktion mittels der Sensormodelle und einem groben Höhenmodell (z.B. SRTM); (2) Normalisierte Kreuzkorrelation im reduzierten Suchbereich sowie Subpixel-Interpolation; (3) Elimination von Ausreißern; (4) Interpolation für diese Bereiche und (5) Übertragung der Matching-Ergebnisse auf die nächste Pyramidenebene.

5.3 Verwendung von mehreren Matching-Ergebnissen

Am Institut für Digitale Bildverarbeitung wurden ursprünglich für optische Daten Methoden für den räumlichen Vorwärtsschnitt entwickelt, welche auch mehr als ein Matching-Ergebnis verwenden können [10]. Diese wurden nunmehr für SAR-Bilddaten adaptiert und sind von Relevanz, wenn eine Abdeckung durch mehr als zwei Bilder vorliegt, wie es für die gegenständlichen Testdatensätze auch der Fall ist. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass für das Matching "benachbarte" Bildpaare verwendet werden können, welche üblicherweise die größte Ähnlichkeit haben, was eine optimale Matching-Performance garantiert. Die Mehrfach-Matching-Ergebnisse werden in weiterer Folge im räumlichen Vorwärtsschnitt quasi zusammengeführt, decken dadurch ein erweitertes Schnittwinkel-Spektrum ab und garantieren somit auch beste geometrische Robustheit für die Berechnung der Bodenkoordinaten.

Durch die erhöhte Überbestimmung des Vorwärtsschnitts besteht auch die Möglichkeit, fehlerhafte Matching-Ergebnisse in der angewandten Least-Squares Methode zu erkennen und zu eliminieren. Die dadurch entstehenden Lücken können bei Bedarf durch geeignete Interpolationsverfahren im Zuge der Oberflächenmodell-Generierung wieder aufgefüllt werden.

5.4 Ascending/Descending Oberflächenmodellfusionierung

In bergigem Gelände zeigen SAR-Bilddaten in Abhängigkeit des Blickwinkels vielfach reduzierten Informationsgehalt durch die SAR-spezifischen Abbildungseffekte der Pixel-Kompression (foreshortening), der Pixel-Überlagerung (layover) oder der Abschattung (shadow). Dies sind

speziell Bereiche, wo das Bild-Matching versagt und vermehrt fehlerhaft agiert. Resultierende Oberflächenmodelle sind demnach in diesen Bereichen ebenfalls fehlerhaft oder zumindest lückenhaft, falls die Matching-Fehler im Zuge des Vorwärtsschnittes eliminiert werden können.

Die Verwendung von Bilddaten des „ascending“ und des „descending“ Orbits sowie die Fusionierung von daraus hergeleiteten Oberflächenmodellen kann zu einem Gutteil Abhilfe schaffen. Die Grundidee hierbei ist, die fehler- und lückenhaften Bereiche eines dieser Oberflächenmodelle durch die allenfalls vorhandene Höheninformation des anderen Oberflächenmodells zu ersetzen. In dem am Institut für Digitale Bildverarbeitung verwendeten Ansatz wird als Fusionierungskriterium vorzugsweise das Maximum des lokalen SAR-Einfallswinkels verwendet, welches in der Regel die Information der dem Sensor jeweils abgewandten Hänge (Back-Slopes) priorisiert.

Anzumerken ist auch, dass trotz dieser Fusionierung steile (vertikale) Oberflächenstrukturen, wie z.B. Waldränder oder Gebäudefassaden, und deren unmittelbare Umgebung Problemzonen darstellen. Für eine Blickrichtung besteht hier der Layover-Effekt und für die andere der Shadow-Effekt. Somit kann für solche sensible Bereiche aus keinem der beiden Datensätze eine sinnvolle 3D-Information hergeleitet werden.

6. Erstellung von Oberflächenmodellen

Die vorhin skizzierten Methoden zur Oberflächenrekonstruktion wurden auf die Daten der beiden Testgebiete angewandt. Für die einzelnen Stereo-Bildpaare wurde zunächst das Matching durchgeführt, und die Matching-Ergebnisse von einzelnen wie auch von Mehrfach-Bildpaaren dem räumlichen Vorwärtsschnitt wie im vorigen Abschnitt aufgezeigt unterworfen. Im Zuge dessen wurden unzuverlässige bzw. unstimmmige Matching-Ergebnisse durch Berücksichtigung relativ strenger Residuen-Schwellwerte innerhalb der Least-Squares Berechnung der Bodenkoordinaten verworfen.

Die Tabelle 3 zeigt den Prozentsatz der verworfenen Punkte für sämtliche prozessierten Stereo-Paare und Bild-Triplets. Die numerischen Werte bestätigen zunächst, dass die Zuverlässigkeit des Matching mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel abnimmt, da für das Bildpaar 1-3 weitgehend die meisten Punkte verworfen werden. Das entspricht der grundsätzlichen Erwartungshaltung, da die geometrische Ähnlichkeit der Bildpaare und damit die Matching-Perfor-

mance grundsätzlich mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel abnehmen. Eine Ausnahme bildet der MGD-Datensatz des Testgebietes „Burgau“. Bei diesem zeigt das Bild ASC2 in Vergleich zu den Bildern ASC1 und ASC3 radiometrische Unterschiede, welche offensichtlich die Qualität der Matching-Ergebnisse der Bildpaare 1-2 bzw. 2-3 erheblich degradieren. Im Gegensatz dazu zeigt der SSC-Datensatz beispielsweise eine deutlich homogenere Radiometrie, und damit verbunden einen sehr niedrigen Prozentsatz verworfener Punkte im Bild-Triplett. Grundsätzlich ist zu sehen, dass durch die Verwendung der Matching-Ergebnisse des Triplets eine deutliche Optimierung, sprich Reduktion der verworfenen Punkte, erzielt werden kann.

Weiters fällt auf, dass in den Bildpaaren 1-2 und 1-3 des DSC-Datensatzes von „Baernbach“ ein sehr hoher Prozentsatz von Matching-Ergebnissen verworfen wird. Hier zeigt das Bild DSC1 deutlich stärkere abbildungsspezifische und topographiebedingte Bildverzerrungen als die anderen Bilder, welche auf das Zusammenspiel von kleinem Off-Nadir-Winkel und ungünstiger (schräge) Exposition des Geländes in Bezug zum TerraSAR-X-Sensor zurückzuführen ist.

Testdatensatz	Stereomodell			Triplett
	1-2	2-3	1-3	1-2-3
Burgau MGD	39.2	29.6	31.1	19.3
Burgau SSC	26.3	24.0	30.3	7.0
Baernbach ASC	35.6	33.9	37.3	16.8
Baernbach DSC	53.9	29.8	58.0	18.8

Tabelle 3: Prozentsatz der im räumlichen Vorwärtsschnitt verworfenen Punkte

In weiterer Folge wurden aus den Ergebnissen des räumlichen Vorwärtsschnittes Oberflächenmodelle mit einer Ausgabe-Pixelgröße von 2 Metern erstellt. Abbildung 5 zeigt die aus den drei Stereomodell-Kombinationen des SSC-Datensatzes von „Burgau“ generierten Oberflächenmodelle in grauwert-kodierter Darstellung, wobei hier die durch Punktverwerfung entstehenden „Löcher“ beibehalten wurden. Der Zusammenhang zwischen Stereo-Schnittwinkel und Anteil der verworfenen Punkte, d.h. der schwarzen Oberflächenmodellbereiche, wird hier visuell klar verdeutlicht.

Ein aus dem Bildpaar ASC2-ASC3, welches die beste Matching-Performance zeigt, hergeleitetes Oberflächenmodell, in welchem diese Löcher aufgefüllt wurden, ist in Abbildung 6 (links) dargestellt. Alternativ zeigt diese Abbildung in der mittleren und rechten Illustration das aus

dem Bild-Triplett hergeleitete Oberflächenmodell, einerseits noch mit Löchern behaftet und andererseits nach Interpolation dieser Löcher. Wie zu sehen ist, resultiert aus dieser Konstellation ein wesentlich geringerer Anteil an verworfenen Punkten mit der Folge, dass eine Interpolation der nunmehr vergleichsweise kleinen Lücken vertrauenswürdiger möglich ist. Weiters zeigt das zuiinterpolierte Oberflächenmodell wesentlich weniger Rauschen als das aus dem Stereomodell hergeleitete Oberflächenmodell. Dies belegt über die Tabelle 3 hinaus die Sinnhaftigkeit der Verwendung von mehr als zwei Bildern zur 3D Rekonstruktion und bestätigt, dass unter solchen Rahmenbedingungen fehlerhafte Matching-Ergebnisse doch zu einem erheblichen Anteil erkannt und eliminiert werden können.

Für das Testgebiet „Baernbach“ wurden zunächst in adäquater Weise Oberflächenmodelle aus den Stereo-Bildpaaren bzw. den Bild-Triplets der Bilder des aufsteigenden bzw. des absteigenden Orbits erstellt. Für die aus den Stereo-Bildpaaren hergeleiteten Oberflächenmodelle gilt grundsätzlich bereits vorhin Gesagtes: Die Matching-Performance nimmt mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel ab und damit der Anteil der im räumlichen Vorwärtsschnitt verworfenen Punkte zu. Zusätzlich spielt für hier auch die bergige Charakteristik dieses Testgebiets eine Rolle. Fehlerhafte Matching-Ergebnisse bzw. daraus resultierende Lücken des Oberflächenmodells treten verstärkt auf den „Foreslopes“, also den dem Sensor zugeneigten Hängen auf, wo die SAR-Abbildungseffekte des „Foreshortening“ bzw. des „Layover“ hineinspielen.

Die aus den Bild-Triplets des aufsteigenden bzw. des absteigenden Orbits hergeleiteten Oberflächenmodelle sind in Abbildung 7 dargestellt. Diese sind noch mit den durch die Punktelimination bedingten Lücken behaftet, welche relativ ausgedehnte Bereiche repräsentieren und dem oben Gesagten folgend vornehmlich an den west-exponierten Hängen im Falle des aufsteigenden und an den ost-exponierten Hängen im Falle des absteigenden Orbits auftreten. Mit dem in Abschnitt 5.4 skizzierten Ansatz wurden diese beiden Produkte fusioniert. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 (links) dargestellt und zeigt, dass die relativ großen Lücken der beiden Oberflächenmodelle durch Einfügen von Höheninformation des jeweils anderen Modells drastisch reduziert werden können. Eine Interpolation dieser Bereiche ist weitgehend unproblematisch und führt zu dem in Abbildung 8 (rechts) dargestellten Ergebnis.

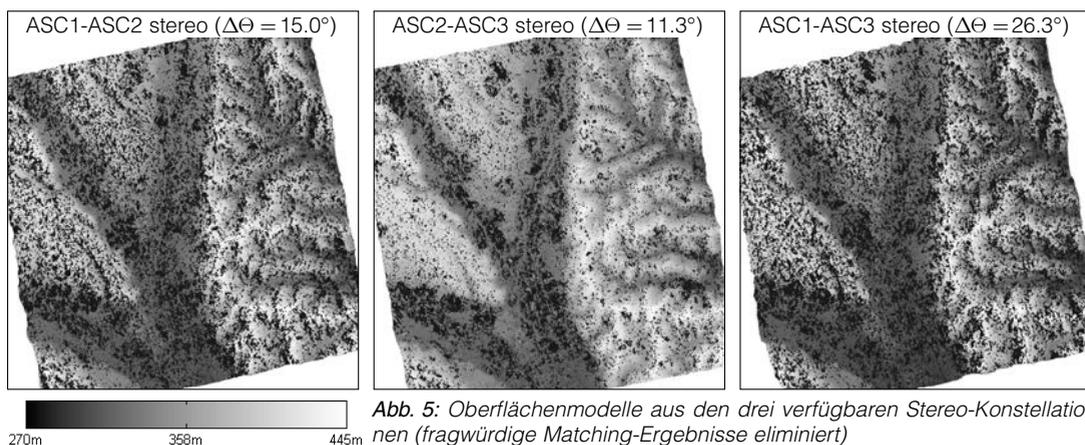


Abb. 5: Oberflächenmodelle aus den drei verfügbaren Stereo-Konstellationen (fragwürdige Matching-Ergebnisse eliminiert)

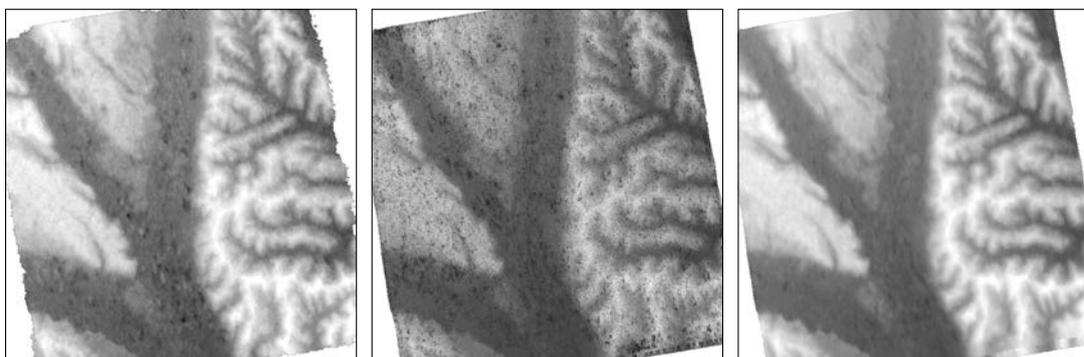


Abb. 6: Oberflächenmodelle aus Stereopaar „2-3“ (links) sowie aus Bild-Triplett (Mitte: Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse; rechts: Interpolation dieser Bereiche)

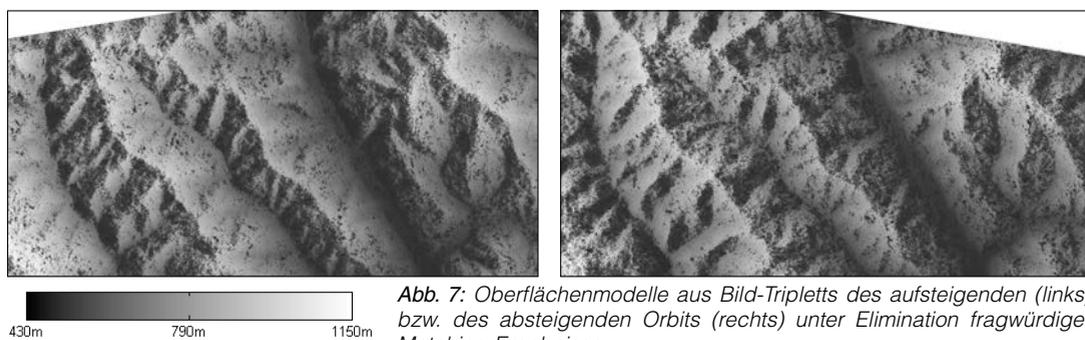


Abb. 7: Oberflächenmodelle aus Bild-Triplets des aufsteigenden (links) bzw. des absteigenden Orbits (rechts) unter Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse

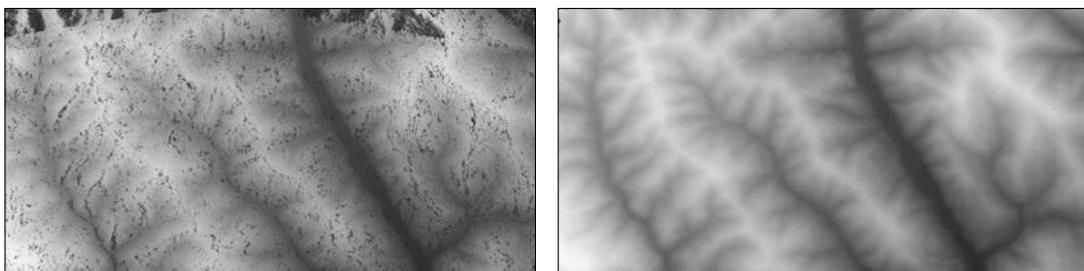


Abb. 8: Verschneidung der Oberflächenmodelle aus Bild-Triplets unter Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse (links oben) bzw. nach Interpolation dieser Bereiche (rechts oben)

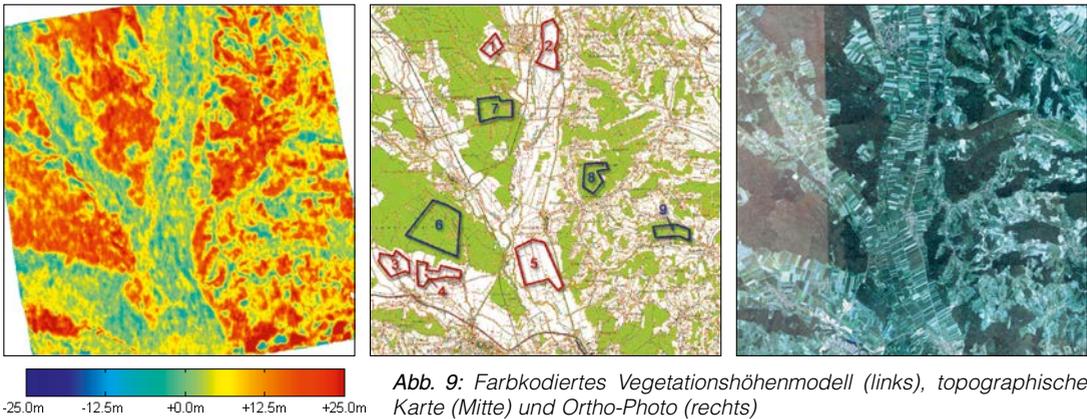


Abb. 9: Farbkodiertes Vegetationshöhenmodell (links), topographische Karte (Mitte) und Ortho-Photo (rechts)

7. Validierung

Die Validierung der erstellten Oberflächenmodelle gestaltet sich insofern problematisch, als die Testgebiete – insbesondere „Baernbach“ – mehrheitlich mit ausgedehnten Waldbeständen bedeckt sind. Geeignete Referenzdaten für das Baumkronen-Dach liegen derzeit noch nicht vor. In einem ersten Schritt wurde daher für das eher flache Testgebiet „Burgau“ ein Vergleich zum vorliegenden Höhenmodell durchgeführt.

Zunächst wurde ein „Vegetationshöhenmodell“ durch Differenzbildung zwischen TerraSAR-X Oberflächenmodell und Referenz-DHM generiert. Die farbkodierten Höhendifferenzen sind in Abbildung 9 (links) dargestellt, in welcher nun die warmen Farbtöne positive Höhenwerte zeigen und Vegetationsbestand signalisieren. Zum Vergleich ist in dieser Abbildung der entsprechende Ausschnitt der ÖK50 (Mitte) bzw. des Ortho-Photos (rechts) zu sehen, welche die Waldbestände unmittelbar ausweisen.

Grundsätzlich ist eine weitgehende Korrespondenz der Waldbestandsflächen zu erkennen. Die Waldränder zeigen mehrheitlich Rampen, was auf die Seitsichtgeometrie des TerraSAR-X zurückzuführen ist, welche in diesen Bereichen zu Layover oder Abschattung führt, und somit keine plausible Höhenrekonstruktion erlaubt. Einige Ausreißer in Form von Absenkungen von 10 Metern und mehr sind auch zu sehen, deren Ursache in lokalen Matching-Problemen liegt, welche im Zuge der Oberflächenmodell-Generierung nicht eliminiert werden konnten.

Für ausgewählte „Areas of Interest (AOI)“ (siehe Abbildung 9, Mitte) über Freiflächen wie auch über Waldbeständen wurden in weitere Folge statistische Kenngrößen wie Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Diese sind in der Tabelle 4 für 5 Freiflächen und 4 Waldbestände zusammengefasst.

Für die Freiflächen ergeben sich mit Ausnahme der AOI #3 Mittelwerte knapp über 0 Metern, was durch einzelne Vegetationsbestände bedingt durchaus plausibel erscheint. Die Standardabweichung liegt im Bereich von etwa 2.5 bis 3.5 Metern, und ist somit in der Größenordnung des 2- bis 2½-fachen RMS-Fehlers der Tabelle 2. Für die Waldbestände liegen die Mittelwerte der Vegetationshöhen im Bereich von 12 bis 20 Metern, was durchaus wieder den realen Baumhöhen entsprechen könnte.

Freiflächen			Waldbestände		
AOI	Mw	Std	AOI	Mw	Std
#1	0.57	3.63	#6	15.5	3.81
#2	0.33	2.57	#7	16.1	4.52
#3	-0.39	2.81	#8	20.0	3.50
#4	0.90	3.13	#9	12.3	4.20
#5	0.80	2.88			

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung der Höhendifferenzen für ausgewählte AOIs

Für eine durchgreifende Analyse und Validierung der Oberflächenmodelle wären Referenzdaten mit entsprechend hoher Genauigkeit erforderlich. Insbesondere für die bewaldeten Flächen, wo zusätzlich die Eindringtiefe des SAR in das Baumkronen-Dach eine zu untersuchende Komponente darstellt, wären dies idealerweise Oberflächen- wie auch Bodenmodelle aus Laser-Scanner-Daten. Die Akquisition solcher Daten ist derzeit noch im Gang.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In der gegenständlichen Studie wurde die 2D- wie auch die 3D-Geolokalisierungs-genauigkeit von TerraSAR-X Spotlight-Bildern analysiert. Grundlage hierfür waren Passpunkte in Form von natürlichen Objekten mit der ihnen eigenen Identifizierung und Messungengenauigkeit. Die seitens des DLR spezifizierten 2D-Genauigkeiten im Bereich eines

Meters konnten für die verwendeten Bilddaten nicht bestätigt werden. Zum Teil wurden initiale Lagefehler in der Größenordnung von bis zu 6 Pixel (RMS) erzielt, welche auf Grund ihrer Charakteristik durchaus nicht auf die Ungenauigkeit der verwendeten Kontrolldaten und Passpunktmesungen zurückzuführen sind. Ein Sensormodell-Ausgleich wurde daher durchgeführt, welcher auf die sogenannten Azimut- und Range-Konvertierungsparameter beschränkt werden konnte. Für MGD-Produkte ist selbst dies bedingt durch die für die „Slant-to-ground-range“-Konvertierung verwendeten Polynome 5. Ordnung eine sensible Konstellation, welche eine ausreichende Anzahl von gut verteilten Passpunkten erfordert.

Auf Basis der ausgeglichenen Sensormodelle wird eine durchaus vielversprechende 3D-Genauigkeit mit Lagefehlern von etwa 2 Metern signalisiert. Nichtsdestotrotz stellt die flächenhafte 3D-Rekonstruktion aus hochauflösenden TerraSAR-X-Daten eine große Herausforderung dar, da bei den verwendeten Daten das Bild-Matching durch den SAR-Speckle generell sowie die bewaldeten Flächen und zeitlich bedingten radiometrischen Bildunterschiede mit einem hohes Fehler-Potential behaftet ist. Anhand der aufgezeigten Anwendungsbeispiele konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung von Bild-Triplets und daraus resultierenden Mehrfach-Matching-Ergebnissen einerseits, sowie die Verwendung von Daten des aufsteigenden wie auch des absteigenden Orbits andererseits, optimale Rahmenbedingungen für die Oberflächenreduktion darstellen, unter welchen eine deutliche Reduktion der aus den fehlerhaften Matching-Ergebnissen resultierenden Artefakte möglich ist.

Eine detaillierte Validierung der für die ausgewählten Testgebiete generierten Oberflächenmodelle war bisher mangels entsprechender Referenzdaten, insbesondere für das Baumkronen-Dach, nicht möglich. Für ausgewählte Ausschnitte sind die über Freiflächen im Vergleich zum Referenz-Bodenmodell hergeleiteten Höhenunterschiede zufriedenstellend klein und korrespondieren gut mit der Genauigkeitsabschätzung über Passpunkte. Über bewaldeten Flächen bewegen sich Höhendifferenzen zum Bodenmodell, welche quasi die Baumhöhen repräsentieren, in einer durchaus plausiblen Größenordnung. Eine definitive Genauigkeitsaussage kann hier allerdings nur auf Basis eines genauen Referenz-Oberflächenmodells gemacht werden. Hierfür sollen in naher Zukunft aus Laser-Scanner-Daten hergeleitete Oberflächen- wie auch Bodenmodelle akquiriert werden.

Danksagung

Die präsentierten Forschungsarbeiten sind in zwei Projekten im Rahmen des Austrian Space Applications Programms (ASAP) unter Förderung der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) eingebettet. Die TerraSAR-X Daten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bzw. von Infoterra-Deutschland zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

- [1] DLR, 2008. TerraSAR Ground Segment – Basic Product Specification Document, Doc. TX-GS-DD-3302, issue 1.5, 103 Seiten.
- [2] Raggam H. und K.H. Gutjahr, 1998. Evaluation of Radarsat Stereo Data. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, pp. 103-106.
- [3] Curlander J. C., 1982. Location of space-borne SAR imagery. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 20(3), pp. 359-364.
- [4] Schmidt N., J. Janoth, H. Raggam, K. Gutjahr und A. Wimmer, 2007. TerraSAR-X Value-Added Image Products. "IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium".
- [5] Fritz T., H. Breit, und M. Eineder, 2008. TerraSAR-X Products – Tips and Tricks. 3rd TerraSAR-X workshop, Oberpfaffenhofen. Published at <http://sss.terrasar-x.dlr.de/>
- [6] Raggam H., K.H. Gutjahr, R. Perko und M. Schardt, 2008. Assessment of the Potential of TerraSAR-X with Respect to Mapping Applications Using Radargrammetric and Interferometric Techniques. 3rd TerraSAR-X workshop, Oberpfaffenhofen. Published at <http://sss.terrasar-x.dlr.de/>
- [7] Leberl F. 1978. Satellitenradargrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Serie C, No. 239, ISBN 3769692942, 156 Seiten.
- [8] Paar G. und Pölzleitner W., 1992. Robust disparity estimation in terrain modelling for spacecraft navigation, ICPR.
- [9] Hirschmüller H. 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, PAMI, 30, pp. 328-341.
- [10] Raggam H., 2005. Surface Mapping using Image Triplets – Case Studies and Benefit Assessment in Comparison to Stereo Image Processing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(5), pp. 551-563.

Anschrift der Autoren

Dr. Hannes Raggam, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: hannes.raggam@joanneum.at

Dr. Roland Perko, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: roland.perko@joanneum.at

Dr. Karlheinz Gutjahr, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: karlheinz.gutjahr@joanneum.at

Vortragender

Dr. Hannes Raggam

1955 geboren

1980-1984 Freier Mitarbeiter am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research

Seit 1984 Angestellt am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research. Leiter der Arbeitsgruppe für „Geometrische Bildverarbeitung von Fernerkundungsdaten“ 



UltraCam – digitale Luftbildkameras für alle Fälle

*Michael Gruber, Alexander Wiechert,
Richard Ladstädter, Graz*

Kurzfassung

UltraCamXp und UltraCamLp sind die neuen digitalen Luftbildkameras von Vexcel Imaging GmbH (ein Unternehmen im Eigentum von Microsoft Corp.) und wurden am XXI Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung 2008 in Beijing vorgestellt.

Die beiden Kameras unterscheiden sich durch das Bildformat – UltraCamXp ist mit 196 MegaPixel die derzeit größte digitale Kamera, UltraCamLp wird mit 92 MegaPixel etwa das halbe Format aufweisen (derzeit noch mit 64 Megapixel in Produktion) - haben aber beide eine geometrische Qualität und radiometrische Kapazität für alle photogrammetrischen Anwendungen.

Für UltraCamXp ist zusätzlich eine Weitwinkeloption vorgesehen. Damit wird die Aufnahme von kleinmaßstäbigen Projekten aus komfortablen Flughöhen gewährleistet und die UltraCam Serie abgerundet.

Schlüsselwörter: Photogrammetrie, digitale Luftbildkamera, UltraCam

Abstract

UltraCamXp and UltraCamLp are digital aerial camera products offered by Vexcel Imaging GmbH – a Microsoft Company since May 2006. The introduction into the market was executed during the XXI Conference of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing in Beijing, 2008.

The cameras show different image formats – UltraCamXp is currently the largest digital aerial camera with 196 MegaPixel and UltraCamLp will have 92 Megapixels (today a 64 MegaPixel version is in operation). Both cameras show geometric and radiometric performance to support any kind of photogrammetric application.

In addition to the existing UltraCamXp a wide angle option is in preparation, which will serve for small scale data acquisition from a comfortable flying height.

Keywords: Photogrammetry, digital aerial camera, UltraCam

1. Einleitung

1.1 Entwicklung der UltraCam

Digitale Luftbildkameras für die photogrammetrische Anwendung werden von Vexcel Imaging GmbH seit etwa 6 Jahren angeboten. Das erste Produkt – UltraCamD – wurde am Österreichischen Geodätentag in Wels (April 2003) und im Rahmen der ASPRS Tagung in Anchorage, Alaska (Mai 2003) vorgestellt. UltraCamD konnte sich mit einem Bildformat von ca. 86 MegaPixel und einer Bildwiederholrate unter einer Sekunde erfolgreich am Markt behaupten. Durch verbesserte Angebote der Industrie im Bereich der Datenspeicherkapazität, der Datenübertragungstechnologie und durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der CCD-Sensorkomponente konnte im Mai 2006 UltraCamX mit 136 MegaPixel gezeigt werden. Die Tagung der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) im Juli 2008 in Beijing, China, bot die Gelegenheit, UltraCamXp mit einem Bildformat von 196 MegaPixel anzubieten. Zeitgleich wurde eine neue Produktlinie mit UltraCamLp angekündigt und mit der ersten

Auslieferung vorerst als UltraCamL im Mai 2009 manifestiert.

Die digitalen Kameras werden von Software für den Betrieb und die Prozessierung der Bild-daten unterstützt. Die Softwareentwicklung wird ausschließlich in Graz durchgeführt. Für die Fertigung der mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten soll hier die Firma WILD Austria, Völkermarkt, als wichtigster Partner genannt werden.

1.2 Vexcel Imaging GmbH

Vexcel Imaging GmbH wurde 1992 von Dr. Franz Leberl in Graz eingerichtet und mit der Entwicklung von Filmscannern betraut. Mit UltraScan 5000 wurde das erste Produkt für photogrammetrische Anwendungen vorgestellt.

Die Entwicklung der digitalen Luftbildkamera UltraCam ab 2002 folgt dem bereits deutlich sichtbaren Trend zur digitalen Kameratechnologie. Vexcel Imaging GmbH hat die Einführung dieser Technologie entscheidend mitgestaltet und hat sich mittlerweile als weltweiter Marktführer von digitalen Großformatkameras etabliert.

Die Akquisition der Firma durch den amerikanischen Softwarekonzern Microsoft Corp. im Mai 2006 brachte entscheidende neue Aspekte in die Entwicklungsarbeit von Vexcel Imaging GmbH ein. Die Kamera wurde für das globale Datenerfassungsprogramm Virtual Earth (jetzt BING Maps) ausgewählt und gleichzeitig wurden Investitionen für die Entwicklung von Softwarekomponenten vorgenommen.

1.3 Kameradesign

Das Design digitaler Luftbildkameras mit großem Bildformat sieht – bis auf wenige Ausnahmen – eine Kombination mehrerer Kameraköpfe vor. Das ist verständlich, da bildgebende Sensoren in genügender Größe und Pixelanzahl noch nicht verfügbar sind oder mit einer ungenügenden Bildwiederholrate die photogrammetrische Anwendung einschränken [1], [5].

Das gilt auch für die Sensoreinheiten der UltraCam Serie. Das Design der Sensormodelle UltraCamD, UltraCamX, UltraCamXp sowie UltraCamXp w/a beinhaltet 8 Kameraköpfe mit 13 CCD-Sensormodulen. Dabei wird das panchromatische Bild aus vier Köpfen und 9 CCD Sensormodulen zusammengesetzt. Dazu kommen 4 Kameraköpfe für Rot, Grün, Blau und Infrarot (Abbildung 1). Für die neue Serie UltraCamL und UltraCamLp wurde eine etwas abgewandelte Bauweise gewählt. Insgesamt werden 4 Kameraköpfe eingesetzt. Das Panchromatische Bild entsteht aus zwei Köpfen, für Farbe wird ein Colorsensor mit Bayer-Filter und für Infrarot ein zusätzlicher Kamerakopf mit entsprechendem Filter eingesetzt.



Abb. 1: UltraCamXp mit den 8 Kameraköpfen (links) und einem aus 9 CCDs und 4 Kameraköpfen zusammengesetzten panchromatischen Bild mit 17310 * 11310 Pixel (rechts). Die Bezeichnung ‚M‘ deutet auf die 4 CCDs des sog. MasterCone hin.

Die parallele Ausrichtung der Kameraköpfe und das zeitversetzte ‚syntopische‘ Aufnahmeprinzip sind spezifische Eigenschaften der Vexcel – Kameras und erlauben das geometrisch korrekte Zusammenfügen der Teilbilder in ein

großformatiges perspektives Flächenbild. Die Kompensation der Flugbewegung wird auf elektronischer Ebene realisiert und kann ohne mechanisch bewegte Teile erfolgen.

Die panchromatische Aufnahme wird von vier Farbköpfen begleitet. Diese liefern die drei Primärfarben des sichtbaren Spektrums und nahes Infrarot. Die Farbauszüge mit geringerem Bildformat werden bei der digitalen Entwicklung der Bilddaten auf die Geometrie des panchromatischen Bildes registriert.

1.4 Bildqualität

Die Bildqualität von digitalen Luftbildkameras kann in radiometrischer wie auch geometrischer Hinsicht beurteilt werden. Wir zeigen hier die radiometrische Bandbreite aus einer großmaßstäbigen Aufnahme mit feinen Schattierungen und Strukturen (Abbildung 2). Der Grauwertebereich liegt bei über 5000 Graustufen (12.5 bit) und die Bodenauflösung bei 3 cm (Flughöhe 500m über Grund). Die hohe geometrische Qualität der UltraCam (< 2µm) wird durch sorgfältige Kalibrierung im hauseigenen 3D-Testfeld garantiert [2].

2. Die neuen Kameramodelle

2.1 UltraCamXp

Das Flaggschiff der Kamerareihe wurde im Juli 2008 am XXI Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) in Beijing vorgestellt und wird mittlerweile weltweit in der photogrammetrischen Datenerfassung eingesetzt (Abbildung 3). Die wichtigsten technischen Parameter der Kamera sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Mit dem Bildformat von 196 MegaPixel ist UltraCamXp die gegenwärtig größte digitale Luftbildkamera und erlaubt daher einen wirtschaftlichen und produktiven Einsatz bei der photogrammetrischen Datenerfassung [4].

Die wichtigsten Kameraparameter sind nachfolgender Liste zu entnehmen:

- Bildformat 17310 x 11310 Pixel bzw. 104 x 68 mm (Bildgröße 196 Megapixel)
- 6 µm CCD Sensor (DALSA FTF 6040 M)
- Nennbrennweiten von 100 mm (PAN) bzw. 33 mm (Multispektral)
- Speicherkapazität von 6600 Aufnahmen mit einer einzigen Speichereinheit
- Schneller Datentransfer für das Post-Processing mit der neuen Docking Station



Abb. 2: Aufnahme aus einem Bildflug mit UltraCamXp über Leibnitz, Steiermark, aus einer Höhe von 500 m über Grund. Die Bodenauflösung beträgt 3 cm.



Abb. 3: UltraCamXp mit der Sensoreinheit (rechts), der Datenerfassungseinheit (links) und dem Benutzerterminal (mitte).

2.2 Die Weitwinkel-Variante

Eine Variante der Kamera mit einer Brennweite von 70 mm ($w/a = \text{Wide Angle}$) ist derzeit in Entwicklung und wird bis Jahresende zur Verfügung stehen. Vexcel Imaging wird damit erstmals eine digitale großformatige Luftbildkamera mit zwei unterschiedlichen Brennweiten anbieten. Das Einsatzgebiet der Kamera mit kurzer Brennweite sind Projekte mit kleineren Bildmaßstäben die so aus geringeren Höhen erfolgen werden können. Aus einer Flughöhe von 5800 m wird mit der UltraCamXp w/a eine Bodenauflösung von 50 cm und eine Streifenbreite von 8655 m erreicht.

2.3 Die Mittelformatkamera UltraCamLp

Die neue Mittelformatkamera UltraCamLp, eine Ergänzung zur digitalen Großformatkamera, wurde im Juli 2008 in Beijing angekündigt und im Mai 2009 erstmals an Kunden geliefert. Das Bildformat wird mit 92 MegaPixel etwa halb so groß sein wie das der UltraCamXp (bis Ende 2009 wird UltraCamL mit 64 MegaPixel Bildformat ausgeliefert).

UltraCamLp wird als vollständige digitale Luftbildkamera für photogrammetrische Anwendungen verstanden. Die Kamera leistet die gleichzeitige Aufnahme von Farbe und Infrarot, ist mit einer elektronischen Flugbewegungskompensation ausgestattet und erzeugt Bildfolgen in einem Intervall von 2.5 sec (siehe Tabelle 2). Die geometrische Bildqualität wird durch Bauweise und Kalibrierung sichergestellt und entspricht dem hohen Niveau der erfolgreichen Baureihe UltraCamX und UltraCamXp. Durch die geringe Größe von modernen Elektronikkomponenten und nicht zuletzt durch die Nutzung von SSD Speichermodulen kann UltraCamLp sehr kompakt gebaut werden. Sensorik, Datenerfassung, Datenspeicherung sowie der IMU – Behälter finden im Sensorkopf Platz. Die Handhabung der Kamera, insbesondere Ein- und Ausbau wird wesentlich erleichtert, kleiner Flugzeugtypen können problemlos genutzt und damit flexible und wirtschaftliche Rahmenbedingungen geschaffen werden.



Abb. 4: UltraCam L mit dem Integrierten Kamera-Datenerfassungsteil und dem Benutzerterminal (links vorne).

Die Entwicklung und Herstellung der Objektiv für die panchromatischen Kameraköpfe mit 70 mm Nennbrennweite und einem Auflösungsver-

mögen von 80 lp/mm wurde von LINOS GmbH, München durchgeführt. Für den multispektralen Teil konnten die bereits bei UltraCam Xp eingesetzten Vexcel-Linos Objektive mit 33 mm Brennweite verwendet werden.

3. UltraMap Software

UltraMap ist das neue Softwareprodukt von Vexcel und bietet alle Funktionen zur digitalen Entwicklung für UltraCam Bilddaten sowie zum kontrollierten Kopieren der Rohdaten nach der Landung, zur ersten Qualitätskontrolle und zur Visualisierung von Bildverbänden aus mehreren tausend Einzelbildern.

UltraMap unterstützt die Verarbeitung von großen Bilddatenmengen durch verteiltes Rechnen mit bis zu 50 Prozessoreinheiten und nützt mo-

Digital Camera Technical Data (Sensor Unit S-Xp)	
Panchromatic image size	17,310 * 11,310 pixels
Panchromatic physical pixel size	6 µm
Input data quantity per image	624 Mega Bytes
Physical format of the focal plane	103.9 mm * 68.4 mm
Lens system	Apo-Sironar digital HR
Panchromatic lens focal distance	100 mm
Lens aperture	f= 1/5.6
Angle-of-view from vertical, cross track (along track)	55° (37°)
Color (multi-spectral capability)	33 mm
Color image size	5,770 * 3,770 pixels
Color physical pixel size	6 µm
Lens system	Linos Vexcel Apo-Sironar digital HR
Color lens system focal distance	33 mm
Color lens aperture	f = 1/4.0
Color field of view from vertical, cross track	55° (37°)
Shutter system	Prontor magnetic 0 – Vexcel
Shutter speed options	1/500 to 1/32
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Maximum FMC-capability	50 pixels
Pixel size on the ground (GSD) at flying height of 1000 m (at 500m)	6.0 cm (3.0 cm)
Frame rate per second (minimum inter-image interval)	1 frame per 2 seconds
Analog-to-digital conversion	14 bits
Radiometric resolution in each color channel	>12 bit
Physical dimensions of the camera unit	45cm x 45cm x 60 cm
Weight	~ 55 kg
Power consumption at full performance	150 W
Abweichende Parameter der UltraCamXp w/a:	
Panchromatic lens focal distance	70 mm
Angle-of-view from vertical, cross track (along track)	73° (52°)
Color lens system focal distance	23 mm
Color field of view from vertical, cross track (along track)	73° (52°)

Tabelle 1: Technische Spezifikation UltraCamXp und UltraCamXp w/a

Digital Camera Technical Data (Sensor Unit S-Lp)	
Panchromatic image size	11,704 * 7,920 pixels
Panchromatic physical pixel size	6 μ m
Physical format of the focal plane	67.9 mm * 47.5 mm
Lens system	Linor Vexcel Apo-Sironar digital HR
Panchromatic lens focal distance	70 mm
Lens aperture	f= 1/5.6
Angle-of-view from vertical, cross track (along track)	52° (37°)
Color (multi-spectral capability)	True color & NIR
Color image size	5,320 * 3,600 pixels
Color physical pixel size	6 μ m
Lens system	Linor Vexcel Apo-Sironar digital HR
Color lens system focal distance	33 mm
Color lens aperture	f = 1/4.0
Color field of view from vertical, cross track	52° (37°)
Shutter system	Prontor magnetic 0 – Vexcel
Shutter speed options	1/500 to 1/32
Forward-motion compensation (FMC) for PAN, RGB and NIR	TDI controlled
Maximum FMC-capability	50 pixels
Pixel size on the ground (GSD) at flying height of 900 m (at 500m)	8 cm (4.3 cm)
Frame rate per second (minimum inter-image interval)	1 frame per 2.5 seconds
Analog-to-digital conversion	14 bits
Radiometric resolution in each color channel	>12 bit
Physical dimensions of the camera unit	45 cm x 45 cm x 80 cm
Weight	~ 55 kg
Power consumption at full performance	~220 W

Tabelle 2: Technische Spezifikation UltraCamLp

derne Methoden zur Visualisierung großer Bildmengen mit einer radiometrischen Bandbreite von 16 bit.

3.1 Visualisierung und Interaktion

Das von Microsoft Live Labs entwickelte Visualisierungstool Seadragon mit dem dafür optimierte Bilddatenformat wurde für UltraCam Bilder adaptiert und in die UltraMap Software eingebunden. Dadurch wird die effiziente Darstellung großer Bildverbände mit über 5000 Bildern gelöst und mehr als 1 TeraPixel problemlos verwaltet. Wichtige Darstellungsmöglichkeiten und Interaktionshilfen sind nachfolgend angegeben:

- Die Footprint-Ansicht zeigt die Projektion der Bilder auf den Boden (mittels GPS/IMU-Daten).
- Die Indexmap zeigt den Block der georeferenzierten Bilder mit stufenlosem Zoomfaktor.
- Die Heatmap zeigt den Grad der Überlapung farbcodiert an und erlaubt das schnelle Erfassen der Streifen-Anordnung.

- Die Bildinhalte können durch zusätzliche Informationen (ID's, Projektionszentren, Passpunkte, etc.) überlagert werden.

3.2 UltraMap AT

UltraMap AT bietet eine effiziente und moderne Triangulationslösung für UltraCam Bildverbände. Das Modul arbeitet als Erweiterung von UltraMap AT und nützt daher die Möglichkeit des verteilten Rechnens sowie die Visualisierung auf Basis der Dragonfly Technologie [6]. Der AT-Arbeitsablauf birgt ein robustes und kontrolliertes Verfahren, das in einem ersten Schritt Verknüpfungspunkte zwischen Bildern erzeugt, mehrfache Überlappungen berücksichtigt und auch unterschiedliche Bildmaßstäbe verarbeitet. In einer iterativen Schrittfolge werden eventuelle Fehlmessungen eliminiert und der bereinigte, redundante Datensatz einer Bündellösung zugeführt. Diese wird mit dem integrierten Softwareprodukt BINGO [3] berechnet und die Ergebnisdaten zur Verfügung gestellt. Abbildung 5 zeigt eine Seite der graphischen Benutzerschnittstelle mit Bilddaten und überlagerten Messpunkten.

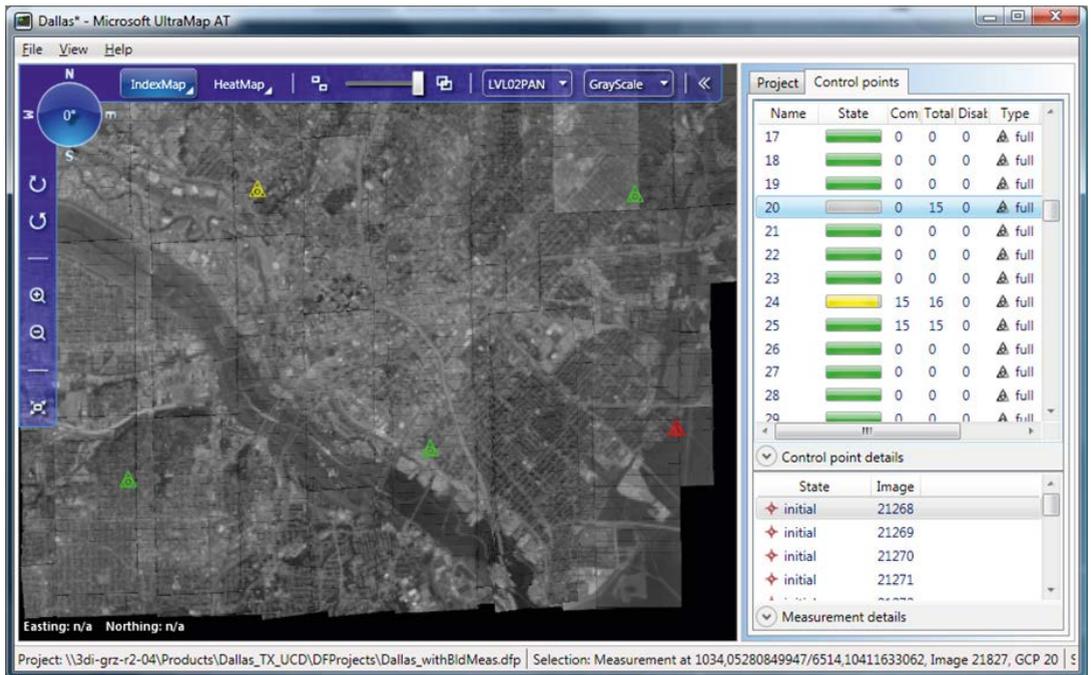


Abb. 5: Interaktives Messen von Punkten mit UltraMap AT mit der Überlagerung über dem genäherten Bildmosaik und Detailinformation zu den Punktdaten.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Gruber, M., 2007: UltraCamX, the new digital aerial camera system by Microsoft Photogrammetry, Proceedings of the Photogrammetric Week 2007, Stuttgart.
- [2] Gruber, M., Ladstädter, 2008: Calibrating the digital large format aerial camera UltraCamX. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006 Proceedings, January 2008, Castelldefels, Spain.
- [3] Kruck, E., 1984: BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur Anwendungen. Möglichkeiten und praktische Ergebnisse, International Archive for Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janeiro 1984.
- [4] Ladstädter, R., Gruber M., 2009: Leistungsdaten der digitalen Luftbildkamera UltraCamXp, DGPF Tagungsband 18, Jena 2009.
- [5] 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.
- [6] Reitinger, B. et al., 2008: DragonFly – Interactive Visualization of Huge Aerial Image Datasets, Proc. of ISPRS 2008, Seite 491-494.

Anschrift der Autoren

Dr. Michael Gruber, Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergergasse 8, A-8010 Graz.
E-Mail: michgrub@microsoft.com

Dipl. Wirtschaftsing. Alexander Wiechert, Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergergasse 8, A-8010 Graz.
E-Mail: alwieche@microsoft.com

Dr. Richard Ladstädter, Laboratoriumstr. 29b, A-8053 Graz.
E-Mail: richard.ladstaedter@alumni.TUGraz.at

Vortragender

Dr. Michael Gruber

1959 geboren

Studium Vermessungswesen an der TU Graz

1997 Promotion

Berufliche Laufbahn:

Institut für Digitale Bildauswertung des Joanneum Research

Assistent an der Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung

Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen

Oktober 1999 Vexcel Imaging GmbH

seit 2006 Microsoft Virtual Earth Program

Michael Gruber ist Autor und Co-Autor mehrerer US Patente, darunter Patente für den Filmscanner UltraScan5000 und die digitale Luftbildkamera UltraCam. 



Aufbau und Nutzung einer virtuellen Erde im Internet

Franz Leberl, Michael Gruber, Graz

Kurzfassung

Das Exabyte-3D Weltmodell im Internet steht zur Diskussion. Die globale Kommunikation entwickelt zunehmend Anwendungen mit einem Ortsbezug, etwa beim Ersatz der Telefon- und Gelben-Seiten-Bücher durch die Geschäfts- und Adressen-Suche im Internet, bei der Navigation im Fahrzeug und mittels Smart Phones, im e-Commerce, zum Beispiel beim Handel mit Liegenschaften oder bei der Urlaubsplanung und bei Hotelbuchungen. Dazu bieten einige globale Anbieter von Internet-Suchmaschinen 2- und 3-dimensionale Modelle der Erde, die in einzelnen urbanen Räumen Einzelheiten bis in den Zentimeter-Bereich auflösen. Hoheitliche, aber lokale 3D-Regionenmodelle entstehen als Erweiterung des GIS für eine breite Verwendung in der Planung, Verwaltung, Bürgerbeteiligung und in technischen Projekten in städtischen Räumen.

Der Aufbau solcher 3D-Modelle erfolgt mittels Satelliten- und Luftbildern, Laser-Abtastungen, Sensordaten aus fahrenden Autos oder aus manuell gewonnenen Standbildern, und auch Innenräume werden mit geeigneten Sensoren erfasst. Im Vollausbau werden diese Systeme vielleicht 1 Exabyte an Daten verwalten und laufendhalten müssen. Wir bewerten die Datenerfassungsmethoden und automatischen Verfahren des Modellaufbaus mit Genauigkeiten im Sub-Pixelbereich. Wir projizieren den Status-Quo in eine Zukunft mit interpretierten Objekten, aus welchen die interaktiven Darstellungen visualisiert werden. Und wir präsentieren einige Anwendungsbeispiele.

Schlüsselwörter: 3D Photogrammetrie, Photorealismus in Stadtmodellen, Internet-Weltmodell, Gebäuderekonstruktion, Straßenbilder, Digitale Luftbilder, Semantische Bild-Interpretation.

Abstract

At issue is the Exabyte 3D World Model in the Internet. Global communication is increasingly developing applications with location-references. Examples are the search for addresses and businesses on the Internet, navigation in cars and on smart phones, e-commerce, for example in real estate, travel planning and searches for hotels. Some global Internet providers have begun to provide 2- and 3-dimensional models of the Earth at geometric resolutions in some urban spaces in the range of 2 centimeter. Governmental local systems have started to be built in the form of a 3D GIS for a broad range of applications in planning, administration, citizens' participation and for technical projects.

Creation of these models can be based on space and aerial imagery, laser scanning, sensors in street vehicles or hand carried, to include even interior spaces. Once fully available, one will have to deal with perhaps 1 Exabyte of data, first to initialize the system, then to keep it current. We will review automated procedures to create the models at accuracies in the sub-pixel range. We project for the future an increasing need to build interpretations of the elements of, and objects in urban areas so that interactive visualizations will be computer generated rather than simply presentations of colored point clouds or polygonal facets. We also will speculate on some of the interesting applications of such a World model.

Keywords: 3D photogrammetry, Photorealistic urban 3D models, Internet World Model, Building reconstruction, Street-level imagery, Digital aerial photography, semantic image interpretation.

1. Digitale Geodaten

1.1 Technologie-Genese:

Digitalisierung von Karten und Plänen

Als in den späten Jahren 1970 das Rechnerwesen soweit entwickelt war, dass diverse hoheitliche Organisationen mit der massenweisen Digitalisierung aller Karten und Pläne begannen (genauso wie dies übrigens auch im betrieblichen Bereich des Maschinenbaus mit den Konstruktionszeichnungen modern wurde), war die Motivation eine Erleichterung der Speicherung,

die Einfachheit der Laufendhaltung und des Kopierens als auch die Flexibilität der Visualisierung via einen Ausdruck in jedwedem Maßstab. Festzuhalten ist dabei erstens, dass diese geographischen Daten in Analogie zu Landkarten durchwegs 2-dimensional angelegt waren und etwaige Höhen nur als Attribut den 2D-Punkten zugeordnet wurden. Zweitens veränderte der Übergang zur Digitalform zunächst nichts an der typischen Bedeutung dieser Daten, denn sie blieben Werkzeug von Spezialisten. Erst das Internet konnte diese Einschränkung beenden.

1.2 Technologie-Genese: Automatisierter Verkauf digitaler Geodaten

Digitale Straßenkarten werden seit Mitte der Jahre 1990 routinemäßig auf Datenträgern verkauft. Zum Beispiel konnte man von Microsoft diverse Produkte wie TripPlanner, Encarta, Streets&Trips oder MapPoint erwerben, welche auf Basis von digitalen Straßendaten die Routenplanung von automotiven Transportsystemen verbesserte (Leberl, 2009). Das weit gestreute Interesse an Straßendaten hatte die Verbreitung des persönlichen Rechnens zur Voraussetzung. Der Siegeszug des Internet hat diese Art des Datenverkaufs sehr beflügelt. Auch Satellitenbilder und Orthophotos ergänzten sehr bald das Angebot an digitalen Geodaten. Erste Initiativen für den Verkauf von Satellitenbildern entstammen allerdings diversen Raumfahrtprogrammen und der daraus inspirierten Internet-unterstützten Suche nach und dem Erwerb von Satellitenbildern der Erde und Planeten. In Europa entwickelte sich das Projekt CEO (Center for Earth Observation) als umfassender Zugang zu Fernerkundungsdaten Europas (Leberl und Kalliany, 1995). Der nationale e-Commerce mit Geodaten wird am Beispiel Österreichs durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen illustriert (Ernst, 2007; BEV, 2009). Zweck dieser Angebote war die Erleichterung und Automatisierung des Datenverkaufs. Via interaktiver Präsentation von 2D-GIS-Daten wurde und wird das Angebot dargestellt und die Auswahl und Auslieferung automatisiert.

Der Verkauf von Geodaten via Internet bleibt weiterhin ein kleines Segment des e-Commerce. Das Internet bewirkt aber, dass der Kreis der Interessenten über den der traditionellen Geoexperten hinauswächst.

1.3 Technologie-Genese: Erweiterte Geodaten-Anwendung im GIS

Der weit interessantere Grund zum Übergang in die Digitalform von Geodaten ist die Anwendung des Computers für eine intelligente Organisation und interaktive Verwendung dieser Daten. Damit sind wir bei der Idee und dem Aufbau von geographischen Informationssystemen GIS. Dies begann relativ früh mit dem kanadischen Geographic Information System ab etwa 1962 (Tomlinson, 1967), daher lange vor der Verbreitung des Internet und mehr als 10 Jahre vor der erstmaligen Realisierung des persönlichen Rechnens. Man kann dies zunächst als Weiterentwicklung des traditionellen Kartenwesens in der Nutzung durch Experten verstehen, setzt aber in allen Fällen die Nutzung eines Rechners voraus.

Mit dem Siegeszug des GIS wurde die Digitalform der Geodaten die Basis einer selbstverständlichen Erweiterung der Anwendungen um die interaktive Analyse, der Fundamentalidee von Tomlinson.

1.4 Technologie-Genese: Automotiv Navigation fordert digitale Geodaten

Eine Vorstellung zukünftiger Entwicklungen wurde durch das Interesse an einer interaktiven automotiven Navigation sichtbar, die ab etwa 1985 eine erste praktische Anwendung mit dem System von ETAK erfuhr (Etak, 2009), in welches digitale Straßendaten eingespeist waren. Es war diese Anwendung, welche die weltweit aggressive Erstellung digitaler Straßendaten und den Aufstieg der zwei wesentlichen Firmen in diesem Bereich begründete, Teleatlas und Navteq. Relevant ist hier, dass noch 10 Jahre vergehen mussten, bis das GPS ab etwa 1995 breite Verfügbarkeit erlebte und mit dem Einbringen der eigenen Position der Übergang von der einfachen Reiseplanung zur automatisierten Navigation möglich wurde. Damit verließen digitale Geodaten erstmals und unabhängig vom Internet den Fokus auf Experten und wurden für jedermann von Interesse.

2. Ortsbezug im Internet

2.1 Suche im Internet

„Search“ oder Suche im Internet ist ein völlig neues Wirtschafts-Phänomen, welches sich vor allem durch das dramatische Wachstum einer Firma, nämlich Google, dokumentiert. Gegründet wurde Google im Jahr 1999, einen Jahres-Umsatz von US\$ 20 Milliarden erreichte sie 10 Jahre später im Jahre 2008, und all dies mit nur einer Dienstleistung, nämlich der Suche im Internet. Das Geschäftsmodell beruht auf Reklameinschaltungen, die Nutzung selber ist gratis. Die gesellschaftliche Bedeutung der „Suche“ im Internet ist zunächst unabhängig von der Einbindung von Geodaten gewachsen.

Allerdings begann 2005 eine Ergänzung der Suche durch Geodaten, indem zunächst 2D-Straßenkarten zur Steuerung einer Suche angeboten wurden. Es dauerte nur kurze Zeit, um die dritte Dimension zunächst in Form eines digitalen Topographiemodelles einzubringen und dann die Informations-Dichte der 2D geographischen Information mittels Luftbildern zu erweitern (Abbildung 1).

Heute sind die Geodaten nicht mehr aus den Suchportalen gewunden.



Abb. 1: Beispiel einer 2D Straßenkarte im System BING Maps [www.bing.com/maps], wo Gebäudesymbole fehlen und daher im großen Maßstab kaum noch Information angeboten wird (links). Die Zufügung des Orthophotos erweitert die Information ganz wesentlich (rechts). Beispiel aus Graz-Mariatrost-Föllingerstraße.

2.2 Navigation und Internet

Es war die automotiv Anwendung digitaler Geodaten zur Reiseplanung und Navigation, welche die Erzeugung von Straßendaten der ganzen Welt verursachte und wirtschaftlich begründete. Das Internet erweiterte dies einerseits um die Anwendung am PC, Laptop und Mobiltelefon. Andererseits mutierten die reklame-finanzierten Suchsysteme im Internet zu einer Konkurrenz der dedizierten Navigationshilfen; und mit der GPS-Integration entsteht daraus ein Navigationssystem am Laptop und Smart Phone, wobei gerade letzteres als eine wesentliche Bereicherung der Internet-Anwendungen gilt und in den Bereich der mobilen Augmented Reality hineinwirkt (Abbildung 2).

Die Firma Mapquest erreichte als frühe Inselösung für die Reiseplanung in Nordamerika den größten Marktanteil bei diesem Anwendungsegment (MapQuest, 2009; heute im Besitz von AOL).

2.3 e-Commerce

Es wurde schon eingangs darauf hingewiesen, dass der Verkauf von Geodaten am Internet ein Zweig des e-Commerce darstellt. Der Ortsbezug

wird beim Handel mit Liegenschaften und beim Reisen, etwa bei Hotelreservierungen, deutlich. Die Bewertung von Liegenschaften führt zu Anwendungen des Geomarketing. Diverse Location-Based Services (LBS) verknüpfen das Internet mit Geodaten (siehe zum Beispiel Gartner und Rehr, 2008).

2.4 Das Internet-der-Dinge

Objekte in Museen oder Teile in einer Autofertigung sind wertvoll, werden katalogisiert und laufend überwacht. Mit dem seit etwa Mitte des letzten Dezenniums diskutierten „Internet-der-Dinge“ verbreitet sich diese Objektsorge in neue, gemeinhin als weniger wertvoll empfundene Objektkategorien. Das Internet-der-Dinge entsteht, wenn man ein drahtloses Netzwerk mit Objekten aller Art verbindet. Kern ist zunächst die Technologie der Radio Frequency Identification RFID, welche als sehr kleine Markierung eine Verbesserung der Supermarkt-Warenstrichkodierung darstellt. Jedem Objekt wird eine RFID-Markierung aufgeklebt oder bei der Fertigung eingebracht; das kann auch Lebewesen betreffen, seien es weidende Nutztiere oder wir

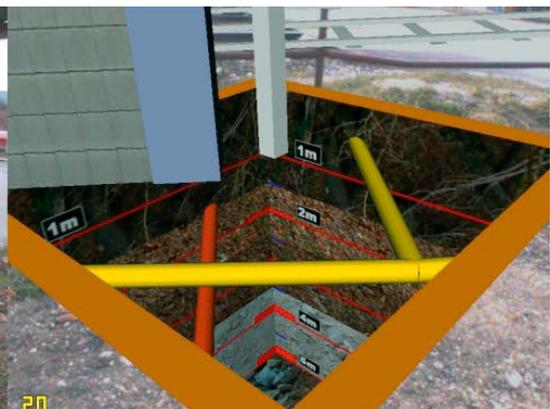


Abb. 2: Augmented Reality am Smart Phone verknüpft das Bild der Natur (links) mit einem aufgrund eines bestehenden Modells berechneten Objekts (rechts, ein virtueller Schacht). Beispiel aus Projekt Vidente (2009).

selber mit unseren diversen Ausweisen. Statt der Webseiten werden nun diese Objekte oder Lebewesen „durchsucht“, es wird geprüft, wo etwas ist und welchen Bezug es zu anderen Objekten hat. Die erste Anwendung geht auf die militärische Freund-Feind-Unterscheidung zurück. Moderne Internet-basierte praktische Produkte sind wohl noch etwas auf der „spielerischen“ Seite. Die Markierung muss gelesen werden, um den Ort des Objektes sichtbar zu machen. Dieses Lesen und Sehen ist Gegenstand von Sensoren, die zunehmend in Betrieb gehen und beobachten können. Die Reaktion auf diese Entwicklung ist teils ungeduldig enthusiastisch (O'Reilly und Batelle, 2009), teils voll Sorge über die zunehmende Überwachungsmöglichkeiten (van Kroenburg, 2008).

Noch wird der Zusammenhang mit einem 3D Weltmodell nicht diskutiert, vielleicht auch nicht verstanden? Wenn aber die Frage nach dem „Wo“ besteht, dann betrifft dies sowohl diese markierten Objekte („die Dinge“ und Lebewesen, etwa im Sinne von „wo ist meine Brille?“ oder „wo ist Franz?“) als auch die beobachtenden Internet-fähigen Sensoren. Dann wird schnell verständlich, dass Anwendungen des Internet-der-Dinge einen Ortsbezug aufweisen und ein Modell jedes Ortes notwendig wird, an dem sich identifizierbare Objekte und Lebewesen befinden. Zumindest der Ort jedes Sensors wird bekannt sein müssen, und wenn sich der Sensor bewegt, so ist damit zu rechnen, dass das GPS zu Hilfe genommen wird.

3. Die Virtuelle Stadt aus Luftbildern

Der Verkauf von Geodaten in 3 Dimensionen, das GIS in 3D, die Navigation in urbanen Räumen und nun vor allem die Internetsuche begründen das explosionsartig wachsende Interesse an 3-dimensionalen Stadtmodellen.

Das Umfeld aus dem Bestand an digitalen Geodaten und aus wachsenden Ideen zu ihrer Anwendung hat ab 2005 dazu geführt, dass das Internet mit einem digitalen geografischen Weltmodell erweitert wurde. Google, Microsoft, Yahoo und Ask brachten erste globale 2-dimensionale Systeme zur Anwendung, AOL erwarb Mapquest und diverse lokale Anbieter ergänzten dieses Angebot durch nationale Lösungen (Herold, 2009; Klicktel, 2009). Als Datenbasis fungierten die aus der automotiven Navigation entstammenden Straßenkarten. Diese wurden sehr schnell durch 2D-Bilddaten ergänzt. Der Wunsch, rasch global präsent zu sein, führte zur Verwendung von globalen Satellitenbildsystemen wie jene von

DigitalGlobe (Quickbird, Worldview-1) oder von GeoEye (Ikonos, GeoEye-1).

3.1 Annäherung an die dritte Dimension via Schrägansichten

Unsere Umgebung ist drei-dimensional, aber 2D-Landkarten, Straßenkarten und Orthophotos können den Wunsch nach der 3. Dimension nicht befriedigen. Microsoft führte daher 2006 Schrägaufnahmen aus der Luft ein (ein System der US-Firma Pictometry, in Europa vertreten durch die norwegische Firma Blom ASA mit ihren in ganz Europa verteilten Unternehmen). Mit den Schrägaufnahmen wird intuitiv die dritte Dimension via ein Bild der Hausfassaden dargestellt, die in Straßenkarten und Orthophotos fehlen. Abschnitt 4.3 und Abbildung 10 gehen näher auf dieses Thema ein.

3.2 Digitaler photogrammetrischer Arbeitsfluss

Der Wunsch nach einer 3D-Erfahrung der urbanen Räume erfordert die Erstellung von städtischen Gebäudemodellen. Microsoft entwickelte dazu das weitestgehende System, während etwa Google 3D-Daten im wesentlichen aus gegebenen Beständen zukaufte. Yahoo und Ask als auch AOL/Mapquest ingorieren bisher die 3. Dimension. Bei Microsoft besteht als Ergebnis der Entwicklungen seit 2006 ein automatischer photogrammetrischer Workflow, der es gestattet, aus Luftbildern pro Jahr etwa 400 Städte in 3D zu modellieren.



Abb. 3: Microsofts www.bing.com/maps zeigt dieses Beispiel eines automatisch erstellten 3D Stadtmodells mit interpretierten Bäumen und allen Häusern. Die Hausfassaden werden aus Vertikalbildern modelliert, sind aber mittels Schrägaufnahmen texturiert. Das Gebiet ist das Capitol in Denver (USA). Dieses Detail besteht derzeit nur in US-Städten.

Abbildung 3 zeigt ein Ergebnis als Beispiel dieses Verfahrenablaufes: es wird jedes Gebäu-



Abb. 4: 5000 Rechner in Containern außerhalb eines Bürogebäudes in Boulder (USA, links). Diese Auslagerung verringert die Probleme mit der Kühlung, der Lärmbelastigung und den Vorrichtungen zum Strombedarf (rechts das Innere eines Containers mit den Parallelrechnersystemen der Firma Verari).

de gesondert dargestellt und durch Flächenstücke definiert. Die Gebäude werden auf die kahle Erde in Form eines dichten Digitalen Höhenmodells aufgesetzt. Bäume werden erkannt und durch computergrafische Baummodelle ersetzt. In Beiträgen zur geodätischen Woche Obergurgl 2007 und 2009 wurde dieser photogrammetrische Arbeitsfluss beschrieben (Leberl, 2007; Leberl und Gruber, 2009). Zusammenfassend sei wiederholt, dass der Erfolg eines automatischen Verfahrens von folgenden 6 Faktoren bestimmt wird:

1. Exzellenz in der Bildgebung mit sehr hoher radiometrischer Leistung zur Sicherstellung des Erfolgs automatischer Bildanalyseverfahren (an die 13 Bit \rightarrow 7000 Grauwerte);
2. Intelligente Bildbefliegung zur Erzeugung hoch-redundanter Bildblöcke mit 10 bis 20 Bildern je Objektpunkt;
3. Voll-automatische Aero-Triangulation unter Nutzung der Redundanzen und mit weitestgehender Modellierung systematischer Restfehler und mit Genauigkeiten von etwa $\pm 1 \mu\text{m}$;
4. Vollautomatische Erstellung eines dichten Höhenrasters mit Nutzung der Bild-Redundanzen und mit Höhenwerten im Abstand von 2 Pixeln;
5. Höchstmögliche geometrische Höhen-Genauigkeit im Sub-Pixelbereich;
6. Größtmöglicher geometrischer Detailreichtum durch Befliegungen mit 10cm Bodenauflösung, manchmal sogar mit noch kleineren Pixeln.

Diese Anforderungen führen zu großen Datenmengen. Für das Beispiel von Graz (8 cm Pixel) mit einer Vorwärtsüberlappung von 80% und einer Seitenüberlappung von 60% ergeben sich

3300 Bilder mit 0,5 Gigabytes pro Bild und daher insgesamt 1,5 Terabytes an Eingangs-Daten.

Die Verarbeitung solcher Datenmengen in einer akzeptablen Zeitspanne macht die Verwendung von hochparallelen Rechnern unvermeidbar. In Microsofts Anwendung wird ein Arrangement mit 5000 CPUs verwendet (Abbildung 4).

3.3 Die Rolle der Überbestimmung

Mit dem Übergang vom Filmbild zum Digitalbild entfallen alle Materialkosten pro Bild und es entfällt die wirtschaftliche Begründung für die bisherige (nicht redundante) Minimalüberlappung mit nur 2 Bildern je Objektpunkt für den Stereoeffekt. Eine dichtere Überlappung würde zu höherer Redundanz und dadurch zu einem robusteren und genaueren Datenprodukt führen. Mit dem Übergang vom Zweibild-Stereo zur so genannten Multiview-Geometry, etwa nach Hartley und Zissermann (2003), sind auch methodische Werkzeuge entstanden, welche diese höheren Redundanzen zur Anwendung bringen können.

Es sollte intuitiv einleuchten, dass mit 10 oder 20 Bildern pro Objektpunkt die Verdeckungen in urbanen Hausschluchten und die groben Fehler automatischer Messverfahren reduziert werden. Aber auch die geometrische Genauigkeit wird erhöht. Gruber und Ladstätter (2006) haben gezeigt, dass eine Steigerung der Genauigkeit in der Höhenkoordinate von ± 2 Pixeln im 2-Bildfall auf ± 0.3 Pixel im 8-Bildfall erzielt wird.

4. Menschen-Relevanz und das Straßenniveau

Gebäudemodelle aus Luftbildern liefern Ergebnisse, die am ehesten dem Paradigma der Vogelperspektive entsprechen. So erfährt der Mensch aber seine urbane Umgebung nicht, so kann er kaum sinnvoll damit interagieren. Stattdessen bewegt man sich auf dem Straßenniveau, geht

oder fährt durch Straßen und besucht das Innere von Gebäuden. Damit stellt sich die Frage, wie ein Modell der Welt mit ausreichendem Detail für eine menschlich relevante Darstellung entstehen kann. Dazu gibt es zwei Ansätze: einerseits die systematische und gelenkte Erfassung von Straßendaten, andererseits die Nutzung von Zufallsbildern, wie so von uns allen erzeugt und ins Internet gestellt werden, etwa auch in das System Flickr.com.

4.1 Systematische Datenerfassung mit Sensoren in Fahrzeugen

Anbieter globaler Internet-Suchdienste mit Ortsbezug wie Google ergänzen die städtischen Daten aus der Luft durch Daten aus einem Fahrzeug (Abbildung 5). Dabei werden Städte systematisch abgefahren, sodass von allen Straßenzügen Bilddaten entstehen. Die Anwendung dieser Daten beruht auf den GPS-gestützten Positionierungen der Kameras. Die Bilder werden als eigener Datensatz weitgehend unabhängig von den Luftbildern gezeigt. Es wird also nicht ein 3D-Modell der Straßenzüge entwickelt, die Straßenbilder werden auch nicht auf etwaige 3D Modelle aus der Luft aufgebracht. Stattdessen werden die Aufnahmen in 2D präsentiert. Um einen räumlichen Eindruck zu vermitteln, werden die Bilder in einer Hemisphäre an gewissen Standpunkten belichtet und im 2D Luftbildlaborat an diesen Standpunkten wahlweise

angezeigt. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel. Der Betrachter kann die Blickrichtung vorgeben, der Standpunkt ist aber fest.



Abb. 5: Googles Autos mit Kameras auf dem Dach werden von Österreich nach Deutschland transportiert und zufällig auf der Autobahn gesichtet. Diese Autos sind Teil einer globalen Flotte, welche derzeit die urbanen Straßenschluchten der Welt abfährt.

Das Gegenstück wäre die Nutzung der Straßenbilder, um die Textur der Gebäudemodelle zu verbessern. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel aus einem experimentellen Microsoft-Modell von Tampa (Florida). Man muss wohl damit rechnen, dass eine geometrische Verknüpfung der Bilder aus den diversen Quellen erst in weiterer Zukunft realisiert werden wird und bis dahin nur Zwischenlösungen nach dem Modell von Google angeboten werden.

4.2 Zufallsbilder

Es ist eine offensichtliche Idee, die sehr detaillierten Straßenbilder nicht nur „systematisch“ zu

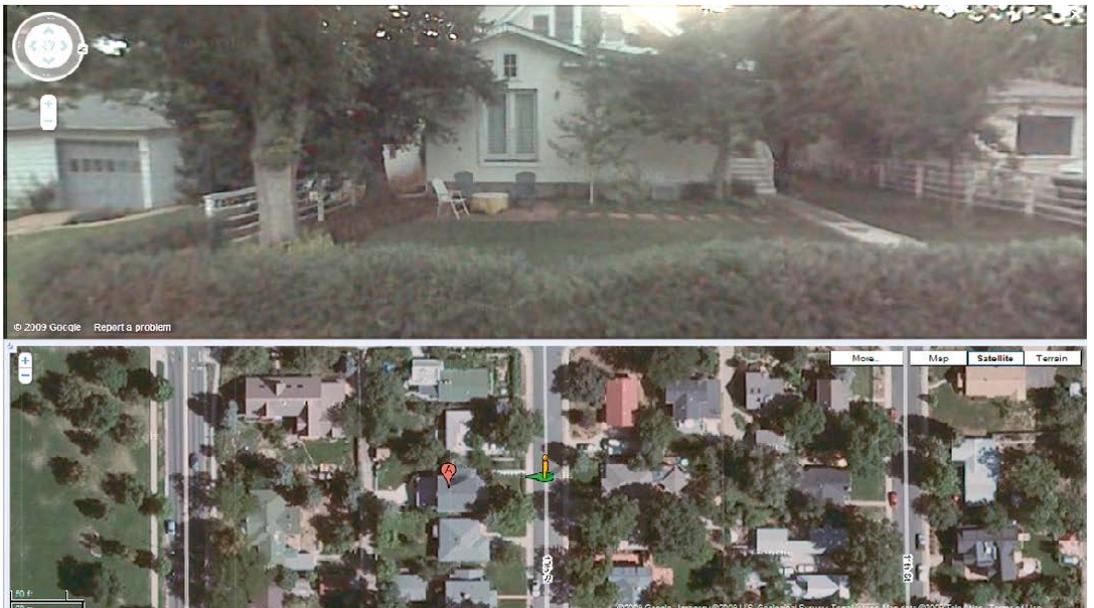


Abb. 6: Googles „Bubble-View“ aus einer Straßensicht-Belichtung. Ein Standpunkt auf der Straße aus dem fahrenden Auto liefert ein hemisphärische Bildgruppe, die in eine „Bubble“ (=Kugelform) umgerechnet wird. Der Betrachter wird an die Aufnahmepositionen gesetzt, kann seinen Blick aber in jede Richtung richten. Szene aus Boulder (USA).



Abb. 7: Microsoft experimentierte mit verschiedenen Darbietungsmodellen von Straßendaten. Dieses Beispiel ist unter www.bing.com/maps für Tampa zu finden. Die 2D-Straßenbilder wurden dort auf die aus Luftbildern gewonnenen 2D-Fassadenebenen aufprojiziert. Das mag aus einer gewissen Distanz einen visuell akzeptablen Eindruck vermitteln (links), aber bei näherem Hinsehen entdeckt man geometrische Inkonsistenzen, etwa wenn ein Straßenbild-Auto im Luftbild-Asphalt versinkt (rechts).

erfassen, sondern die Anwender einzuladen, aus ihrer Nachbarschaft im Sinne der „Neo-Geografie“ selber Bilder beizutragen. Es mag auch sein, dass diese Bilder aus einer Bilddatei wie Flickr entnommen werden.

Eine Begriffsdefinition des Neo-Geografen findet sich bei Goodchild (2008). Google unterstützt das Hinzufügen von Anwender-Fotos als geometrisch nicht zugeordnetes Attribut. Microsoft hat dazu hingegen eine besonders interessante und geometrisch ansprechende Lösung in Arbeit. Diese beruht auf dem System „Photosynth“ (Agüera y Arcas, 2007; Livelabs, 2008).

Abbildung 8 stellt einen Bildverband eines Anwenders dar, der Microsoft als ungeordneter Bildblock angeboten wird. Dort werden diese überlappenden Bilder trianguliert, auch wenn keine innere Orientierung bekannt ist, ja nicht einmal eine, sondern auch mehrere Kameras

diese Bilder erstellt haben können (Snavely u.a., 2008a und b). Abbildung 9 illustriert das Ergebnis einer geometrischen Zuordnung.

Eine Aktivierung dieses Zugangs zur routinemäßigen Nutzung innerhalb des Microsoftsystems BING Maps via www.bing.com/maps (früher Virtual Earth) steht an.

4.3 3D-visueller Eindruck ohne 3D-Modellierung

Die dritte Dimension ist für eine Interaktion mit der urbanen Umwelt unabdingbar. Kann die dritte Dimension durch eine Abfolge von 2D-Visualisierungen angenähert werden? Den Beginn machte Microsoft mit den Schrägaufnahmen (siehe Abbildung 10). Diese dienen dem Zweck, noch vor der späteren Modellierung von Gebäuden in realem 3D einen virtuellen 3D-Eindruck zu vermitteln.

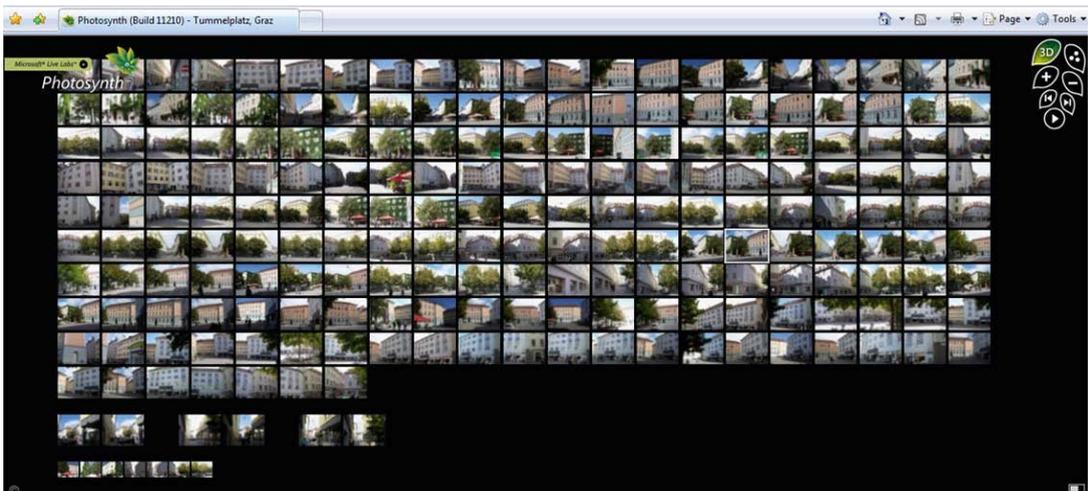


Abb. 8: Photosynth Eingabe – ein Verband überlappender Bilder, vielleicht aus verschiedenen Kameras, aber ohne Wissen um eine innere Orientierung, wird dem System eingegeben.

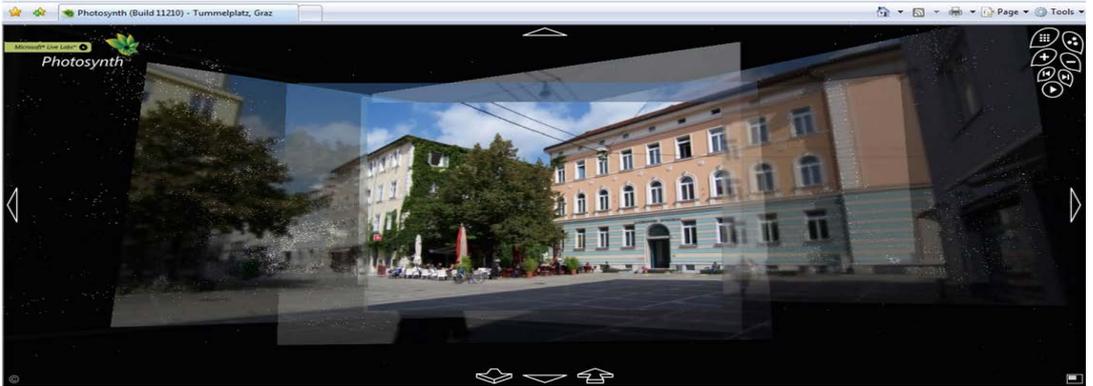


Abb. 9: Photosynth Ergebnis – Einander geometrisch zugeordnete 2D Bilder aus dem Bildverband der Abb. 8. Dies gestattet, das Objekt räumlich zu erkunden, ohne je ein 3D Raummodell erzeugt zu haben.



Abb. 10: Verwendung der Schrägaufnahme aus der Luft zur Vermittlung eines 3-dimensionalen Eindruckes aus einer Folge von vier Bildern, alle 2-dimensional (siehe auch Abb. 1, selbe Szene).



Abb. 11: www.herold.at bietet ein Navigationssystem via Straßenbilder aus Wien an, in welches Innenräume eingebettet sind. Damit wird Geschäften angeboten, sich im Internet mittels eines Panoramabildes in einer pseudo-dreidimensionalen Ansicht interaktiv darzustellen.

Im selben Licht ist die Darbietung der Straßenbilder durch Google in deren System „Streetview“ zu sehen. Es gibt dort kein 3D-Modell, sondern es werden die 2D Bilder selber angeboten, aber in einer Weise, welche entsprechend Abbildung 6 den Anwender im Glauben lässt, dass er sich in einem 3D-Gebilde befindet. Diese Art der Visualisierung vereinfacht das Internet-System, weil es keine 3D-Modelle zu erstellen, zu bearbeiten, laufend zu halten und darzubieten gibt. Dass dies den Charakter einer Zwischenlösung hat, ergibt sich aus der Überlegung, dass im Vollausbau eine freie Standpunktwahl erwünscht ist, daher die Fassaden und die Vegetation in 3D modelliert werden sollten.

4.4 Innenräume und Objekte

Das menschliche Interesse schließt Innenräume mit ein, etwa in Shopping Malls, Kirchen, Museen, Ämtern usw. Und auch die in gewissen Gebäuden enthaltenen Objekte, etwa Statuen, sind von Interesse. Gruber und Sammer (1995) haben dazu erste Ansätze entwickelt, ohne dabei eine Anwendung via Internet im Auge zu haben. Herold (2009) hingegen nutzt das Internet in einem Geschäftsmodell, welches einzelnen Betrieben gestattet, sich in einem Pseudo-3D-Format zu zeigen. Bilder der 360°-Umgebung werden aus einem festen Standpunkt aufgenommen und als 2D-Panorama angeboten (Abbildung 11).

5. DATENMENGEN IM EXABYTE-BEREICH

5.1 Ein 3D Weltmodell aus Luftbildern

In Tabelle 1 werden Annahmen und Berechnungen zum Datenumfang eines Weltmodells aus Luftbildern zusammengefasst. 9 Millionen Luftbilder würden die gesamte Landmasse der Erde im Umfang von 148 Millionen km² ohne Redundanz bedecken, wenn man eine geometrische Auflösung von 30 cm annimmt. Für die vollautomatische Interpretation und die Erweiterung zu einem 3D Modell sollte man eine 10-fache Redundanz einplanen. Dies führt zu 90 Millionen Luftbildern mit einem Volumen von etwa 50 Petabytes.

Landmasse der Erde, km ²	148,000,000	Quadratkilometer
Fläche 1 Luftbild @ 30 cm Pixel, km ²	16.83	Berechnet aus 17K x 11K Pixeln
Luftbilder der Erde ohne Redundanz	8,793,821	Berechnet
Luftbilder der Erde, 10-fach Redundanz	87,938,206	Berechnet
Terabytes für die Landmasse der Erde	47,506	Berechnet

Tabelle 1: Bedeckung der Landmasse der gesamten Erde mit Luftbildern (oder auch Satellitendaten) mit 30 cm Pixeln führt zu einem Datenbestand von 50 Petabytes, wenn man eine 10-fache Redundanz einplant.

Erweitert man diese Daten in den Städten der Industrienationen um eine höhere Auflösung von 10 cm in 3 Dimensionen, so erhält man nach Tabelle 2 weitere 9 Millionen Luftbilder und 5 Petabytes. Wollte man im Jahresverlauf die Jahreszeiten beachten, so könnte man an 4 Datensätze denken und das Gesamtvolumen an Luftbild-Daten wäre im Bereich von etwa 200 Petabytes.

Erstaunlich ist, dass eine Rechnerkonfiguration mit 5000 CPUs an einem Ort und bei einem Berechnungsaufwand von 1 h pro Bild diese Datenmenge in etwa 2 Jahren abarbeiten könnte.

5.2 Erweiterung des Weltmodells in den Straßen und manchen Innenräumen

Man kann davon ausgehen, dass eine Stadt mit einer Fläche von 167 km² eine Straßenlänge von vielleicht 260 km betreut, wenn ein enges Strassengitter im Abstand von etwa 100m besteht. Man wird diese Straßen abfahren und mit Bildern bedecken, welche Pixelgrößen von etwa 2cm aufweisen, damit alle Schilder gelesen werden können. Werden entlang aller Straßen im Abstand von 4m jeweils 6 Bilder mit je 1 Mbyte erstellt, so fügt dies dem Datenvolumen insgesamt zu:

- 1,2 Milliarden Bilder;
- 1,2 Exabytes.

Dazu sollte man noch die Innenräume einplanen. Diese werden wohl mit noch höherer geometrischer Auflösung erfasst, daher mit vielleicht 0,5 cm Pixeln. Nimmt man an, dass 10% aller erfassten Gebäude mit zumindest zwei Innenräumen dargestellt werden, und werden pro Innenraum je drei Bildsphären mit je 12 Bildern erfasst, so ergibt sich daraus wiederum ein Volumen von:

- 1,1 Milliarden Bildern;
- 1,1 Exabytes.

6. Von kolorierten Polyedern zu interpretierten Objektmodellen

Was wir heute am Internet in den Suchmaschinen angeboten erhalten, ist im wesentlichen für das Auge gedacht und stellt uninterpretierte Flächen mit aufgebracht Phototextur dar. Die wesent-

Thema	Wert	Kommentar
Bevölkerung, global	1,500,000,000	In den reichen Industriestaaten
Städte	3,000	Annahme
Bewohner pro Stadt	500,000	Berechnet
Menschen pro Gebäude	10	Annahme
Gebäude, global	150,000,000	Berechnet
Gebäude je km ²	300	Annahme
Datenbudget, US\$	100,000,000	Einfach definiert
Kosten pro Gebäude, US\$	0.67	Berechnet
Fläche pro Stadt, km ²	167	Berechnet
Fläche auf 1 Luftbild @ 10 cm pixels, km ²	1.87	Format mit 17K × 11K Pixeln
Photos pro km ² @ 10 cm Pixels	0.53	Berechnet
Photos pro Stadt ohne Redundanz	312	Berechnet
Redundanz-Faktor	10	Annahme
Gesamtzahl der Luftbilder pro Stadt	3,117	Berechnet
Gesamtzahl aller Luftbilder	9,350,000	Berechnet
Mbytes pro Bild	1,496	2 bytes per each of 4 colors
Mbytes/Bild @ Level 2 (komprimiert)	540	Pan @ volle Auflösung, Farbe reduziert
Terabytes für alle Städte	5,051	Berechnet

Tabelle 2: Datenmenge zur Erzeugung von urbanen 3D Modellen aus Luftbildern mit 10 cm Pixeln und 10-fach Redundanz. In den Industrienationen leben etwa 1,5 Milliarden Menschen in zirka 3000 Städten einer Größe von zumindest 100000 Einwohnern.

liche Interpretation in den Datenbeständen ist (1) die Auftrennung in die kahle Erde als DTM und die darauf befindlichen Gebäude-Blöcke als einfache Polyeder und (2) die Bäume mit einigen wenigen Kennzahlen wie etwa Durchmesser der Baumkrone und Baumart. Eine Suche dieser geometrischen Objekte ist nicht möglich, weil die einfachsten Fakten nicht bekannt sind. Wir wissen nicht, wo ein Gebäude endet und ein zweites beginnt, also sind Adressen nicht zuordenbar. Es ist unbekannt, wie viele Stockwerke ein Gebäude hat, wo Fenster sind, ob es einen Keller gibt, wo etwa Schornsteine und Dachflächenfenster für eine Evakuierung bestehen. Gibt es versiegelte Flächen? Eine Garage?

Damit wollen wir darauf hinweisen, dass eine „Suche“ des urbanen Datenbestandes nicht sinnvoll möglich ist, solange die Objekte nicht interpretiert sind, wie dies ja in traditionellen Landkarten und einem modernen 2D GIS sehr wohl der Fall ist. Wir sehen daher eine Notwendigkeit, an ein zukünftiges Weltmodell zu denken, in welchem die gesammelten Bilder zu interpretierten Modellen der Objekte umgewandelt wurden und die Visualisierung für das Auge computergrafisch aus den Objekten berechnet wird. Ansätze zu diesem interpretierten Modell (semantic model) werden an der Technischen Universität Graz entwickelt und bearbeitet (siehe etwa Kluckner u.a., 2009; Recky & Leberl, 2009).

Die wachsende Bedeutung der Augmented Reality und ihre Realisierung über Smart Phones begründet die Hoffnung auf eine wichtige Anwendung. Erste Ansätze dazu sind zum Beispiel im Projekt Vidente ebenfalls in Graz in Entwicklung (siehe Schall u.a., 2009 und Abbildung 2).

7. Ausblick

Dass die Suche am Internet einen dramatischen Bedarf an Geodaten begründen würde, ist seit etwa 2005 mit den ersten globalen Systemen der ortsbewussten Internetsuche zunehmend sichtbar. In Österreich begann zwar die Entwicklungsarbeit von 3D Stadtmodellen sehr früh, nämlich Mitte der 90-er-Jahre (Gruber, 1997). Jedoch wurde damals keineswegs an eine derartige Anwendung gedacht. Diese Entwicklung hat die meisten Geodaten-Experten überrascht.

In der kurzen Zeit seit 2005 konnte sich noch kein Standardvorgehen für die Verknüpfung der Internet-Suche mit einem 3D Weltmodell herausbilden. Wir erfahren ein Auf und Ab verschiedener Ansätze in 2 und 3 Dimensionen. Deutlich ist, dass die Landmasse des Globus mit 2D Orthophotos bedeckt wird, wobei die geometrische Auflösung in politisch schwierigeren Regionen durch Sensoren aus Satelliten bestimmt wird und in liberaleren Regionen mit höher auflösenden Luftbildern zu rechnen ist. Die Wunschaufklärung liegt bei 30 cm und höher. In urbanen Räumen

ist aber absehbar, dass nur ein 3D-Ansatz langfristigen Sinn macht, auch wenn zunächst die 3. Dimension durch eine Folge von 2D-Visualisierungen angenähert wird, wie wir dies heute mittels Schrägluftbildern vermittelt erhalten.

Die Vogelperspektive ist ein ungeeignetes Paradigma für die menschliche Nutzung eines Stadtmodells. Man spricht vom „human scale“ und meint damit die Erfahrung eines fahrenden und gehenden Benutzers des Internet (im Auto, am Smart Phone). Dies führt zu Bildern von Straßen und Innenräumen. Und diese Daten bringen den Bestand sehr schnell jenseits der Grenze zum Exabyte; daher können wir durchaus von einem *Exabyte-Weltmodell* sprechen.

Die Internet-inspirierte Modellierung der Welt unterscheidet sich zunächst von den regionalen Datenmodellen zur Erfüllung hoheitlicher Aufgaben. Denn zunächst ist bei ersterem die Qualitätskontrolle nur schlecht ausgebildet, die Datenbestände sind inhomogen und schlecht bis gar nicht integriert, die Genauigkeit und Vollständigkeit ist weitgehend unbestimmt. Es ist aber absehbar, dass diese Unterschiede langfristig verschwimmen könnten. Mit der Idee der Neo-Geografen und der Anwender-Beiträge zur Initialisierung und Aktualisierung höchstauflösender 3D Darstellungen urbaner Räume kann durchaus ein Datengebilde entstehen, welches nicht nur die Bedürfnisse der Internet-Nutzer, sondern auch alle wesentlichen hoheitlichen Anwendungen abdeckt.

Ganz besonders sehen wir diese Konvergenz anhand des Trends, statt der nur dem Auge dienenden Datenbestände auch die Suche selber auf die urbanen Geometrieobjekte auszubreiten, etwa im Sinne von „alle Garagen“ oder „Gebäude mit Dachflächenfenstern“. Dann kommt es zu einem Weltmodell mit interpretierten Details, und dies erfordert eine hohe geometrische Genauigkeit zur sinnvollen Verknüpfung von Bildern und Sensordaten unterschiedlicher Provenienz. Und für die sinnvolle Suche besteht die Notwendigkeit zur Vollständigkeit und der damit verbundenen Verifizierung dieser Vollständigkeit und Qualität.

Literaturverzeichnis

Agüera y Arcas B. (2007) http://www.ted.com/talks/blaise_aguera_y_arcas_demos_photosynth.html

BEV (2009) <http://www.bev.gv.at/portal/page>

Ernst J. (2007) *E- Geodata Austria – the web service of the BEV*. Seminar „Cadaster on the Internet“ November 27th, Lisbon. Available from http://www.euro-socialfiscal.org/uploads/documentos/20071204_171212_Austrian_Web_services.pps

Etak (2009) <http://en.wikipedia.org/wiki/Etak>

Gartner G., K. Rehr Eds. (2008) *Location Based Services and TeleCartography II. From Sensor Fusion to Context Models*. 5th International Conference on Location Based Services and TeleCartography, 2008, Salzburg. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography; 2009, XXIX, 456 p. ISBN: 978-3-540-87392-1

Goodchild M. (2008) Assertion and authority: the science of user-generated geographic content. *Proceedings of the Colloquium for Andrew U. Frank's 60th Birthday*. GeInfo 39. Department of Geoinformation and Cartography, Vienna University of Technology.

Gruber M. and R. Ladstätter (2006): Geometric issues of the digital large format aerial camera UltraCamD. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006, Proceedings, 25-27 Jan. 2006, Castelfdefels, Spain.

Gruber M., P. Sammer (1995) Modeling the Great Hall of the Austrian National Library, International Journal of Geomatics 9/95, Lemmer 1995.

Gruber M.(1997) „Ein System zur umfassenden Erstellung und Nutzung dreidimensionaler Stadtmodelle“, Dissertation, Graz University of Technology, 1997.

Hartley R, A. Zissermann (2003) *Multiple View Geometry for Computer Vision*. Cambridge University Press, 2nd edition.

Herold (2009) <http://strassentour.herold.at/> und <http://www.herold.at/routenplaner/>

Klicktel (2009) www.klicktel.de

Kluckner S., Georg Pacher, H. Bischof, F. Leberl (2009) Objekterkennung in Luftbildern mit Methoden der Computer Vision durch kombinierte Verwendung von Redundanz, Farb- und Höheninformation, in 15. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2009, Wichmann – Heidelberg.

Leberl F., R. Kalliany (1995) Satellite Remote Sensing in Austria and the European Center for Earth Observation. Vermessung und Geoinformation (vormals OeZ), 83.Jhg, VGI 1+2/95, pp.37-47.

Leberl F. (2007) Die automatische Photogrammetrie für das Microsoft Virtual Earth System. in 14. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2007, Wichmann – Heidelberg, S. 200 – 208.

Leberl F., M. Gruber (2009) „Ortsbewusstsein im Internet – von 2-dimensionalen Navigationshilfen zur 3-dimensionalen Mixed Reality“. Tagungsband der 15. Geod. Woche Obergurgl, Wichmann-Verlag, ISBN 978-3-87907-485-3. S. 67-79.

Leberl F. (2009) Human Habitat Data in 3d for the Internet. Springer Lecture Notes on Computer Science LNCS, Selected Papers from VisiGrapp-2009, Lisbon, Portugal.

LiveLabs (2008) Seadragon, Microsoft Live Labs, 2008. <http://livelabs.com/seadragon>.

MapQuest (2009) <http://www.mapquest.com>.

O'Reilly T., J. Batelle (2009) *Web Squared: Web 2.0 Five Years On*. O'Reilly Media Inc. Available from www.web2summit.com.

Recky M., F. Leberl (2009) *Semantic Segmentation of Street-Side Images*. In "Visual Learning", books@ocg.at, Volume 254; Proceedings of the Annual Meeting of the Austrian Assoc. for Pattern Recognition AAPR, P. Roth, T. Mautner, T. Pock (eds.), held in Stainz (Austria), May 14-15; pp. 273-282.

Schall G., D. Schmalstieg, F. Leberl (2009) Einsatz von mixed reality in der Mobilen Leitungsauskunft, in 15. Intern.

Geodätische Woche Obergurgl 2009, Wichmann – Heidelberg.

Snavely N., S. M. Seitz, and R. Szeliski. (2008a) Modeling the world from Internet photo collections. International Journal of Computer Vision, 80(2):189-210, November 2008.

Snavely N., R. Garg, S. Seitz, R. Szeliski (2008b) Finding Paths through the World's Photos. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2008).

Tomlinson R.F. (1967) An introduction to the geo-information system of the Canada Land Inventory. ARDA, Canada Land Inventory, Department of Forestry and Rural Development, Ottawa.

Van Kranenburg R. (2008) The Internet-of-Things, A Critique of Ambient Technology and the All-Seeing Network of RFID. Network Netbooks. Institute of Network Cultures, Amsterdam. ISBN/EAN 978-90-78146-06-3, 61 Seiten

Vidente (2009) Vidente – Handheld Augmented Reality for Technical Infrastructure. <http://www.vidente.at/>

Anschrift der Autoren

o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Leberl, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: leberl@icg.tugraz.at;

Dr. Michael Gruber, Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergergasse 8, A-8010 Graz.
E-Mail: michgrub@microsoft.com

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Franz Leberl

1967 Dipl.-Ing. Geodäsie und Photogrammetrie, TU Wien

1972 Rigorosum

1977 Habilitation für Photogrammetrie und Fernerkundung

1985-1992 Gründung von Vexcel Imaging, bis 1992 CEO, dann Vorstandsmitglied

seit 1992 Professor für Informatik an der TU Graz

1992-1997 Vorstandsvorsitzender von Vexcel Imaging

1996-1998 CEO der Austrian Research Centers Seibersdorf

1998-1999 Vorstandsvorsitzender Vexcel Imaging

2003-2006 CEO Vexcel Imaging GmbH; Verkauf von Vexcel an Microsoft in 2006

2006-2007 Direktor der Microsoft Virtual Earth Business Unit

2008 Dekan der Fakultät für Informatik



Medienpartner des OGT



The latest news in one location

DATA

Cartographic
Accuracy
Metadata
Remotely Sensed
Warehousing
Capture/Conversion
Legislation and Privacy Issues
Standards / Availability
Web & Wireless Content
Data Integration
Offshore Services

SOFTWARE

Surveying
Cartographic Production
Visualisation
WebMapping
Image Processing / Compression
Spatial Databases
Digital Photogrammetry
Cadastral/LIS
3-D Modelling
Geomarketing
Addressing and Geocoding

HARDWARE

Large Format Printers & Plotters
PC/Workstation Technology
Hand-Held Devices for Personal Nav.
Speech Recog. & Voice Output Tech.
Analogue & Digital Airborne Cameras
Laser Range Finders
GPS/GIS Data Capture
Photogrammetric Workstations
Bulk Data Storage
Wireless Technology
Surveying Instruments

APPLICATIONS

Environmental/Natural Resources
Health
Public Safety
Retail
Environmental
Utilities
Surveying
Location-Based Services
Transport and Logistics
Telecommunications
Geophysics

Annual Subscription Rates:

GEO:connexion: £45 or €85/US\$
GEO:connexionUK: £25 or €48/US\$
Combined Subscription: £50 or €95/US\$
Online Subscription: £20 or €38/US\$
Email: subscription@geoconnexion.com
Tel: +44 (0) 1223 279151

www.geoconnexion.com/subscription or email: subscription@geoconnexion.com

GEO:connexion



Die Gletscher im Wandel der Zeit – Gletschermonitoring am Beispiel der Pasterze

Wolfgang Sulzer und Gerhard K. Lieb, Graz

Kurzfassung

Die Gletscher im Wandel der Zeit – Gletschermonitoring am Beispiel der Pasterze: Das zentrale Thema dieses Beitrags ist die räumliche und zeitliche Veränderung der Gletscher unter veränderten Klimabedingungen. Zu diesem Zweck wird ein kurzer Überblick über glaziologische Grundbegriffe gegeben. Anschließend wird die Verteilung und Veränderung der Vergletscherung aus globaler Sicht unter besonderer Berücksichtigung der Situation seit dem Pleistozän diskutiert. Anhand der Pasterze, dem größten Gletscher Österreichs, wird der kontinuierliche Gletscherrückgang seit dem Jahre 1850 dokumentiert. Der Gletscherrückgang wird sowohl mit traditionellen als auch mit modernen (unter spezieller Berücksichtigung der Fernerkundung) Methoden durchgeführt. Ein Vergleich der verwendeten Beobachtungsmethoden zeigt, dass die besten Ergebnisse bei einer Kombination traditioneller mit modernen Methoden erzielt werden.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Gletschermonitoring, Pasterze

Abstract

Glaciers in the change of time – glacier monitoring by the example of Pasterze: The leading topic of this paper is the spatio-temporal reaction of glaciers to the changing climatic conditions. For this purpose a short overview of basic terms of glaciology is given first. Then the glacial phenomenon is discussed on a global perspective with special regard to the Pleistocene and the development since then. Pasterze glacier is used as an example of pronounced shrinking of a glacier since 1850. The glacier retreat is monitored by traditional as well as modern methods (with special focus on Remote Sensing) which are compared in the last chapter. The results show that the best way of monitoring the behavior of glaciers is to use a set of different methods.

Keywords: climate change, glacier monitoring, Pasterze

1. Einleitung

Der Beitrag soll einen geowissenschaftlichen Überblick über das Werden und Vergehen von Gletschern geben. Dabei wird der Bogen über Grundbegriffe der Gletscherkunde bis hin zu Methoden des Gletschermonitorings am Beispiel der Pasterze gespannt. Die historischen Veränderungen der Vergletscherung in den Alpen spiegeln eine abwechslungsreiche Klimageschichte wider. Verschiedene wissenschaftliche Methoden erlauben es, Veränderungen von Gletscherausdehnungen weit in die Vergangenheit zurück zu verfolgen. Unmittelbar dokumentiert und vermessen werden die Veränderungen der Gletscher seit der 2. Hälfte des 19. Jhs. – an der Pasterze, Österreichs größtem Gletscher, existiert eine der weltweit längsten Messreihen seit 1879. In jüngster Zeit erlauben moderne Methoden wie etwa die Fernerkundung einen exakteren und flächenhaften Einblick in den vom Klimawandel klimagesteuerten Gletscherrückzug.

2. Grundbegriffe der Gletscherkunde

„Unter einem Gletscher versteht man eine aus festem atmosphärischen Niederschlag entstandene Masse aus Schnee und vor allem körnigem Eis, die sich in teils gleitender, teils fließender

Bewegung von einem Nähr- in ein Zehrgebiet befindet.“ Diese gängige Definition spricht die wichtigsten Rahmenbedingungen, den inneren Aufbau und die daraus resultierende Dynamik der Gletscher an und soll die Leitlinie der folgenden Erläuterungen bilden.

Die Bildung von Gletschern setzt Klimaverhältnisse voraus, unter denen über viele Jahre hinweg mehr Schnee fällt als abschmilzt. Dies ist in Abhängigkeit von einem ausreichend tiefen Temperaturniveau nur in den hohen Breiten (Arktis, Antarktis) und in großen Höhen der Gebirge der Fall. Wenn sich der **Schnee** anhäuft, wandelt er sich durch Setzung, Auftauen und Wiedergefrieren allmählich zu **Firn** (=Schnee, der älter ist als ein Jahr) und unter dem Druck der überlagernden Schneeschichten nach einigen Jahren schließlich zu grobkörnigem **Gletschereis** um.

Da sich Schnee und Eis auf diese Weise nicht beliebig hoch auftürmen können, kommt es zu einer der Schwerkraft folgenden Massenverlagerung (**Fließbewegung**) talabwärts, die einerseits durch Gleiten am Untergrund und andererseits durch interne Verformung der Eismasse zustande kommt. Hierdurch gelangt ein Teil des Gletschers in eine tiefere Höhenstufe, in der im

Laufe eines Jahres mehr Schnee abschmilzt als fällt. Das bedeutet, dass im Sommer nicht nur der hier gefallene Schnee wieder verschwindet, sondern darüber hinaus auch noch Gletschereis abschmilzt (**Zehr- oder Ablationsgebiet** des Gletschers). Wird der Betrag dieser Abschmelzung durch den Eisnachschub (aus dem **Nähr- oder Akkumulationsgebiet**) kompensiert, so ändert sich die Ausdehnung des Gletschers nicht (=stationäres Verhalten). Ist der Eisnachschub größer, so schiebt sich der Gletscher nach vor, vergrößert also sein Areal (= **Gletschervorstoß**); ist der Eisnachschub kleiner, schmilzt der Gletscher zurück (=sogenannter Gletscherrückzug, oder **Gletscherschwund**).

Diese Variationen der Ausdehnung des Gletschers hängen vom Massenumsatz ab, der zahlenmäßig als **Massenbilanz** ausgedrückt werden kann und sich (nach einem gerne verwendeten Vergleich mit einem Unternehmen) aus der Summe der „Einnahmen“ (Akkumulation) und der „Ausgaben“ (Abschmelzung = Ablation) zusammensetzt (Abbildung 1). Dabei sind die Witterungsverhältnisse des jeweiligen Jahres der wirtschaftlichen Konjunktur vergleichbar. Zentrale Größe hierbei ist die Höhenlage der **Gleichgewichtslinie**, die Nähr- und Zehrgebiet voneinander trennt, bzw. ihr langjähriges Mittel, die **Schneegrenze**. Bei stationären Gletschern gilt im Alpenraum als grobe Faustregel, dass Nähr- und Zehrgebiet meist ein Flächenverhältnis von etwa 2:1 besitzen.

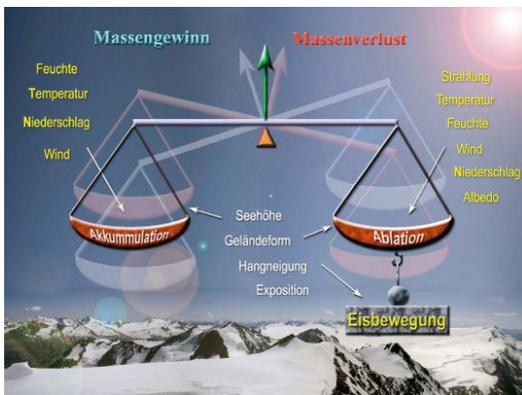


Abb. 1: Die Massenbilanz eines Gletschers (Quelle: Weber, 2004)

3. Die Verbreitung der Gletscher im Wandel der Zeit

3.1 Übersicht

In kontinentaleuropäischer Perspektive spielen Gletscher flächenmäßig eine nur geringe Rolle, bedecken sie doch selbst im „Parade-Gebirgsland“ Schweiz nicht mehr als 3% der Staatsflä-

che. Auf der gesamten Erde hingegen umfassen die Gletscher rund 16 Millionen Quadratkilometer oder rund 11% der Festlandsfläche, wovon 86% auf den fast ganz vergletscherten Kontinent Antarktis, 11% auf Grönland und nur 3% auf alle übrigen Gebiete entfallen. Mehr noch als die Flächen ist jedoch die in Gletschereis gebundene Wassermenge von Interesse. 97,5% des Wassers der Erde sind Salzwasser und vom verbleibenden Rest sind wiederum etwa 70% des Süßwassers als Eis in Gletschern gebunden. Damit rücken abschmelzende Gletscher als mögliche Süßwasserlieferanten für eine verstärkt unter Wassermangel leidende Menschheit ins Blickfeld.

Da Gletscher klimaabhängig sind und sich das Klima beständig ändert – derzeit wegen der vom Menschen verursachten Verstärkung des „Treibhauseffektes“ besonders dynamisch –, wandelt sich auch das Verbreitungsbild der Gletscher. Noch vor rund 20.000 Jahren etwa lag in der Würm-Eiszeit ganz Nordeuropa unter einem Eispanzer und die Gletscher der Alpen stießen bis vor die Tore Münchens vor. In den Ausläufern der östlichen Ostalpen reichten die mächtigen Talgletscher entlang der Talungen der Mur bis Judenburg, der Drau bis Völkermarkt und der Enns bis etwa Hiefrau (Abbildung 2).



Abb. 2: Rekonstruktion der würmzeitlichen Vergletscherung der östlichen Ostalpen (Ausschnitt aus van Husen, 1987)

Viele Naturphänomene – von den Alpen- und Alpenrandseen über die Urstromtäler des Norddeutschen Tieflandes bis zu den Fjorden Norwegens – zeugen davon. Umgekehrt kennt die Erdgeschichte aber auch viele Millionen Jahre

andauernde Phasen, in denen es auf der Erde überhaupt keine Gletscher gab. Aussagen zur gegenwärtigen Vergletscherung sind also nur Momentaufnahmen in einem permanenten Anpassungsprozess der Gletscher an die sich laufend wandelnden Klimabedingungen. Vor diesem Horizont schenkt die moderne Forschung den Gletschern als sensible „Klimazeigern“ hohe Aufmerksamkeit. Die Datenbestände über die räumliche Verteilung und zeitlichen Veränderung werden durch den World Glacier Monitoring Service (2009) in Zürich verwaltet und fortgeführt.

3.2 Die Vergletscherung in den Alpen

Im 20. Jahrhundert haben die Gletscher aller Gebirge der Erde – mit wenigen Ausnahmen – an Fläche, Länge und Volumen verloren. Beim letzten Gletscherhochstand um 1850 betrug die gesamtalpine Gletscherfläche ca. 4470km², 1970 dann noch 2909km² und 2000 nur noch 2270km². Innerhalb von 150 Jahren hat sich somit die alpine Gletscherfläche um 50% reduziert. Noch drastischer ist der Volumenverlust (Tabelle 1): Zwischen 1975 und 2000 ist im Schnitt jährlich rund 1% des verbleibenden Eisvolumens verloren gegangen. Seither sind die durchschnittlichen jährlichen Verluste auf ca. 2 – 3% gestiegen. Das Extremjahr 2003 allein hat geschätzte 8% des restlichen Eises eliminiert (Haeberli und Maisch, 2007; Zryd 2008).

	1850	1975	2000	2005
Volumen (km ³)	200	105	75	65
Rel. Änderung des Volumens (%)		-47,5	-28,5	-12,5
Änderungsrate (% pro Jahrzehnt)		-3,8	-11,4	-25,5

Tabelle 1: Eisvolumen und Änderungsraten von 1850-2005 (nach Haeberli und Maisch, 2007)

Der Anteil der Gletscherfläche von rund 0,5% an der österreichischen Staatsfläche ist übrigens ähnlich dem der Weinbaufläche: Beide Phänomene sind in der österreichischen Flächenstatistik Marginalien, denen aber jeweils große wirtschaftliche Bedeutung und ideelle Wertschätzung – mit starker Rückwirkung sogar auf regionale Identitäten – zukommt. Die Gletscher umfassten übrigens selbst bei ihrem letzten „Hochstand“ in der Mitte des 19. Jhs. nur 1,1% des heutigen Staatsgebietes. Das in allen Gletschern gespeicherte Wasservolumen spielt im gesamtösterreichischen Wasserhaushalt eine geringe Rolle: Die Wassermenge entspricht nur einem Fünftel der Menge, die jährlich als Niederschlag auf Österreich fällt.

Szenarien für die Zukunft zeigen, dass selbst bei einem günstigen Klimaszenario – einer Stabilisierung der globalen Temperaturzunahme bei etwa 2 Grad und einem um rund den Faktor 2 verstärkten Effekt im Hochgebirge – die Alpengletscher innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf kümmerliche Reste verschwinden dürften (Haeberli und Maisch, 2007).

In der Schweiz wird bei einer Erwärmung bis 2080 von 2,8 Grad ein Schneegrenzanstieg um 400m erwartet (Haeberli et. al, 1998). Für Österreich werden sich die Gletscher aufgrund der wesentlich geringeren Vergletscherung und Gebirgshöhen zum Ende des 21. Jahrhunderts in die höchsten Lagen und Kare zurückziehen, Talgletscher werden keine mehr vorhanden sein (Wakonigg, 2007).

4. Die Pasterze und ihre Messungen

4.1 Übersicht

Die Pasterze, der größte Gletscher Österreichs und der Ostalpen, gilt als ein besonders gut erforschter Gletscher, wobei in jüngster Zeit zahlreiche wissenschaftliche Einzelprojekte, die sich etwa mit Fragen der Klimaänderung, der Abschmelzung oder der Massenbilanz befassten (Slupetzky et. al 1998, Herbst et. al, 2002, Oerlemanns 2005, Geiser 2006, Böhm et. al, 2007, Kellerer-Pirklbauer A., 2008). Das Besondere an der Pasterze aber sind die außerordentlich langen Datenreihen aus Standardmessungen, die bereits seit 1879 alljährlich – im September 2009 also zum 130. Mal – durchgeführt wurden.

Der Pasterzengletscher liegt am Fuß des Großglockners (Hohe Tauern) im Einzugsgebiet der Möll bzw. der Drau, in welchen die Vergletscherung während der Würmkaltzeit bis an das östliche Ende des Klagenfurter Beckens vorgestoßen ist (Abbildung 2).

An der Pasterze wurden in den letzten Jahren vom Gletscherbach immer wieder Hölzer unter dem Gletscher herausgespült (Slupetzky 1993; Nicolussi und Patzelt 2000, 2001). Diese Reste von teilweise über 300 Jahre alt gewordenen Bäumen, jeweils Lärchen bzw. Zirben, datieren vor allem ins frühe Holozän und belegen durchwegs Perioden mit einer geringeren Eisausdehnung der Pasterze als heute. Abbildung 3 veranschaulicht die Gletschervorstöße von Pasterze und Gepatschferner (Ötztaler Alpen), die mit den klimaabhängigen Jahresringbreiten der Zirbe (geringere Werte signalisieren kühle Klimaphasen) erwartungsgemäß relativ gut übereinstimmen (Nicolussi und Patzelt 2001).

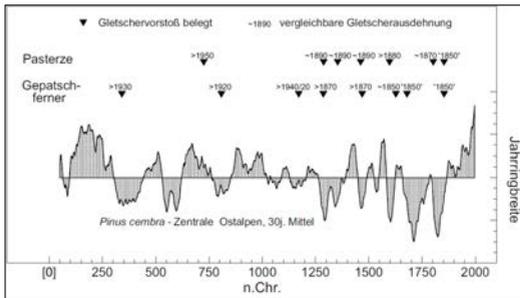


Abb. 3: Vergleich der nachgewiesenen Gletschervorstöße von Pasterze und Gepatschferner mit der Jahringbreitenentwicklung der ostalpinen Hochlagen-Zirbenchronologie der letzten 2000 Jahre (nach: Nicolussi und Patzelt, 2001).

Gletscher sind seit langem eine wichtige Datenquelle in der Paläoklimaforschung. Gletscher bieten zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Gewinnung von Proxydaten über das Klima vergangener Zeiten (Schöner, 2009):

- Analyse der im Eisgefüge gespeicherten Klimainformation (Analyse von Eisbohrkernen) wobei sowohl das Eis selbst als auch die eingeschlossene Luft untersucht werden können. Die Gletscher der Ostalpen sind auf Grund der geringeren Seehöhen und der damit verbundenen sommerlichen Schmelze nicht in der Lage, entsprechende Klimainformation im Eis oder Firn zu speichern.
- Proxydaten, die aus der Untersuchung der Gletschermassenbilanz und damit in Zusammenhang stehenden Größen (Volumenänderungen, Längenänderungen, Höhe der Gleichgewichtslinie, Flächenverhältnis Akkumulationsgebiet zu Gesamtfläche) abgeleitet werden. Im weiteren Sinne beziehen sich auch Klimarekonstruktionen aus Moränenständen, Expositionsdatierungen, Flechtenmessungen und ähnliches auf die Massenbilanz eines Gletschers.

Die weitläufigen Nährgebiete der Pasterze liegen in hochgelegenen Firnmulden auf tertiären Altflächen und erlauben somit das Vorhandensein einer mächtigen Gletscherzunge. Hauptsächlich die beiden Firnmulden Schneewinkel und Riffelwinkel, die beiderseits des Johannsbergs (3463m) liegen, sind für die Ernährung der Pasterze verantwortlich. An einer um die 400m hohen Steilstufe zwischen dem Mittleren und Kleinen Burgstall wird die Gletscheroberfläche aufgerissen und es bildet sich der „Hufeisenbruch“ mit zahlreichen Spalten und Seracs (Eisstürmen). Am Hufeisenbruch sind in den letzten

Jahren immer mehr apere Stellen sichtbar geworden, was auf einen geringeren Eisnachschub hindeutet. Die Gletscherzunge weist nur eine geringe Neigung von etwa $4 - 6^\circ$ auf und liegt zur Gänze im Zehrgebiet. Sie weist besonders im Bereich ihres mittleren Abschnittes im schutfreien Bereich zahlreiche Spalten auf. Da der Gletscher durch die Isolationswirkung der Schuttbedeckung vor der Ablation geschützt wird, weist die orographisch rechte schuttbedeckte Seite eine größere Mächtigkeit und Länge auf. Die Schuttbedeckung variiert von wenigen cm bis rund 1m.

Pasterze und Großglockner von der Franz-Josefs-Höhe
Blick von der Franz-Josefs-Höhe (2370m) auf den Großglockner und die Pasterze, Blickrichtung Westen



Abb. 4: Die Pasterze im Überblick (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

4.2 Langjährige Standardmessungen

Die an der Pasterze alljährlich im Auftrag des Österreichischen Alpenvereins routinemäßig durchgeführten Messungen erfolgen nach wie vor mit einfachen, traditionellen Methoden, einerseits aus Kostengründen und andererseits zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit den vorhandenen langjährigen Messreihen. Die Aussagekraft der Daten in Hinblick auf die klimatische Interpretation des Gletscherverhaltens ist dadurch nicht beeinträchtigt.

Die Längenänderung eines Gletschers drückt die Veränderung der Lage der Gletscherstirn von Jahr zu Jahr aus. Die Längenänderung wird jährlich durch Messung der Distanz von fix definierten Punkten zum Gletscherrand in konstanter Richtung bestimmt. Hierzu wird ein Visierkompass (Bussole) und ein Maßband bzw. ein anderes Distanzmessgerät (z.B. Laser) benötigt.

Die Pasterze hat auf Grund ihrer - immer noch beeindruckenden - Größe (2002: 8,4 km Länge, 18,5 km² Fläche, 1,8 km³ Eisvolumen) auf die untergeordneten Klimaschwankungen seit dem letzten Hochstand nur träge und ausgespro-

chen undeutlich reagiert. So etwa gab es bei keinem der beiden von vielen Alpengletschern bekannten Vorstoßphasen des 20. Jhs. (um 1920 und 1965-1980) einen Gletschervorstoß „im Sinne eines raumgreifenden Vorschubs der gesamten Gletscherfront“ (Wakonigg und Lieb, 1996). Umso mehr muss die spätestens seit etwa 1990 beobachtbare Verstärkung des Gletscherschwundes zu denken geben, die nicht nur in den Messwerten (die Gletscherzunge ist z.B. in der Dekade 1994-2003 jährlich im Mittel um 4,24 m eingesunken, das ist das 2 1/2-fache des Mittelwertes für 1936-1994), sondern auch im Erscheinungsbild des Gletschers erkennbar wird.

Jahr	1852	1924	1969	1985	2002
Länge	11,4km	10,3km	9,5km	9,0km	8,4km
Fläche	26,5 km ²	22,6 km ²	19,8 km ²	18,9 km ²	18,5 km ²
Vol.	3,5 km ³	2,9 km ³	2,2 km ³	2,0 km ³	1,8 km ³

Tabelle 2: Länge, Fläche und Volumen der Pasterze 1852-2002 (Quelle: Lieb und Slupetzky 2004)



Abb. 5: Der Blick vom Glocknerhaus um 1900 (oben) und im Jahre 2005 (unten) (Archiv, Photo Lieb)

Abbildung 5 zeigt den Blick vom Glocknerhaus in Richtung Pasterze. Um 1900 (oben) reicht die Pasterze noch mächtig in die Schlucht am Elisabethfelsen hinein, während sie 2005 (unten) vom Glocknerhaus nicht mehr zu sehen war.

Die mittlerweile schon zum „Klassiker“ gewordene Summenkurve, die von einer Verflachung in den 20er-Jahren des 20. Jhs. abgesehen steil nach unten weist, ist zusammen mit den Einzeljahreswerten in Abbildung 6 wiedergegeben. Die wichtigste, aus den langjährigen Standardmessungen ableitbare Aussage ist die, dass die Pasterze sich über den gesamten Zeitraum hin praktisch ununterbrochen verkleinerte. Dies zeigt die Längenänderung am klarsten: sie beträgt in Summe (seit dem Hochstand 1851) rund 1700m und war nie positiv – abgesehen von wenigen Jahren in der zweiten bis vierten Dekade des 20. Jahrhunderts mit mehr oder weniger stationärem Verhalten, worin sich die vergleichsweise gletschergünstige Periode um 1920 abbildet.

Die Messung der Höhenänderung erfolgt tachymetrisch: Hierbei handelt es sich um Schnellmessungen von Entfernung und Höhe mittels Theodolit und Messlatte. Die Messpunkte sind entlang von 5 Querprofilen über den Gletscher angeordnet und voneinander meist 100m entfernt. Sie sind durch exakt eingemessene Fixpunkte an der linken Seite des Gletschers und vorgegebene Richtungen definiert. Die Nettoakkumulation des Nährgebietes wirkt dem Einsinken der Firnfelder entgegen, im Zehrgebiet wirkt die Nettoablation dem „Aufquellen“ der Zunge entgegen. Eine gegenüber dem Vorjahr gleiche Oberfläche besagt daher nur, dass sich Eisnachschub und Abschmelzen die Waage halten, aber nicht, dass es keine Abschmelzung gegeben hätte. Wegen der trägen Bewegungskomponente sind Änderungen der Haushaltsgrößen Akkumulation und Ablation in den Einzeljahren sehr gut erkennbar. Die an den tiefer gelegenen Profilen vorherrschenden negativen Werte der Höhenänderung bedeuten eine laufende Erniedrigung der Gletscheroberfläche, die die Volumenverluste widerspiegelt.

Die Höhenänderungen (Abbildung 7 und Abbildung 8) zeigten ebenfalls in den weitaus meisten Jahren negative Werte – also ein Einsinken der Gletscheroberfläche. Allein die Zeit zwischen 1974 und 1980 war an den beiden hoch gelegenen Profilen eine Phase kontinuierlicher Aufhöhung des Gletschers (am Firnprofil in Summe um 7,16m, an der Linie am Hohen Burgstall um 8,45m) unter den damals gletschergünstigen Witterungsbedingungen („Vorstoßperiode 1965-1980“).

Im Mittel für die gesamte Gletscherzunge kam es nur in zwei Jahren (1978 und 1980) zu geringfügigen Aufhöhungen; von 1938 bis 1999 sank die Zunge um insgesamt 135m ein, was größenordnungsmäßig einem Volumenverlust von 800 Millionen Kubikmetern entspricht.

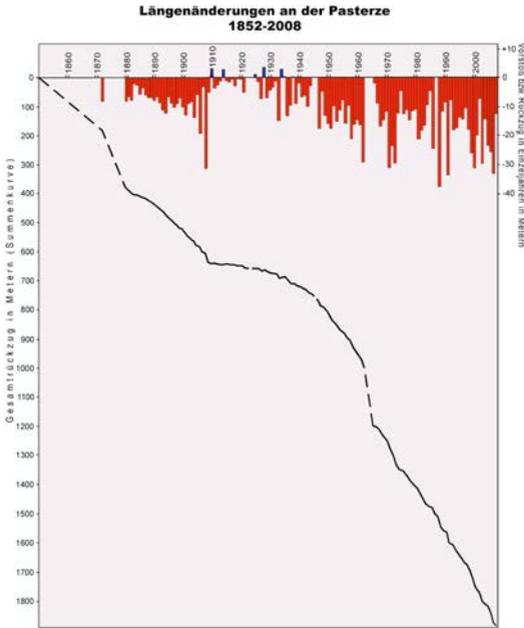


Abb. 6: Längenverluste der Pasterze in Einzeljahren (Stäbe) und in Summen (Kurve) (1852-2008), Quelle: eigene Daten, Graphik: M. Krobath



Abb. 7: Die mittlere Höhenänderung der Pasterze nach Einzeljahren (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

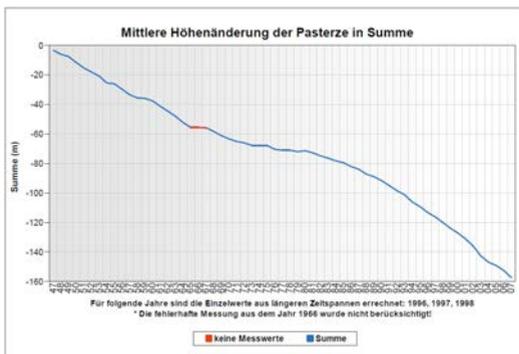


Abb. 8: Die mittlere Höhenänderung der Pasterze in Summe (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

Abbildung 9 dokumentiert eindrucksvoll den Gletscherhöhenchwund im Zungenbereich entlang der Seelandlinie im mittleren Teil der Gletscherzunge. Seit dem Hochstand um 1850 hat hier die Pasterze rund 2/3 der Mächtigkeit verloren.

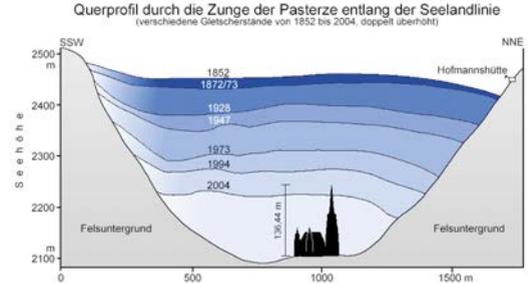


Abb. 9: Querprofil durch die Zunge der Pasterze entlang der Seelandlinie (Quelle: Lieb und Slupetzky, 2004)

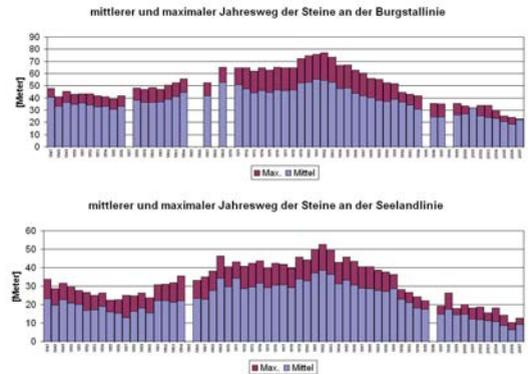


Abb. 10. Der mittlere und maximale Jahresweg der Steine an der Burgstalllinie und Seelandlinie (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

Die Messungen der Horizontalbewegung an der Gletscheroberfläche erfolgen nach der „Steinlinien-Methode“: Entlang von 4 Profillinien (alle außer dem Firnprofil) werden an den Messpunkten der Höhenänderung nummerierte Steinplatten hinterlegt. Diese bewegen sich auf der Gletscheroberfläche talabwärts. Der dabei zurückgelegte Jahresweg wird als Abstand zwischen den im Vorjahr hinterlegten und den jeweils am selben Punkt der Profillinie neu hinterlegten Steinen mittels Maßband gemessen. Da die Jahreswege ihr Maximum in der Gletschermittle erreichen, ist es sinnvoll, neben dem Mittelwert aus allen Steinen eines Profils auch den jeweils höchsten Jahresweg mitzuteilen (Abbildung 10). Auch die Oberflächengeschwindigkeiten lassen eine Abhängigkeit vom jeweils vorherrschenden Witterungscharakter insofern erkennen, als sich ungünstige Ernährungsbedingungen für den

Gletscher wenigstens verzögert als Phasen abnehmender Bewegung erweisen. So etwa lagen die maximalen Jahreswege an der Burgstalllinie 1981 bei 75m, in den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts hingegen um nur 40m.

4.3 Spezielle Untersuchungen mit modernen Technologien

Fernerkundungsmethoden zum Gletschermonitoring können in verschiedenen räumlichen, spektralen und zeitlichen Dimensionen und Maßstabebenen durchgeführt werden. Laut Käab (2005) versteht man unter räumlichen Dimensionen Punkt bzw. Linie (1D), Fläche (2D), Oberfläche inklusive Höheninformation (2,5D) und „echter“ Höheninformation (3D). Die spektrale Dimension kann monospektral, multispektral bzw. hyperspektral sein, und die zeitliche Dimension spiegelt wieder, ob Daten für einen, zwei oder mehrere Zeitpunkte zur Verfügung stehen.

Beim Gletschermonitoring werden sowohl passive als auch aktive Fernerkundungssensoren verwendet, die auf luftgestützten, weltraumbasierten oder auch terrestrischen Plattformen montiert sind. In Abbildung 11 werden die gängigsten Sensoren und Methoden zum Gletschermonitoring angeführt.

Digitale Höhenmodelle bzw. Höhenmessungen an Gletschern sind der Schlüssel zu Berechnungen des Volumens von Gletschern. Aus Volumenänderungen können Änderungen der Massenbilanz eines Gletschers abgeleitet werden, die Rückschlüsse auf Klimaänderungen zulassen. Methoden zur Generierung von Höhenmodellen aus Fernerkundungsdaten sind in Tabelle

3 aufgelistet. Der Vollständigkeit halber wurde die Tabelle durch terrestrische Methoden ergänzt, die im Untersuchungsgebiet zur Ermittlung von Höheninformationen verwendet wurden.

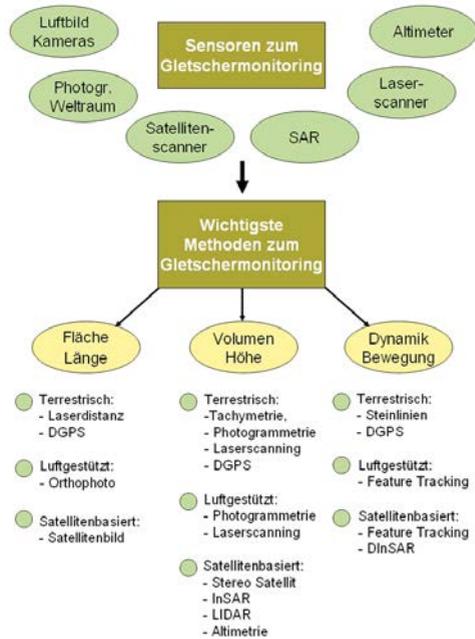


Abb. 11: Sensoren und Methoden zum Gletschermonitoring. (Quelle: Moser, 2008)

Die Fließgeschwindigkeit an der Gletscheroberfläche kann mittels optischen Luftbild- oder Satellitenbilddaten bzw. differenzieller Radarinterferometrie ermittelt werden. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über anwendbare Fernerkundungsmethoden.

Terrestrische Methoden	Luftgestützte Methoden	Satellitengestützte Methoden
Tachymetrische Methoden (Distanz, Winkel)	Photogrammetrie mit Digitalen Luftbildern von Messkameras oder gescannten Messbildern	Stereo Satellit: - Along-Track - Across-Track
Terrestrische Photogrammetrie	Digitale Luftbildphotogrammetrie mit Pushbroom Sensoren	Radarinterferometrie (InSAR)
Terrestrisches Laserscanning (TLS)	Luftgestütztes Laserscanning (ALS, LIDAR)	LIDAR Altimetrie
GNSS (z.B. DGPS)	Luftgestütztes InSAR	Radar-Altimetrie

Tabelle 3: Methoden zur Generierung von Höhenmodellen (nach Käab, 2005)

Terrestrische Methoden	Luftgestützte Methoden	Satellitengestützte Methoden
Steinlinienmethode	Feature Tracking (Orthophoto)	Feature Tracking (Orthophoto)
GNSS (z.B. DGPS)		Differenzielle Radarinterferometrie (DInSAR)

Tabelle 4: Bewegungsmessung mit Fernerkundungsmethoden (Quelle: Moser, 2008)

An der Pasterze werden seit 2001 kontinuierlich neue Methoden des Gletschermonitorings im Rahmen des FWF-Projektes „Alpchange“ erprobt. Im Folgenden sollen hier Ergebnisse von Studien über den Einsatz von Laserscanning, Differential-GPS und Luft- und Satellitenbilddauswertungen vorgestellt werden.

Terrestrisches Laserscanning an der Pasterzengunge wird seit 2001 jährlich durchgeführt. Die Ergebnisse (Abbildung 12) zeigen deutliche Einsinkbeträge am moränenfreien Teil der Gletscherzunge (C); bei (B) werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Ablationsbedingungen auf schuttbedecktem und schutfreiem Eis verdeutlicht. Am schutfreien Teil der Gletscherzunge sind die Einsinkbeträge deutlich geringer. Abbildung 13 dokumentiert die Veränderungen von 2004 auf 2005, wobei in dieser Abbildung (B) und (C) jeweils Bereiche mit ausgeprägtem Eiszerfall zeigen.

DGPS Messungen an der Pasterze wurden von Avian et. al (2007) eingesetzt, um die a) exakte Position der Gletscherumrahmung, b) Geschwindigkeitsmessungen an der „Seelandlinie“ (Mittelabschnitt der Gletscherzunge), c) Grenzbestimmung für den schuttbedeckten und den schutfreien Gletscherzungenbereich, und d) Ground Control Points als Unterstützung für das Laserscanning zu erfassen.

Der Vergleich der traditionellen und der modernen Gletschermessungen hat gezeigt, dass die Ergebnisse prinzipiell keine kontroversiellen Daten erbracht haben. Vielmehr bringt die Kombination der verschiedenen Methoden einen generellen Gewinn für das Gletschermonitoring. GPS erbringt einerseits genaue 3D Informationen (z.B. Linien und Punkte), andererseits liefert Laserscanning flächenhafte Information in annähernd gleicher Genauigkeit. Tachymetrische Messungen besitzen noch immer Vorteile in den Messungen der Oberflächenbewegung und liefern zusätzliche Informationen für die modernen Messmethoden.

Die terrestrischen Laserscanning Aufnahmen beschränkten sich bislang aufgrund des hohen Geräteaufwandes auf Teile der unteren Gletscherzunge. 2008 wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung in Graz eine Studie mittels konventioneller Stereoauswertung von Luftbildern (1982 und 2006) des BEV durchgeführt (Moser 2008), um den Zungenbereich der Pasterze flächendeckend zu analysieren. Die Luftbilder wurden jeweils in der 3. Septemberwoche auf-

genommen und stimmen zeitmäßig mit den Gletschermessungen am Ende des Haushaltsjahres gut überein.

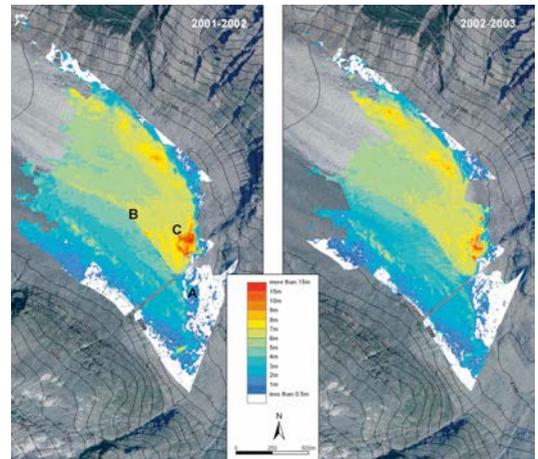


Abb. 12: Die räumliche Verteilung der Oberflächenveränderungen an der Pasterze in den Perioden 2001/2002 und 2002/2003 (Quelle: Avian et al., 2006)

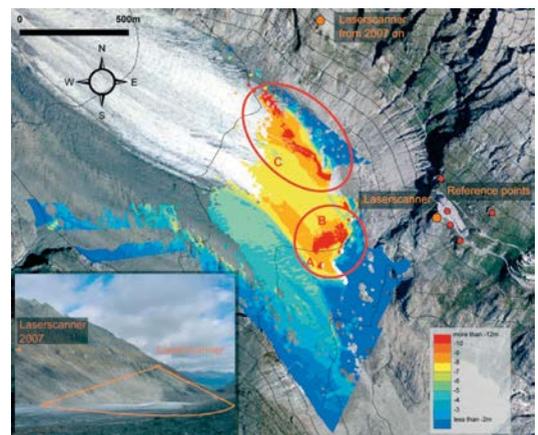


Abb. 13: Die räumliche Verteilung der Oberflächenveränderungen an der Pasterze in den Periode 2004/2005 (Quelle: Avian et al., 2007)

Die Länge der Gletscherzunge von der fiktiven oberen Begrenzung bis zum Eisrand beträgt 4680m (schuttbedeckt) und 4390m (schutfrei) für das Jahr 1982 sowie 4350m (schuttbedeckt) und 3880m (schutfrei) für das Jahr 2006. Die Längenänderung von 1982 – 2006 beträgt 510m am schutfreien Teil (21m/a) und 330m am schuttbedeckten Teil (14m/a).

Die Höhenänderung der Gletscherzunge von 1982 – 2006 wird in Abbildung 15 visualisiert. Große Verluste von über 100m bis zum maximalen Wert von -122m konnten im linken unteren Bereich der Gletscherzunge ermittelt werden.

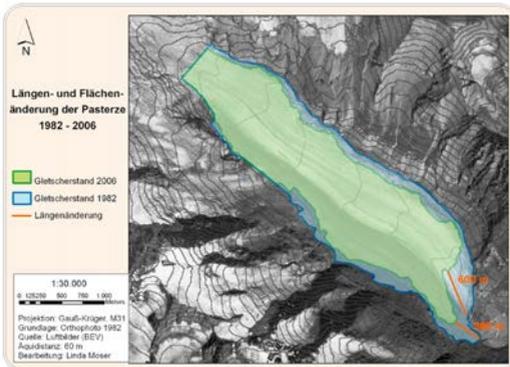


Abb. 14: Die Gletscherstand 1982 (grün) und 2006 (blau), (Quelle: Moser 2008)

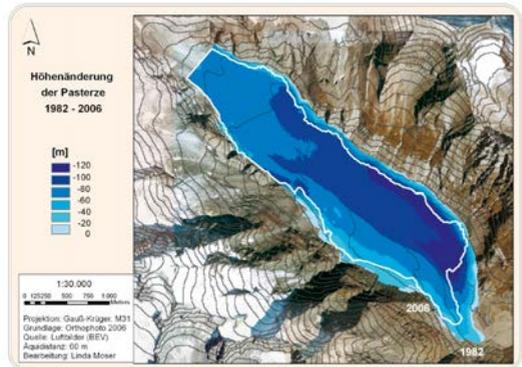


Abb. 15: Höhenverlust der Pasterzenzunge 1982 – 2006; Gletscherstand 2006 (weiße Linie), (Quelle: Moser, 2008)

4.4 Vergleich der Methoden des Gletschermonitorings

Aufgrund des Vorhandenseins sowohl einer langen Zeitreihe aus Routinemessungen als auch von Daten aus den „modernen“ Forschungen bietet sich deren Vergleich an. Damit soll das Gletschermonitoring, sollten sich kostengünstigere und genauere Methoden auf tun, langfristig vereinfacht – das Hauptproblem ist die schwierige Zugänglichkeit der Gletscher – und verbessert werden. Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus diesem laufenden Methodenvergleich präsentiert:

Kellerer-Pirklbauer et al. (2007) verglichen tachymetrische Messwerte am schuttbedeckten und schutfreien Teil der Pasterzenzunge mit digitalisierten Höhenmodellen, die für die Jahre 1964, 1981 und 2000 aus Karten erstellt wurden. Zusammengefasst waren die wichtigsten Ergeb-

nisse (Abbildung 16): Der Volumenverlust war in der Periode von 1981-2000 um das 2,3fache größer als in der Periode 1964-1981. Die Höhenänderungen von 1981-2000 betrug -70m an der Gletscherstirn und -40m im oberen Teil der Gletscherzunge. Durchschnittlich verlor der schuttbedeckte Teil der Gletscherzunge 41,6m und der schutfreie 55m. Im Jahr 1964 nahm der schuttbedeckte Teil der Gletscherzunge 5,4% der gesamten Gletscheroberfläche ein, bis zum Jahr 2001 vergrößerte sich der Flächenanteil auf 7,3%. Durch die Zunahme der Schuttbedeckung auf dem rechten Teil der Gletscherzunge vergrößern sich die Unterschiede zwischen den beiden Gletscherteilen zunehmend, was sowohl mit den tachymetrischen Messungen als auch mit Auswertungen dieser Art gezeigt werden kann,

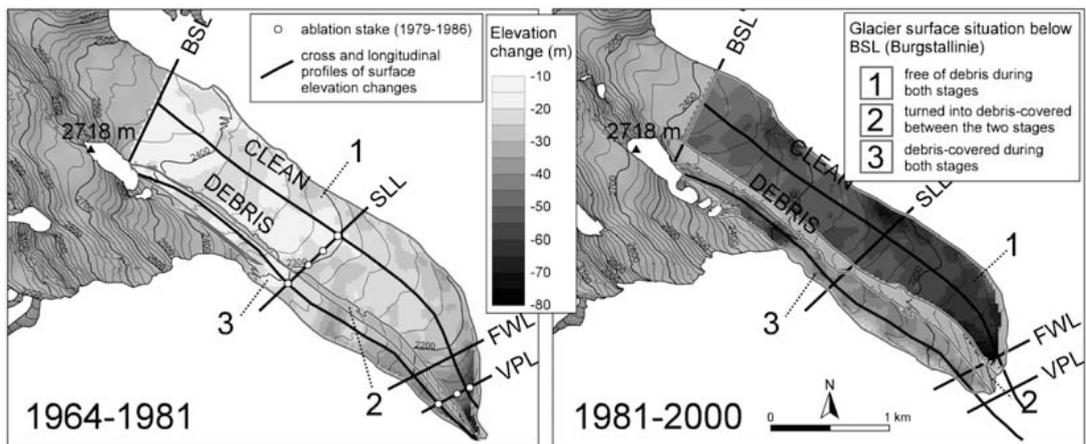


Abb. 16: Höhenänderungen der Pasterze unterhalb der Burgstalllinie (BSL) basierend auf Subtraktion digitaler Höhenmodelle. a) 1964-1981, Isohypsen 1981, b) 1981-2000, Isohypsen 2000. Schutfreier Bereich in jeweils beiden Jahren (1), Bereich, der während der Periode schuttbedeckt wurde (2), vorher und nachher schuttbedeckter Teil (3) (Quelle: Kellerer-Pirklbauer et al., 2007)

Die tachymetrisch eingemessenen Koordinaten aller Messpunkte der 3 Profillinien an der Gletscherzunge wurden mit den aus den Luftbildern berechneten DHMs mit Auflösungen von 3m, 5m und 10m (2006) und 5m und 10m (1982) verglichen. Zusätzlich wurde auch noch das 10m-DHM des BEV aus dem Jahr 2006 miteinander bezogen.

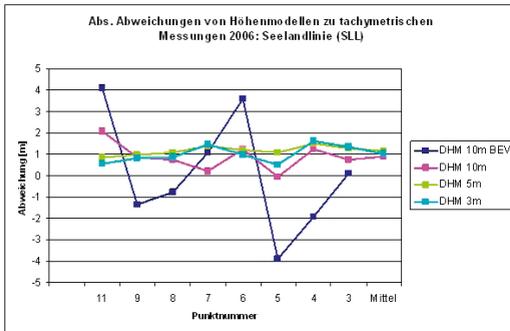


Abb. 17: Absolute Abweichungen von Höhenmodellen zu tachymetrischen Messungen 2006, (Quelle: Moser, 2008)

An der in der Mitte der Gletscherzunge gelegenen Seelandlinie (Abbildung 17) zeigte der Vergleich die geringsten Abweichungen zu den terrestrischen Messungen. Die Tendenz ist, dass alle Messungen im Mittel um einen Meter zu hoch liegen. Nur das 10m-DHM des BEV weist Werte von -3,90 bis +4,10 m auf und weist eine sehr hohe Streuung auf. Ein Grund für die Abweichung liegt auch in der kleinreliefierten Topographie des Gletscherabschnittes, wo sich aufgrund der Spalten auf kurzer Distanz relativ rasch Höhenunterschiede über den Meterbereich einstellen

Hall et al. (2001, 2003) erarbeiteten Anfänge satellitengestützten Gletschermonitorings an der Pasterze und analysierten Abweichungen der Gletscherstände aus alten topographischen Karten und rezenten Satellitenbildern. Verwendet wurden Alpenvereinskarten verschiedener Jahre, die älteste Karte war die Spezialkarte von Österreich-Ungarn (1893), zitiert bei Hall et al. (2003). Weiters standen 8 Landsat-Szenen zur Verfügung, die vom Jahr 1976 (MMS) bis 2001 (ETM+) reichten. Zusätzlich wurden noch zwei Ikonos-Bilder aus den Jahren 2000 und 2001 verwendet. Die Messgenauigkeit ist von drei Faktoren abhängig: Von der Koregistrierung, der Pixelauflösung und der Genauigkeit des Gletscherstandes auf den topographischen Karten, welche nicht überprüft werden konnte. Alle Satellitenbilder und Karten wurden auf eine Landsat-Szene von 1984 mit einer Auflösung von 28,5m

koregistriert. Die erreichte Genauigkeit für Karten und Landsat-Szenen wurde mit $\pm 0,5$ Pixel angegeben - was in etwa ± 14 Meter entspricht - mit Ausnahme von Landsat MSS (± 23 m). Die Ikonos-Szenen lagen bereits georeferenziert vor. Die Genauigkeit der Koregistrierung in Kombination mit der Messgenauigkeit ergab mögliche fragwürdige Abweichungen von ± 54 m für TM und ETM+, und ± 136 m für MSS. Jedoch wurde lediglich eine Abgrenzung des schutfreien Gletschersees vorgenommen, da der schuttbedeckte Teil der Pasterze von der Umgebung nicht abgrenzbar war. Diese Methode eignet sich nur bedingt für einen so gut dokumentierten Einzeltgletscher wie die Pasterze. Für großräumige Inventuren in entlegenen Hochgebirgen der Erde liefert sie hingegen ausreichend Informationen über die Veränderungen von Gletscherflächen.

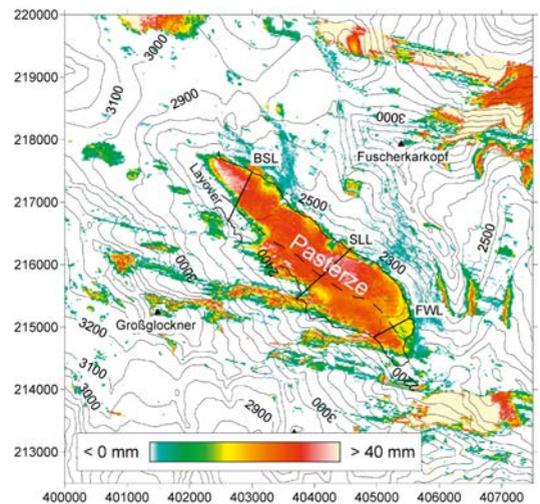


Abb. 18: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares 20.8.–21.8.1995. (Quelle: Kaufmann et al., im Druck)

V. Kaufmann et al. (2005 und im Druck) untersuchten die messtechnische Erfassung der Gletscherbewegung (Oberflächendeformation) der Pasterze mittels satellitengestützter (ERS-1/2) differentieller SAR-Interferometrie (DINSAR). Für die Bewegungsanalyse standen SAR-Bilddaten von Sommermonaten zur Verfügung. Eines von drei vorhandenen Bildpaaren der ERS Tandem-Mission wies für den Zungenbereich der Pasterze genügend Kohärenz auf, um daraus ein aussagekräftiges Interferogramm (Bewegungsbild) ableiten zu können (Abbildung 18). Für den eintägigen Beobachtungszeitraum im August 1995 wurden maximale Oberflächenverschiebungen von 30–40 mm/Tag in SAR-Blickrichtung festgestellt.

Ausgehend von diesem Messergebnis, welches um den Einfluss einer abgeschätzten mittleren Ablation von 2cm/Tag korrigiert wurde, kann unter vereinfachten Annahmen, wie z. B. oberflächenparalleles Fließen und über das Jahr gleich bleibende Fließgeschwindigkeit, eine maximale jährliche Fließgeschwindigkeit der Gletscherzunge der Pasterze von 20–30m für das Jahr 1995 abgeschätzt werden (Kaufmann et. al. im Druck).

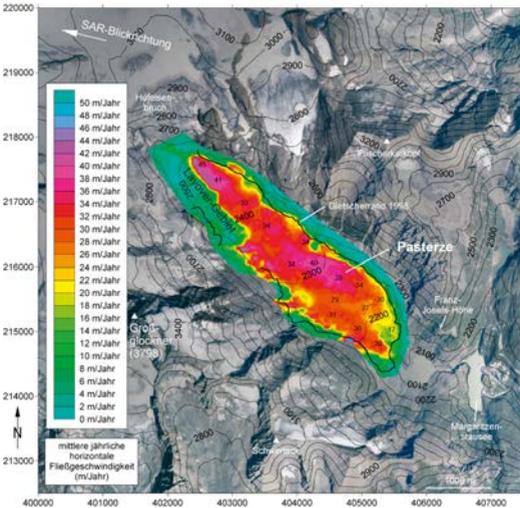


Abb. 19: Die geschätzte mittlere horizontale Jahresfließgeschwindigkeit der Pasterze abgeleitet aus dem eintägigen ERS-1/2 Interferogramm für den Zeitraum 20.8.1995–21.8.1995, (Quelle: Kaufmann et al., im Druck)

5. Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Methodenvergleiche, die u.a. im Rahmen der Forschungsaktivitäten der Autoren weitergeführt werden, haben gezeigt, dass alle Methoden ihre speziellen Stärken – und sei es nur die Kostengünstigkeit oder einfache Durchführbarkeit auch für Nicht-Fachleute haben und keine ohne weiters die andere ersetzen kann. Aus diesem Grund ist die Zweckmäßigkeit von Fall zu Fall neu zu prüfen und im Idealfall eine Kombination mehrerer Methoden einzusetzen, wie dies in den meisten modernen Forschungsprojekten auch geschieht.

Literaturverzeichnis

[1] ALPCHANGE (2009): www.alpchange.at (Zugriff: 08/2009)
 [2] Avian M and Bauer A. (2006): First Results on Monitoring Glacier Dynamics with the Aid of Terrestrial Laser Scanning on Pasterze Glacier (Hohe Tauern, Austria). In: Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (V.

Kaufmann and W. Sulzer, ed.). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Bd. 41, 27-36.
 [3] Avian M., Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A. and Bauer, A. (2007): Variations of Pasterze Glacier (Austria) Between 1994 and 2006 – Combination of Different Data Sets for Spatial Analysis. In: Proceedings of the 9th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (V. Kaufmann and W. Sulzer, ed.). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Bd. 43, 79-88.
 [4] Bayr K.J., Hall D.K. and Kovalick W.M., (1994): Observations on glaciers in the eastern Austrian Alps using satellite data. In: International Journal of Remote Sensing, 15(9):1733-1752.
 [5] Bätzing W. (2007): Gletscher im Treibhaus – die Klimaerwärmung und ihre Folgen für die Alpen. In: Jahresmitteilungen der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg, 2007, Nürnberg, 31-40.
 [6] Böhm R., Schöner W., Auer I., Hynek B., Kroisleitner Chr. and Weyss G. (2007): Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. Eigenverlag der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 111S.
 [7] Endlicher W. and Gerstengarbe W. (Hrsg., 2007): Der Klimawandel – Rückblicke, Einblicke und Ausblicke. Potsdam, 134 S.
 [8] Gspurning J., Tintor W., Tribusser M. and Wakonigg H. (2004): Volumen- und Flächenänderungen an der Pasterze von 1981 bis 2000. In: Carinthia II, 194./114. Jahrgang, Klagenfurt, 463-472.
 [9] Geiser E. (2006): Frozen Chrysolmelids from Alpine Glaciers – Witnesses of the Postglacial Resettlement. In: Bonner zoologische Beiträge, Band 54, Heft 4 239-245.
 [10] Haberli W. ; W., Hoelzle W. und Maisch M. (1998): Gletscher – Schlüsselindikatoren der globalen Klimaänderung. In: Lozán J. L., Graßl H. und Hupfer, P.(Hrsg.): Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Hamburg, S. 213 – 221.
 [11] Haeberli W. und Maisch M. (2007): Klimawandel im Hochgebirge. In: Endlicher W. und Gerstengarbe W. (Hrsg., 2007): Der Klimawandel – Rückblicke, Einblicke und Ausblicke, 98-107.
 [12] Hall D.K., Bayr, K., Bindschadler, R.A., und Schöner, W. (2001): Changes in the Pasterze Glacier, Austria, as Measured from the Ground and Space, - 58th Eastern Snow Conference Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
 [13] Hall D.K., Bayr, K., Schöner, W., Bindschadler, R.A. und Chien, J.Y.L. (2003): Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001). – Remote Sensing of Environment, 86, S.566-577.
 [14] Herbst P., Flandera, T. and Neubauer, F., 2002: A three-dimensional model of the Pasterze glacier, Austria. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 38, Heft 2, 179-184.
 [15] Ivy-Ochs S., Kerschner H., Maisch M., Christl M., Kubik P.W. and Schluchter Chr. (2009): Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. Quaternary Science Reviews xxx (2009) 1–13
 [16] Käab A. (2005): Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. Schriftenreihe Physische Geographie. 48, 266 p.

- [17] Kaufmann V., Kenyi L.W. und Avian M. (2005): Messung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern). Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten) - Endbericht zum Forschungsprojekt des Kärntner Nationalparkfonds, 43-56 S.
- [18] Kaufmann V., Kellerer-Pirklbauer, L. und Wan I. (im Druck) Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie: Die Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten). In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 42/1 (2008), S. 85–104.
- [19] Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Avian M., Gspurning, J. (2007): The response of partially debris-covered valley glaciers to climate change: The example of the Pasterze glacier (Austria) in the period 1964 to 2006. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Volume 90 Issue 4, Pages 269 – 285.
- [20] Kellerer-Pirklbauer A. (2008): The Supraglacial Debris System at the Pasterze Glacier, Austria: Spatial Distribution, Characteristics and Transport of Debris. In: *Z. Geomorph. N.F.* 52, Suppl. 1: 3-25.
- [21] Lieb, G. K. (1999): Die Pasterze in Vergangenheit und Zukunft – 150 Jahre Gletscherforschung. – In: *Ewiges Eis? Eine Tagung zum Rückgang der Gletscher in den Alpen in Heiligenblut*. Tagungsbericht. Nationalparkakademie Hohe Tauern, 49-52.
- [22] Lieb G. K. und Slupetzky, H. (2004): Gletscherweg Pasterze. - Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern, Band 2, Innsbruck, 122 S.
- [23] Moser L. (2008): Fernerkundungsmethoden zum Gletschermonitoring – Einsatz ausgewählter Luftbilder und Orthofotos. Unveröff. Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz, Graz, S.199.
- [24] Moser L., Sulzer W. and Avian M. (2009): Monitoring of Glacier Variability at Pasterze Glacier (Austria) between 1982 and 2006 Using Very High Resolution Aerial Imagery. *Geophysical Research Abstracts*, ol. 11, EGU2009-846, 2009; EGU General Assembly 2009
- [25] Nicolussi K. and Patzelt G. (2000): Discovery of Early Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. - *The Holocene* 10/2: 191-199.
- [26] Nicolussi K. and Patzelt G. (2001): Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). - *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 36: 1-87.
- [27] Oerlemans J. (2005): Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 308(5722), 675-677.
- [28] Schöner W. (2009): Paläoklimainformationen aus Kenngrößen der Gletschermassenbilanz – Beispiele für die Alpen seit der ausgehenden Kleinen Eiszeit. In: *Alpine Space - Man & Environment*, Vol. 6: Klimawandel in Österreich, Innsbruck University Press, 127-144.
- [29] Slupetzky H. (1993): Holzfunde aus dem Vorfeld der Pasterze. Erste Ergebnisse von 14C-Datierungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 26/2: 179-187.
- [30] Slupetzky H., Krisai R. und Lieb G.K. (1998): Hinweise auf kleinere Gletscherstände der Pasterze (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) im Postglazial. Ergebnisse von 14C-Datierungen und Pollenanalysen. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern* 4: 225-240.
- [31] Van Husen D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. *Popularwiss. Veröffentlichung der Geologischen Bundesanstalt*, Wien, 24 S.
- [32] Wakonigg H. 2007: *Klima im Wandel*. LIT Verlag, Wien, Wien, 188S.
- [33] Wakonigg H. und Lieb G. K. (1996): Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. - In: *Wissenschaft im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten*. Kärntner Nationalpark-Schriften 8, Großkirchheim, 99-115.
- [34] Weber M. (2004): Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. Dissertation an der Universität Innsbruck, Innsbruck, 311S.
- [35] World Glacier Monitoring Service (2009): www.geo.unizh.ch/wgms (Zugriff: 08/2009).
- [36] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M., Maisch M. und Paul F. (2007). Europäische Alpen bald ohne Gletscher? In: *Jahrbuch Ökologie, Becksche Reihe*, München, 68-83.
- [37] Zryd A. (2008): Eine kleine Geschichte der Gletscher – Alpengletscher im Klimawandel. Haupt Verlag, Zürich, 140S.

Anschrift der Autoren

Ass. Prof. Mag. Dr. Wolfgang Sulzer, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz.
E-Mail: wolfgang.sulzer@uni-graz.at

Ao. Univ. Prof. Mag. Dr. Gerhard Karl Lieb, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz.
E-Mail: gerhard.lieb@uni-graz.at

Vortragender

Ass.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer

- 1990 Sponision zum Mag.rer.nat. Geographie
- 1990 Vertragsassistent am Institut für Geographie
- 1994 Forschungsaufenthalt in Dresden (Institut für Kartographie an der Technischen Universität Dresden)
- 2000 – 2006 Universitätsassistent am Institut für Geographie und Raumforschung
- seit 2006 Ass. Prof. am Institut für Geographie und Raumforschung

Forschungsbereiche:

Physische Geographie und Fernerkundung, Veränderungen von Natur- und Kulturlandschaften in Hochgebirgsräumen im Bereich Alpen, Himalaya und Anden. 10 Jahre Mitglied im Gletscheresmessteam der Glockner- und Schobergruppe.



Einsatz von LIDAR für die Forstinventur

Mathias Schardt, Graz

Kurzfassung

Die Forstverwaltungen benötigen für die nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes flächenhafte und verlässliche Informationen hinsichtlich der Zusammensetzung und des Zustandes des Waldes. Wichtige Parameter stellen in diesem Zusammenhang neben dem Bestandestyp und Beschirmungsgrad vor allem der Holzvorrat, Holzzuwachs sowie die Baumhöhe und Holznutzung dar. Der vertikale Aufbau der Waldbestände, der Auskunft über deren Stabilität liefert, ist ein weiterer wichtiger Parameter, der vor allem bei neueren Erhebungen mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. Als Alternative zu terrestrischen Inventurverfahren bieten sich grundsätzlich die Verwendung von LIDAR-basierten Verfahren an. Der Vortrag befasst sich mit den Möglichkeiten, die derartige Verfahren bieten sowie mit Methoden zur automatisierten Datenauswertung. Darüber hinaus werden anhand ausgewählter Beispiele die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen von LIDAR aufgezeigt und diskutiert.

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Mathias Schardt

- 1957 geboren
- 1986 – 1990 Wissenschaftlicher Angestellter bei der DLR in Oberpfaffenhofen im Forschungsprojekt: „Waldklassifizierung Bayerns mit Hilfe von Satellitenbilddaten“
- 1990 Abschluss der Promotion an der Albert – Ludwigs – Universität Freiburg
- 1990 – 1994 Projektleiter an der TU Berlin, Institut für Landschafts- und Freiraumplanung im Projekt „Fernerkundung und GIS für die Forstwirtschaft“
- seit 1995 Leiter des Institutes für „Digitale Bildverarbeitung“ (Bereich Fernerkundung) an der Forschungsgesellschaft Joanneum Research mbH, Graz
- 1997 Abschluss der Habilitation im Fach „Fernerkundung und Geoinformationssysteme“ an der TU Berlin
- seit 2002 Professor an der TU Graz, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie (weiterhin Leitung des Institutes für Digitale Bildverarbeitung)

		
AGEO – ÖSTERREICHISCHER DACHVERBAND FÜR GI	AIRBORNE TECHNO- LOGIES GMBH	AKG SOFTWARE CONSULTING GMBH
<p>Der österreichische Dachverband für Geographische Information (GI) vertritt als fachübergreifende Vereinigung die Interessen seiner Mitglieder in Österreich und in internationalen Organisationen. Information der Öffentlichkeit über GI und Förderung von Initiativen zur technischen und methodischen Weiterentwicklung sollen Österreich als starken Standort für Geoinformation und die hohe Qualität der GI-Ausbildung in Österreich erhalten. Ein Anliegen von AGEO ist der Aufbau einer nationalen Geodaten-Infrastruktur als selbstständige Säule in einer europäischen SDI.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Öffentlichkeitsarbeit ■ Bewußtseinsbildung ■ GI Standards ■ Aus- und Weiterbildung ■ Initiativen 	<p>Airborne Technologies GmbH mit Sitz in Wiener Neustadt ist ein junges, dynamisches Unternehmen. Mit einem erfahrenen, stetig wachsenden und flexiblen Team werden Kunden optimale Komplettlösungen in den Bereichen Airborne Laserscanning, Photogrammetrie, Hyperspektral, Katastrophenschutz und Infrastrukturüberwachung geboten.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Airborne Laserscanning ■ Photogrammetrie ■ Hyperspectralscanning ■ Katastropheneinsatz ■ Thermalbefliegung ■ Thermalmapping ■ Naturereignisdokumentation ■ Naturgefahrenokumentation ■ 3D-Mapping <p>Mitaussteller bei: BEWAG GEOSERVICE GMBH</p>	<p>AKG bietet Tiefbausoftware aus einer Hand - von der Planung über die Bauausführung bis zur Abrechnung. Die Produktfamilie VESTRA steht für die Bereiche Vermessung, DGM, Grunderwerb, Straße, Bahn, Kanalplanung und Bauabrechnung zur Verfügung und ist wahlweise mit eigenem CAD-Kern, für AutoCAD Civil 3D/AutoCAD, für GeoMedia von Intergraph oder für GEOgraf von HHK erhältlich.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ VESTRA seven Civil 3D ■ VESTRA PRO ■ VESTRA CAD ■ VESTRA GIS GeoMedia ■ Schulung/Support ■ Consulting/Projektbetreuung ■ Vertrieb Autodesk-Produkte: <ul style="list-style-type: none"> ■ AutoCAD Civil 3D ■ AutoCAD ■ AutoCAD Map 3D
<p>Stand W86b</p> <p>AGEO – Österreichischer Dachverband für GI</p> <p>Bürgerstrasse 34 6020 Innsbruck Österreich</p> <p>Tel.: +43 512 588091 1301 Fax: +43 512 588091 1253 E-Mail: office@ageo.at</p> <p>www.ageo.at</p>	<p>Stand MR6</p> <p>Airborne Technologies GmbH</p> <p>Wiener Straße 113/2.11.C 2700 Wiener Neustadt Österreich</p> <p>Tel.: +43 2622 347 18 Fax: +43 2622 347 18 15 E-Mail: office@airbornetechnologies.at</p> <p>www.airbornetechnologies.at</p>	<p>Stand W1</p> <p>AKG Software Consulting GmbH</p> <p>Uhlandstraße 12 79423 Heitersheim Deutschland</p> <p>Tel.: +49 7634 5612 0 Fax: +49 7634 5612 300 E-Mail: info@akgsoftware.de</p> <p>www.akgsoftware.de</p>

		
VERMESSUNG AVT ZT GMBH	AXMANN GEO-INFORMATION GMBH	BARTHAUER SOFTWARE GMBH
<p>Die Vermessung AVT ZT GmbH ist ein großes österreichisches Vermessungsunternehmen mit 6 Standorten in Tirol und 50 Mitarbeitern. Das Unternehmen wurde im Jahr 1970 gegründet und ist in Österreich, Deutschland, Norditalien, Schweiz und Dänemark tätig.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Katastervermessung ■ Photogrammetrie ■ Ingenieurgeodäsie ■ Geoinformation <p>Mitaussteller bei: MILAN GEOSERVICE GMBH</p>	<p>axmann geoinformation ist spezialisiert auf Produkte und Leistungen im Bereich Geodatenmanagement. Wir bieten Beratung, Dienstleistungen sowie Softwareprodukte und -lösungen und bringen so Ihre Geodaten in (jede) Form. Als Basis für die Analyse, Prüfung, Veredelung, Bearbeitung, Konvertierung sowie Umsetzung Ihrer Geodaten dient FME.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ FME ■ Geodatenmanagement ■ Dienstleistungen ■ Beratung ■ Geodatenanalyse ■ Geodatenprüfung ■ Geodatenveredelung ■ Geodatenbearbeitung ■ Geodatenkonvertierung 	<p>Seit 25 Jahren entwickelt und vertreibt die Barthauer Software GmbH Netzinformationssysteme. Der Schwerpunkt liegt auf den Themen Kanal und Wasser. Mit der neuesten Produktversion des Unternehmens, dem modularen, datenbankbasierten Netzinformationssystem BaSYS, können Leitungsnetze auf verschiedenen grafischen CAD- und GIS-Plattformen geplant, berechnet und verwaltet werden. Die Kunden sind u.a. Zweckverbände, Eigenbetriebe, Stadtwerke, Kommunen und Ingenieurbüros.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ BaSYS – Netzinformationssystem ■ Leitungsmanagement ■ Vermögensbewertung ■ Kanalzustandsmanagement ■ Längsschnitt ■ hydraulische Netzberechnung ■ ISYBAU XML Import/Export ■ Migration von alten GIS-Daten ■ Datenaustausch KPC-konform
<p>Stand W18</p> <hr/> <p>Vermessung AVT ZT GmbH</p> <p>Eichenweg 42 6460 Imst Österreich</p> <p>Tel.: +43 5412 6930 0 Fax: +43 5412 6930 26 E-Mail: avt@avt.at</p> <p>www.avt.at</p>	<p>Stand MR7</p> <hr/> <p>axmann geoinformation gmbh</p> <p>Donau-City-Straße 1 1220 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 20501 59100 Fax: +43 1 20501 59900 E-Mail: office@axmann.at</p> <p>www.axmann.at</p>	<p>Stand ML1</p> <hr/> <p>Barthauer Software GmbH</p> <p>Pillaustraße 1a 38126 Braunschweig Deutschland</p> <p>Tel.: +49 531 23533 0 Fax: +49 531 23533-99 E-Mail: info@barthauer.de</p> <p>www.barthauer.de</p>

		
BEV - BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN	BEWAG GEOSERVICE GMBH	BAIK, BFG VERMESSUNGSWESEN
<p>Das BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen ist eine Bundesdienststelle des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend. Sitz der Zentrale ist Wien, österreichweit ist das BEV mit 67 Dienststellen in allen Bundesländern vertreten.</p> <p>Aufgabenbereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Vermessung und Geoinformation ■ Grundlagenvermessung ■ Topographie, Kartographie ■ Vermessungsbehörde ■ Mess- und Eichwesen ■ Nationales Metrologieinstitut ■ Eichbehörde <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Orthophotos und Luftbilder ■ Digitales Geländehöhenmodell ■ Grundstückkataster ■ Lage- und Höhenfestpunkte ■ APOS (GPS-Positionierung) ■ Digitales Landschaftsmodell ■ Kartographische Modelle ■ Amtliche Landkarten 	<p>Geoservice bietet 3D-Airborne-Laserscanning Lösungen auf höchstem technischen Niveau an. Die Wirklichkeit kann als exaktes, vollständiges 3D-Modell abgebildet werden. Eine technologisch neuartige Kombination verschiedener Sensoren garantiert eine besonders präzise, sichere 3D-Laserscan Abbildung der Oberflächen und Objekte. Mit bisher nicht möglicher Präzision und Wirtschaftlichkeit werden Daten erfasst und aufbereitet.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Airborne-Laser-Scanning ■ Luftbilder ■ Projektsimulationen ■ Planung v. Leitungsanlagen ■ Dokumentation von Infrastruktur ■ Geländemodelle <p>Mitaussteller: AIRBORNE TECHNOLOGIES GMBH</p>	<p>Die Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten.</p> <p>Die Kammern sind Körperschaften öffentlichen Rechts und die gesetzlichen Berufsvertretungen der staatlich befugten und beeideten Ziviltechniker/innen (Architekt/innen und Ingenieurkonsulent/innen mit rund sechzig Befugnissen auf ingenieur- und naturwissenschaftlichen, montanistischen Fachgebieten und Fachgebieten der Bodenkultur). Die Bundeskammer gliedert sich in die Bundessektion Architekten und die Bundessektion Ingenieurkonsulenten.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Katastrale Vermessung ■ Technische Vermessung, wie zB. <ul style="list-style-type: none"> ■ Ingenieurgeodät. Netzmes-sung ■ Landeskoordinatenanschluss ■ GPS-Messungen ■ Nivellement ■ Photogrammetrie ■ Gelände- u. Bestandsvermes-sung ■ Geoinformationen, GIS-Systeme <p>Mitaussteller: ONLAW INTERNET TECHNOLOGIE GMBH</p>
<p>Stand ML7</p> <p>BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen</p> <p>Schiffamtsgasse 1-3 1020 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 21110 2160 Fax: +43 1 21110 2161 E-Mail: kundenservice@bev.gv.at</p> <p>www.bev.gv.at</p>	<p>Stand MR6</p> <p>BEWAG Geoservice GmbH</p> <p>Thomas Alva Edison Straße 1 7000 Eisenstadt Österreich</p> <p>Tel.: +43 2682 9000 1891 Fax: +43 2682 9000 1928 E-Mail: wolfgang.trimmel@geoservice.at</p> <p>www.geoservice.at</p>	<p>Stand W2</p> <p>Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten (bAIK)</p> <p>Karlgasse 9/2 1040 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 505 58 07 Fax: +43 1 505 32 11 E-Mail: office@arching.at</p> <p>www.arching.at</p>

		
DEUTSCHER CHRISTLICHER TECHNIKER-BUND E.V.	ENERGIE STEIERMARK AG	ENERGIE AG OBERÖSTERREICH DATA GMBH
<p>Der Deutsche Christliche Techniker-Bund wurde 1904 gegründet. Er ist ein Zusammenschluss von Christen vorwiegend aus technischen Berufen. Gemeinsames Ziel ist die Orientierung des persönlichen Lebens an der Bibel. Tagungen, Freizeiten und ein Literaturangebot laden dazu ein. Fünf Ingenieure bereisen Fachhochschulen, um Studenten zu betreuen. Seit 1986 sind Geodäten im DCTB auf dem DGT/INTERGEO mit einem Messestand präsent, so auch 2006 auf dem OGT in Krems.</p>	<p>Die Energie Steiermark AG ist das viertgrößte Energieunternehmen Österreichs mit den Kerngeschäftsfeldern Strom, Erdgas, Fernwärme und Restmüllverwertung. Auf in- und ausländischen Märkten verkauft die Energie Steiermark 8.000 GWh Strom, 1.200 Mio. Kubikmeter Erdgas und 2.300 GWh Fernwärme. Der Konzernumsatz liegt bei rund 1,3 Milliarden Euro.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Bereich Vermessung ■ GNSS/VRS Netz ■ GPS Korrekturdienst für STMK ■ Genauigkeit in cm und dm ■ Korrekturdaten über GPS ■ Korrektur im Postprocessing ■ flexible Tarife ■ RINEX Daten <p>Mitaussteller: ENERGIE AG OBERÖSTERREICH DATA GMBH</p>	<p>Wie der Name Energie AG Data bereits umschreibt, handelt es sich bei dem Unternehmen um einen Bereich, der sich mit der Datenerfassung, dem Transport und der Zuführung zu dessen Verwertung befasst. Die Datenerfassung liegt hauptsächlich im Metering-Bereich in Form der Zählerstandserfassung. Transportiert werden Daten über alle fernmeldetechnischen Einrichtungen, wie Funknetze, Kupfernetze und vermehrt auch Glasfasernetze.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Korrekturdienst für OÖ ■ Genauigkeit in cm und dm ■ Referenzstationen mit LWL ■ Korrekturdaten über GPS ■ Korrektur im Postprocessing ■ Dichtes Netz mit 22 Stationen ■ Portal mit Benutzeraccount ■ flexible Tarife <p>Mitaussteller bei: ENERGIE STEIERMARK AG</p>
<p>Stand W8a</p> <p>Deutscher Christlicher Techniker-Bund e.V. Uhlandstraße 9 70825 Korntal-Münchingen Deutschland</p> <p>Tel.: +49 711 83808 28 Fax: +49 711 83808 29 E-Mail: info@dctb.de www.dctb.de</p>	<p>Stand W8</p> <p>Energie Steiermark AG Leonhardstraße 59 8010 Graz Österreich</p> <p>Tel.: +43 316 9000 E-Mail: office@e-steiermark.com www.e-steiermark.com</p>	<p>Stand W8</p> <p>Energie AG Oberösterreich Data GmbH Böhmerwaldstraße 3 4020 Linz Österreich</p> <p>Tel.: +43 664 60165 7131 E-Mail: karl.draxler@energieag.at www.netfocus.at</p>

		
<p style="text-align: center;">EOVISION GMBH</p>	<p style="text-align: center;">FARO</p>	<p style="text-align: center;">FLUID FORMS</p>
<p>Das Salzburger Unternehmen eoVision ist ein Komplettanbieter im Bereich von Satelliten- und anderen Geodaten. Angebotsschwerpunkte liegen in der Herstellung und Anwendung von hochwertigen Satellitenbilddaten und abgeleiteten Informationsprodukten, in der Auswahl optimaler Daten und in der Herstellung hochwertiger Bilder, Karten und anderer Geoinformationsprodukte für eine breite Palette von Anwendungen, sowie in der Lizenzierung von Daten und Beratung zu allen Aspekten der Fernerkundung.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Satellitenrohdaten ■ Satellitenbilder ■ Hochauflösende Satellitendaten ■ 3D-Visualisierung ■ Geoanimationen ■ Landnutzungskartierung ■ Geodateninfrastructureservices ■ Geoinformationsprodukte ■ Radar-Satellitendaten ■ Satellitenkarten 	<p>Mit mehr als 18.000 Installationen und 8.600 Kunden weltweit, entwickelt und vertreibt FARO computergestützte Messmaschinen und Messsoftware für die Erstellung digitaler 3D-Modelle. Sie ermöglichen hochgenaue 3D-Messungen, 3D-Vergleiche von großen und kleinen Teilen und Anlagen direkt in der Fertigung, Fabrikplanungen, Bestandsaufnahmen, wie auch zum Beispiel spezialisierte Anwendungen in den Bereichen Ingenieurvermessung, Unfall- und Tatortdokumentation bis hin zum Denkmalschutz.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ FAROArm ■ FARO GAGE ■ FARO Laser Tracker ■ FARO Laser Scanner 	<p>Fluid Forms bieten über die Webseite www.fluid-forms.com topografische Höhenschichtmodelle an. Der gewünschte Ausschnitt kann dabei innerhalb weniger Sekunden mit Hilfe des Online-Design-Tools bestimmt und in der Vorschau als 3D-Modell angezeigt werden. Nach Bestellung dauert die Herstellung zirka 2 Wochen und die fertigen Modelle werden per Post direkt zugestellt. Die Modelle eignen sich perfekt als spezielles Geschenk für Private und für Unternehmen und können auch mit Widmungen oder Logos versehen werden.</p> <p>Daneben erstellt Fluid Forms topografische Modelle in allen erdenklichen Größen und Materialien für Museen, Ausstellungen und andere Anwendungen.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Topografische Höhenschichtenmodelle aus Holz ■ Topografische Höhenschichtenmodelle aus Modellbauwerkstoffen ■ Topografische Höhenschichtenmodelle aus Silber und anderen Materialien als Geschenke und Give-Aways ■ Online-Software um topografische Höhenschichtenmodelle online zu bestellen ■ Online Vertriebssystem, um topografische Höhenschichtenmodelle auf jeder beliebigen Website verkaufen zu können
<p>Stand W19</p> <hr/> <p>eoVision GmbH Franz-Josef-Straße 19 5020 Salzburg Österreich</p> <p>Tel.: +43 662 243217 Fax: +43 662 243217 11 E-Mail: office@eovision.at</p> <p>www.eovision.at</p>	<p>Stand W6</p> <hr/> <p>FARO Europe GmbH & Co. KG Lingwiesenstraße 11-2 70825 Korntal-Münchingen Deutschland</p> <p>Tel.: +49 7150 9797226 Fax: +49 7150 97979226 E-Mail: info@faroeurope.com</p> <p>www.faro.com</p>	<p>Stand MR5</p> <hr/> <p>FluidForms Walter & Williams OG</p> <p>Josefigasse 1 8024 Graz Österreich</p> <p>Tel.: +43 316 890203 Fax: +43 316 890203 15 E-Mail: office@fluid-forms.com</p> <p>www.fluid-forms.com</p>

 		 www.geoinfograz.at
GEOAESIE AUSTRIA – TRIMBLE	GEODIS AUSTRIA GMBH	GEOINFO INFORMA- TIONSSYSTEME GMBH
<p>Geodaesie Austria ist seit über fünf Jahren der offizielle Vertriebspartner von Trimble in Österreich für Produkte aus dem Bereich Vermessungswesen und Maschinensteuerung. Von Steyr in OÖ sowie den Vertriebsmitarbeiterstandorten in Brandenburg bei Wörgl und Baden bei Wien betreuen wir ganz Österreich. Neben kompetenter und umfassender Beratung bieten wir einen technischen Service sowie Support und Schulungen an. Ein umfangreicher Zubehörcatalog sowie Miet- und Leihgeräte runden unser Angebot ab.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ optische Totalstationen ■ GPS- & GNSS-Systeme ■ Nivelliere ■ VRS-Netzwerke ■ 3D-Laserscanning ■ Maschinensteuerung ■ Vermessungssoftware ■ Vermessungszubehör ■ Service & Support ■ Schulungen & Workshops <p>Mitaussteller: HHK DATENTECHNIK GMBH</p>	<p>Die Firma GEODIS Austria GmbH mit Sitz in Brunn am Gebirge ist seit drei Jahre erfolgreicher Generalvertreter der TOPCON medizinischen Instrumente in Österreich. Seit Juni 2009 sind auch die Positioningprodukte des Herstellers TOPCON für den exklusiven Vertrieb in Österreich dazugekommen. Neben dem Verkauf bietet GEODIS Austria, als Tochter von GEODIS Brunn, ein technisches Service für alle im Vertrieb angebotenen Instrumente auf höchstem Standard an.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ GNSS - Netzwerkrover ■ Referenzstationempfänger ■ Handheld GPS Geräte ■ Robotik Totalstationen ■ Imaging Totalstationen ■ Ingenieur Tachymeter CE.NET ■ GIS - Empfänger ■ Laserscanner, Mobile Mapping ■ Digitalnivelliere ■ Monitoring 	<p>Die GeoInfoGraz ist vorwiegend im Bereich Geoinformation tätig. Der Mitarbeiter(-innen)stab besteht aus Spezialisten der Vermessung, Geographie, Telematik und Betriebswirtschaft. Bereits 1995 wurde die GeoInfoGraz unter die 100 Leitbetriebe der Stadt Graz aufgenommen. Von der Projektentwicklung bis hin zur Auslieferung der fertigen Produkte werden alle Arbeitsschritte je nach Anforderung realisiert. Die Auftraggeber kommen primär aus den Bereichen Verwaltung, Wirtschaft und Tourismus.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ GIS-Software – GeoOffice ■ GIS-Software – ArcGIS ■ CAD-Software – AutoDesk ■ GIS – Projektrealisierung ■ Kartographie ■ Geomarketing ■ Geodatenerfassung ■ Geodatenanalyse ■ Geodatenmanagement <p>Mitaussteller bei: SynerGIS INFORMATIONSSYSTEME GMBH</p>
<p>Stand MR3</p> <hr/> <p>Geodaesie Austria Ennsner Strasse 83 4407 Steyr-Gleink Österreich Tel.: +43 7252 87165 0 Fax: +43 7252 87165 40 E-Mail: office@geodaesie.at www.geodaesie.at</p>	<p>Stand ML5</p> <hr/> <p>GEODIS AUSTRIA GmbH Campus21, Liebermannstr.A01 304 B.8 2345 Brunn am Gebirge Österreich Tel.: +43 1 866 702 1550 Fax: +43 1 866 702 1554 E-Mail: topconbusiness@geodisgroup.at www.geodisgroup.at</p>	<p>Stand W12</p> <hr/> <p>GeoInfo Informationssysteme GmbH Zwerggasse 13 8010 Graz Österreich Tel.: +43 316 327093 Fax: +43 316 327093 20 E-Mail: office@geoinfograz.at www.geoinfograz.at</p>

		
GEOLAND.AT	GOECKE GMBH & CO. KG	GRID-IT
<p>Über GEOLAND.AT – das Geodatenportal der österreichischen Länder – wird ein zentraler Zugang auf wichtige Geodatenbestände angeboten. Geodaten aller 9 Bundesländer können über den GEOLAND-Viewer in Landkartenform dargestellt und ausgedruckt werden. Sowohl das Fachdatenangebot als auch die Kartenfunktionalitäten werden laufend erweitert. Auch eine Länder übergreifende Metadatensuche wird derzeit implementiert.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Geoland-Viewer ■ Geoland-Metadaten ■ WMS-Dienst ■ GPS-Transformation 	<p>GOECKE ist ein führender Anbieter für Vermessungszubehör im deutschsprachigen Raum. Das 1930 gegründete Familienunternehmen mit Sitz in Schwelm wird in der dritten Generation von Christian und Harald Goecke geführt und beschäftigt zirka 20 Mitarbeiter.</p> <p>Zum Lieferprogramm gehören alle Produkte, die im vermessungstechnischen Außendienst benötigt werden. Die eigene Produktion für Vermarktungsmaterial ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität bei Sonderwünschen. Außendienstmitarbeiter in Wien.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Vermarktungsmaterial ■ Tunnelvermessungszubehör ■ Gleisvermessungszubehör ■ Messzeuge ■ EDM- und GPS-Zubehör ■ Instrumente ■ Stative ■ Wetterbekleidung ■ Fahrzeugeinrichtungen 	<p>Die GRID-IT Gesellschaft für angewandte Geoinformatik steht für innovative und praxisnahe Lösungen in der Geoinformatik und Fernerkundung. Als Spezialist für komplexe Fragestellungen rund um Geodaten unterstützen wir Sie in den Bereichen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Geodatenmanagement (Organisation, Auswertung und Visualisierung räumlicher Daten) ■ Kundenspezifische Softwareentwicklung (Datenprozessierung, Internetapplikationen, Content Management) ■ Software- und Datenvertrieb (ERDAS-Vertrieb für Österreich, TeleAtlas, Laserdata) <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ERDAS-Software (Vertrieb) ■ Management komplexer Geodaten ■ Fernerkundung ■ GIS-Analysen ■ 3D Visualisierungen ■ Kundenspezifische Softwareentwicklung ■ Datenprozessierung ■ Numerische Simulationsmodelle ■ Internet-Informationssysteme
<p>Stand W13</p> <hr/> <p>geoland.at</p> <p>Bahnhofplatz 1 4021 Linz Österreich</p> <p>Tel.: +43 732 7720 12605 Fax: +43 732 7720 212888 E-Mail: thomas.ebert@ooe.gv.at</p> <p>www.geoland.at</p>	<p>Stand ML2</p> <hr/> <p>GOECKE GmbH & Co. KG</p> <p>Ruhrstraße 38 58332 Schwelm Deutschland</p> <p>Tel.: +49 2336 4790 0 Fax: +49 2336 4790 10 E-Mail: info@goecke.de</p> <p>www.goecke.de</p>	<p>Stand ML4</p> <hr/> <p>GRID-IT Gesellschaft für angewandte Geoinformatik</p> <p>Technikerstraße 21a 6020 Innsbruck Österreich</p> <p>Tel.: +43 512 507 4860 Fax: +43 512 507 4869 E-Mail: office@grid-it.at</p> <p>www.grid-it.at</p>

		
HHK DATENTECHNIK GMBH	IDC EDV GMBH	INGENIEURBÜROS FÜR VERMESSUNGSWESEN
<p>Die HHK ist eine der führenden Hersteller von CAD-Systemen für Vermessung in Deutschland. Mit rund 60 Mitarbeitern in Braunschweig und Berlin sowie mit mehr als 15 Partnerfirmen liefert das Unternehmen praxiserprobte Lösungen für alle Bereiche des Vermessungswesens auch außerhalb Deutschlands. Das Portfolio erstreckt sich vom CAD über die Büroverwaltung bis zum GIS und Webanwendung. Mehr als 3.200 Kunden nutzen unsere Kompetenz und Erfahrungen aus 25 Jahren erfolgreicher Geschäftstätigkeit.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ GEOgraf (CAD) ■ GEObüro (Büroverwaltung) ■ GEOgrafIS (GIS) ■ GEOcheck (Datenprüfung) ■ HHKmapserver (Webanwendung) ■ Softwareberatung ■ Produktschulungen ■ Datenmigration ■ Projektbetreuung ■ Individualentwicklungen <p>MitAussteller bei: GEODÄSIE AUSTRIA – TRIMBLE</p>	<p>Derzeit ist die IDC der größte Anbieter von EDV-Dienstleistungen im Tiroler Oberland. Zur Abrundung der Produktpalette wurde im Herbst 2007 eine Marketingabteilung gegründet und der österreichische Generalvertrieb für die CAD-Software BricsCAD übernommen. Die Software-Entwicklungsabteilung betreut Energieversorger und technische Büros. Neben der Vermessungssoftware Geosi und vielen anderen innovativen Programmen wird derzeit an Internet-Lösungen für Google Earth gearbeitet.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Geosi Software für Vermessung ■ Monobild dig. Bildentzerrung ■ Bricscad CAD-Alternative 	<p>Die Ingenieurbüros für Vermessungswesen sind ein Teil des „Fachverbandes der Ingenieurbüros“ und damit Mitglieder der Wirtschaftskammer Österreich. Das Ingenieurbüro arbeitet unabhängig, neutral und treuhändisch, weil es an der Ausführung des Werkes nicht teilnimmt. Der Berechtigungsumfang ist umfassend im §134 GewO verankert, die Standesregeln durch eine VO des Wirtschaftsministers definiert.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ gesamtes Gebiet der Vermessung ■ Planungsgrundlagen ■ Bauabsteckungen ■ Bildmessung ■ Katastervermessung ■ Bauüberwachungsmessungen ■ Bestandspläne für Gebäude ■ Leitungskataster – GIS ■ Gutachten ■ Vertretung gegenüber Behörden
<p>Stand MR3</p> <hr/> <p>HHK Datentechnik GmbH Hamburger Straße 277 38114 Braunschweig Deutschland</p> <p>Tel.: +49 531 2881 0 Fax: +49 531 2881 111 E-Mail: info@hkk.de</p> <p>www.hhk.de</p>	<p>Stand W10</p> <hr/> <p>IDC EDV GmbH Eichenweg 42 6460 Imst Österreich</p> <p>Tel.: +43 5412 63200 Fax: +43 5412 6930 E-Mail: vertrieb@idc-edv.at</p> <p>www.geosi.at</p>	<p>Stand W20</p> <hr/> <p>Fachverband Ingenieurbüros Schaumburggasse 20/1 1040 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 590 900 3248 Fax: +43 590 900 229 E-Mail: ftbi@wko.at</p> <p>www.ingenieurbueros.at</p>

		
KUBIT GMBH	LANDMARK GMBH	LGS AUSTRIA GMBH
<p>kubit ist ein Softwarehersteller, der sich darauf spezialisiert hat, Daten von Vermessungsgeräten möglichst schnell und kostensparend in CAD-Programme zu übernehmen und sie dort auszuwerten. Das Ergebnis der Auswertung ist in allen Fällen ein standardisierter CAD-Plan, der problemlos von nahezu allen CAD-Programmen gelesen werden kann. Bei den Vermessungsgeräten handelt es sich um Bandmaße, Distometer (Handlaser), Tachymeter, Kameras und Laserscanner nahezu aller Hersteller.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ TachyCAD ■ DistToPlan ■ PhoToPlan ■ PointCloud ■ hylasFM ■ Systemlösungen ■ Schulungen / Training 	<p>Vermessungs- und Vermarktungs-material - Handel</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Vermessungszubehör ■ Vermarktung ■ Markieren ■ Prismen und EDM ■ Ortungstechnik ■ Reparatur und Mietservice ■ Nivelliergeräte, Laser ■ Entfernungsmesser ■ Akkutausch ■ Suchgeräte 	<p>Österreichische Vertriebsgesellschaft des weltweit führenden Unternehmens Leica Geosystems AG, das durch hohe Innovationskraft die Zukunft der Vermessungstechnologie prägt. So erobern LEICA TPS, GPS- und Laser-basierte Vermessungssysteme für die Datenerfassung und Datendarstellung Schritt für Schritt die dritte Dimension in der räumlichen Datenwelt und eröffnen damit neue Märkte und Potentiale.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ TPS Sensoren ■ GNSS Sensoren ■ Monitoringlösungen HW + SW ■ Referenzstationslösungen ■ Terrestrisches Laserscanning ■ Digitalnivelliere ■ Bauvermessungsprodukte ■ Schulungen ■ Support ■ Technischer Service
<p>Stand ML6</p> <p>kubit GmbH Fiedlerstraße 36 01307 Dresden Deutschland Tel.: +49 351 41767 0 Fax: +49 351 41767 29 E-Mail: info@kubit.de www.kubit.de</p>	<p>Stand W14</p> <p>Landmark Produktions- u. Handelsgesellschaft m.b.H. Bahnhofstraße 8b 6922 Wolfurt Österreich Tel.: +43 5574 63549 Fax: +43 5574 63639 E-Mail: info@landmark.at www.landmark.at</p>	<p>Stand ML3</p> <p>Leica Geosystems Austria GmbH Gudrunstraße 179 1100 Wien Österreich Tel.: +43 1 98122 0 Fax: +43 1 98122 50 E-Mail: lgs.austria@leica-geosystems.com www.leica-geosystems.at</p>

		
MA 41 – STADTVERMESSUNG, MAGISTRAT WIEN	METTENMEIER MOBILE SOLUTIONS	MILAN GEOSERVICE GMBH
<p>Die Stadtvermessung Wien übernimmt die Aufgaben von „Vermessungsingenieurinnen und Vermessungsingenieuren“ innerhalb der Wiener Stadtverwaltung. Das Bereitstellen von Plänen und Geodaten und die Durchführung der dafür notwendigen Vermessungen und Arbeiten ist der Auftrag an die Magistratsabteilung 41.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Geobasisdaten ■ Projektgrundlagen ■ Städtische Grundstücksgrenzen 	<p>Mettenmeier Mobile Solutions entwickelt, produziert und vertreibt robuste Tablet-PCs und Notebooks für Anwender, die mobile Anwendungen mit Zuverlässigkeit und Outdoor-Erlebnis verbinden möchten. Die Geräte erfüllen höchste Qualitätsstandards, stecken randvoll mit fortschrittlicher Technik und überzeugen in puncto Kraft und Ausdauer. Ein starker Bezug zur Praxis sowie mehr als 20 Jahre Erfahrung sind in die Entwicklung unserer bewährt-robusten Tablet-PCs aus eigener Fertigung eingeflossen.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Tablet-PC colibri X7 protect ■ ConvertibleNotebook GETAC V100 ■ Mobile GIS-Lösungen 	<p>Die MILAN Geoservice GmbH führt als 100%ige Tochtergesellschaft der eta AG engineering deren Geschäftsfeld des Airborne Laserscanning sowie der Digitalen Photogrammetrie seit Mitte des Jahres 2002 weiter. Im Jahr 2007 erweiterten sich die Geschäftsfelder um die Bereiche Kartografie / Risswerksführung und Vermessung / Markscheidewesen. Damit bietet die MILAN Geoservice GmbH auch ingenieurgeodätische und markscheiderische Vermessungsleistungen sowie zahlreiche Spezialvermessungen an.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Airborne Laser Scanning ■ Digitale Höhenmodelle ■ DSM und DTM ■ Digitale Orthophotos ■ Hyperspektralmessungen ■ 3D Terrestrisches Laserscanning ■ Markscheidewesen ■ Ingenieurgeodäsie ■ Kartografie ■ Bergmännisches Risswerk <p>Mitaussteller: VERMESSUNG AVT ZT GMBH</p>
<p>Poster</p> <hr/> <p>Magistrat Wien, MA 41 – Stadtvermessung</p> <p>Muthgasse 62 1190 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 4000 8041 Fax: +43 1 4000 998041 E-Mail: post@ma41.wien.gv.at</p> <p>www.stadtvermessung.wien.at</p>	<p>Stand W7</p> <hr/> <p>Mettenmeier GmbH Mobile Solutions</p> <p>Klingenderstraße 10-14 33100 Paderborn Deutschland</p> <p>Tel.: +49 5251 150 500 Fax: +49 5251 150 511 E-Mail: info@robust-pc.de</p> <p>www.robust-pc.de</p>	<p>Stand W18</p> <hr/> <p>MILAN Geoservice GmbH</p> <p>Zum Tower 4 01917 Kamenz Deutschland</p> <p>Tel.: +49 355 28924 602 Fax: +49 355 28924 112 E-Mail: info@milan-geoservice.de</p> <p>www.milan-geoservice.de</p>

		
ÖAV SCHLADMING	ONLAW INTERNET TECHNOLOGIE GMBH	PETERSCHINEGG GMBH
<p>ÖAV Neigungsgruppe Höhlenforscher</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Untertagevermessung ■ Höhlenforschung ■ Montangeschichte ■ Höhlenrettung ■ Bergbaubewahrung ■ touristische Arbeiten ■ Mitarbeit mit Universitäten <p>Mitaussteller: TU DRESDEN</p>	<p>Innovative Lösungen, hochwertige Technologien und qualifizierte Serviceleistungen ermöglichen es onlaw, Gesamtlösungen nicht nur anzubieten, sondern auch erfolgreich umzusetzen und unsere Kunden dabei zufrieden zu stellen. onlaw entwickelt zukunftsweisende Produkte zur Wissensaufbereitung und Wissensvernetzung, die u.a. vom österreichischen Marktführer für Online-Rechtsinformation, der RDB, Österreichs größtem Fachverlag, dem Manz Verlag Wien und der BAIK erfolgreich eingesetzt werden.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Informationserschließung ■ Projekt- u Qualitätsmanagement ■ Webapplikationsplanung ■ Webapplikationsumsetzung ■ Websiteumsetzung ■ Websiteplanung ■ Content Production Services ■ IT Infrastruktur und -Hosting ■ Partner für Rechtsinformation ■ Open Source Lösungen <p>Mitaussteller bei: BUNDESKAMMER DER ARCHITECTEN UND INGENIEURKONSULENTEN (BAIK)</p>	<p>Die PETERSCHINEGG GesmbH wurde 1981 gegründet, zu einer Zeit, in der die ersten PCs den Markt eroberten. Die innovative Entscheidung im Jahr 1983 den Vertrieb von AutoCAD, einem zum damaligen Zeitpunkt unbekanntes Produkt zu übernehmen, hat in der Folge die Ausrichtung der Firma geprägt.</p> <p>Neben maßgeschneiderten Gesamtlösungen werden von den jeweiligen Spezialisten von PETERSCHINEGG auch Training, Support und Projektbegleitung angeboten. Post Sales Betreuung ist für dieses Unternehmen nicht nur ein Schlagwort, sondern eine der Säulen auf der Kundenbetreuung und Kundenzufriedenheit aufgebaut sind.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Autodesk Produkte: <ul style="list-style-type: none"> ■ AutoCAD ■ AutoCAD Map 3D ■ AutoCAD Civil 3D ■ Autodesk Topobase ■ Applikationen: <ul style="list-style-type: none"> ■ URBANO Kanal / Wasser ■ URBANO GIS ■ PLATEIA
<p>Stand MR2</p> <hr/> <p>ÖAV Schladming Europaplatz 8970 Schladming Österreich</p> <p>Tel.: +43 3687 22429 23940 E-Mail: t.streicher@kabsi.at www.alpenverein-schladming.at</p>	<p>Stand W2</p> <hr/> <p>onlaw internet technologie gmbh Johannesgasse 23 1010 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 512 74 02 0 Fax: +43 512 74 02 599 E-Mail: info@onlaw.at www.onlaw.at</p>	<p>Stand W4</p> <hr/> <p>PETERSCHINEGG GmbH Schindlergasse 31 1180 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 4707413 Fax: +43 1 4792314 E-Mail: c.cicin@peterschinegg.at www.peterschinegg.at</p>

		
<p style="text-align: center;">RIEGL LMS</p>	<p style="text-align: center;">rmDATA GMBH</p>	<p style="text-align: center;">RMR SOFTWARE-ENTWICKLUNGSGESELLSCHAFT</p>
<p>Mit 30 Jahren Erfahrung auf dem Gebiet der Forschung, Entwicklung und Fertigung von Laser Entfernungsmessern, Distanzmessgeräten und Laserscannern ist RIEGL laufend höchst innovativ im Bereich der 3D Messtechnik tätig. Die neuen RIEGL V-Line Scanner ermöglichen durch Echodigitalisierung und „Online-Waveform-Analysis“ Mehrzielfähigkeit, hohe Genauigkeit der Entfernungsmessung, sehr hohe Scangeschwindigkeiten und Messraten, sowie die Ausgabe eines Qualitätsindikators für jede Messung.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Terrestrische Laserscanner ■ Airborne Laserscanner ■ Mobile Laserscanner ■ Scanner für Industrieanwendung ■ Laserscanning Software ■ Laser-Entfernungsmessgeräte 	<p>Bereits seit 1984 erstellt rmDATA Software für Vermessung, Planerstellung und Geoinformation. Zum Betätigungsfeld gehören der Vertrieb dieser Produkte, Beratung, Schulungen und Support. Einen weiteren Schwerpunkt bilden anwenderspezifische Software-Lösungen auf Basis von Standard-Produkten. Als einer der wenigen Softwarehersteller im deutschsprachigen Raum bietet rmDATA eigenentwickelte Software mit durchgängigem Datenfluss vom Vermessungsgerät bis zum Geoinformationssystem an.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ rmGEO (Berechnungssoftware) ■ rmNETZ (Ausgleichung) ■ rmKatOffice (ehemals rmV408) ■ rmDATA GeoModeller (DGM) ■ rmMAP (CAD/GIS-Datenerfassung) ■ rmMAP/Module u. Schnittstellen ■ rmGDB (Abfragen via Internet) ■ rmINFO/GDB ■ rmVIEW (Auskunftssystem) ■ Schulung, Installation 	<p>Die RMR besteht seit 1987 und hat ihren Firmensitz in Bad Neuenahr-Ahrweiler.</p> <p>RMR erstellt Software in den Bereichen Vermessung, Straßenbau, DGM und 3D-GIS. Die Programme sind als AutoCAD-Applikation oder mit eigener AutoCAD-kompatibler CAD erhältlich. Auf dieser Basis werden u.a. auch Software für GPS-gestützte FDVK, Baggersteuerung usw. angeboten.</p> <p>Wir bieten Kunden mehrtägige Schulungsseminare an: auf Wunsch in der eigenen Firma oder in unseren Schulungsräumen in Bad Neuenahr.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ GeoCAD-OP 3D GIS ■ GeoCAD-Maschinensteuerung ■ GeoCAD-Absetzer ■ GeoCAD-Bagger ■ GeoCAD-FDVK ■ GeoCAD-Leitstand ■ GeoCAD-Classic ■ GeoCAD-3D Laserscanner ■ Kundenspezifische Software
<p>Stand W11</p> <p>RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH</p> <p>Riedenburgstraße 48 3580 Horn Österreich</p> <p>Tel.: +43 2982 4211 Fax: +43 2982 4210 E-Mail: office@riegl.co.at</p> <p>www.riegl.com</p>	<p>Stand MR1</p> <p>rmDATA GmbH</p> <p>Prinz Eugen Straße 12 7400 Oberwart Österreich</p> <p>Tel.: +43 3352 38482 0 Fax: +43 3352 38482 76 E-Mail: office@rmdata.at</p> <p>www.rmdata.at</p>	<p>Stand W5</p> <p>RMR Softwareentwicklungsgesellschaft</p> <p>Ahrweilerstrasse 40 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler Deutschland</p> <p>Tel.: +49 2641 900 520 Fax: +49 2641 31611 E-Mail: info@rmr.de</p> <p>www.rmr.de</p>

		
HELMUT SCHULTZ GMBH	SOFTWARE DEVELOPMENT REICHHART GMBH	STADTVERMES- SUNGSAMT GRAZ
<p>Die Helmut Schultz GmbH ist ein Vollsortimenter mit Produkten für die Vermessungstechnik.</p> <p>Mit ihrer über fünfzigjährigen Tradition, ist die Helmut Schultz GmbH ein führender Anbieter in der Geodäsie. Diplom-Ingenieure, Techniker und Vertriebsmitarbeiter sorgen für zufriedene Kunden. Das Leistungsspektrum reicht vom Mini-Vermarkungsnagel bis hin zum kombinierten GPS-Tachymeter-System. Reparaturen bzw. Kalibrierungen werden durch geschulte Techniker durchgeführt.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Vermarkungsmaterial ■ Warn- und Arbeitsschutz ■ Maschinen und Funkgeräte ■ Zeichentechnik ■ EDM-Zubehör ■ Nivelliere, Theodolite, Laser ■ Tachymeter, GPS-Systeme ■ GIS-Systeme ■ Zeichentechnik ■ eigene Reparaturwerkstatt 	<p>Die Firma sdr() - Software Development Reichhart GmbH wurde am 14. Dezember 1999 gegründet. Der Firmensitz befindet sich in Wien 22.</p> <p>Seit September 2009 wird ein Lehrling in Informationstechnologie-Informatik ausgebildet.</p> <p>Die Geschäftsführung liegt in den Händen von Dipl.-Ing. Friedrich Reichhart und Friedrich Reichhart, BSc. Die Hauptaktivität ist die Entwicklung und der Vertrieb der Büroverwaltungssoftware sdr(optimus 6), einer projektorientierten Controllingsoftware.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ sdr(optimus 6) ■ sdr(internet.backup) ■ sdr(virtualisierung) ■ sdr(it.sicherheit) ■ sdr(web.entwicklung) ■ sdr(file.server) ■ sdr(vpn) ■ sdr(it.lösungen) ■ sdr(programmierung) 	<p>Öffentliche Institution</p>
<p>Stand W9</p> <p>Helmut Schultz - Gesellschaft für Vermessungstechnik mbH</p> <p>Elsässer Straße 5 66119 Saarbrücken Deutschland</p> <p>Tel.: +49 681 91028 0 Fax: +49 681 91028 28 E-Mail: vertrieb@helmut-schultz.de www.helmut-schultz.de</p>	<p>Stand MR4</p> <p>Software Development Reichhart GmbH</p> <p>Schachnerstraße 53 1220 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 203 77 51 Fax: +43 1 204 42 71 E-Mail: office@sdr.at www.sdr.at</p>	<p>Poster</p> <p>Magistrat Graz – Stadtvermessungsamt</p> <p>Europaplatz 20 8010 Graz Österreich</p> <p>Tel.: +43 316 872 4100 Fax: +43 316 872 4109 E-Mail: stadtvermessung@stadt.graz.at www.graz.at</p>

		
<p style="text-align: center;">SYNERGIS</p>	<p style="text-align: center;">TECHNISCHE UNIVER- SITÄT DRESDEN</p>	<p style="text-align: center;">TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ</p>
<p>Die SynerGIS Unternehmensgruppe mit Ihren Standorten in Wien, Innsbruck, Bratislava, Waghäusel bei Heidelberg mit Geschäftsstellen in Freiburg, Landshut und Lübeck ist im gesamten deutschen Sprachraum und anderen europäischen Ländern tätig. Seit 1987 sind wir ESRI Generalvertreter in Österreich und verstehen sich heute als Repräsentant führender Systemhersteller (ESRI, SAFE, KMS), Applikationsentwickler und Implementierungspartner für unterschiedlichste Kundenprojekte im Bereich von GIS.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ESRI Distribution ■ ESRI zertifizierte Trainer ■ WebOffice ■ GeoOffice ■ GIS Services ■ Desktop GIS Entwicklung ■ Server GIS Entwicklung ■ Enterprise GIS Integration ■ SAFE Vertrieb ■ KMS Vertrieb <p>Mitaussteller: GEOINFO INFORMATIONSSYSTEME GMBH</p>	<p>Zu den Hauptaufgaben des Instituts für Kartographie der TU Dresden zählt neben der Grundlagen- sowie angewandten Forschung zu Kartographie und Geoinformatik die Lehrtätigkeit für die Studiengänge Kartographie (Diplom) und Kartographie und Geomedientechnik (BA). Das Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) ist eine zentrale wissenschaftliche Einrichtung der TU Dresden mit begleitenden Forschungen im vollen Spektrum der Aufgabengebiete.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen: Entwicklung von Methoden der fotorealistischen pseudo- und dreidimensionalen Visualisierung von Geodaten sowie universitäre Ausbildung auf diesem Gebiet.</p> <p>Mitaussteller: ÖAV HÖHLENFORSCHER SCHLADMING</p>	<p>Die TU Graz versteht sich als eine zukunftsorientierte Bildungs- und Forschungseinrichtung in den Bereichen der technischen Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften mit internationalem Profil und außerordentlich hoher Dynamik. Auf der Basis ausgeprägter fachlicher Kompetenzen kooperiert sie mit akademischen und industriellen Partnern und stellt sich, höchster Qualität verpflichtet, bewusst dem internationalen Wettbewerb. Die Erkenntnisse aus Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung finden direkt Eingang in die einschlägigen Studienprogramme.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 7 Fakultäten mit 102 Instituten ■ 7 Fields of Expertise ■ 900 lfd. Forschungsprojekte ■ 7 CD-Labors ■ 2 Beteiligungen an K2-Zentren ■ 9 Beteiligungen an K1-Zentren ■ 13 Doctoral Schools ■ 31 Masterstudien ■ 17 Bachelorstudien ■ 3 Lehramtsstudien
<p>Stand W12</p> <hr/> <p>SynerGIS Informationssysteme GmbH Technologiestraße 10 1120 Wien Österreich Tel.: +43 1 878 06 Fax: +43 1 878 06 99 E-Mail: vertrieb@mysynergis.com www.mysynergis.com</p>	<p>Stand MR2</p> <hr/> <p>Technische Universität Dresden Helmholtzstraße 10 01069 Dresden Deutschland Tel.: +49 351 463 34809 Fax: +49 351 463 37028 E-Mail: manfred.buchroithner@tu-dresden.de kartographie.geo.tu-dresden.de</p>	<p>Stand W17</p> <hr/> <p>Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz Österreich Tel.: +43 316 873 0 Fax: +43 316 873 6009 E-Mail: info@tugraz.at www.tugraz.at</p>

		
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, HÖHERE GEODÄSIE, IGG	UNIVERSITÄT SALZBURG – ZENTRUM FÜR GEOINFORMATIK	VEXCEL IMAGING GMBH
<p>Die Forschungsgruppe Höhere Geodäsie konzentriert ihre Forschungsaktivitäten auf die Bereiche Satellitenverfahren und Navigation (GNSS, SLR), geodätisches VLBI, und Interaktionen im System Erde. Zur FG gehören ca. 15 wissenschaftlich tätige Mitarbeiter als auch Doktoranden und Gastwissenschaftler. An der Abteilung werden derzeit u.a. wiss. Arbeiten zu den Themen Precise Point Positioning (PPP), EGNOS, Real-Time Control (RTK), und Troposphärenmonitoring durchgeführt.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Koordinaten-Referenzsysteme ■ GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO) ■ RTK-Punktbestimmung ■ Troposphären Monitoring 	<p>Das Zentrum Geoinformatik (Z GIS) ist an der Universität Salzburg als Kompetenzzentrum für Geoinformatik eingerichtet. Die wichtigsten Aufgabenbereiche des Z GIS liegen in Aus- und Weiterbildung, Forschung und Entwicklung, Ausbau internationaler Beziehungen und Organisation von Fachtagungen. Die vorrangige Aufgabe ist die Unterstützung der GIS-Praxis in allen Anwendungsgebieten in enger Kooperation mit Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung. Als Träger bzw. Partner regionaler und internationaler Forschungs- und Bildungsprojekte arbeiten wir in engem Kontakt mit in- und ausländischen Institutionen an der Weiterentwicklung des Geoinformationswesens.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ AGIT Symposium und EXPO ■ UNIGIS Fernstudien ■ Z_GIS Seminarangebote 	<p>Vexcel Imaging GmbH wurde 1995 gegründet und gilt als führender Hersteller von großformatigen digitalen Luftbildkameras (UltraCamD, UltraCamX und UltraCamXp). Seit 2008 ist Vexcel mit der Vorstellung der ersten photogrammetrischen Mittelformatkamera, „UltraCamL“, in einem weiteren Marktsegment tätig. Seit der Übernahme von Microsoft Corp. im Mai 2006 wurde Vexcel zusätzlich das wesentliche Entwicklungszentrum für Microsoft's Virtual Earth Business Unit.</p> <p>Produkte und Dienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ UltraCamL ■ UltraCamXp ■ UltraMap
<p>Stand W16</p> <p>FG Höhere Geodäsie, Institut für Geodäsie und Geophysik, TU-Wien</p> <p>Gusshausstraße 27-29 1040 Wien Österreich</p> <p>Tel.: +43 1 58801 12806 Fax: +43 1 58801 12896 E-Mail: harald.schuh@tuwien.ac.at www.hg.tuwien.ac.at</p>	<p>Stand W15</p> <p>Universität Salzburg, Zentrum für Geoinformatik</p> <p>Hellbrunner Straße 34 5020 Salzburg Österreich</p> <p>Tel.: +43 662 8044 5210 Fax: +43 662 8044 182 E-Mail: zgis@sbg.ac.at www.zgis.at</p>	<p>Stand W21</p> <p>Vexcel Imaging GmbH</p> <p>Anzengrubergasse 8 8010 Graz Österreich</p> <p>Tel.: +43 316 849066 0 Fax: +43 316 849066 999 E-Mail: mpsinfo@microsoft.com www.microsoft.com/ultracam</p>



WIENSTROM GMBH

Die WIENSTROM GmbH als Tochtergesellschaft der WIEN ENERGIE GmbH ist das größte Landeselektrizitätsunternehmen Österreichs. Wir stehen für ressourcenschonende und nachhaltige Stromproduktion, innovative Telekommunikation und zukunftsorientierte Lösungen.

Produkte und Dienstleistungen:

- Echtzeitpositionierungsdienst
- DGNSS
- RINEX-Daten
- GNSS-Referenzstationsnetzwerk

Stand W3

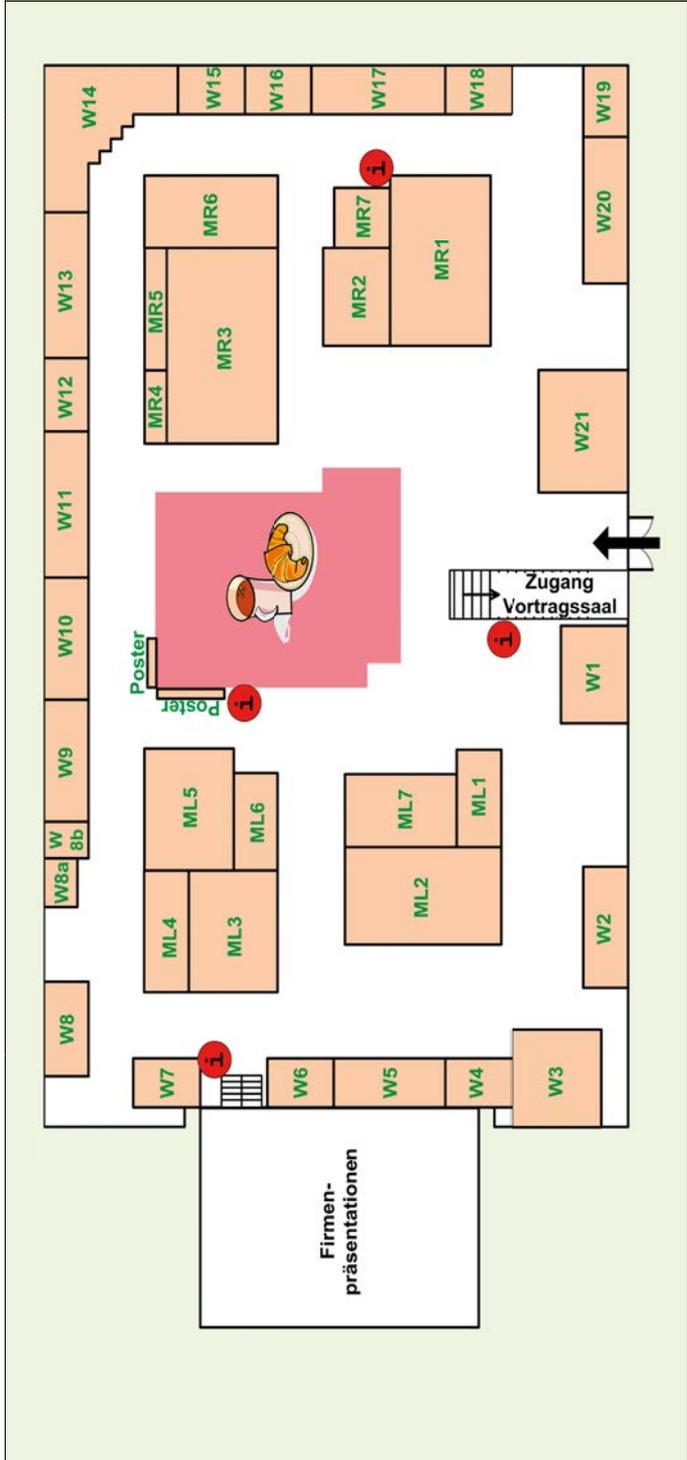
WIENSTROM GmbH

Mariannengasse 4-6
1090 Wien
Österreich

Tel.: +43 1 4004-0
E-Mail: info@wienstrom.at

www.wienstrom.at

FACHMESSE OGT 2009 STANDÜBERSICHT



Hauptsponsoren



www.rmdata.at



www.microsoft.com/ultracam



www.geodaesie.at

Gold Sponsoren



www.bev.gv.at



www.arching.at



www.steiermark.com



www.synergis.at



www.ingenieurbueros.at



www.tugraz.at

Silber Sponsoren



www.e-steiermark.com



www.goecke.de



www.leica-geosystems.at



www.goed.at



www.schladmingerbier.at



www.planai.at

UltraCam Performance für jede Flughöhe!

**Das UltraCamXp Wide Angle Modell:
Small-scale mapping mit einer großformatigen Luftbildkamera.**



Basierend auf dem UltraCamXp Kamerakzept und mit der gleichen Bildqualität, besitzt die UltraCamXp Wide Angle ein Weitwinkelobjektivsystem, welches alternativ zur UltraCamXp angeboten wird. Dies gibt nun auch Firmen, die Flugzeuge mit eingeschränkter Dienstgipfelhöhe einsetzen, die Möglichkeit Small-scale Mapping-Projekte zu befliegen.

- > **Niedrigere Flughöhe über Grund bei gleicher Bodenauflösung (GSD) wie eine UltraCamXp**
- > **Brennweite: 70mm PAN, 23mm RGB und NIR**
- > **Bodenauflösung (GSD) bei einer Flughöhe von 1000m (500m) über Grund: 8,6cm (4,3cm)**
- > **Volle Kompatibilität zu UltraMap und UltraMap /AT**

Mehr über die UltraCamXp Wide Angle unter: www.microsoft.com/ultracam/wideangle/ogt

Besuchen Sie uns am Stand Nr. W21 und erhalten Sie die neuesten Informationen!

Für nähere Informationen in Bezug auf Preise, Eintausch- und Upgradeprogramme der UltraCamD, UltraCamX und UltraCamXp Modelle kontaktieren Sie uns unter der Email: mpsiinfo@microsoft.com.

Serious tools for serious mapping.

VEXCEL
IMAGING

Microsoft

a Microsoft company

Das Beste für Vermesser am ÖGT.

- > rmDATA GeoModeller ALS
- > rmDATA GeoDiscoverer
- > rmDATA Kataster-Paket
(VermV 2009)
- > rmKATOffice

NEU

Foto: © BEV – 12009/57096

Ihr Partner für IT-Dienstleistungen
in der Vermessung und Geoinformation

www.rmdata.at
www.rmdata.de



rmDATA Österreich
7400 Oberwart, Prinz-Eugen-Straße 12
Tel: +43/3352/384 82 - 0, Fax: - 76, Email: office@rmdata.at

rmDATA Deutschland
82110 Germering/München, Untere Bahnhofstraße 50
Tel: +49/89/856 38 52 - 0, Fax: - 241, Email: office@rmdata.de