

## Neueste Trends in der österreichischen Forschung

Berichte der ÖGK beim 10. Österreichischen Geodätentag  
am 7. Oktober 2009





Österreichische Zeitschrift für  
**Vermessung &  
Geoinformation**

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

98. Jahrgang 2010

Heft: 2/2010

ISSN: 1605-1653

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>

*H. Schuh:*

**Vorwort** 51

*H. Titz, N. Höggerl, E. Imrek, G. Stangl:*

**Realisierung und Monitoring von ETRS89 in Österreich** 52

*T. Schmalz, E.-H. Tentschert, A. Preh, K. Mair am Tinkhof, C. Zangerl, A. Eichhorn:*

**Kalibrierung eines dreidimensionalen Finite-Differenzen-  
Modells einer Massenbewegung mithilfe der adaptiven  
Kalman-Filtertechnik** 62

*R. Prüller, M. Schardt:*

**GIS Modellierung alpiner Kulturlandschaften** 69

*M. Moser, K. Hanke, K. Kovács:*

**3D- Grabungs- und Funddokumentation in der Archäologie** 78

*K. Macheiner:*

**Eine Glasfaser als Sensorelement: Entwicklung eines faseroptischen  
Zweiachs-Neigungssensors** 82

*T. Koukal, C. Adelman, C. Bauerhansl, W. Schneider:*

**Vom Punkt zur Fläche – vom Pixel zur Karte: Klassifikation der  
Landbedeckung mit der kNN-Methode** 90

*G. Kirchner, F. Koidl, D. Kucharski:*

**kHz Satellite Laser Ranging – Innovative Applikationen** 102

*W. Karel, S. Niedermayr:*

**Photogrammetrie + Laserscanning = Range imaging** 109

*S. Böhm:*

**Der Einfluss der Gezeiten auf die Erdrotation** 116



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

98. Jahrgang 2010 / ISSN: 1605-1653  
<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, E-Mail: [vgi@ovg.at](mailto:vgi@ovg.at).

**Manuskripte:** Bitte direkt an die Schriftleitung senden. Es wird dringend ersucht, alle Beiträge in digitaler Form zu übersenden. Genaue Angaben über die Form der Abfassung des Textes sowie der Abbildungen (Autoren-Richtlinien) können bei der Schriftleitung angefordert werden bzw. sind auf <http://www.ovg.at> unter „VGI Richtlinien“ zu ersehen. 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 Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.iur. 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: 1200 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 exklusive 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 Bundespolizeidirektion Wien vom 26.11.2009): 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

## Vorwort

Die Österreichische Geodätische Kommission (ÖGK) mit dem Sitz in Wien ist das Organ der Internationalen Geodäsie für Österreich. Sie untersteht laut Statut „dem Bundesminister für Wirtschaft und Arbeit, der das Einvernehmen mit dem Bundesminister für Wissenschaft und Forschung herstellt“. Sie vertritt die Belange Österreichs in der Internationalen Assoziation für Geodäsie (**IAG**) und bei zwischenstaatlich vereinbarten geodätischen Arbeiten und ist offizielle Verbindungsstelle Österreichs mit der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (**IUGG**). Zu den wichtigsten Aufgaben der ÖGK gehört es, die wissenschaftliche und fachliche Entwicklung der Geodäsie voranzutreiben, wozu auch die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehört.

Es ist schon zu einer erfreulichen Tradition geworden, dass die ÖGK auf dem Österreichischen Geodätentag eine wissenschaftliche Vortragsreihe organisiert, ein weiteres Beispiel für die äußerst konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen OVG und ÖGK. Beim Geodätentag in Schladming wurden am 7. Oktober 2009 im von der ÖGK zusammengestellten Teil insgesamt neun Vorträge von hervorragenden jungen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen gehalten, die beim sehr zahlreichen Publikum auf großes Interesse gestoßen sind. Neben den Technischen Universitäten Graz und Wien waren auch die Universität für Bodenkultur Wien, die Universität Innsbruck, das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und das Institut für Weltraumforschung (IWF) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften vertreten. Diese Leistungsschau der österreichischen geodätischen Wissenschaft und Forschung findet im vorliegenden Heft der vgi nun ihren Niederschlag und im Namen der ÖGK möchte ich mich bei allen Referenten und Referentinnen dafür bedanken, dass sie ihre Vorträge nun auch schriftlich einem größeren Leserkreis zur Verfügung stellen. In Anbetracht des hohen Niveaus der Beiträge können wir hoffnungsfroh in die Zukunft schauen.

Prof. Dr. Harald Schuh  
(Präsident der ÖGK)

## Realisierung und Monitoring von ETRS89 in Österreich



*Helmut Titz, Norbert Höggerl, Erich Imrek, Wien; Günter Stangl, Graz*

### Kurzfassung

Koordinatenbezugssysteme für Vermessung, Kataster und Geo-Wissenschaften wurden in den letzten 25 Jahren durch die Einbeziehung von Satellitenmessungen gravierend verändert. Die globale Vernetzung und länderübergreifende Projekte machten die Einführung eines 3-D Referenzsystems erforderlich. Gemeinsam mit den meisten anderen europäischen Ländern hat das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) beschlossen, das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) als nationales 3-D Bezugssystem zu nutzen. Mit der Fertigstellung des Echtzeitdienstes APOS (Austrian Positioning Service) ist die permanente Realisierung von ETRS89 in Österreich gewährleistet. Im Beitrag wird ein Überblick über die Realisierung von ETRS89 gegeben. Es versteht sich von selbst, dass neben der Realisierung ein permanentes Monitoring eine entscheidende Aufgabe darstellt, um die Qualität der Realisierung sicher zu stellen. Über die Vorgangsweise beim Monitoring, sowie die sich daraus ergebenden Konsequenzen in Hinblick auf die Stabilität der Koordinaten wird berichtet. Abschließend wird die Nutzung von ETRS89 in Zusammenhang mit der EU-Richtlinie INSPIRE dargestellt.

**Schlüsselwörter:** AMON, APOS, ETRS89 Austria 2002, Bezugsrahmen, Bezugssystem, Monitoring

### Abstract

The generation of coordinate reference systems for geodesy, surveying and geo-sciences has been strongly changed by the use of satellite measurements over the last 25 years. 3-D reference systems are necessary to provide a common base for regional and global projects. The Federal Office of Metrology and Surveying (BEV) decided to use ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) as the official 3-D system. The newly established Austrian Positioning Service (APOS) is used to implement ETRS89 in Austria. This article intends to give a survey of the implementation process of ETRS89 in Austria. Once realized, permanent monitoring is necessary to secure quality standard. In this article the monitoring process will be described and the necessity of coordinate stability as well as the consequences of possible changes in coordinates will be discussed. Finally the use of ETRS89 data within INSPIRE, the EU directive, will be referred to.

**Keywords:** AMON, APOS, ETRS89 Austria 2002, Reference Frame, Reference System, Monitoring

### 1. Einleitung

Nach 1980 wurde die Landesvermessung durch die Einführung von Satellitenmessmethoden in allen Ländern stark verändert. Erstmals wurde es möglich, kartesische Koordinaten in allen drei Dimensionen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Vermessungen konnten über viel weitere Entfernungen und mit einer viel höheren Genauigkeit als bisher unter Verwendung von Lage- und Höhenfestpunkten durchgeführt werden. Die Ungenauigkeiten der Satellitenbahnen, der Satelliten- und Empfängeruhren, sowie der atmosphärischen Einflüsse, besonders die der Ionosphäre und der Troposphäre, bedingen jedoch Relativverfahren, die diese Ungenauigkeiten und entfernungsabhängigen Einflüsse größtenteils eliminieren. Das Prinzip der Vernetzung von Permanentstationen, auf deren Basis korrigierte Messungen z.B. in Form der „Virtuellen Referenzstation – VRS“ den Anwendern in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden, wurde konzipiert und umgesetzt. Durch das Bundesamt

für Eich- und Vermessungswesen (BEV) wurde in Österreich APOS, das Austrian Positioning Service, geschaffen. Die Modellierung der entfernungsabhängigen Einflüsse für eine VRS-Übertragung basiert auf Stationskoordinaten höchster Genauigkeit. Die Koordinaten müssen einerseits genauer als jene der zu messenden Einzelpunkte und andererseits in einem präzise definierten Bezugssystem bestimmt worden sein. Die Bestimmung, Überwachung und Einbindung in internationale Bezugssysteme wird im folgenden Überblick geschildert.

### 2. ITRS und ETRS89 als übergeordnete Systeme und ihre Realisierung

Will man ein nationales geodätisches Referenzsystem aus einem internationalen realisieren, stehen derzeit zwei zur Auswahl:

- 1) das International Terrestrial Reference System (ITRS) und
- 2) das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89).

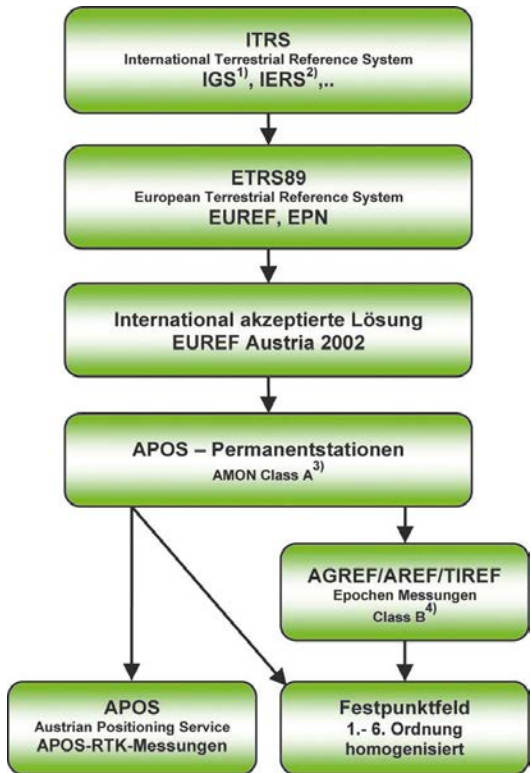


ITRS ist definiert als dreidimensionales kartesisches System mit dem Ursprung im Schwerpunkt der Erde. Das System rotiert definitionsgemäß mit der Erde [1]. Das Problem dabei ist, dass durch die Kontinentalverschiebung jeder reale Punkt auf der Erdoberfläche zeitabhängige Koordinaten besitzt. Für Europa betragen die jährlichen Veränderungen im Durchschnitt 25 mm pro Jahr. Deshalb wurde für die Bedürfnisse der Landesvermessungen in Europa nach einem System gesucht, das Koordinaten von Vermessungspunkten und anderen Punkten auf lange Zeit stabil im Rahmen der geforderten Genauigkeit hält. Im Jahr 1989 wurde vom ITRS ETRS89 abgeleitet, das für den „stable part of the Eurasian plate“ fast konstante Koordinaten liefern sollte [2]. Die Ansprüche an die Genauigkeit lagen damals im Bereich von 3-5 cm. ITRS und ETRS89 werden durch Messungen realisiert. Die Realisierungen von ITRS werden durch ITRF (International Terrestrial Reference Frame) und der Jahreszahl (z.B. ITRF89, ITRF2005) ausgedrückt. Die Realisierung von ITRS geschieht durch die Kombination von Messungen unter Verwendung von GPS (Global Positioning System), SLR (Satellite Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry zu Quasaren) und DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Die Kombination erfolgt aus einem Netz von globalen Referenzstationen, für welche Koordinaten und Geschwindigkeiten (Koordinatenänderungen pro Jahr) inklusive mittlerer Fehler berechnet werden. Mit jeder Realisierung ändern sich die Werte, da neue Modelle und mehr sowie bessere Messungen verwendet werden. Für idente Stationen erhält man daher je nach Realisierung unterschiedliche Werte. Eine signifikante systematische Differenz in Koordinaten und Geschwindigkeiten besteht zwischen ITRF2000 und ITRF2005. Da die Realisierungen von ETRS89 bisher immer von denen des ITRS abgeleitet wurden, sind die Differenzen auch in den Realisierungen ETRF2000 und ETRF2005 vorhanden. Deshalb wird von EUREF<sup>1</sup> bis auf weiteres die Verwendung von ETRF2000 (ETRF2000-Release 05) für eine Neurechnung von ETRS89 Koordinaten empfohlen [3], [4]. Von ETRS89 abgeleitete nationale Realisierungen wurden bis vor wenigen Jahren in Form von Kampagnen, die an die Permanentstationen von IGS (International GNSS Service) und EPN (EUREF Permanent Network) angebunden wurden, durchgeführt [5].

### 3. Realisierung von ETRS89 in Österreich

Die Messungen zur Realisierung von ETRS89 in Österreich reicht bis in die Mitte der 90-er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück und spiegelt auch sehr stark die technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Realisierung von satellitengestützten 3-D Bezugssystemen wider. Wie in Abb. 1 dargestellt, ist die Realisierung von ETRS89 in Österreich ein mehrstufiges Verfahren, welches sich aus den folgenden Hierarchieebenen zusammensetzt:

- *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002*
- APOS Permanentstationen
- AGREF, AREF, TIREF
- Homogenisiertes Festpunktfeld
- APOS – Austrian Positioning Service



1) IGS: International GNSS Service  
 2) IERS: International Earth Rotation Service  
 3) CLASS A: < 1cm, perm. (reproduzierbar)  
 4) CLASS B: ± 1 cm, 3x24 h. (ev. 1x24 h)

Abb.1: Hierarchieschema für die Realisierung von ETRS89 in Österreich

1) Reference Frame Subcommittee for Europe/IAG Commission I

### 3.1 International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002

Im Jahre 2003 wurde der EUREF Subkommission eine Koordinatenlösung für 11 Punkte (10 Permanentstationen und 1 Epochenstation) in Österreich für die GPS-Woche 1176 (Juni 2002) vorgelegt, welche nach den damals gültigen Kriterien eine ETRS89 Koordinatenberechnung beinhaltete. Diese Berechnungen wurden vom BEV gemeinsam mit dem Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien durchgeführt. Die Berechnungen beinhalteten vier Punkte als Ankerpunkte (stabile Permanentstationen der höchsten Hierarchieebene). Diese Lösung wurde als eine dem internationalen Standard entsprechende Realisierung von ETRS89 akzeptiert und ist als Lösung ETRS89 Austria 2002 (exakt: ETRS89/ETRF2000 Austria 2002.45) in der Resolution 1 von EUREF aus 2003 bestätigt worden [6].

### 3.2 APOS Permanentstationen

APOS nutzt derzeit 43 GPS/GNSS Permanentstationen in Österreich (BEV: 32, ÖAW: 3, KELAG: 8) und weitere 33 GPS/GNSS Permanentstationen im grenznahen Ausland. Die APOS Permanentstationen in Österreich dienen zur Realisierung von ETRS89 in Österreich, 8 dieser Stationen waren bereits in der unter Kap. 3.1 angeführten *international akzeptierten Lösung ETRS89 Austria 2002* enthalten. Die restlichen APOS Permanentstationen wurden seit 2003 kontinuierlich in die Lösung ETRS89 Austria 2002 eingerechnet.

### 3.3 AGREF, AREF und TIREF

Seit 1990 wurde durch GPS-Epochenmessungen ein Netz von Festpunkten, welches die Bezeichnung AGREF (Austrian Geodynamic Reference Frame) trägt, realisiert. Durch die spezielle örtliche Auswahl und Monumentierung der Messpunkte sollten einerseits hochgenaue 3-D Referenzpunkte geschaffen, gleichzeitig aber durch Wiederholungsmessungen aktuelle tektonischen Bewegungen untersucht werden [7], [8]. Die ersten Ergebnisse des Gesamtnetzes wurden 1997 gemeinsam von BEV und dem Institut für Weltraumforschung (IWF) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) publiziert [9], [10]. Aus finanziellen Gründen konnte das Konzept einer in regelmäßigen Abständen stattfindenden Übermessung jedoch nicht eingehalten werden.

Im Jahr 1996 wurde von privater Seite die GPS-Kampagne AREF-96 (Austrian Reference Frame) durchgeführt, die ca. 300 Punkte, vor allem Triangulierungspunkte der Landesvermes-

sung und AGREF-Punkte, umfasste. Die vom IWF und der TU Wien/Institut für Geodäsie und Geophysik durchgeführten Koordinatenberechnungen ergaben damals Ergebnisse im System ITRF1994 [11].

Im Jahre 2002 wurden die Ergebnisse von AREF durch das BEV übernommen. In den Jahren 2004-2009 wurde die Qualität der Erstmessung durch Kontrollmessungen geprüft (Messdauer > 24 h), wo erforderlich verbessert, und in den österreichischen Referenzrahmen ETRS89 Austria 2002 eingerechnet. Die bei den Berechnungen erzielte Genauigkeit ist:

$$m_{x,y} < \pm 1,0 \text{ cm,}$$

$$m_h < \pm 2,0 \text{ cm.}$$

Seitens der Tiroler Landesregierung wurden im Jahre 2000 im Rahmen eines Leistungsausgleichs die GPS Messdaten von 35 Punkten an das BEV übergeben, welche die Basis für das TIREF (Tyrolean Reference Frame) bildeten. AGREF, AREF und TIREF stellen die 3. Hierarchiestufe der Realisierung von ETRS89 in Österreich dar.

### 3.4 Homogenisiertes Festpunktfeld

Die im klassischen Festpunktfeld (FPF) enthaltenen Fehler erreichen in Österreich gesamt gesehen ca. 1,5 m, lokal können Maßstabsdefekte von bis zu 3 cm/km auftreten. Zur Behebung dieser Mängel laufen im BEV folgende Arbeiten:

- FP 1.-5.Ordnung: statische GPS Messungen auf FP (fertig),
- FP 1.-5.Ordnung: Neurechnung mit vorhandenen klassischen Messungen,
- FP 6.Ordnung: Übermessung von FP 6. O. (Einschaltpunkte) mittels APOS.

Zunächst werden die seit dem Jahre 1989 an 36.700 Punkten gemessenen 122.000 GPS-Basislinien (mittlere Entfernung 1.8 km) ausgeglichen, wobei die Koordinatenwerte der APOS Permanentstationen, sowie von AGREF, AREF und TIREF datumsbestimmend sind. Die Ergebnisse dieser Ausgleichs legen wiederum das Datum für die nachfolgenden Ausgleichs der terrestrischen Messungen (1,5 Millionen Richtungen, Strecken und Zenitdistanzen) fest. Die Grundlage für alle Berechnungen bildet eine umfangreiche Beobachtungsdatenbank aller Messungen seit dem Jahr 1920. Nachdem für den überwiegenden Teil (65 %) der 60.000 Triangulierungspunkte redundante Messergebnisse aus unterschiedlichen Messepochen vorliegen, können Aussagen über die Stabilität von Punkten und Massenbewe-

gungen (Rutschungen, Senkungen) abgeleitet werden. Im Bereich der Einschaltpunkte findet die Realisierung des ETRS89 bei etwa 120.000 Punkten statt, wobei 25.000 Punkte über gemeinsame Basislinien und die restlichen Punkte mittels APOS-RTK-Messungen bestimmt werden.

Nach Abschluss dieser Arbeiten stehen für alle gültigen FP 1.-6.O. ETRS89 Koordinaten im Bezugsrahmen ETRF89 Austria 2002 zur Verfügung.

**3.5 Echtzeit-Koordinatenbestimmung mittels APOS**

APOS – der Austrian Positioning Service, erfüllt bei der Realisierung von ETRS89 in Österreich zwei Funktionen:

- die APOS-Permanentstationen stellen nach der *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002* die höchste Hierarchieebene in der Realisierung von ETRS89 in Österreich dar,
- das Echtzeit Positionierungsservice APOS liefert dem Nutzer Koordinaten im nationalen ETRF89 Bezugsrahmen in Echtzeit [12].

Diese Doppelfunktion von APOS zeigt dessen große Bedeutung für die Realisierung von ETRS89 in Österreich auf, da nicht nur die Nutzung als Echtzeit-Positionierungsservice ETRS89 Koordinaten liefert, sondern auch alle unter Kap. 3.4 angeführten Arbeiten zur Homogenisierung des Festpunktfeldes auf den ETRS89 Koordinaten der APOS-Permanentstationen aufbauen.

In der Funktion als Echtzeit-Positionierungsservice nutzt APOS derzeit 67 Stationen des Stationsnetzes (siehe Abb. 2).

**4. Festlegung der ETRS89 Koordinaten in Österreich**

Die Festlegung eines nationalen Koordinatenbezugsrahmens orientiert sich heute an internationalen Regeln, welche man auch als top-down-Prinzip bezeichnen kann: ausgehend von den GPS orbits erfolgt die Berechnung im weltweiten ITRF, im nächsten Schritt wird dann in den europäischen Bezugsrahmen ETRF umgerechnet um abschließend in einer nationalen Lösung zu münden: GPS orbits → ITRF → ETRF → nationale Realisierung. Für Zwecke der praktischen Vermessung (z. B. Kataster) sollen die einmal veröffentlichten Koordinaten möglichst lange unverändert erhalten bleiben. Andererseits verlangen Echtzeit-Positionierungsdienste, wie z. B. APOS, die bestmöglichen aktuellsten Koordinaten. Dieser Widerspruch wird sich nie ganz auflösen lassen, ist aber in Österreich mit seinen geringen Koordinatenänderungen aufgrund tektonischer Stabilität zu handhaben.

Wie unter Kap. 3.1 beschrieben, gilt als Grundlage für die Realisierung von ETRS89 in Österreich die *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002*. Zum Zeitpunkt der Bestimmung dieses Bezugsrahmens waren 10 APOS Permanentstationen in Österreich verfügbar, die

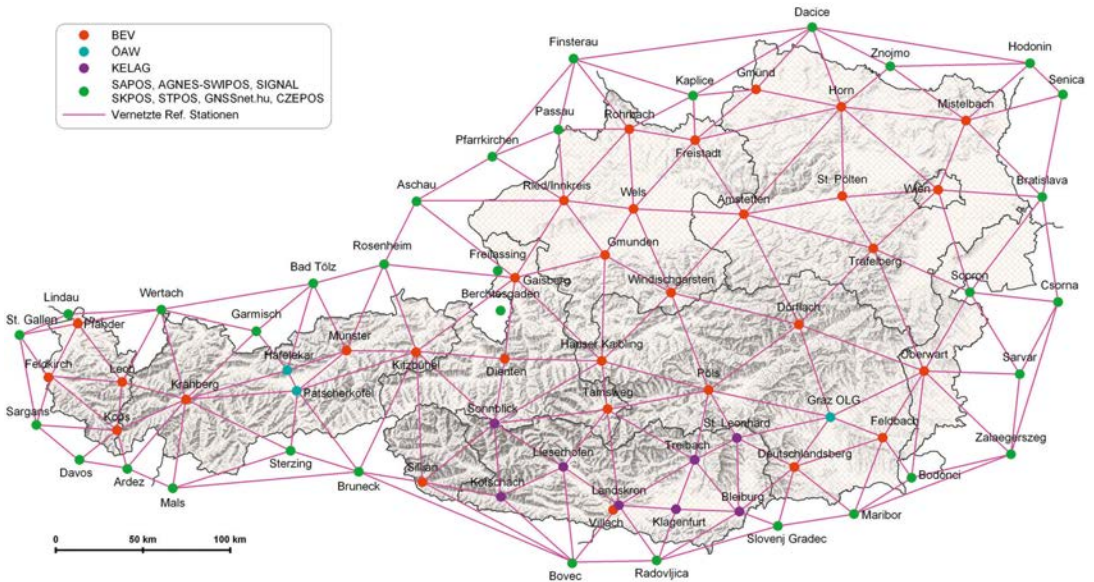


Abb. 2: Permanentstationen und internationale Vernetzung von APOS



weiteren 33 Permanentstationen wurden sukzessive bis einschließlich 2008 aufgebaut und in APOS integriert. D. h., der Prozess der Koordinatenneubestimmung für die 33 Permanentstationen fällt mit dem Koordinatenmonitoring der bereits existierenden Stationen zusammen.

#### 4.1 Berechnungsgrundlagen

Für die Berechnungen von Koordinaten der APOS Permanentstationen werden RINEX-Daten (Intervall 30 sec.) verwendet. Diese Berechnungen erfolgen nach folgenden Grundlagen:

- Internationale Standards wie bei EPN (European Permanent Network),
- Tageslösungen vereint zu Wochenlösungen (GPS week),
- Fixierung der IGS Stationen: GRAZ (A), PENC (H), WTZR (Wetzell/D), ZIMM (Zimmerwald/CH); ergänzt durch STPO (St. Pölten/A),
- jährliche Berechnung von kumulierten Mehrjahreslösungen (Start 2001, jedes neue Jahr wird angehängt).

#### 4.2 Veränderungen mit GPS week 1400

Die mit GPS week 1400 (November 2006) eingeführten neuen Vorgaben für die internationale Bestimmung von 3-D Koordinaten brachten folgende Änderungen mit sich:

- Einführung von absoluten Antennenkalibrierdaten für Satelliten- und Empfängerantennen (statt relativer),
- Referenzrahmen IGS05 (statt ITRF2000),
- Cut off Winkel für Beobachtungen  $3^\circ$  (statt  $10^\circ$ ),
- verbesserte Troposphärenmodelle,
- Einführung von Geschwindigkeitsschätzung bei der Zeitreihenauswertung.

Durch die Einführung der o. a. neuen Regeln für die Koordinatenbestimmung erfahren alle Koordinaten mit der GPS week 1400 einen Sprung, der sich vor allem in der Höhenkomponente auswirkt [13]. Diese Sprünge verfälschen die Geschwindigkeiten, wenn sie nicht eliminiert werden. Vor GPS week 1400 wurden nach den damaligen internationalen Regeln die Sprünge geschätzt und angebracht [14]. In der Zwischenzeit werden kleine Sprünge nach dem Vorbild von ITRF als „discontinuities“ ausgewiesen und nur große ab ca. 10 mm angebracht.

#### 4.3 Endgültige ETRS89 Koordinatenfestlegung

Wie sich in den letzten Jahren gezeigt hat, konvergieren die Koordinatenbestimmungen sehr schnell, je weiter sie sich von dem Zeitpunkt GPS week 1400 entfernen. Deshalb wurde mit der Lösung 2008 (Messdaten aus den Jahre 2001 bis Ende 2008) ein Kompromiss gefunden, der im Bereich der Genauigkeit von 10 mm praktikabel ist. Die in ITRF2000 gerechnete Lösung wurde mithilfe einer Helmert-Transformation auf die identen Punkte GRAZ, PENC, STPO, WTZR, ZIMM der *International akzeptierten Lösung ETRS89 Austria 2002* (vor GPS week 1400) mit gutem Erfolg transformiert. Der mittlere Fehler der Transformation betrug  $\pm 2,5$  mm. Diese Lösung 2008 wurde „eingefroren“, die Koordinaten der APOS-Permanentstationen werden auf unbestimmte Zeit fixiert und die Stationsgeschwindigkeiten als Information ausgewiesen, ohne dass sie verwendet werden. Die Werte der entsprechenden Stationen von ETRS89 Austria 2002 werden durch die Lösung 2008 ersetzt. Die nationale Referenz, ETRS89 realisiert durch ETRF2000 Epoche 2002.45, bleibt unverändert. Wie gezeigt werden kann, ist die Realisierung durch die Lösung 2008 verbessert. Die Lösung 2008 enthält viel mehr Stationen als die von 2002, da der Aufbau von APOS 2008 abgeschlossen war.

Im Vergleich zu den Nachbarstaaten, die alle Realisierungen von ETRS89 aus verschiedenen Jahren verwenden, gilt, dass je zeitlich näher diese Realisierungen sind, desto kleiner sind die Koordinatendifferenzen gemeinsamer Punkte (=Permanentstationen). Trotz der großen Zeitspanne der Realisierungen von ETRS89 in Deutschland (1993) und Italien (2008), betragen die Koordinatendifferenzen maximal 1–2 cm. D.h., die nationalen Realisierungen von ETRS89 sind für grenzüberschreitende Anwendungen nahezu unbeschränkt verwendbar.

#### 4.4 Rechtliche Grundlage für ETRS89

Die Nutzung des ETRF89 Bezugsrahmens für die APOS Permanentstationen wurde im Amtsblatt für Vermessungswesen velautbart [15] und in der Vermessungsverordnung 2010 präzisiert. Gültiges geodätisches Bezugssystem der Landesvermessung bleibt jedoch weiterhin das System des Militärgeographischen Institutes (MGI).

#### 5. Monitoring des Bezugsrahmens ETRF89

Die Realisierung von nationalen Bezugssystemen im System ETRS89 unterliegt, wie in Kap. 3.1 beschrieben, genauen Vorgaben seitens EUREF.

Genauso wichtig wie die Bestimmung international gültiger ETRS89 Koordinaten ist die laufende Kontrolle der einmal festgelegten Koordinaten. Für das Monitoring des österreichischen ETRF89 Bezugsrahmens wurde das Austrian Monitoring Network (AMON) geschaffen (Abb. 3), welches neben allen APOS-Permanentstationen auch öffentlich zugängliche Stationen in Österreich und dem benachbarten Ausland umfasst.

**5.1 AMON – Austrian Monitoring Network**

Die Berechnung von Zeitreihen für AMON ist ein Prozess, welcher, wie in Kap. 4 beschrieben, gemeinsam mit der Berechnung der Stationskoordinaten durchgeführt wird. Diese Zeitreihen für AMON werden mehrmals im Jahr erneuert und liefern Koordinaten (x, y, z) zu einer bestimmten Epoche und die Geschwindigkeiten ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) in ITRF2000. Die Koordinaten werden dann in ETRF2000 transformiert. Die Geschwindigkeiten werden durch Subtraktion der Rotation der Eurasischen Platte in ITRF2000 [16] auf ETRF2000 reduziert. Die Geschwindigkeiten der APOS-Stationen betragen in ETRF2000 nicht einmal 10 % der Werte von ITRF2000. Trotz aller tektonischen Strukturen bewegt sich das österreichische Staatsgebiet fast im Gleichklang mit der Eurasischen Platte. Allerdings bewegen sich die einzelnen Stationen unterschiedlich. In Tab.1 sind die beiden Stationen PFAN (Pfänder bei Bregenz) und WIEN (Wien BEV) exemplarisch angeführt,

deren Geschwindigkeitsschätzungen bereits seit Jahren stabil und kaum mehr von eventuellen Rechen- oder Modellgenauigkeiten beeinflusst sind. Die relative Geschwindigkeit beträgt im Mittel ca. 3 mm pro Jahr. Das bedeutet, dass 2011 die Realisierung von 2008 um einen Zentimeter von der aktuellen abweichen wird, wenn die Koordinaten von 2008 beibehalten werden.

Bezugsrahmen / Geschwindigkeit V	PFAN [mm/Jahr]	WIEN [mm/Jahr]
ITRF2000 $V_x$	-13,4	-17,0
ITRF2000 $V_y$	18,0	16,4
ITRF2000 $V_z$	11,6	9,3
ETRF2000 $V_x$	0,5	-1,2
ETRF2000 $V_y$	-0,2	-1,1
ETRF2000 $V_z$	1,8	0,1
ETRF2000 $V_{North}$	0,9	1,1
ETRF2000 $V_{East}$	-0,3	-0,8
ETRF2000 $V_{Up}$	1,7	-0,9

Tab. 1: Stationsgeschwindigkeiten in ITRF2000 und ETRF2000

Wie die Abb. 3 zeigt, gibt es zwischen Wien und Bregenz einige Stationen, die Abweichungen von mehreren mm pro Jahr gegenüber den Nachbarstationen aufweisen, darunter auch

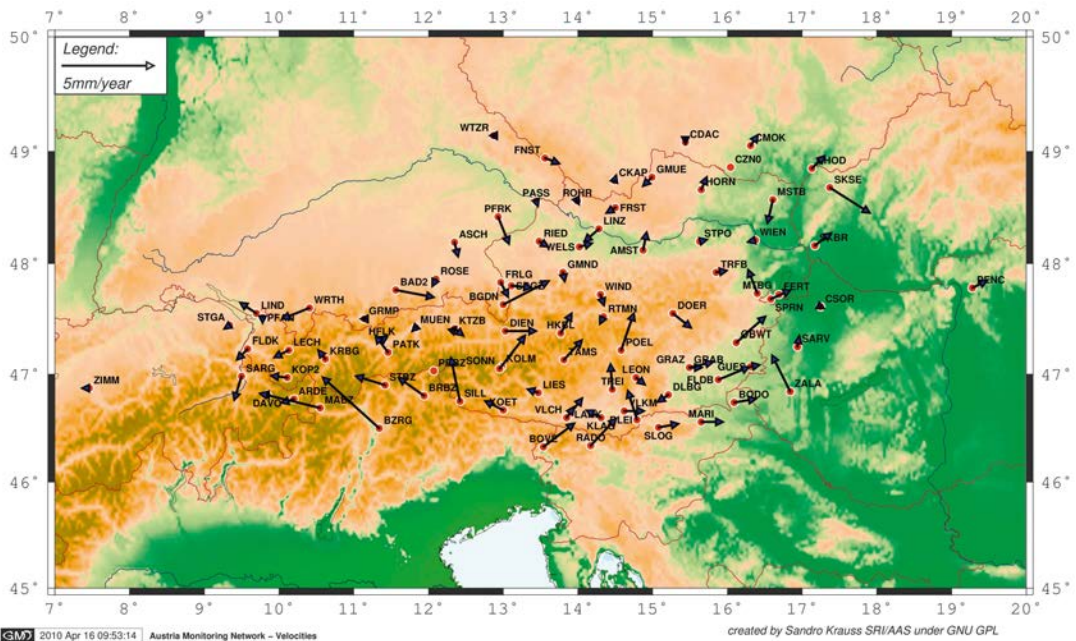


Abb. 3: Horizontale Stationsgeschwindigkeiten in ETRF2000 für das Austria Monitoring Network (AMON) 2009

APOS-Stationen (z.B. SILL, Sillian). Aus den Zeitreihen lässt sich auch herauslesen, dass die Koordinaten von saisonalen Effekten betroffen sind [17]. Ein Paradebeispiel ist das Hafelekar (HFLK), dessen Nordkomponente seit mehr als 10 Jahren saisonal um  $\pm 5$  mm schwankt. In der Höhenkomponente sind saisonale Schwankungen von  $\pm 10$  mm nicht ungewöhnlich, obwohl durch verbesserte Troposphärenmodelle seit GPS week 1400 die Amplitude um 50 % reduziert wurde (z.B. PATK, Patscherkofel). Ein permanentes Monitoring ist deshalb notwendig, um das Verhalten zu beobachten und die Ursachen zu erforschen.

Eine moderne Methode der Beurteilung saisonal variierender Stationskoordinaten ist die Frequenzanalyse. Zunächst berechnet man das so genannte Autospektrum jeder Komponente der Koordinatenzeitreihe. Zeigen sich im Autospektrum deutliche Spitzen bei bestimmten Frequenzen, so kann man diese Information zur Filterung der Zeitreihe heranziehen und dadurch einen wesentlich glatteren Verlauf der Koordinatenzeitreihe erreichen. Diese trendreduzierte Zeitreihe kann dann zur Berechnung verbesserter, mittlerer Koordinaten und Geschwindigkeiten

herangezogen werden. Am Beispiel der Station Hafelekar (Abb. 4, unten) erkennt man in der Nordkomponente einen sehr stark ausgeprägten Autokorrelationskoeffizienten bei einer jährlichen Periode. Durch die Filterung und Trendreduktion kann die saisonale Schwankung von  $\pm 5$  mm auf ca.  $\pm 1,5$  mm reduziert werden (Abb. 4, oben). Es handelt sich bei der Frequenzanalyse um eine rein empirische Methode, die Ursachen derartiger Effekte werden dabei allerdings nicht aufgedeckt und bedürfen tiefergehender Untersuchungen. Vermutet werden können Zusammenhänge der Koordinatenvariationen mit Frost, Grundwassereinflüssen oder auch atmosphärischen Parametern wie inhomogene Schichtungen atmosphärischen Wassers oder Föhnwind. Vielfach haben sich auch die noch immer nicht ausgereiften Troposphärenmodelle der Auswertesoftware als Ursache scheinbarer saisonaler Effekte herausgestellt und weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt, speziell bei der Höhenkomponente.

## 5.2 Echtzeitkoordinatenmonitoring

Typischerweise erfolgt die AMON Auswertung aufgrund der Verfügbarkeit der Precise Orbits des IGS mit einer Verzögerung von mindestens

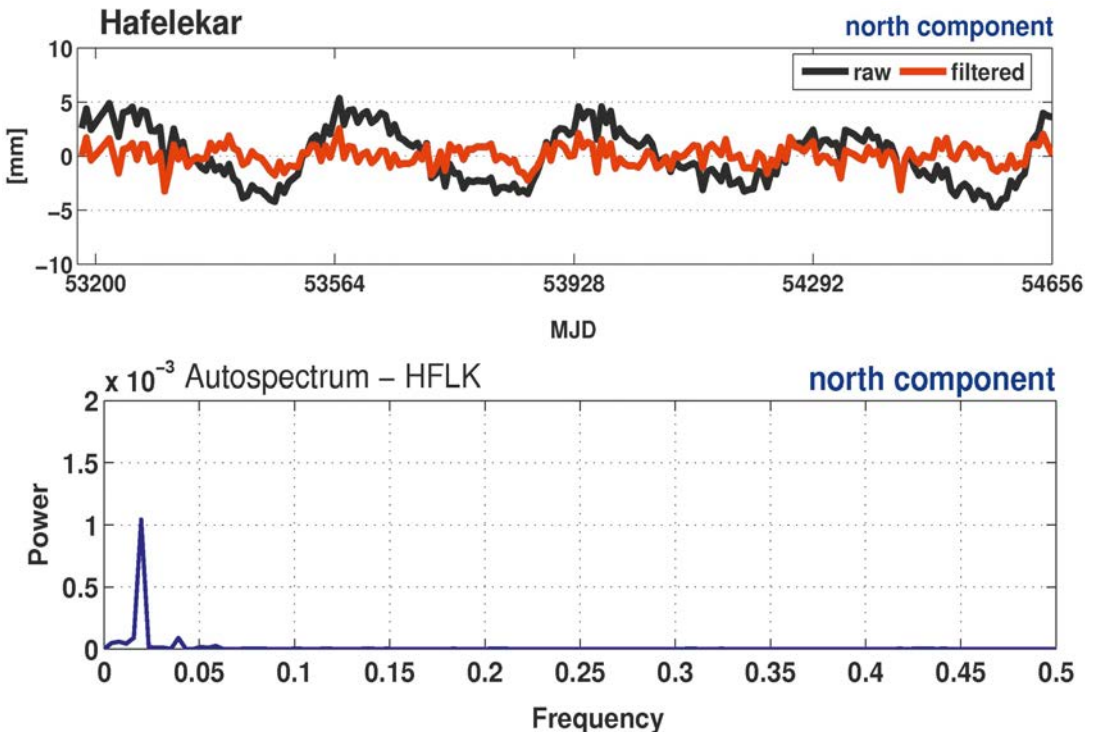


Abb. 4: Hafelekar – Vergleich roher und gefilterter Nordkomponente (oben), sowie Autospektrum (unten). Einheit (Frequency) ist [1/week].

2 Wochen nach der Messdatenaufzeichnung auf Basis von Tagesfiles mit dem Ziel die Langzeitstabilität zu untersuchen. Dieses Verfahren liefert die höchste erreichbare Genauigkeit, hat aber den Nachteil, dass spontane Veränderungen an den Stationen, wie z.B. Beschädigungen der Fundamentierung durch Bauarbeiten, nicht unmittelbar erkannt werden können. Auch schleichende Veränderungen, z.B. durch zunehmende Vereisung der Antennen im Winter werden erst extrem verspätet – 4 Wochen und mehr – erkannt. Für ein Echtzeitsystem wie APOS würde das Nichterkennen von Koordinatenänderungen an den Permanentstationen bedeuten, dass das ETRS89-Referenzsystem nicht mehr in der erforderlichen Genauigkeit realisiert werden kann und die RTK-Nutzer im Bereich der beeinträchtigten Station verschobene Positionen ihrer Messpunkte erhalten würden. Es ist deshalb durch geeignete Monitoringverfahren und Alarmmechanismen sicherzustellen, dass die zugrunde liegenden Permanentstationen stabile Koordinaten besitzen und im Fall von Abweichungen, die einen Alarmlevel übersteigen, Maßnahmen gesetzt werden können.

Das Echtzeitmonitoring gestaltet sich nun zweistufig. Einerseits kontrolliert sich ein typisches Echtzeitsystem mittels spezieller Koordinatenmonitore selber, indem es für alle Stationen laufend ETRF89-Koordinaten aus aktuellen Beobachtungen rechnet und mit den Sollkoordinaten,

die aus der AMON Berechnung stammen, vergleicht. Beim Überschreiten definierter Schranken für Abweichungen wird unmittelbar ein Alarm generiert und ein Operator kann Sofortmaßnahmen setzen. Derartige Selbstkontrollen garantieren einen reibungsfreien Betrieb und sichern die Qualität von APOS als ETRS89-Realisierung im Zentimeterbereich.

### 5.3 Near Realtime Monitoring

Als zweite Stufe der Koordinatenüberwachung hat sich ein Verfahren als sehr gut geeignet herauskristallisiert, welches „Near Realtime Monitoring“ genannt wird. Auf Basis gespeicherter Stundendateien wird jede Stunde eine komplette Netzwerklösung, ähnlich jener der AMON Langzeitauswertung, durchgeführt und das Ergebnis wieder den Sollkoordinaten gegenübergestellt. Diese Methode hat zwei wesentliche Vorteile. Da das Ergebnis sehr rasch vorliegt, kann man im Fall von Veränderungen unmittelbar Maßnahmen setzen. Der Einsatz von zusätzlichen Softwareprodukten, welche von der Echtzeitssoftware (Vernetzungssoftware) unabhängig sind, schützt außerdem vor Softwarebugs. Typischerweise verwendet Postprocessingsoftware auch andere Auswertelgorithmen als Echtzeitssoftware, wodurch sich eine weitere Kontrollmöglichkeit ergibt. Das Near Realtime Monitoring von APOS befindet sich derzeit noch im Stadium eines Prototypen. Erste Ergebnisse zeigen aber bereits, dass ein Erkennen von Koordinatenänderungen

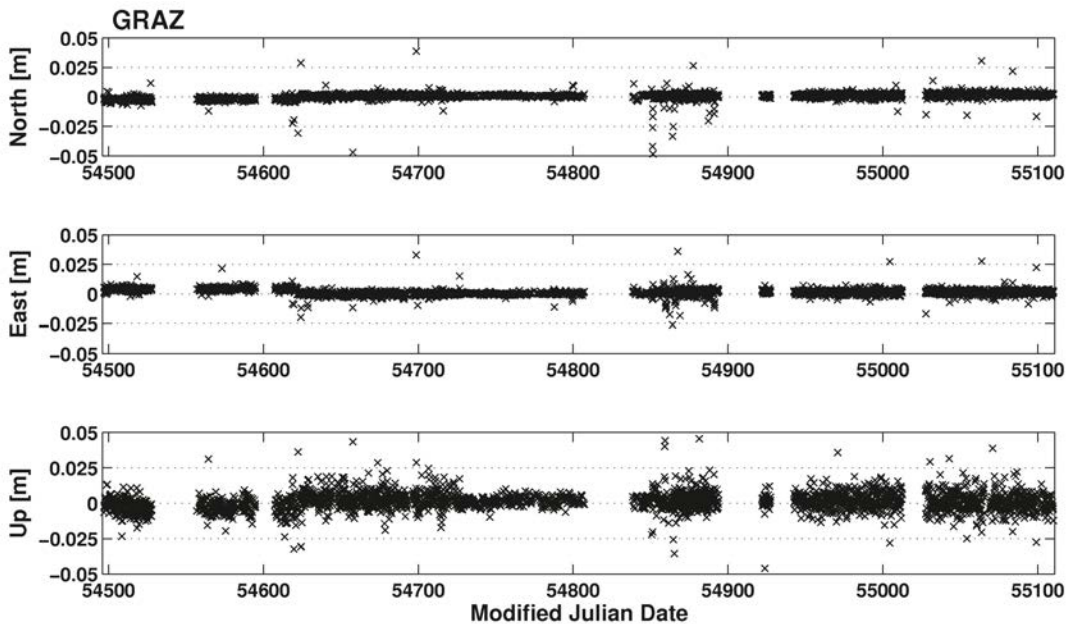


Abb. 5: Near Realtime Monitoring für GRAZ



der Permanentstationen zuverlässig möglich ist. Als problematisch erweisen sich jedoch abrupte Geometrieänderungen an der Permanentstation, wie sie durch das Hinzukommen neuer Satelliten oder das Wegfallen untergehender Satelliten auftreten (Abb. 5). Die dabei festgestellten, scheinbaren, sprunghaften Koordinatenänderungen führen bisweilen zu Fehlalarmen. Nachgeschaltete Filter würden diese Fehlalarme zwar abfangen, bergen aber die Gefahr, echte Koordinatenänderungen zu „verschmieren“ und die Reaktionszeiten zu verlängern. Hier ist ein Kompromiss und geschicktes Finetuning erforderlich, um einerseits Stationsprobleme rechtzeitig zu erkennen aber andererseits nicht zu viele Fehlalarme zu erhalten.

## 6. Nutzung von ETRS89 in INSPIRE

Mit dem Bundesgesetz über eine umweltrelevante Geodateninfrastruktur des Bundes (Geodateninfrastrukturgesetz – GeoDIG) vom 1. März 2010, wurde die Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE) in nationales Recht umgesetzt. Mit dem Aufbau von INSPIRE wird eine internationale Infrastruktur verfügbar gemacht, die auf Ebene aller 27 EU Mitgliedstaaten den Datenaustausch und die Datenbereitstellung für umweltrelevante Daten zum Ziel hat. Damit diese Datenbereitstellung auch entsprechend effizient verwirklicht werden kann, wurden von Seite der EU Vorgaben über die Nutzung einheitlicher Referenzsysteme gemacht. Als einheitliche europäische Bezugssysteme sind die von der EUREF Kommission definierten Referenzsysteme ETRS89 und EVRS (European Vertical Reference System) zu verwenden [18]. Ausnahmen gibt es nur für nicht auf der Eurasischen Platte befindliche Gebiete (z. B. Reunion im Indischen Ozean). Folgende Koordinatentypen und deren Kombination sind vorgesehen:

- 3-dimensional (3-D):  
Räumliche kartesische Koordinaten in ETRS89, geografische Koordinaten in ETRS89 und GRS80 (Breite, Länge, ellipsoidische Höhe),
- 2-dimensional (2-D):  
Geodätische (geografische) Koordinaten in ETRS89 und GRS80 (Breite, Länge), ebene Koordinaten (N, E oder Y, X) abgeleitet aus geografischen Koordinaten unter Verwendung einer Projektion,
- kombinierte Referenzsysteme (2-D und 1-D):  
Höhen aus dem EVRS (physikalisch definierte Höhen) kombiniert mit geografischen oder ebenen Koordinaten.

Ob alle möglichen Kombinationen der oben angeführten Koordinatentypen genutzt werden, oder ob sich so genannte „Favoriten“ herausbilden werden, ist derzeit noch nicht klar.

## 7. Zusammenfassung

Der Aufbau des österreichischen 3-D Bezugsrahmens ETRF89 wurde in den 90-er Jahren des vorigen Jahrhunderts begonnen, und wird seinen Abschluss in einigen Jahren mit der Bereitstellung von ETRS89-Koordinaten für alle Festpunkte 5. und 6. Ordnung erreicht haben. Trotz dieses mehr als zwei Jahrzehnte dauernden Aufbaus wurde ein ausgezeichnetes Ergebnis dadurch erreicht, dass, wie in Kap. 3 beschrieben, streng hierarchisch bei den Berechnungsarbeiten vorgegangen wurde. Die vorhandenen Ergebnisse stellen einen österreichweit homogenen und für den internationalen Datenaustausch bestens geeigneten Bezugsrahmen dar, der allen technischen Anforderungen gerecht wird. Durch das permanente Monitoring von AMON ist auch sicher gestellt, dass auftretende Veränderungen erkannt und gegebenenfalls auch entsprechende Anpassungen einzelner Stationskoordinaten durchgeführt werden können.

Um das Potential, das in den bereits zwei Jahrzehnte umfassenden Messdaten enthalten ist, auch für die Untersuchung tektonischer Veränderungen nutzen zu können, gibt es derzeit international wie auch national Bestrebungen, ein so genanntes „reprocessing“ durchzuführen. D. h., alle vorhandenen Messdaten werden, soweit wie möglich, nach einheitlichen Standards ausgeglichen. Dieses „reprocessing“ wird auch wieder hierarchisch, von der obersten bis zur untersten Ebene durchgeführt werden (GPS-orbits → ITRF → ETRF → AMON → AGREF/AREF), und damit auch eine Basis für die wissenschaftliche Nutzung dieser Daten bieten.

## Referenzen

- [1] [http://itrf.eng.ign.fr/itrs\\_itrf.php](http://itrf.eng.ign.fr/itrs_itrf.php).
- [2] Boucher, C. and Altamimi, Z.: The EUREF Terrestrial Reference System and its first realizations, EUREF Meeting, Bern, Switzerland March 4-6, 1992.
- [3] [ftp://epncb.oma.be/epncb/general/Guidelines\\_for\\_EUREF\\_Densifications.pdf](ftp://epncb.oma.be/epncb/general/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf).
- [4] <ftp://epncb.oma.be/pub/station/coord/EPN/EUREF-DensificationITRF2005.pdf>.
- [5] Höggerl, N., Weber, R., Pesec, P., Stangl, G., Fragner, E.: Realisierung moderner 3-D Referenzsysteme für Wissenschaft und Praxis. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 90. Jg. 2002, Heft 3+4, Wien, ff 92-108, ISSN 0029-9650.



- [6] *Stangl, G., Weber, R., Höggerl, N., Fragner, E.*: EU-REF-Austria 2002, EUREF-Campaign for the introduction of ETRS89 in Austria, International Association of Geodesy / Section I – Positioning; Subcommission for Europe (EUREF), Publication No. 13, Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Toledo, 4 - 7 June 2003.
- [7] *Stangl, G., Hofmann-Wellenhof, B., Pesec, P., Sünkel, H.*: Austrian GPS Reference Network - Concept, Realization, and First Results. XX. IUGG General Assembly, Vienna Aug. 1991.
- [8] *Erker, E., Stangl, G., Pesec, P., Sünkel, H.*: The Austrian Geodynamic Reference Frame - Motivation and Results; IUGG General Assembly, Boulder, July 1995; Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformatik Jg. 84, Heft 3/96, pp. 293-298, 1996.
- [9] *Pesec, P., Erker, E., Sünkel, H., Imrek, E., Stangl, G.*: Das Österreichische Geodynamische Bezugssystem AGREF. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Graz 1997.
- [10] *Stangl G.*: AGREF – 7 Jahre Aufbau eines nationalen Referenzsystems. Kombination verschiedener GPS-Kampagnen zu einem österreichischen nationalen Referenzsystem am Beispiel AGREF. 46. DVW-Seminar „GPS-Praxis und -Trends '97“ 29.9.-1.10. 1997 Frankfurt/Main. DVW Schriftenreihe 35/1999 Stuttgart 1999, 274-280.
- [11] *Ahrer, H., Döllner, H.*: AREF-1 – Das GPS Grundnetz von Österreich als Basis der modernen telematischen Geodäsie. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 85. Jg. 1997, Heft 2, Wien, ISSN 0029-9650.
- [12] *Högerl, N., Titz, H., Zahn, E.*: APOS-Austrian Positioning Service. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 1, Wien, ff 10-23, ISSN 0029-9650.
- [13] *Haslinger, C., Krauss, S., Stangl, G.*: Changes in the OLG GPS time series due to new adjustment models, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 2, Wien, 59-65.
- [14] *Haslinger, C., Krauss, S., Stangl, G.*: The Intra-Plate Velocities of GPS Permanent Stations of the Eastern Alps, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 2, Wien, 66-72.
- [15] *Amtsblatt für Vermessungswesen-AVerm (2003); Herausgeber: BEV-Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*, Jg. 2003, Stück 4, 2788. Verlautbarung.
- [16] *Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P., Feissel-Vernier, M.*: The ITRF 2000. IERS Technical note No. 31, 2004, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- [17] <http://gps.iwf.oeaw.ac.at/> ->GPS -> Reference Stations -> AMON Network.
- [18] [http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data\\_Specifications/INSPIRE\\_Specification\\_CRS\\_v3.0.pdf](http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_Specification_CRS_v3.0.pdf)

#### **Anschrift der Autoren**

**DI Helmut Titz**, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-Mail: [helmut.titz@bev.gv.at](mailto:helmut.titz@bev.gv.at)

**DI Norbert Höggerl**, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-Mail: [norbert.hoeggerl@bev.gv.at](mailto:norbert.hoeggerl@bev.gv.at)

**DI Erich Imrek**, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-mail: [erich.imrek@bev.gv.at](mailto:erich.imrek@bev.gv.at)

**DI Mag. Dr. phil. Günter Stangl**, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, c/o Institut für Weltraumforschung, Schmiedlstraße 6, 8042 Graz. E-Mail: [guenter.stangl@oeaw.ac.at](mailto:guenter.stangl@oeaw.ac.at)

## Kalibrierung eines dreidimensionalen Finite-Differenzen-Modells einer Massenbewegung mithilfe der adaptiven Kalman-Filtertechnik



Thilo Schmalz, Ewald-Hans Tentschert, Alexander Preh, Kurt Mair am Tinkhof, Wien;  
Christian Zangerl, Innsbruck; Andreas Eichhorn, Darmstadt

### Kurzfassung

Massenbewegungen treten insbesondere in gebirgigen Regionen verstärkt auf und stellen häufig eine Gefahr für Mensch und Infrastruktur dar. Für die Untersuchung solcher geodynamischen Prozesse werden heute oftmals numerische Modelle verwendet, die das Verhalten des Untergrundes simulieren. Die Anpassung solcher Modelle an in situ-Messdaten geschieht jedoch häufig durch unsicheres „trial and error“. Einen Genauigkeitsgewinn und die statistische Beurteilung der Modellanpassung verspricht hier die adaptive Kalman-Filtertechnik. Diese erlaubt die optimale Schätzung des Zustands des Systems „Rutschhang“ und kann auch zur Prädiktion des künftigen Hangverhaltens eingesetzt werden. Nachfolgend soll die Entwicklung eines adaptiven Kalman-Filters anhand einer noch simulierten Testböschung erläutert werden. Die Methode der Modellkalibrierung soll später auf das Modell eines realen Untersuchungsobjekts angewendet werden, und zusammen mit den erfassten Monitoringdaten die Grundlage für ein wissensbasiertes Alarmsystem für Massenbewegungen schaffen.

**Schlüsselwörter:** Massenbewegung, Monitoring, numerische Modellierung, Finite-Differenzen-Methode, adaptives Kalman-Filter, Parameterschätzung

### Abstract

Mass movements especially appear in mountainous regions and often cause dangerous situations for men and infrastructure. Today, the analysis of such geodynamic processes is commonly done by numerical modelling to simulate the behaviour of bedrock. The adjustment of such models with measured data is usually done by statistically non assured 'trial and error' methods. Adaptive Kalman-filtering can be used to increase accuracy and enable the statistical evaluation of the adaptation results. The optimal estimation of relevant system quantities and the prediction of the future slope behaviour are possible. The application of an adaptive Kalman filter to a still simulated test slope is described below. The calibration method will be applied to a model of a real slope being the basis for a knowledge-based alarm system for mass movements.

**Keywords:** mass movement, monitoring, numerical modelling, finite-difference methods, adaptive Kalman filter, parameter estimation

### 1. Motivation

Die Untersuchung von Massenbewegungen und die Installation von Frühwarnsystemen zum Schutz von Mensch, Umwelt und Infrastruktur erlangt gerade in Gebirgsregionen eine zunehmende Bedeutung [1]. Im Bereich von Hangrutschungen basieren Frühwarnsysteme derzeit im Wesentlichen auf am Hang erfassten Monitoringdaten (u.a. Tachymetermessungen, GPS, Extensometer, etc.). Defizite liegen bspw. in der Assoziation zwischen gemessenen Ereignissen und theoretischen Modellrechnungen bzw. im Verständnis der zugrunde liegenden Versagensmechanismen.

Im Rahmen des FWF-Projektes KASIP (Knowledge-based Alarm System with Identified Deformation Predictor) [2] soll eine verbesserte Interpretation der Monitoringdaten durch eine Verknüpfung mit möglichen ursächlichen Versagensmechanismen erreicht und damit letztendlich eine zuverlässigere Alarmierung ermöglicht werden. Hierzu wird zunächst ein numerisches Modell des Rutschhanges entwickelt, das den inneren Aufbau der Massenbewegung möglichst realitätsnah abbildet. Das Modell stellt die Grundlage für die Prädiktion und die Erklärung von Versagensereignissen des Hanges dar. Durch die Kombination der numerischen Berechnungsergebnisse mit empirischen Monitoringdaten wird

eine Verbesserung der modellimmanenten Parameter (z.B. Festigkeiten) im Sinne einer least squares-Schätzung (Modellkalibrierung) angestrebt und die statistische Beurteilung der Berechnungsergebnisse ermöglicht.

Mit der Weiterverarbeitung von theoretischen Berechnungen im kalibrierten Modell und der in situ erfassten Messdaten in einem wissenschaftlichen Alarmsystem soll dann eine Steigerung der Zuverlässigkeit bei der Warnung bzw. Alarmierung von Rutschungen erzielt werden (Abbildung 1).

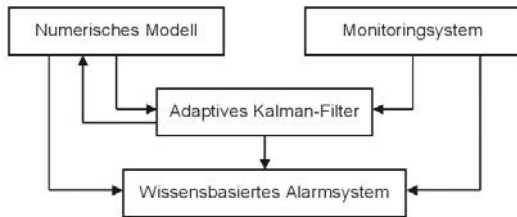


Abb. 1: Komponenten im Projekt KASIP

Die Modellierung der Massenbewegung erfolgt mithilfe des Programms  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  der Firma Itasca [3], welches auf der Finite-Differenzen-Methode [4] beruht (s.a. Kapitel 3.1) und die Berechnung dreidimensionaler Kontinuumsmodelle ermöglicht. Die bisher übliche Anpassung des numerischen Modells an die Messdaten durch die „trial and error“-Methode [5] soll durch Anwendung der adaptiven Kalman-Filtertechnik verbessert werden. Das so verbesserte Modell kann dann zur Prädiktion bzw. realitätsnahen Simulation künftiger Hangzustände eingesetzt werden.

## 2. Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsobjekt im Projekt KASIP dient die Massenbewegung „Steinlehnen“ bei Gries

im Sellrain, Nordtirol, Österreich (Abbildung 2a). Der stark zerlegte Untergrund besteht im Wesentlichen aus Paragneisen, Amphiboliten und Granodioritgneisen. Im oberen Teil der Böschung beträgt der Neigungswinkel ca.  $43^\circ$ , im unteren Teil ca.  $31^\circ$ .

Die Mächtigkeit der Rutschmasse beträgt 10 bis 20 m im hochaktiven Bereich (Abbildung 2b), die absolute Mächtigkeit liegt bei bis zu 100 m. Ausgelöst durch zahlreiche Felsstürze an der übersteilten Stirne der Massenbewegung bewegte sich der hochaktive Bereich im Juni 2003 ca. 20 m talwärts. Aufgrund der Gefährdung der nahegelegenen Siedlung wurde ein Monitoring-System installiert. Hierbei handelte es sich zunächst um einen terrestrischen Laserscanner, welcher nach Abnahme der Felssturzerreignisse durch ein Tachymeter (Station am Gegenhang) mit im Rutschhang angebrachten Reflektoren ersetzt wurde. Die Beobachtung der Reflektoren erfolgte bislang in unregelmäßigen Zeitschritten (Messrate  $\Delta t = 1$  Monat bis zu 1 Jahr). Die aktuelle Bewegungsrate des Hanges liegt bei ca. 25 cm pro Jahr [6]. Die Beträge der Verschiebungsvektoren für 19 Hangpunkte sind in Abbildung 3 dargestellt.

## 3. Vereinfachtes numerisches Böschungsmodell

Derzeit erfolgt in KASIP die Generierung eines dreidimensionalen numerischen Modells des Steinlehnen [7]. Die Modellkalibrierung soll dann unter Ausnutzung der am Hang verfügbaren Monitoringdaten (Abbildung 3) im adaptiven Kalman-Filter erfolgen. Die Festlegung der Modellgeometrie erfolgt auf der Grundlage von im Jahr 2003 durchgeführten Laserscannerbefliegungen. Die initiale Parametrisierung des Modells und die Identifikation von Homogenbereichen (von Mate-

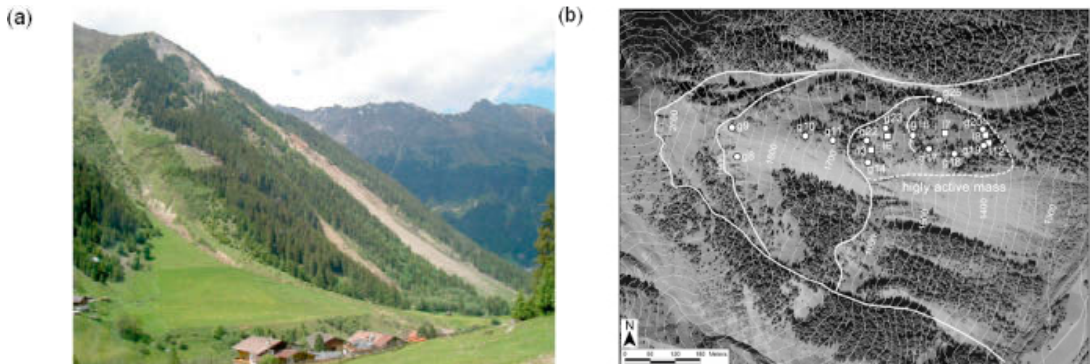


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Steinlehnen. (a) Blick von Süden. (b) Orthofoto mit Positionen der Laserscannerfenster (l) und Reflektoren (g) [6].

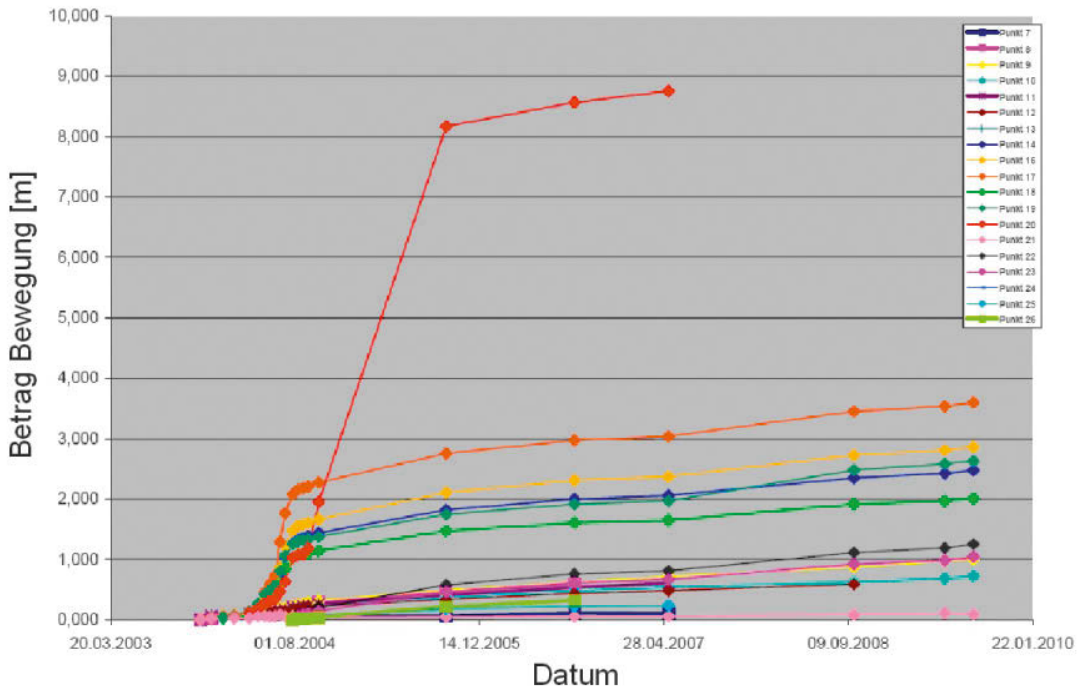


Abb. 3: Betrag der Punktverschiebungen seit Juni 2003 (Quelle: alpS GmbH)

rialparametern) erfolgt zunächst auf der Grundlage von geologischen Kartierungen. Die Daten werden vom Projektpartner „alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH“ (Innsbruck, Österreich) zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden werden die im Projekt verwendete Modellierungsmethode und die grundsätzliche Strategie der Modellkalibrierung mittels adaptiver Kalman-Filterung zunächst anhand von Simulationsrechnungen bei einer vereinfachten homogenen Modellböschung vorgestellt.

### 3.1 Die Finite-Differenzen-Methode

Da eine Lösung großer nichtlinearer Gleichungssysteme analytisch zumeist nicht möglich ist, werden hierfür numerische Verfahren verwendet. Eines dieser Verfahren ist die Methode der Finiten Differenzen, welche zur Lösung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen eingesetzt werden kann. Hierbei werden die Ableitungen der zu lösenden Gleichungen in dem zu untersuchenden Gebiet mittels Taylor-Entwicklung durch Differenzgleichungen ersetzt. Das Gebiet wird hierfür durch ein Gitter diskretisiert [4].

Auf der Finite-Differenzen-Methode basiert auch das Programm  $FLAC^{3D}$  (Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions) der Firma „Itasca Consulting Group, Inc.“, welches zur

Erzeugung des numerischen Modells des Steinlehnen verwendet wird. Dieses erlaubt die Berechnung dreidimensionaler Kontinuumsmodelle unter Anwendung unterschiedlicher elastischer und plastischer Materialmodelle.

Der Zustand eines Gitterpunktes wird dabei nur vom Zustand der Feldvariablen seiner Nachbarzonen beeinflusst, der Zustand einer Zone nur vom Zustand ihrer Randpunkte. Ausgehend von den Bewegungsgleichungen werden dann aus Spannungen und Kräften neue Geschwindigkeiten und Verschiebungen berechnet. Die Geschwindigkeiten der Gitterpunkte liefern die Dehnungsgeschwindigkeiten der einzelnen Zonen. Dadurch ergeben sich neue Spannungsverhältnisse. Auf diese Weise werden die auf das Gesamtsystem wirkenden Kräfte und Spannungen ausgeglichen. Die Berechnungen brechen ab, wenn die unausgeglichene Kraft unter ein vorgegebenes Minimum gefallen ist oder die Anzahl der vorgegebenen Berechnungsschritte erreicht ist [8].

### 3.2 Das Böschungsmodell

Das Böschungsmodell hat eine Höhe von insgesamt 40 m (15 m Sockelhöhe und 25 m eigentliche Böschungshöhe), eine Breite von 40 m und eine Tiefe von 70 m. Es ist mit 1607 Gitterpunkten diskretisiert und weist damit eine verhältnismäßig

große Maschenweite auf (Abbildung 4), was aber aus Gründen einer begrenzten Rechenzeit in der Testphase zunächst als sinnvoll angesehen wird.

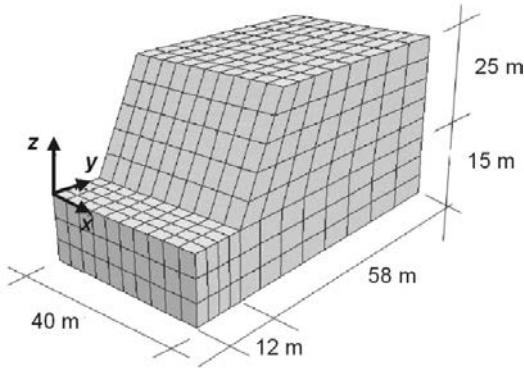


Abb. 4: Böschungsgeometrie des  $FLAC^{3D}$ -Modells

An den Modellrändern müssen Randbedingungen definiert werden. Diese werden so gewählt, dass die Bewegungen der  $xy$ -Ebene bei  $z = -15$  m in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, der  $yz$ -Ebenen bei  $x = 0$  m und  $x = 40$  m in  $x$ -Richtung und der  $xz$ -Ebenen bei  $y = 0$  m und  $y = 70$  m in  $y$ -Richtung gesperrt sind.

Im vereinfachten Böschungsmodell wird mit einem homogenen, mohr-coulombschen Materialmodell gearbeitet (nach [8], verändert). Neben der Dichte  $\rho$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Querkontraktionszahl  $\nu$  werden der Böschung zwei Festigkeitsparameter (ein Reibungswinkel  $\varphi$  und eine Kohäsion  $c$ ) zugeordnet. Die Festigkeiten legen das zeitliche (Deformations-) Verhalten der Böschung maßgeblich fest. Unterschreiten sie bestimmte Grenzwerte, kommt es zum Versagen. Sie sind damit die wesentlichen Zielgrößen der Modellkalibrierung.

#### 4. Ansatz zur Kalibrierung des Böschungsmodells

Das numerische Modell einer Massenbewegung wird zunächst mithilfe der verfügbaren geologischen und topografischen Vorinformationen aufgebaut und repräsentiert damit einen bestimmten Zustand in der Vergangenheit. Um nun beispielsweise aktuelle Verschiebungsraten von Oberflächenpunkten (z.B. prozessierte Ergebnisse aus Tachymetermessungen) abbilden zu können, muss das Modell entsprechend an die aktuelle Situation angepasst werden. Üblicherweise geschieht dies durch die Variation von Materialparametern (i. a. der Festigkeitsparameter Reibungswinkel  $\varphi$  und Kohäsion  $c$ ), hier zumeist allerdings als reines „trial and error“-Verfahren.

Die o.g. Vorgehensweise der Anpassung des numerischen Modells an die Messdaten soll durch eine echte Modellkalibrierung im adaptiven Kalman-Filter verbessert werden. Die adaptive Kalman-Filterung ermöglicht die optimale Schätzung des aktuellen Zustands der Massenbewegung, welcher sowohl durch die Kinematik (Lage, und ggf. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Gitterpunkte) als auch durch die modellimmanenten Materialparameter (adaptiver Anteil) repräsentiert wird (u. a. [9] und [10]).

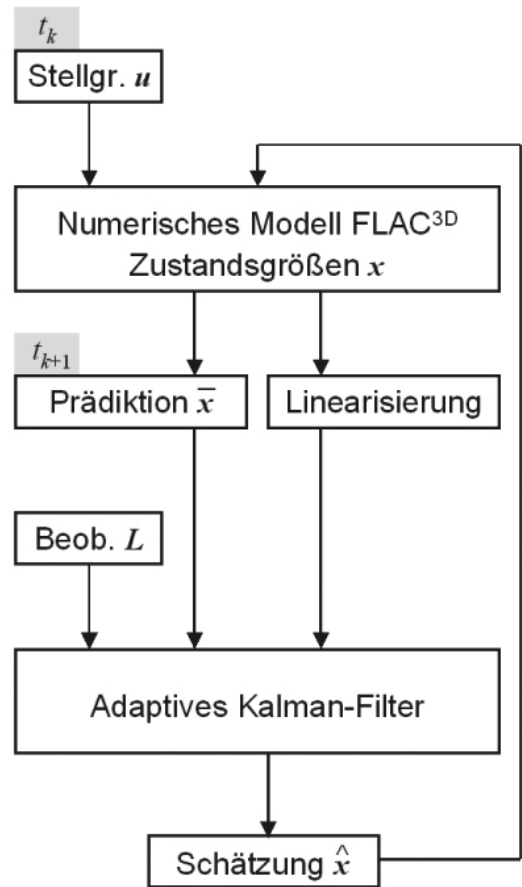


Abb. 5: Prinzip des Filterverlaufs

Das Prinzip des Filterverlaufs ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Zustandsvektor  $x$  umfasst sowohl einen kinematischen Anteil  $x_{kin}$  (Positionen und ggf. Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen der Gitterpunkte) als auch einen adaptiven Anteil  $x_p$ , in welchem die Festigkeitsparameter  $\varphi$  und  $c$  aufgenommen werden können.

Die Prädiktion des Zustandsvektors von einer Filterepoche  $t_k$  nach  $t_{k+1}$  wird direkt mit dem



nichtlinearen FLAC<sup>3D</sup>-Modell berechnet, wobei externe Einflussgrößen als Stellgrößen  $u$  berücksichtigt werden.

Für die im Kalman-Filter erforderliche Varianzfortpflanzung (Bestimmung der Kovarianzmatrix der Prädiktion) muss das FLAC<sup>3D</sup>-Modell linearisiert werden. Dies erfolgt durch numerisches Differenzieren nach den Zustands- und Stellgrößen, was einen außer-ordentlich rechenintensiven Vorgang darstellt (bereits mehrere Stunden im vereinfachten Böschungsmodell).

Unter Ausnutzung der Messdaten  $L$  wird dann der aktuelle Zustandsvektor zur Epoche  $t_{k+1}$  geschätzt. Der adaptive Teil des Zustandsvektors enthält gerade die Schätzwerte für die anzupassenden Festigkeitsparameter.

### 5. Optimale Schätzung des Festigkeitsparameters $c$ im statischen Modell

Im Rahmen der Untersuchungen im vereinfachten Böschungsmodell soll gezeigt werden, dass die Schätzung von a priori unzureichend bekannten Festigkeitsparametern im adaptiven Kalman-Filter möglich ist. Im vorliegenden Ex-

periment wird das Böschungsmodell zunächst als statisches System betrachtet (u.a. [11]), d.h. das Deformationsverhalten wird als Folge von statischen Gleichgewichtslagen simuliert. Als Stellgröße  $u$  wird dabei eine zeitliche Variation des Reibungswinkels  $\varphi$  der Böschung vorgegeben. Die Kohäsion  $c$  wird als zu identifizierende Größe über mehrere Epochen im Filter geschätzt.

Die Simulation von Messdaten  $L$  erfolgt unter Vorgabe eines festen Sollwertes  $c_{\text{Soll}}$  für die Kohäsion. Im FLAC<sup>3D</sup>-Modell werden die räumlichen Positionen  $(x_i, y_i, z_i)$  der  $i = 1 - 1607$  Gitterpunkte für  $k = 0 - 4$  Epochen berechnet und anschließend in das Kalman-Filter eingeführt.

Der Verlauf der Schätzwerte für die Kohäsion ist in Abbildung 6 für verschiedene Startwerte  $c_0$  dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Schätzwerte unabhängig vom Startwert generell gegen den Sollwert konvergieren. In fünf von den sechs dargestellten Fällen liegen die verbleibenden Restabweichungen bereits nach vier Filterepochen in einem Bereich von  $< 0,5 \%$  des Sollwertes, wo-

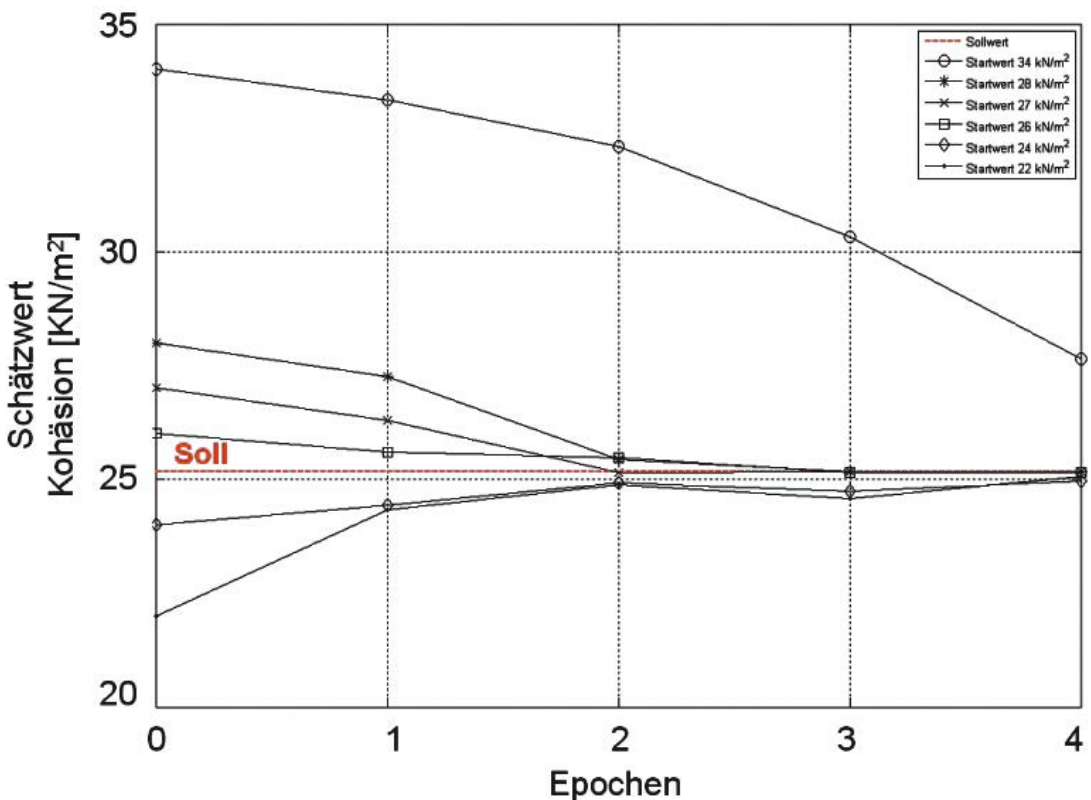


Abb. 6: Verlauf der Schätzwerte für die Kohäsion

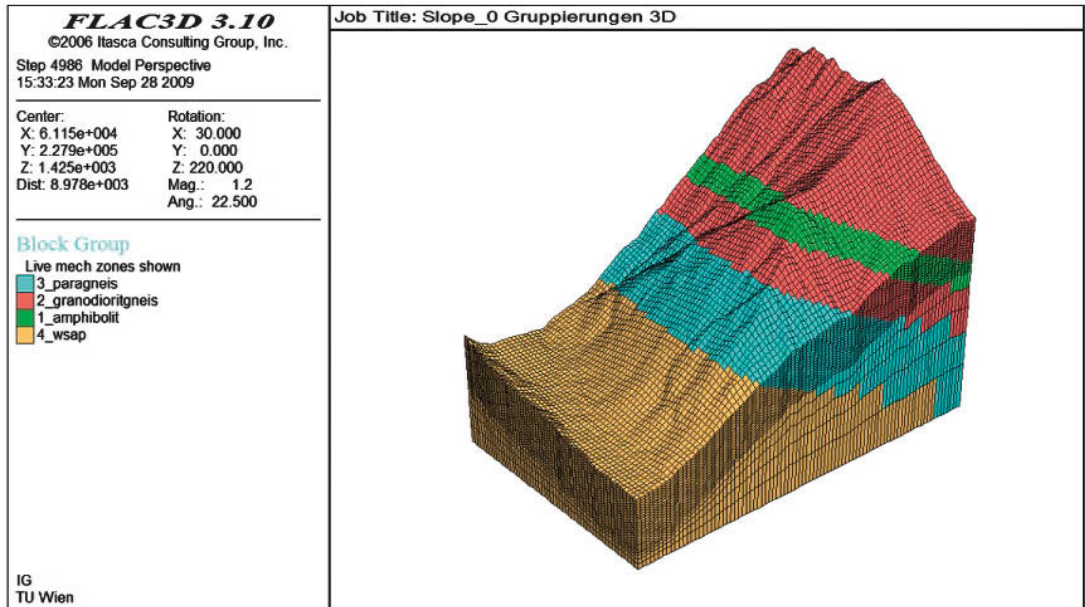


Abb. 7:  $FLAC^{3D}$ -Modell des Hanges „Steinlehnen“, Gries im Sellrain, Nordtirol, Österreich. Das Modell wurde anhand von Laserscannerdaten und geologischen Kartierungen (alpS GmbH) erzeugt und zeigt die geologischen Homogenbereiche.

durch eine präzise Schätzung erzielt wird. Es kann also ausgesagt werden, dass mit der adaptiven Kalman-Filterung ein adäquates Werkzeug zur Schätzung von Festigkeiten im numerischen Modell einer Massenbewegung vorliegt.

## 6. Ausblick

Das numerische Modell der Massenbewegung „Steinlehnen“ wird aus ca. 100.000 Gitterpunkten bestehen (Abbildung 7) und soll ebenfalls mit der Methode der adaptiven Kalman-Filterung kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt dann nicht im statischen, sondern im dynamischen System. In diesem Fall müssen sowohl die Zeit als auch die am Modell angreifenden Kräfte berücksichtigt werden [11]. Grundlegende Untersuchungen zur Kalibrierung eines  $FLAC^{3D}$ -Modells mithilfe der adaptiven Kalman-Filterung im dynamischen System finden sich in [12].

## Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung bedanken wir uns beim Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF), Projektnummer: P20137.

Für die Bereitstellung der Monitoringdaten bedanken wir uns bei der „alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH“ (Innsbruck) und für die Durchführung der Tachymetermessungen bei Herrn Verm.-Ass. Dipl.-Ing. Volker Buhl (TU Darmstadt).

Weitere Informationen zum Projekt KASIP:  
<http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip>

## Referenzen

- [1] *United Nations University (2006)*: Land-slides, United Nations University, January 18, 2006, R/E01/06/rev1, <http://www.ehs.unu.edu/file.php?id=81>, letzter Zugriff 11/ 2009.
- [2] *Kasip (2010)*: Projektthomepage, [http:// info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip), letzter Zugriff 02/2010.
- [3] *Itasca (2006)*: Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions. Version 3.1. Manual.
- [4] *Smith, G. D. (1985)*: Numerical solution of Partial Differential Equations – Finite Difference Methods. Oxford University Press.
- [5] *Meier, J., Schaedler, W., Borgatti, L., Corsini, A., Schanz, T. (2008)*: Inverse Parameter Identification Technique Using PSO Algorithm Applied to Geotechnical Modeling. In: Journal of Artificial Evolution and Applications, Volume 2008, Article ID 574613.
- [6] *Zangerl, C., Eberhardt, E., Schönlaub, H., Anegg, J., (2007)*: Deformation behaviour of deep-seated rock-slides in crystalline rock. Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands – Eberhardt, Stead & Morrison (eds.), Taylor Francis Group, London ISBN 978-0-415-44401-9, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 Mai, 901-907
- [7] *Mair am Tinkhof, K., Preh, A., Tentschert, E.-H., Eichhorn, A., Schmalz, T., Zangerl, C. (2009)*: KASIP – Knowledge-based Alarm System with Identified Deformation Predictor. Posterbeitrag. 58. Geomechanik Kolloquium / Franz-Pacher-Kolloquium. Salzburg, [http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/ kasip/publications.html](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip/publications.html).

- [8] *Roth, W. (1999)*: Entwicklung von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuums-mechanischen Finite-Differenzen-Codes FLAC. Diplomarbeit. Institut für Ingenieurgeologie. TU Wien.
- [9] *Brammer, K., & Siffling, G. (1989)*: Kalman-Bucy-Filter: deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. R. Oldenbourg Verlag, München Wien.
- [10] *Eichhorn, A. (2005)*: Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung. Dissertation. Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen. Universität Stuttgart.
- [11] *Isermann, R. (1988)*: Identifikation dynamischer Systeme. Band 1: Frequenzgangmessung, Fourieranalyse, Korrelationsanalyse, Einführung in die Parameterschätzung. Springer-Verlag.
- [12] *Schmalz, T., Eichhorn A., Mair Am Tinkhof, K., Preh, A., Tentschert, E., Zangerl C. (2010)*: Untersuchungen zur Implementierung eines adaptiven Kalman-Filters bei der Modellierung instabiler Talflanken mittels des Finite-Differenzen-Codes FLAC<sup>3D</sup>, Ingenieurvermessung 2010 – T. Wunderlich (Hrsg.). München. 23.-27. Februar 2010. München: Wichmann.

#### **Anschrift der Autoren**

**Dipl.-Geophys. Thilo Schmalz**, Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien  
E-Mail: schmalz@tuwien.ac.at

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn**, Geodätisches Institut, Forschungsgruppe Messsysteme und Sensorik, Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 13, D-64287 Darmstadt, Deutschland  
E-Mail: eichhorn@geod.tu-darmstadt.de

**Prof. Dr. Ewald-Hans Tentschert**, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien  
E-Mail: Ewald-Hans.Tentschert@tuwien.ac.at

**Dr. techn. Alexander Preh**, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien  
E-Mail: Alexander.Preh@tuwien.ac.at

**Dipl.-Ing. Kurt Mair am Tinkhof**, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien  
E-Mail: kurt.mairamtinkhof@tuwien.ac.at

**Dr. Christian Zangerl**, alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement GmbH, Grabenweg 3, A-6020 Innsbruck  
E-Mail: Zangerl@alps-gmbh.com



## GIS Modellierung alpiner Kulturlandschaften

Rainer Prüller, Mathias Schardt, Graz

### Kurzfassung

Durch die Analyse von historischen Bild- und Fotoquellen lässt sich feststellen, dass alpine Kulturlandschaften einem stetigen Wandel unterliegen. Diese Kulturlandschaftsdynamik lässt sich so aber nur qualitativ beschreiben, um quantitative Aussagen über Veränderungen treffen zu können kann man auf Methoden der Fernerkundung und Geoinformatik zurückgreifen. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde auf Basis von Luftaufnahmen beginnend mit dem Jahr 1954 in 11 alpinen Untersuchungsgebieten mit einer Größe von  $1 \times 1 \text{ km}^2$  bzw.  $2 \times 2 \text{ km}^2$  eine Zeitreihenanalyse der Landbedeckung durchgeführt. Es wurden dabei je nach Verfügbarkeit der Luftaufnahmen für jedes Testgebiet manuell aus den Referenzjahren 1954, 1962-67, 1975-78, 1983, 1992-97, 2002 und 2006 Kartierungen durchgeführt, bei denen die Landbedeckungsklassen Wald, Freifläche, Siedlung, Gewässer und Ödland berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse wurden auf mehreren Ebenen mit Hilfe von GIS-basierten Methoden analysiert, um dadurch Rückschlüsse auf die Triebkräfte, die für diese Entwicklungen verantwortlich sind zu finden. Als Ergebnis liegt ein Modell vor, das die Entwicklung alpiner Kulturlandschaften beschreibt. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse sollen mögliche Zukunftsszenarien der Struktur alpiner Kulturlandschaften entworfen werden.

**Schlüsselwörter:** GIS, Fernerkundung, Kulturlandschaft, Landschaftsmodellierung, Landschaftsdynamik, Zelluläre Automaten, Zeitreihenanalyse, Landschaftsentwicklung, Markov Ketten

### Abstract

Historical pictures and photos describe the consistent change of alpine cultural landscapes. With these data sources only a qualitative change can be described, for quantitative predications remote sensing methods in combination with GIS analysis can be applied. Within this research a time series of land cover maps based on aerial images starting from the year 1954 have been implemented in eleven test sites with an area of  $1 \times 1 \text{ km}^2$  resp.  $2 \times 2 \text{ km}^2$ . Depending on the availability of aerial images, land cover maps for the reference years 1954, 1962-67, 1975-78, 1983, 1992-97, 2002 and 2006 with five land cover classes forest, open land (meadow and pasture), settlement, water and wasteland were processed. The mapping results were analyzed by GIS techniques to get an idea of the driving forces behind the dynamics and to create a model of alpine cultural landscapes. Based on the outcome of this research, possible future scenarios for the development of alpine landscapes will be created.

**Keywords:** GIS, remote sensing, landscape modelling, LUCC, Cellular Automata, Markov chains

## 1. Motivation und Ziel

### 1.1 Fernerkundungsdaten zur Beschreibung der Kulturlandschaftsgeschichte

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die Erarbeitung von Modellen, die die Entwicklung und Dynamik von alpinen Kulturlandschaften seit den 1950er Jahren beschreiben.

Wesentliche Grundlagen dafür sind Fernerkundungsdaten mit einer entsprechend hohen zeitlichen Auflösung, um aus den daraus abgeleiteten Landbedeckungskartierungen Trends erkennen und modellieren zu können. Die Untersuchungen sollen einerseits dazu beitragen, die Entwicklung alpiner Kulturlandschaften zu verstehen, andererseits sollen die daraus abgeleiteten Prognosen als Entscheidungshilfen für regionalpolitische Maßnahmen verwendet werden können. Eine Vielzahl von sozioökonomischen Triebkräften

beeinflusst die Dynamik von Kulturlandschaften, die vielfach kleinräumig und mit entsprechender Auflösung nicht verfügbar sind und demnach auch nicht adäquat abgebildet werden können. Hier angemerkt seien öffentliche Fördergelder, land- und forstwirtschaftliche Produkt- und Produktionskosten oder Einkommensverhältnisse als ökonomische Treiber, Verteilung der Alterspyramide, Entwicklung der Bevölkerungszahlen als Beispiel für soziologische Triebkräfte. Mit der Entwicklung von Kulturlandschaftmodellen, die auf Grundlage von topographischen Parametern (Hangneigung, Seehöhe, Exposition) und Distanzfunktionen (Entfernung zum Gemeindehauptort oder zur nächstgelegenen Straße) wird versucht, die oben genannten Triebkräfte zusammenzufassen und so zu einer profunden Aussage über Entwicklungen der Landschaftszusammensetzung treffen zu können.



Abb. 1: Vereinheitlichung der Kulturlandschaft, Rauriser Haupttal 1910 und 2007

## 1.2 Auswirkungen von Veränderungen der Kulturlandschaft

Veränderungen der Zusammensetzung einer Kulturlandschaft wirken sich auf mehrere Bereiche aus, die sich gegenseitig beeinflussen können. Als Beispiel kann hier die Vereinheitlichung des Kulturlandschaftsbildes erwähnt werden, die sich unter anderem auf das Vorkommen von Wildtieren auswirkt. Vor allem durch das Verschwinden von natürlichen Hecken und Gebüschzeilen wird den Tieren der Sichtschutz genommen, die diese Flächen in weiterer Folge als Lebensraum meiden. Durch Verschwinden von diesen kleinstrukturierten Landschaftselementen nimmt auch die Attraktivität des Landschaftsbildes ab. Die Attraktivität eines Kulturlandschaftsraumes ist aber vor allem in den Alpen ein sehr wichtiger touristischer Standortfaktor, ein extensiv landwirtschaftlich genutzter Lebensraum übt eine Anziehungskraft auf Erholungssuchende aus. Kann eine Region durch ihre landschaftlichen Reize touristische Einnahmequellen erschließen, können durch diesen Kapitalzufluss die bürgerlichen Strukturen gestützt werden, die sich im Wesentlichen für die Pflege der Landschaft verantwortlich zeigen. Eine Vereinheitlichung des alpinen Landschaftsbildes ist am Beispiel des Hauptortes von Rauris dokumentiert (Abbildung 1).

Auf dem linken Foto ist der Talboden mit dem Hauptort im Jahr 1910 zu sehen, rechts der gleiche Ausschnitt im Jahr 2007. Es ist darin zu erkennen, dass die kleinstrukturierten Flächen, getrennt durch Gebüschzeilen und natürliche Hecken, weitgehend verschwunden sind und sich der Siedlungskern auf Kosten der umgebenden Acker- und Grünlandflächen ausgebreitet hat. Auch sind 2007 keine Ackerflächen mehr vorhanden, deren Rückgang hauptsächlich durch die vollständige Mechanisierung in der Landwirtschaft zu erklären ist. Das Pferd als wichtigstes Zugmittel wurde ab den 1950er Jahren von Traktoren und anderem landwirtschaftlichen Gerät verdrängt, demnach waren auch keine Getreideäcker für die Versorgung der Pferde mehr notwendig. Durch das Voranschreiten der Arbeitsteilung und der zunehmenden Produktivität in der Landwirtschaft fiel auch der Bedarf für die Eigenversorgung mit Gemüse und Getreide beginnend in den 1950er Jahren weg [1]. Diese Entwicklungen hatten und haben die Vereinheitlichung der Kulturlandschaft zur Folge, mit der u.a. der Verlust der Biodiversität einhergeht, wie zahlreiche Untersuchungen aus dem Alpenraum in Österreich [2] und der Schweiz [3] zeigen. Abbildung 2 versucht diesen Zusammenhang schematisch zu illustrieren. Bei der in der linken Abbildung dargestellten Situation tritt aufgrund

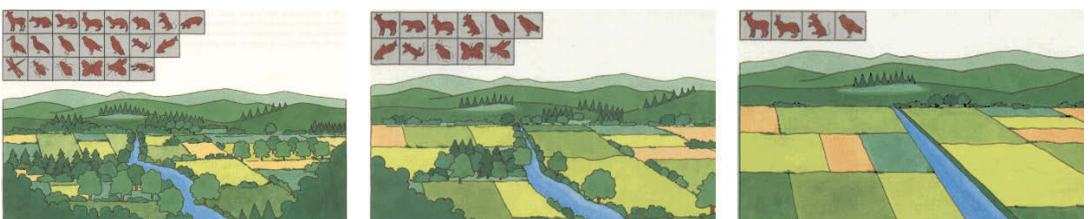


Abb. 2: Verlust der Biodiversität (Quelle: [4])



einer vielfältigen Landschaft mit kleinstrukturierten Grünland-, Acker- und Waldflächen, mit Gebüschen und einem weitgehend unverbauten Flusslauf eine hohe Artenvielfalt in Fauna und Flora auf.

Mit Voranschreiten der Vereinheitlichung des Landschaftsbildes und dem Verschwinden von kleinräumigen Rückzugsgebieten für Wildtiere verschwindet die Biodiversität, die in der für die mechanisierte Landwirtschaft angepassten Landschaftsstruktur in der rechten Abbildung resultiert. Die Produktivität durch den vollständigen Einsatz von Maschinen zur Bewirtschaftung der Flächen wird dadurch zwar mittelfristig optimiert, der Verlust der Biodiversität und die einseitige Nutzung der Böden bringt aber auf lange Sicht nicht nur Vorteile. So verändert sich z.B. durch das Verschwinden der Waldflächen und das Planieren und Einebnen von Landwirtschaftsflächen das Abflussregime von offenen Fließgewässern. Die Böden verringern dadurch ihre Fähigkeit das Oberflächenwasser aufzunehmen und entwässern dadurch schneller in die natürlichen Vorfluter, wodurch die Gefahr von Hochwasser steigt. Neben dem massiven Artenrückgang verschwindet auch der ästhetische Wert der Kulturlandschaft, dem v.a. in Tourismusgebieten ein entscheidender Faktor beigemessen werden muss. Eine vielfältig ausgestattete Landschaft mit einer abwechslungsreichen Landbedeckung steigert die Attraktivität einer alpinen Tourismusregion, viele Formen des sanften Tourismus (Bewirtschaftung von Almen, Anlage von Wanderwegen) bauen auf dem Erhalt einer attraktiven Kulturlandschaft auf.

## 2. Veränderungen in der alpinen Kulturlandschaft

### 2.1 Charakteristik des Untersuchungsgebietes

Die beiden Gemeinden Rauris (Salzburg) und Flattach (Kärnten) bilden das Untersuchungsgebiet für die

im Rahmen der Arbeit durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen. Die geographische Lage der beiden Gemeinden, dargestellt in Abbildung 3, ist in den Zentralen Ostalpen nördlich und südlich des Hohen Sonnblicks in der Goldberggruppe. Der Hauptort der Gemeinde Rauris liegt auf 906 m an der Rauriser Ache, die Gemeinde hat eine Fläche von rund 233 km<sup>2</sup> mit dem größten Anteil der 19 Gemeinden am Nationalpark Hohe Tauern und hat 3050 Einwohner. Der Hauptort der Gemeinde Flattach liegt auf 696 m im Mölltal, Flattach hat eine Fläche von rund 99 km<sup>2</sup> auf der 1305 Einwohner leben.

Die Auswahl dieser beiden Gemeinden folgte der Überlegung, dass beide Haupttäler eine ähnliche naturräumliche Ausstattung aufweisen, durch die unterschiedlich intensive wirtschaftliche Nutzung der beiden Täler entwickelten sich aber unterschiedliche Bilder der Kulturlandschaft. In den beiden Gemeindegebieten wurden in weiterer Folge 11 Testgebiete mit einer Größe von 1x1 km<sup>2</sup> bzw. 2x2 km<sup>2</sup> (siehe Abbildung 4) definiert, die in etwa zu gleichen Teilen in den naturräumlichen Gliederungszonen Haupttal, Seitental und subalpiner Almzone liegen. 5 Testgebiete mit einer Gesamtfläche von 5 km<sup>2</sup> liegen dabei im Haupttal, drei Testgebiete mit einer Gesamtfläche von 5 km<sup>2</sup> in der Zone Seitental und drei Testgebiete mit einer Fläche von 3 km<sup>2</sup> in der subalpinen Almzone. Aufbauend auf dieser Einteilung wurde die Kulturlandschaftsdynamik für diese drei Naturräume untersucht, mögliche statistische Trends herausgearbeitet und darauf aufbauend Szenarien für zukünftige Kulturlandschaftsstrukturen entwickelt.



Abb. 3: Lage des Untersuchungsgebietes

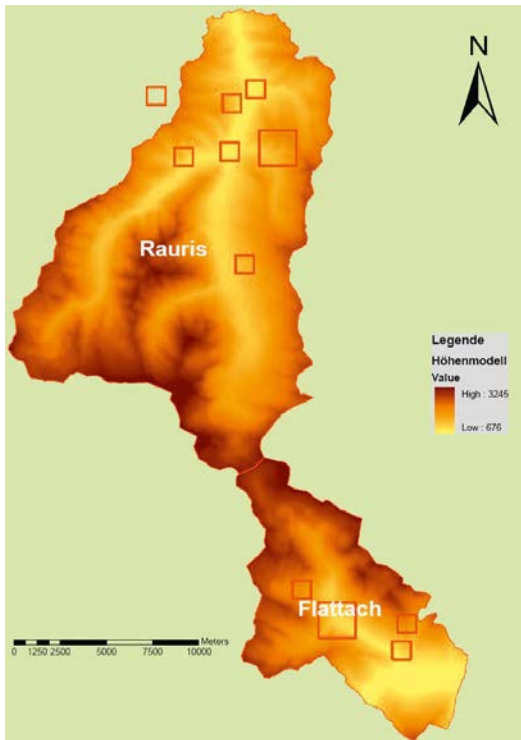


Abb. 4: Verteilung der 11 Testgebiete im Untersuchungsgebiet

Das Rauriser Tal ist im Gegensatz zur Gemeinde Flattach von massentouristischer Infrastruktur in Form von Lifтанlagen erschlossen, die entsprechende Nächtigunzzahlen mit sich bringen und damit das wirtschaftliche Gefüge stabilisieren. Die Gemeinde Flattach kann vom Tourismus nicht vergleichbar profitieren, was sich u.a. in der Bevölkerungsentwicklung niedergeschlagen hat. So hat die Gemeinde Rauris seit den 1950er Jahren eine stetige Bevölkerungszunahme zu verzeichnen, die sich erst im letzten Jahrzehnt von 2000 bis 2009 leicht umgekehrt hat. Die Bevölkerungszahlen in Flattach hingegen entwickeln sich seit den 1970er Jahren negativ [5]. Die Österreichische Raumordnungskonferenz sieht in ihrer Bevölkerungsprognose bis 2031 [6], dass sich dieser Trend in Zukunft weiter verstärkt. Die Bevölkerungsströme können dabei in zwei Richtungen unterteilt werden: Den Abzug in andere Gemeinden und intrakommunale Umzüge. Den Abzug der Bevölkerung in zentraler gelegene Regionen mit mehr Arbeitsplätzen als neue Wohnstandorte betrifft v.a. die Gemeinde Flattach. Die intrakommunalen Bewegungen sind in beiden Gemeinden ausgeprägt, es werden dabei peripher gelegene Siedlungsstand-

orte und Seitentäler zu Gunsten der Hauptorte ensiedelt. Durch die höhere funktionelle Ausstattung der Hauptorte mit geringen Distanzen zur Nahversorgung, öffentlichen Einrichtungen oder günstigeren Verkehrsanbindungen wird eine höhere Attraktivität des Wohnstandortes gewährleistet. Diese Bevölkerungsentwicklung korreliert mit den hier vorliegenden Untersuchungen der Entwicklung der Kulturlandschaft. So ist bei Bevölkerungsrückgang in peripher gelegenen Standorten eine Zunahme der Waldflächen, die in erster Linie auf Kosten von landwirtschaftlichen Flächen gehen, zu verzeichnen.

## 2.2 GIS Analyse zur Quantifizierung der Kulturlandschaftsdynamik

Die Geschichte einer Kulturlandschaft lässt sich visuell am anschaulichsten mit historischem Bild- und Fotomaterial rekonstruieren, das vielerorts auf mehrere Jahrhunderte zurückblicken lässt. Diese Datenquellen lassen sich aber im Rahmen von quantitativen Untersuchungen nicht verwenden. Für quantitativ nachvollziehbare GIS Analysen muss man sich als Datenbasis daher auf photogrammetrische Aufnahmen stützen. Diese historischen Grundlagen alleine würden für die Abschätzung von aktuellen Tendenzen allerdings nicht viel beitragen, da sich die soziale und wirtschaftliche Struktur sehr stark verändert hat und sich damit die damaligen Triebkräfte für Landschaftsveränderungen nicht auf die heutige Situation übertragen lassen. Durch den intensiven maschinellen Einsatz in der Landwirtschaft und den damit einhergehenden strukturellen Veränderungen nach 1945 ist es sinnvoll, quantitative Untersuchungen mit Datengrundlagen nach 1945 durchzuführen. Die ersten verfügbaren Luftbilder Österreichs stammen aus den 1950er Jahren, die im Rahmen dieser Arbeit ausgewertete Zeitreihenanalyse greift auf den Waldstandsflug 1954 als frühesten Untersuchungszeitpunkt zurück. Für die 11 oben beschriebenen 1x1 km<sup>2</sup> bzw. 2x2 km<sup>2</sup> großen Testgebieten wurden jeweils Landbedeckungskartierungen zu 7 Referenzzeitpunkten durchgeführt. Es wurden dabei je nach Verfügbarkeit der Luftaufnahmen für jedes Testgebiet manuell aus den Referenzjahren 1954, 1962-67, 1975-78, 1983, 1992-97, 2002 und 2006 Kartierungen durchgeführt, bei denen die Landbedeckungsklassen Wald, Freifläche, Siedlung, Gewässer und Ödland berücksichtigt wurden. Abbildung 5 zeigt als Beispiel die Landbedeckungen des Hauptortes der Gemeinde Rauris im Jahr 1954 und 2002.

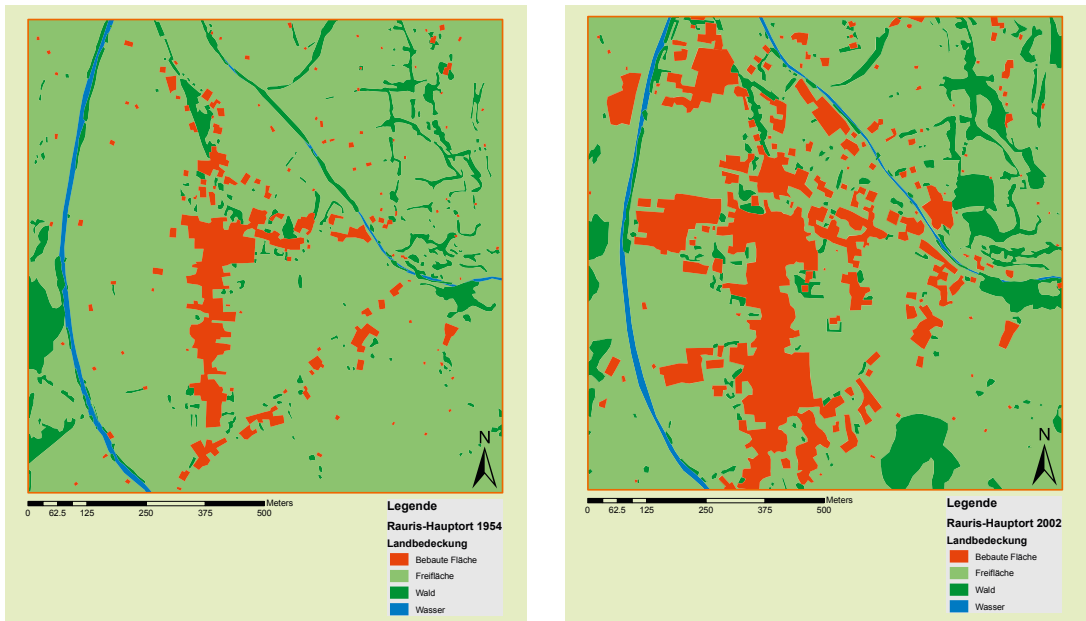


Abb. 5: Landbedeckungskartierung Rauris Hauptort 1954 – 2002

Gut zu erkennen ist die Entwicklung der bebauten Flächen zu einem kompakten Siedlungskern, dessen Fläche sich im Untersuchungszeitraum 1954 – 2002 mehr als verdreifacht hat (+207 %, +12,0 ha). Der Flächenbedarf ging dabei in erster Linie auf Kosten der landwirtschaftlichen Flächen, der Anteil der Freiflächen im 1x1 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet ging um 18 % (–15,8 ha) zurück. Die Waldflächen, die quantitativ mit einem Anteil von etwa 10 % an der Gesamtfläche am Talboden im Haupttal eine untergeordnete Rolle spielen, breiteten sich ebenfalls auf Kosten der Freiflächen aus. Wald nahm um 3,4 ha zu, das entspricht im Untersuchungszeitraum 1954 – 2002 fast einer Verdopplung (+48 %). Neben der quantitativen Veränderung der Waldflächen vollzog sich v.a. eine qualitative, in dem viele Gebüschzeilen und Hecken verschwunden sind. Der Rest von 0,4 ha der Landbedeckungsdynamik ist den Wasserflächen zuzuschreiben, die durch die überwiegende Abholzung der Uferböschungen im Zuge der Flussregulierungen leicht zugenommen haben. Diese Entwicklung der Landbedeckung kann mit den dazwischenliegenden Beobachtungszeitpunkten gestützt werden, die im Wesentlichen eine stetige Entwicklung erkennen lassen (Abbildung 6). Wie sich die Landbedeckung in den drei naturräumlichen Gliederungszonen Almzone, Haupttal und Seitental in 5 der 11 untersuch-

ten Testgebiete im Detail entwickelt hat, zeigt Abbildung 6.

Das Diagramm in Abbildung 6 stellt für die quantitativ am stärksten vorkommenden Landbedeckungsklassen Wald, Freifläche und bebauten Fläche je eine Kurve in den drei Gliederungszonen Almzone, Haupttal und Seitental dar. Als Ausgangsdaten wurden drei Testgebiete zu je 1 km<sup>2</sup> aus der Zone Haupttal und je ein Testgebiet zu 1 km<sup>2</sup> aus den Gliederungszonen Almzone bzw. Seitental verwendet. Es ist dabei zu beobachten, dass die bebauten Flächen in den Zonen Haupttal und Seitental prozentuell stark zugenommen haben (+206 % bzw. +172 %), in der Almzone die bebauten Flächen aber seit 1954 kontinuierlich abnehmen. Mit weniger als 1 % der Gesamtfläche haben die bebauten Flächen flächenmäßig in der Almzone zu keinem Zeitpunkt der Untersuchungsreihe eine Rolle gespielt, sehr wohl aber qualitativ. Der Flächenrückgang ist gleichbedeutend mit dem Rückgang der Anzahl von Einzelgebäuden, die in dieser Höhenlage v.a. Heustadel, Jagd- und Almhütten waren. Diese Gebäude prägen aber das Bild einer Landschaft signifikant, ein Verschwinden dieser Objekte ändert die Charakteristik und damit die Attraktivität einer Kulturlandschaft. Die Waldflächen nahmen in allen drei naturräumlichen Gliederungszonen zu, wobei der größte Waldzuwachs in der Almzone zu beobachten ist (+34 %), in den Seitentälern wurde ein Zuwachs

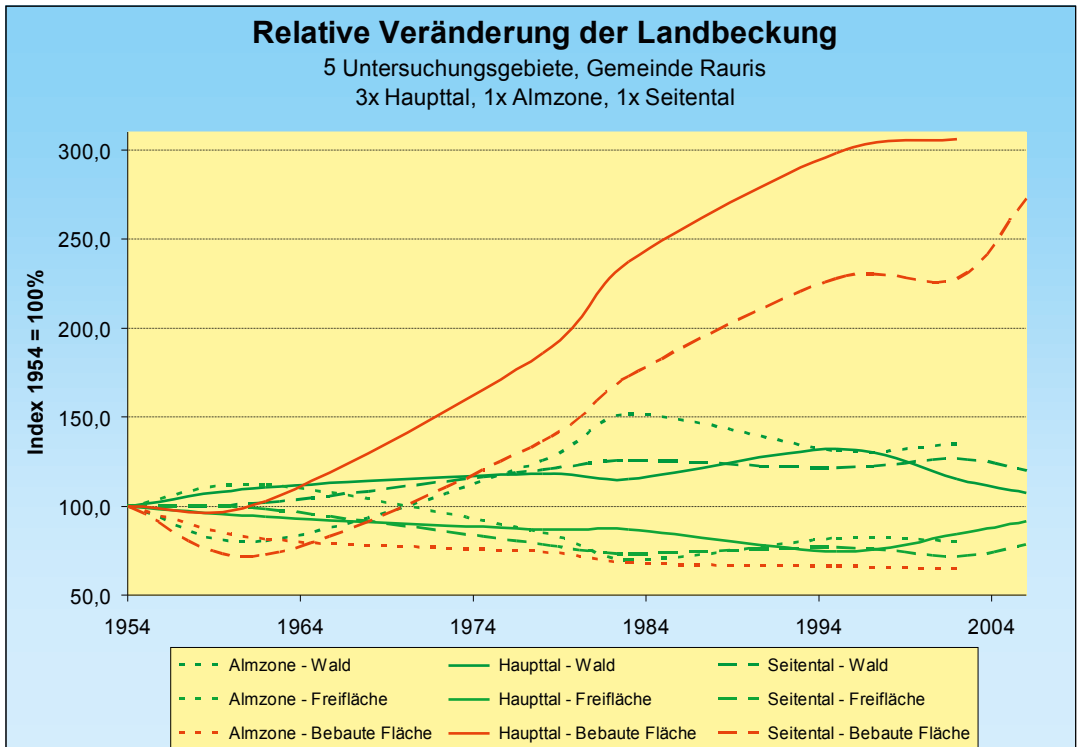


Abb. 6: Relative Landbedeckungsveränderung 1954 – 2006

von 20 % festgestellt, in der Zone Hauptttal stagnierten die Waldflächen mit einem Zuwachs von 7 % fast. Der starke Waldzuwachs im Untersuchungszeitraum 1954 – 2006 in der Almzone kann aber nicht mit klimatischen Veränderungen wie dem Anstieg der Temperatur und dem daraus resultierendem Anstieg der Waldgrenze erklärt werden. Vielmehr wurden Almflächen durch ökonomische Rahmenbedingungen nicht weiter bewirtschaftet und aufgeforstet bzw. einem natürlichen Sukzessionsprozess überlassen. Diese Beobachtungen der Landbedeckungsdynamik in der Almzone korrelieren auch mit Zahlen der Statistik Austria (Almerhebung 1986, [7]), der zu Folge von 1952 bis 1974 die bewirtschafteten Almen in Österreich um 14 % abgenommen haben (Salzburg – 17 %, Kärnten – 7 %). Durch gezielte Fördermaßnahmen in den 1970er Jahren konnten wieder wirtschaftliche Reize geschaffen werden, um Almen zu bestoßen, die Anzahl der bewirtschafteten Almen nahm wieder zu.

Um ein umfassenderes Bild der Dynamik der Kulturlandschaft zu erhalten, wurden Veränderungen der Landbedeckung in den 5 vom neuen Berghöfekataster [8] verwendeten Hangnei-

gungszonen untersucht. Das Ergebnis dieser Analyse und die Einteilung dieser fünf Hangneigungszonen kann Abbildung 7 entnommen werden. Es wird darin die Entwicklung der drei Landbedeckungsklassen bebaute Fläche (BF), Freifläche und Wald in den fünf verschiedenen Hangneigungszonen im Beobachtungszeitraum 1954 – 2006 dargestellt. Die Art der Linie kennzeichnet dabei die Landbedeckungsklasse, die Farbe die Hangneigungszone, wobei eine helle Farbe eine geringe Hangneigung repräsentiert und eine dunklere eine höhere.

Die bebauten Flächen haben dabei in Summe in allen fünf Hangneigungszonen zugenommen, den stärksten Zuwachs gab es dabei mit 211 % in der Zone mit der geringsten Hangneigung, die günstige Siedlungsstandorte am Talboden repräsentiert. Mit dem Anstieg der Hangneigung nimmt der Zuwachs der bebauten Flächen zwar ab, in der Zone mit der höchsten Hangneigung ist aber immer noch ein Zuwachs von 85 % zu beobachten. Gegen Ende der 1970er Jahre wird in allen Hangneigungszonen ein markanter Anstieg der bebauten Flächen beobachtet, der sich in der Bevölkerungsstatistik [5] nicht in diesem

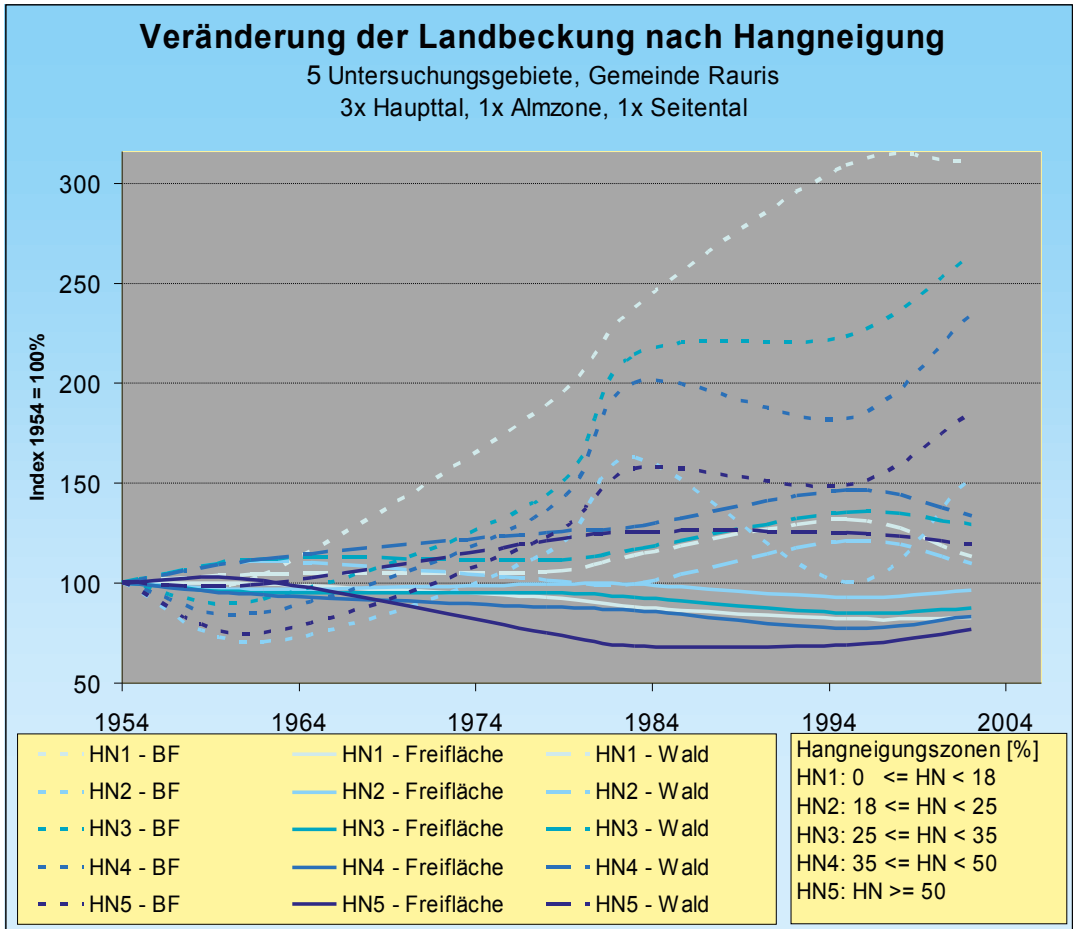


Abb. 7: Veränderung der Landbedeckung nach Hangneigung 1954 – 2006

Maße widerspiegelt. Die Freiflächen haben in Summe in den fünf Testgebieten in allen fünf Hangneigungszonen abgenommen, mit einem Rückgang von 23 % am stärksten auf Flächen mit über 50 % Hangneigung. Die Trends dieses Flächenrückganges entwickelten sich zudem sehr ähnlich in allen Hangneigungszonen. Die Waldflächen haben auf Kosten der Freiflächen in allen Hangneigungszonen zugenommen, wobei diese Zunahme in den beiden untersten Zonen mit 13 % bzw. 9 % weniger stark zu beobachten war wie in den oberen drei (HN1: 29 %, HN2: 33 %, HN3: 19 %). Aufbauend auf den hier vorgestellten und ergänzenden hier nicht vorgestellten topographischen Analysen (Seehöhe, Exposition) werden im nächsten Schritt Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Kulturlandschaft in den Testgebieten generiert.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

#### 3.1 Zusammenfassung der Untersuchungen

Die bisherigen Untersuchungen zur Kulturlandschaftsdynamik in den inneralpinen Untersuchungsgebieten von 1954 – 2006 haben gezeigt, dass nicht nur ein qualitativer Strukturwandel in der Ausstattung der Landschaft stattgefunden hat, sondern auch ein quantitativer. So haben sich die Siedlungsflächen in Summe signifikant ausgebreitet, bevorzugt in den Gunsträumen der Haupttäler am Talboden. Landwirtschaftliche Einzelgebäude wie Heustadel und Almhütten sind in allen Räumen zurückgegangen. Die Siedlungsflächen haben sich wie die Waldflächen auf Kosten der Freiflächen ausgebreitet, die demnach zurückgegangen sind. Waldzuwachs wurde in allen Testgebieten festgestellt,



wirtschaftliche Rahmenbedingungen führten zur vermehrten Aufforstung von Freiflächen.

### 3.2 Entwicklung von Zukunftsszenarien

Aus den oben beschriebenen Untersuchungen der bisherigen Entwicklung der Kulturlandschaft wird im nächsten Schritt versucht werden, Szenarien für die zukünftige Entwicklung zu generieren. Methodisch stehen dazu mehrere Möglichkeiten zur Verfügung ([9], [10]). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Modellansatz der „Gezwungenen Zellulären Automaten“ für räumliche Prognosen zum Einsatz kommen. Zelluläre Automaten sind Computermodelle, die eine Technik zur Modellierung von räumlich diskreten Systemen repräsentieren. Sie bieten die Möglichkeit, durch definierte Regeln den Zustand eines Zellsystems zum Zeitpunkt  $t+1$  aus dem Zustand zum Zeitpunkt  $t$  zu bestimmen [11]. Bei einem freien Zellulären Automaten fließt dazu der eigene Zustand und die Nachbarschaftsbeziehungen einer Zelle zum Zeitpunkt  $t$  ein (Abbildung 8). Die möglichen Zustände einer Zelle in der hier untersuchten Landbedeckungsmodellierung sind die Landbedeckungsklassen Wald, Freifläche, Siedlung, Gewässer oder Ödland. Der Zustand  $g^t$  der Rasterzelle auf der Position  $i, j$  zum Zeitpunkt  $t$  und der Zustand der umgebenden Zellen in der vier Zellen umfassenden „von Neumann Nachbarschaft“ dienen dabei als Ausgangspunkte für die Bestimmung des Zellzustandes  $g^{t+1}$  zum Zeitpunkt  $t+1$  (Abbildung 8, linke Seite).

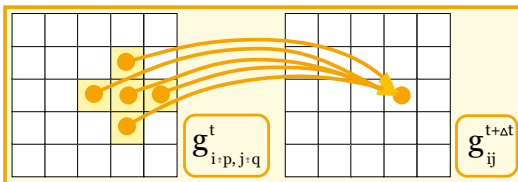


Abb. 8: Prinzipieller Aufbau eines zellulären Automaten

Durch die Anwendung von vorher festgelegten Übergangsregeln auf  $g^t$  und der Einbeziehung der Zustände der Nachbarschaftszellen kann man mit der Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten und dazu festgelegten Schwellwerten  $g^{t+1}$  bestimmen. Mit Hilfe von Markow-Ketten ist es möglich, quantitative Aussagen über zukünftige Entwicklungen basierend auf vorangegangenen Tendenzen zu treffen, sprich die Anzahl der Zellen zu berechnen, die sich in jeder Landbedeckungsklassen pro Zeiteinheit verändern müssen [12]. Diese werden basierend auf der Zeitreihenanalyse der Landbedeckungskartierungen 1954 – 2006 getroffen. Bei Einführung dieser

quantitativen Beschränkungen spricht man von einem „Gezwungenen Zellulären Automaten“. Die Voraussetzung für die Umsetzung Zellulärer Automaten sind demnach das Vorliegen eines Rasters mit Zellen bestimmter Zustände und die Definition von Regeln, die die Zustandsänderungen vom Zeitpunkt  $t$  zum Zeitpunkt  $t+1$  definieren. Da Landbedeckungskartierungen a-priori flächenhaft vorliegen, ist die erste Voraussetzung für die Anwendung erfüllt. Der zweite Punkt, die Bestimmung der Übergangsregeln wird aus den in Kapitel 2 gewonnenen Erkenntnissen der GIS-Analysen möglich. So wird bei der Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit einer Zelle berücksichtigt, welcher naturräumlichen Gliederungszone sie angehört. Als topographische Rahmenbedingungen fließen die Hangneigung, Höhenlage und Exposition ein. Weiters werden über den Zeitraum 1954 – 2006 verfügbare sozioökonomische Daten, wie die Bevölkerungsentwicklung und die Zahl der Arbeitsstätten in die Modellierung einfließen.

### Referenzen

- [1] Sieferle, Rolf Peter, Krausmann, Fridolin, Schandl, Heinz, Winiwarter, Verena: Das Ende der Fläche – Zum gesellschaftlichen Stoffwechsel der Industrialisierung. Böhlau Verlag, 2006.
- [2] Bundesamt für Statistik: Landschaft und Biodiversität. Umweltbericht 2009 Schweiz. <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/04/blank/dos/01.parsys.0016.downloadList.18249.DownloadFile.tmp/ii11.pdf>.
- [3] Hoppichler, Josef: Biodiversity, Landscapes and ecosystem services of agriculture and forestry in the Austrian alpine region - an approach to economic (e) valuation. Organisation for Economic Co-operation and Development, Working Party on Economic and Environmental Policy Integration and Working Group on Economic Aspects of Biodiversity, 2005.
- [4] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Landschaft natürlich – Landschaftsveränderung und Artenrückgang. [http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/nafaweb/berichte/plp\\_06/plp60010.html](http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/nafaweb/berichte/plp_06/plp60010.html), Stand April 2007.
- [5] Statistik Austria: Ein Blick auf die Gemeinde. <http://www.statistik.at/blickgem/>, Stand Jänner 2010.
- [6] ÖROK und Statistik Austria: ÖROK-Prognosen 2001-2031, Teil 1: Bevölkerung und Arbeitskräfte nach Regionen und Bezirken Österreichs. Österreichische Raumordnungskonferenz, 2004.
- [7] Statistik Austria: Almerhebung 1986. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/land\\_und\\_forstwirtschaft/ agrarstruktur\\_flaechen\\_ertraege/almen/022946.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/land_und_forstwirtschaft/ agrarstruktur_flaechen_ertraege/almen/022946.html)
- [8] Tamme, Oliver, Bacher, Ludwig, Dax, Thomas, Hovorka Gerhard, Krammer, Josef, Wirth, Matthias: Der neue Berghöfekataster – Ein betriebsindividuelles Erschwernisfeststellungssystem in Österreich. Bundesanstalt für Bergbauernfragen, 2003.

- [9] *Briassoulis, Helen*: Analysis of Land Use Change: Theoretical Modelling Approaches. The Web Book of Regional Science, Regional Research Institute, West Virginia University, 2000.
- [10] *Benenson, Itzhak, Torrens Paul M.*: Geosimulation - Automata-based modeling of urban phenomena. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.
- [11] *Tyler, Tim*: Cellular Automata. <http://www.cell-auto.com/>, Stand Jänner 2010.
- [12] *Stroock, Daniel W.*: An Introduction to Markov Processes. Springer Berlin-Heidelberg-New York, 2005.

**Anschrift der Autoren**

**Mag. DI Rainer Prüller**, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/I, A-8010 Graz

E-Mail: [rainer.prueller@tugraz.at](mailto:rainer.prueller@tugraz.at)

**Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Forstwirt Mathias Schardt**, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/I, A-8010 Graz

E-Mail: [mathias.schardt@tugraz.at](mailto:mathias.schardt@tugraz.at)



## 3D- Grabungs- und Funddokumentation in der Archäologie

Michael Moser, Klaus Hanke, Kristóf Kovács,  
Innsbruck

### Kurzfassung

Seit 2007 untersucht der FWF-Spezialforschungsbereich HiMAT – History of Mining Activities in Tyrol – der Universität Innsbruck den Einfluss des Bergbaues im alpinen Raum und die dadurch entstehenden substantiellen Veränderungen für Kultur und Umwelt. An der Erforschung der Bergbaugeschichte sind zwölf Universitätsinstitute aus verschiedenen Fachbereichen der Geistes-, Natur- und Ingenieurwissenschaften, sowie internationale Experten der Universitäten Basel, Frankfurt, Tübingen und dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum beteiligt. Das Großprojekt ist auf zehn Jahre konzipiert und wird u.a. vom österreichischen Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung (FWF) sowie den Bundesländern Tirol, Salzburg und Vorarlberg sowie der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol gefördert [1].

Die Vermessung ist ein unerlässlicher Begleiter jeder archäologischen Grabung. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Archäologen und Vermessungsingenieure des SFB HiMAT versucht bewährte Methoden mit neuen Techniken der Dokumentation zu ergänzen und somit den Arbeitsablauf effizienter zu gestalten. Die berührungslose und zerstörungsfreie Datenerfassung sensibler und komplizierter Objekte ist nicht der einzige Vorteil einer dreidimensionalen und flächendeckenden Aufnahme mittels eines Laserscanners. Durch die hohe Auflösung und schnelle Datenverarbeitung moderner Geräte ist eine exakte 3D-Dokumentation mit einer hochauflösenden Texturierung realisierbar. Die Anzahl an exakt vermessenen Details erhöht sich im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren beträchtlich. Das Einsatzgebiet derartige Vermessungsgeräte ist z.B. in der Staudammüberwachung oder der Qualitätssicherung im Flugzeug- und Maschinenbau. Weitere Anwendungen mit hohem Potential finden sich aber zunehmend auch in der Archäologie und im Denkmalschutz.

**Schlüsselwörter:** 3D Dokumentation, Laserscan, Hochauflösende Punktwolken, Modellierung, Texturierung

### Abstract

In early 2007 the special research program HiMAT – History of Mining Activities in Tyrol – was established at the University of Innsbruck. The aim of this international research is the analysis of the impact of mining activities on the environment and human society. Under the broad auspices of the research program, 12 university institutes and international experts from the Universities of Basel, Frankfurt, Tübingen and as well as the Deutschen Bergbau-Museum in Bochum, participate in a total of 14 subprojects. The project with a duration of ten years is generously supported by the Austrian Science Fund as well as by the province governments of Tyrol, South Tyrol, Vorarlberg, Salzburg and the Autonomous Province of Bolzano-South Tyrol, Italy. [1].

Surveying is an important partner for every archaeological excavation. The advantage of a laser scanner is the three dimensional and comprehensive recording and the non destructive way of acquiring geometric data of sensitive and complex objects. The high resolution of modern equipment allows an accurate spatial documentation with a corresponding texturing. In comparison to conventional methods, the quantity of exact surveyed details could be increased at the same time. The typical use for these measurement systems is e.g. monitoring of dams or quality control of aircrafts and engine construction. But increasingly it is also used for archaeology and cultural heritage various applications.

**Keywords:** 3D documentation, Laser scanning, high resolution Point Cloud, modelling, texturing

### 1. Einleitung

Seit 2007 führen das Institut für Archäologien der Universität Innsbruck unter der Leitung von Gerd Goldenberg Grabungen im Gebiet Mauken/Brixlegg im Unterinntal durch [2]. In dieser Region finden sich viele Spuren spätbronzezeitlicher Bergbautätigkeiten, wie der Kupferabbau unter Tage und die notwendigen Prozesse zur Aufbereitung und zum Schmelzen der Erze.

In einem früheren Moor entdeckten die Archäologen eine gut erhaltene Anlage zur Erzauf-

bereitung (Abbildung 1). Durch den torfhaltigen Boden entstehen besonders gute Konservierungsbedingungen für organisches Material. Daher fanden sich dort nicht nur anorganische Objekte wie Rillenschlägel zur Zerkleinerung der Erze sondern auch viele hölzernen Artefakte zur weiteren Erzverarbeitung. Einer der bedeutendsten Funde ist ein gut erhaltener Holztrog sowie ein Holzmesser zur vermuteten Trennung der Erze vom tauben Gestein.



**Abb. 1:** In einem großangelegten Feldversuch in Mauken wurde während der Grabungskampagne 2008 über mehrere Wochen eine derartige permanente Vermessung einer archäologischen Grabung durchgeführt.

Einen weiteren spektakulären Fund entdeckten die Archäologen um Thomas Stöllner vom Deutschen Bergbau-Museum in Bochum im Sommer 2009. Sie erforschen die berühmte Montanregion um den Mitterberg bei Bischofshofen, Salzburg. Dabei handelt es sich um eines der größten bronzezeitlichen Bergbauegebiete Europas [3]. Bei ihrer letztjährigen Grabung konnten sie einen gut erhaltenen Holzkasten bergen. Diese Einrichtung diente ebenfalls zur Trennung und Waschung der Erze vom tauben Gestein.

## 2. Aufnahmetechnik

Für die Digitalisierung der verschiedenen Objekte kamen zwei unterschiedliche Scansysteme zum Einsatz. Die 3D Grabungsdokumentation wurde mit dem terrestrischen Laserscanner Trimble GX durchgeführt. Durch die Möglichkeit zur automatischen entfernungsabhängigen Fokussierung seines Laserpunkts eignet sich dieses Verfahren besonders für eine detailreiche Erfassung von komplexen Oberflächen. Daher konnte ein Punktabstand von 2mm und eine Genauigkeit von 3mm bei der Dokumentation der einzelnen Grabungsepochen und Grabungsschichten erreicht werden.

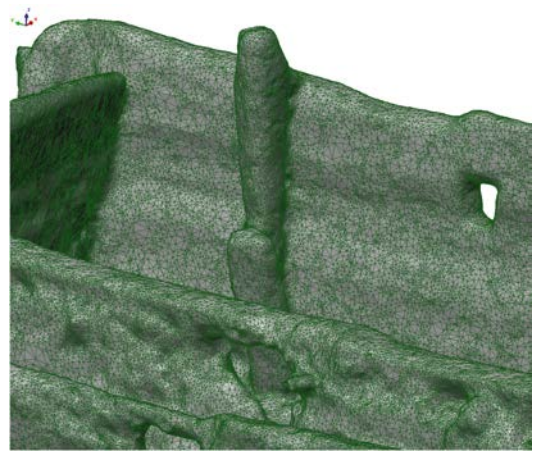
Mit einem Nahbereichsscanner wurden zusätzlich die Fundstücke vermessen. Der Laser Scan-Arm der Firma Faro ermöglicht eine berührungslose Digitalisierung auch von größeren Artefakten, ohne den Einsatz von störenden Passmarken am Objekt. Abhängig von den eingesetzten Komponenten erreicht das System eine Genauigkeit von wenigen Zehntelmillimetern.

Hochauflösende Aufnahmen mit einer kalibrierten Spiegelreflexkamera (Nikon D200, 10 Me-

gapixel) ermöglichen eine präzise Texturierung der berechneten Polygonnetze.

## 3. Modellierung

Ein bekanntes Problem ist die Auswertung der enormen Datenmengen bei hochauflösenden Digitalisierungen. Für eine Bearbeitung in einer entsprechenden Qualität reicht meistens die Prozessor- und Speicherleistung der zur Verfügung stehenden Arbeitscomputer nicht aus. Durch die kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung der Hard- und Software wird seit Kurzem eine Berechnung von hochauflösenden Polygonmodellen möglich (Abbildung 2).



**Abb. 2:** Hochauflösendes Polygonnetz des bronzezeitlichen Holzkastens – Region Mitterberg

Es erschließen sich dadurch für viele Fachrichtungen neue Möglichkeiten, die den bisherigen Arbeitsablauf ergänzen oder effektiver gestalten. Infolge der detaillierten Modellierung wird eine objektivere Dokumentation von archäologischen Grabungen und Funden erst denkbar. Aus den millimetergenauen Punktwolken, bestehend aus Millionen von Einzelpunkten werden detailgetreue 3D Computermodelle berechnet. Zusätzlich erhöht eine fotorealistische Texturierung aus hochauflösenden Bildern einer kalibrierten Digitalkamera den Informationsgehalt einer 3D Dokumentation noch erheblich. Die Nützlichkeit dieser digitalen Methode wird aber erst durch nachfolgende Applikationen deutlich.

## 4. Datenaufbereitung

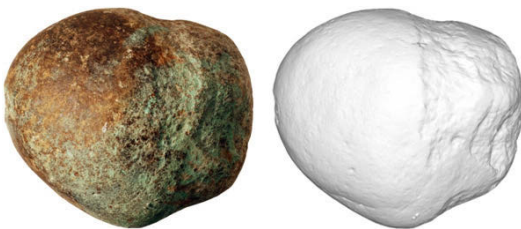
Wegen der langwierigen Konservierungsprozesse sind viele Artefakte für längere Zeit nicht zugänglich. Die Analysen der Geometrie und Textur können bei digitalen Modellen auf zwei verschiedene Varianten sofort weitergeführt werden.

Duplikate können mittels eines 3D-Plotters oder einer Fräsmaschine in unterschiedlichen Maßstäben hergestellt werden. Diese Repliken ermöglichen es die Untersuchungen oder Rekonstruktionen mit herkömmlichen Methoden durchzuführen. Natürlich eignen sie sich auch als gesuchte Ausstellungsobjekte.

Ein rein digitaler Weg ist die zweite Variante. Die hohe Auflösung der dreidimensionalen Modelle erhöht die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Analysen erheblich und vereinfacht deren Ablauf. Für ein besseres Verständnis von komplizierten Formen können ohne große Mühen die gewünschten Ansichten, beliebig im Raum positionierte Schnitte (Abbildung 3) und Höhenschichtplänen beziehungsweise eine Abwicklung der Oberflächen erzeugt werden. Ein wesentlicher Vorteil besonders wenn die Objekte direkt nicht mehr verfügbar oder zugänglich sind.



**Abb. 3:** Hochauflösendes 3D Modell eines ca. 80 cm langen bronzezeitlichen Holztrogs (Datierung etwa 3000 vor heute)



**Abb. 4:** Fotografische Dokumentation versus 3D Modell eines Rillenschlägels

Nicht alle äußerlichen Strukturen eines Artefaktes sind sofort visuell erkennbar. Sie sind häufig durch Oberflächentexturen verdeckt oder zu auch fein für das menschliche Auge. Durch eine Veränderung der Belichtung, monochromatische Darstellung oder vergrößerte Ansicht lassen sich

im 3D Modell noch viele verborgene Strukturen an den Objekten finden (Abbildung 4).

Das Überlagern der verschiedenen Bearbeitungsstufen und Datentypen ist ein weiterer Vorteil. Durch die Möglichkeit jede dreidimensionale Information in das digitale Modell einzufügen, erleichtert sich die gemeinsame Untersuchung der unterschiedlichen Daten wesentlich. Bei einer dreidimensionalen Dokumentation können auch mehrjährige Grabungen mit ihren jeweiligen Schnitten, Schichten und Epochen in einem Gesamtmodell zusammengefasst werden. Dies ermöglicht nicht nur eine gemeinsame Bearbeitung und Analyse der Daten, sondern auch eine Rekonstruktion der originalen Fundsituation der digitalisierten Objekte (Abbildung 5).



**Abb. 5:** Dreidimensionale Dokumentation mit mehreren Grabungsschichten



**Abb. 6:** Texturiertes 3D Modell des bronzezeitlichen Holzkastens – Region Mitterberg

Die Vorteile überwiegen auch bei digitalen Rekonstruktionen im Vergleich zu analogen Methoden. Das aufwendige und vor allem nicht zerstörungsfreie Erstellen von Abdrücken vom Originalobjekt kann sich erübrigen. Das virtuelle Zusammenfügen von Skulptur- oder Keramikfragmenten kann danach am Computer digital simuliert werden. Der kostengünstige und direkte Vergleich mehrerer Varianten unabhängig von der Größe und Gewicht der einzelnen Fragmen-



te, ist eine der wesentlichen Vorteile dieser digitalen Dokumentationsmethode.

Die Visualisierung der Modelle ist der letzte Schritt. Auf sehr anschauliche Weise können die gewonnenen Forschungsergebnisse präsentiert werden und somit ein größeres Interesse auch bei Laien bewirken. Zusätzlich sind für die gewünschten Zielgruppen alle Daten und Erkenntnisse der verschiedenen Bearbeitungsstufen jederzeit bei Bedarf über Internet oder Intranet verfügbar.

## Referenzen

- [1] Hanke, K., Moser, M., Grimm-Pitzinger, A., Goldenberg, G. & Töchterle, U., 2008: Enhanced potential for the analysis of archaeological finds based on 3D modeling. In: Chen, J., Jiang, J., Maas, H.-G.: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXX-VII, Part B5. Beijing 2008. Hannover - Istanbul [u.a.]: ISPRS, 187-191
- [2] Moser, M., Hye, S., Goldenberg, G., Hanke, K., Kovac, K., 2009: Digital documentation and visualization of archaeological excavations and finds using 3D scanning technology. In Proc. ARQUEOLOGICA 2.0 (1st International Meeting on Graphic Archaeology and Informatics, Cultural Heritage and Innovation). Sevilla, Spanien, 2009
- [3] Stöllner, T. (2008): Bronzezeitliche Massenproduktion von Kupfer am Mitterberg. Archäologie in Deutschland vol. 4, pp. 32-33
- [4] Remondino, F., El-Hakim, S., 2006: Image-based 3D modelling: a review. Photogrammetric Record, 21(115), pp. 269-291
- [5] Koehl, M., Grussenmeyer, P., Landes, T., 2009: Dokumentation und Denkmalpflege- von der Kombination von Messungstechniken zum interaktiven 3D- Modell. In: Chesi/Weinold (Hrsg.) 15. Internationale Geodätische Woche Oberurgl 2009

## Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Michael Moser, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Universität Innsbruck, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck

E-Mail: michael.t.moser@uibk.ac.at

ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Hanke, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Universität Innsbruck, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck

E-Mail: klaus.hanke@uibk.ac.at

Dipl.-Geogr. Kristóf Kovács, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Universität Innsbruck, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck

E-Mail: kristof.kovacs@uibk.ac.at



## Eine Glasfaser als Sensorelement: Entwicklung eines faseroptischen Zweiachs-Neigungssensors

Klaus Macheiner, Graz

### Kurzfassung

Glasfasern sind in der Telekommunikation weit verbreitet und ermöglichen hohe Datenraten und Übertragungsgeschwindigkeiten. Licht spielt dabei die zentrale Rolle des Übermittlers. Die Verwendung von optischen Fasern in der Sensorik und deren Anwendungen, insbesondere in der Ingenieurgeodäsie, gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Der Einsatz einer einfachen Glasfaser als Sensorelement für den Prototyp eines Neigungssensors ist ein Beispiel dafür, wie Licht und die mechanischen Eigenschaften der Faser für die Messung von Neigungen in zwei Achsen nutzbar gemacht werden können. Dabei wird das aus einer Glasfaser gefertigte Sensorelement einseitig eingespannt. Das freie Ende des Elements erfährt bei Neigung des Sensors Auslenkungen, die aufgrund der Biegung des Sensorelements entstehen. Wenn Licht in der Faser geführt wird, entsteht am freien Ende ein mit einem positionsempfindlichen Detektor messbarer Punkt. Aus den so bestimmten Faserauslenkungen können anschließend die Neigungswinkel berechnet werden, wofür die Faser als schlanker Balken modelliert wird.

Sensorentwicklung, Kalibrierung und Signalverarbeitung sind Themen dieses Beitrags, wobei auch der Einsatz bei statischen und kinematischen Anwendungen besonders behandelt wird. Die Arbeit steht an der Schnittstelle von Mechanik, Sensorik und Ingenieurgeodäsie und zeigt, wie geodätisches Wissen sowohl bei der Sensorentwicklung, als auch bei der Datenauswertung genutzt werden kann.

**Schlüsselwörter:** Neigungssensor, Faseroptik, Balkenbiegung, Kalibrierung, Signalverarbeitung, statische und kinematische Anwendungen

### Abstract

Optical fibers are widely used for telecommunication and allow high bandwidths and data transfer rates. In the transfer process light plays the central role of the transmission. In sensor technology and its applications, especially in engineering geodesy, the use of optical fibers gains constantly in importance.

The use of a simple optical fiber as a sensing element for the prototype of a fiber optic tiltmeter is an example of how light and the mechanical properties of the fiber can be used for biaxial tilt determination. The sensing element consists of an optical fiber which is clamped at one side. The free end of the emerging element experiences deflections as soon as the sensor is tilted. When light is guided within the fiber, the cantilever deflections can be measured using an optical detector. From the fiber deflections, the tilt angles can be calculated based on modelling the optical fiber as a cantilever using equations of structural mechanics.

Sensor development, prototype calibration and signal processing will be treated in this article. Also selected aspects of static and kinematic applicability will be addressed. The work can be viewed at the interface between mechanics, sensor technology and engineering geodesy and shows how geodetic knowledge can be applied for sensor development and data processing.

**Keywords:** tiltmeter, fiber optics, cantilever, signal processing, calibration, static and kinematic applications

### 1. Einleitung

Abgesehen von hochpräzisen Sensoren für geodätische Überwachungsmessungen (z. B. Leica Nivel 20 bzw. das Nachfolgeprodukt Nivel 200) reichen für die Genauigkeit der Neigungsmessung oftmals  $0.01^\circ$  aus, selbst für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Eine typische Aufgabe, die Absteckung von Pylonen im Brückenbau, wird in [1] beschrieben, wobei die Anforderungen an die Vertikalität der abzusteckenden Objekte bei  $0.07^\circ$  liegen. Auf eine ähnliche Genauigkeitsklasse wird in [2] bei der kontrollierten Absenkung von Senkkästen verwiesen. Beide (quasi-) statischen Anwendungen erfordern die

Bestimmung der Neigungswinkel in zwei Achsen, kommen jedoch üblicherweise mit einem kleinen Arbeitsbereich von weniger als  $5^\circ$  aus.

Für kinematische Anwendungen, z. B. Gleisvermessung [3] oder Baumaschinensteuerung [4], ist oft ein größerer Arbeitsbereich bei gleich bleibenden Genauigkeitsanforderungen erforderlich. Die Einhaltung dieser Genauigkeit im kinematischen Betrieb ist jedoch eine große Herausforderung, vor allem weil Horizontalbeschleunigungen als Störeinflüsse auf das dynamische System Neigungssensor wirken. Für geodätische Arbeiten in diesem Kontext siehe z. B. [5] und [6].

Zentrales Element der hier vorgestellten Sensorentwicklung mit einem Arbeitsbereich von  $\pm 30^\circ$  ist ein Sensorelement (SE) aus einer optischen Faser, dessen Eignung für die Neigungsmessung untersucht wird. Die dafür notwendigen Schritte werden in dieser Arbeit beschrieben. Auszüge experimenteller Ergebnisse im Hinblick auf statische und kinematische Anwendungen werden gezeigt. Untersuchungen kommerziell erhältlicher Neigungsmesser sind beispielsweise in [7] und [8] zu finden und ermöglichen es, die Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Entwicklung im Vergleich zu Produkten auf dem Sensormarkt zu beurteilen.

## 2. Sensorelement Glasfaser

### 2.1 Konzept und Prinzip

Die Verwendung einer Glasfaser als SE für einen faseroptischen Neigungsmesser (FO-TM, fiber optic tiltmeter) basiert auf einem einfachen Konzept: Eine Laserdiode (LD) erzeugt Licht, das in eine Faser (Masse  $m_b$ , Biegesteifigkeit EI) gekoppelt wird, die einseitig mit einer Länge  $l$  eingespannt ist und in Ausgangslage des Sensors vertikal nach unten hängt. Wird der Sensor um den Winkel  $\beta$  geneigt, erfährt das freie Faserende Auslenkungen  $u(l, \beta)$ , die im Falle des Auftretens zeitabhängiger Kräfte  $F(t)$  (z.B. Störbeschleunigungen) zusätzlich von der Zeit  $t$  abhängen. Die Position des am freien Faserende austretenden Lichts der LD kann mit einem optischen Detektor, z.B. einer positionsempfindlichen Diode (PSD), gemessen werden. Somit werden die Auslenkungen in Form von zweidimensionalen Positionen hochfrequent erfasst. Die Situation des ausgelenkten SEs ist in Abb. 1 beispielhaft dargestellt. Die Auslenkungen  $u$  als Funktion der Position  $x$  entlang der Faser beschreiben die Biegelinie  $u(x)$ , siehe z. B. [9]. Aus den Auslenkungen des Endpunktes werden in weiterer Folge Neigungswinkel berechnet. Wenn  $u(l)$  bei sinnvollen Längen  $l$  (mm bis cm) für eine ausreichende Positionsauflösung zu klein ist, können die Faserauslenkungen durch eine Masse  $m_p$  am freien Ende vergrößert werden.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Pendelneigungsmessern, bei denen die Pendelaufhängung oftmals einen großen konstruktiven und mechanischen Aufwand erfordert, besitzt ein derartiges SE durch die feste Einspannung der Faser keine derartigen komplexen Elemente. Ein weiterer Vorteil besteht in der direkten und einfachen Erfassung der zweidimensionalen Auslenkungen.

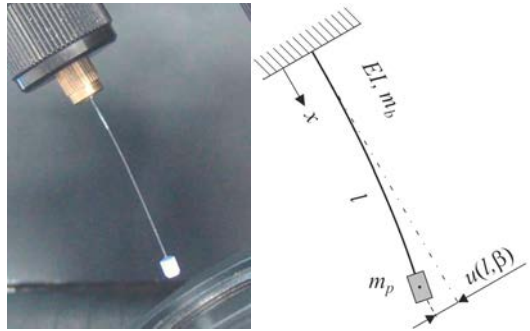


Abb. 1: links, Sensorelement Glasfaser; rechts, mechanisches Äquivalent Biegebalken

### 2.2 Modellierung und Simulation

Für die Modellierung der Auslenkungen  $u$  des faseroptischen SEs wird dieses durch einen schlanken isotropen Balken mit punktförmiger Masse am freien Ende ersetzt. Die Auslenkungen als Funktion der Position  $x$  entlang des Balkens und der Zeit  $t$  werden durch eine partielle Differentialgleichung beschrieben, siehe z.B. [10]. Die Lösung dieser Differentialgleichung setzt sich aus  $k$  verschiedenen Eigenformen (Schwingungsmoden) zusammen, die zusätzlich jeweils zeitabhängig sind ( $k$  unterschiedliche Schwingungsfrequenzen  $f_k$ ). In [11] wird gezeigt, dass die Beiträge von höheren Schwingungsmoden ( $k > 1$ ) zur Gesamtauslenkung  $u$  bei Vorhandensein einer Punktmasse  $m_p$ , die wesentlich größer ist als die Balkenmasse  $m_b$ , vernachlässigt werden können. Maßgeblich sind lediglich die Beiträge der ersten Schwingungsmode (Grundschiwingung), die für den zweidimensionalen Fall ausreichend genau durch das Differentialgleichungssystem

$$M \begin{bmatrix} \ddot{u}(t) \\ \ddot{v}(t) \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

beschrieben werden, siehe z. B. [12]. Die Größen  $u$  und  $v$  beschreiben darin die Auslenkungen entlang zweier orthogonaler Achsen des Sensorkoordinatensystems. Die Matrizen  $M$ ,  $D$  und  $C$  enthalten die schwingenden Massen, die Dämpfungskoeffizienten bzw. die Federkonstanten des mechanischen Systems. Die Kraftkomponenten  $F_1$  bzw.  $F_2$ , die auf das System wirken, werden im Falle einer reinen Neigung durch die entsprechenden Komponenten der Schwerkraft verursacht ( $m \cdot g \cdot \sin \beta$ ). Für diagonale Matrizen kann obiges System durch zwei unabhängige gewöhnliche Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} m \ddot{u}(t) + d_1 \dot{u}(t) + c_1 u(t) &= F_1(t) \\ m \ddot{v}(t) + d_2 \dot{v}(t) + c_2 v(t) &= F_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ausgedrückt werden, siehe [12]. Wenn die punktförmige Masse und die Faser selbst symmetrisch bezüglich ihrer Längsachse sind, können die Dämpfungskoeffizienten  $d_i$  und die Federkonstanten  $c_i$  durch idente Werte für  $d$  bzw.  $c$  ersetzt werden. Die Masse  $m$  setzt sich aus Punktmasse  $m_p$  und Balkenmasse  $m_b$  zusammen,

$$m = m_p + \kappa \cdot m_b, \quad (3)$$

wobei der Faktor  $\kappa = 33/140$  aus der Balkenmasse entsprechend ihres Beitrags zur kinetischen Energie eine äquivalente Punktmasse erzeugt, siehe [13]. Die Federkonstante  $c$  erhält man gemäß [14] aus der Biegesteifigkeit  $EI$  und der Faserlänge  $l$ ,

$$c = \frac{3EI}{l^3}. \quad (4)$$

Der Dämpfungskoeffizient  $d$  kann experimentell durch Untersuchung des Abklingverhaltens ermittelt werden. Die Kreisfrequenz  $\omega$  erhält man aus

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (5)$$

Die Festlegung einer geeigneten Konfiguration (Masse  $m$ , Faserlänge  $l$ ) erfolgt durch numerische Simulationen unter Berücksichtigung des gewünschten Arbeitsbereiches von  $\pm 30^\circ$  und der verfügbaren Fläche des optischen Detektors. Der Glaskörper einer handelsüblichen Glasfaser hat einen Radius von  $r = 62.5 \mu\text{m}$  (notwendig für die Berechnung des Flächenträgheitsmoments  $I$ , siehe [9]), der Elastizitätsmodul von Glas beträgt  $E = 72 \text{ GPa}$  bei einer Dichte von  $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$ ,

vgl. [15]. Die  $15 \mu\text{m}$  starke Schutzumhüllung (Coating) der ausgewählten Faser weist die Parameter  $E_c = 15 \text{ GPa}$  und  $\rho_c = 1.34 \text{ g/cm}^3$  auf, vgl. [16]. Eine Faser mit Polyimid-Coating wird gewählt, da die Eigenschaften und Abmessungen dieses Materials für eine deutliche Reduktion der mechanischen Spannungen innerhalb der Faser bei Biegung sorgen, siehe [17].

Simulationsrechnungen zeigen, dass bei einer Neigung des Sensors von  $30^\circ$  Auslenkungen  $u(l)$  von mehr als  $1 \text{ mm}$  erzielt werden, wenn z. B.  $l = 20 \text{ mm}$  und  $m = 100 \text{ mg}$  gewählt wird. Ab einer Länge von  $l = 35 \text{ mm}$  wird bei identer Masse  $m$  eine Auslenkung  $u(l) > 4 \text{ mm}$  erreicht. Der verfügbare Detektor (PSD) schränkt die messbare Auslenkung auf  $\pm 4 \text{ mm}$  ein, wobei Randbereiche vermieden werden sollten (Abschnitt 3.2). Um die genannten Randbedingungen zu erfüllen, wird das zu fertigende SE mit  $l = 30 \text{ mm}$  und  $m = 80 \text{ mg}$  dimensioniert. Dieses SE weist eine Eigenfrequenz von  $f = 6.4 \text{ Hz}$  auf.

Nach erfolgter Fertigung (Abschnitt 3.1) wurden Simulation und Realisierung einem Vergleich unterzogen. Dazu wurde mit der Einrichtung zur späteren Neigungskalibrierung (Abschnitt 3.2) eine schnelle Neigungsänderung von  $10^\circ$  durchgeführt und die Reaktion des SEs untersucht (Abb. 2). Der gesamte Datensatz umfasst einen Zeitraum von  $30 \text{ s}$ . Die Neigungsänderung beginnt nach  $12 \text{ s}$  und ist  $0.5 \text{ s}$  später beendet. Danach führt das SE zweidimensionale Schwingungen um die statische Ruhelage aus, die durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet ist. Die

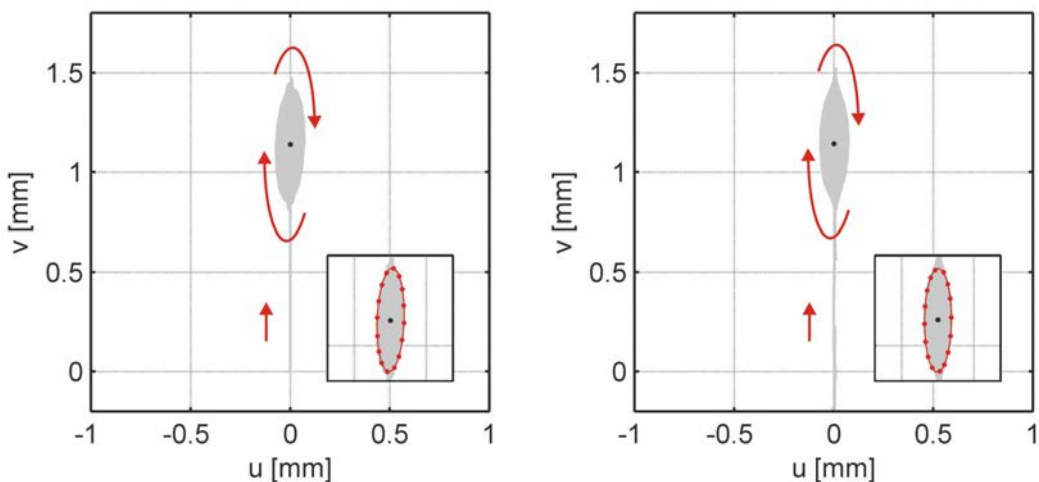


Abb. 2: Auslenkungen  $u$  und  $v$  des SEs bei einer Neigung des Versuchsmusters um  $\beta_1 = 10^\circ$  (Rotation um Achse  $u$ ); links, Simulation; rechts, Messung

ellipsenförmigen Kurven um die statische Ruhelage werden durch laterale Beschleunigungen ( $< 0.01 \cdot g$ ) hervorgerufen, die vermutlich von der Kalibriereinrichtung verursacht werden. Für die Simulation wurden drei aufeinander folgende impulsartige Beschleunigungen angenommen (ansonsten würde das Sensorelement lediglich Schwingungen in einer Ebene parallel zur  $v$ -Achse ausführen).

Für die Berechnung der Neigungswinkel ist die statische Ruhelage, also der Punkt im Zentrum der Grundrisskurven, maßgeblich. In  $v$ -Richtung beträgt der entsprechende Auslenkungsbeitrag 1.145 mm (simuliert) bzw. 1.147 mm (gemessen). Das Differentialgleichungssystem (1) ist also geeignet, das Schwingungsverhalten des SEs zufrieden stellend zu modellieren. Zur Extraktion der zeit- und neigungsabhängigen statischen Ruhelage im späteren Sensorbetrieb müssen geeignete Filtertechniken verwendet werden (Abschnitt 2.3), bevor in weiterer Folge die Neigungswinkel berechnet werden können.

### 2.3 Filterung und Berechnung der Neigungswinkel

Zur Bestimmung der (quasi-) statischen Ruhelage des SEs müssen dessen Vibrationen ( $f = 6.4$  Hz) durch Anwendung von digitalen Filtertechniken rechnerisch eliminiert werden. Unter der Voraussetzung, dass die Neigungsänderungen mit niedrigeren Frequenzen als der Eigenfrequenz des Sensors stattfinden, muss die Grenzfrequenz  $f_c$  des Filters kleiner als die Eigenfrequenz des SEs gewählt werden, z. B. [6]. Mit Hilfe der Transferfunktion des SEs wird für den Standardfall der Anwendungen eine Grenzfrequenz von  $f_c = 1.0$  Hz festgelegt. Bei dieser Frequenz tritt eine maximale Amplitudenvergrößerung von 2.5 % auf. Aus der Vielzahl an möglichen digitalen Filtern, siehe [18], wurde ein Chebyshev-II-Filter minimaler Ordnung ( $N = 5$ ) gewählt, der bei gegebenen Toleranzspezifikationen (Welligkeit im Durchlassbereich: 0.002 dB, Abschwächung im Sperrbereich: -60 dB, Bandbreite: 4 Hz) die geringste Ansprechzeit und die kleinste Überschwingungsamplitude erzielt. Mit diesem Filter werden die Auslenkungen gefiltert, bevor die weiteren Berechnungsschritte zur Bestimmung der Neigungskomponenten  $\beta_1$  und  $\beta_2$  durchgeführt werden.

Nach erfolgter Positionskalibrierung (Abschnitt 3.2) entsprechen die als zweidimensionale Positionen verfügbaren Auslenkungen  $x$  und  $y$  den aus der Simulation (Abschnitt 2.2) bekannten Auslenkungen  $u$  und  $v$ . Die Neigung  $\beta$  in

Richtung  $\alpha$  kann aus der Gesamtauslenkung  $d$  in dieser Richtung durch Kalibrierung ermittelt werden (Abschnitt 3.2). Die Neigung  $\beta$  in Richtung  $\alpha$  wird abschließend in zwei Komponenten  $\beta_1$  und  $\beta_2$  getrennt, die der Längs- und Querneigung in Bezug auf die Achsen des Sensorkoordinatensystems entsprechen.

## 3. Realisierung eines Versuchsmusters

### 3.1 Komponenten

Zur Untersuchung, ob eine optische Faser als SE zur Neigungsmessung geeignet ist, wurde ein FO-TM Versuchsmuster aus teils am Institut bzw. im Messlabor vorhandenen Komponenten realisiert. Aus der Nennung von Hardware-Komponenten dürfen keine Präferenzen abgeleitet werden.

Die Auslenkungen des SEs werden durch Licht aus einer Pigtail-LD (LFO-65-d,  $\lambda = 650$  nm) messbar gemacht. Als optischer Detektor wird eine PSD (Hamamatsu S5991-01) mit Signalverarbeitungseinheit (Hamamatsu C4758) verwendet, deren Ausgangssignal ( $\pm 10$  V) von einem A/D-Wandler (z. B. HBM Spider 8, 16 bit) aufgezeichnet wird. Das SE selbst besteht aus einer 30.15 mm langen Faser mit Polyimid-Coating, an deren Ende eine Keramik-Ferrule mit einer Masse von 80 mg achssymmetrisch angeklebt ist. Das eingespannte Ende des SEs ist in einer stabilen Halterung eingeklebt, die wiederum mit einem Aluminium-Gehäuse fest verbunden ist (Abb. 3).

Wenn man die PSD durch ein faseroptisches System ersetzt, also z.B. die Intensitätsverteilung über mehrere Fasern messen würde, vgl. [19], würde man einen Sensor erhalten, der sämtliche Vorteile faseroptischer Sensoren in sich vereinigt (auch keine Beeinflussung durch elektromagnetische Störungen). Für die grundlegende Untersuchung der Eignung einer Faser als SE ist allerdings die verwendete Hardware ausreichend. Aus ähnlichen Beweggründen wird vorerst der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Resultate nicht untersucht, da die sperrigen Abmessungen des Gehäuses den Hauptanteil dieser Effekte verursachen würden. Bei Miniaturisierung (zur Zeit limitiert durch die Abmessungen der C4758) würden diese möglichen Effekte deutlich reduziert werden.

### 3.2 Kalibrierung

Zur Umwandlung der mit dem A/D Wandler aufgezeichneten Auslenkungen von der Primäreinheit Volt in metrische Größen bei gleichzeitiger



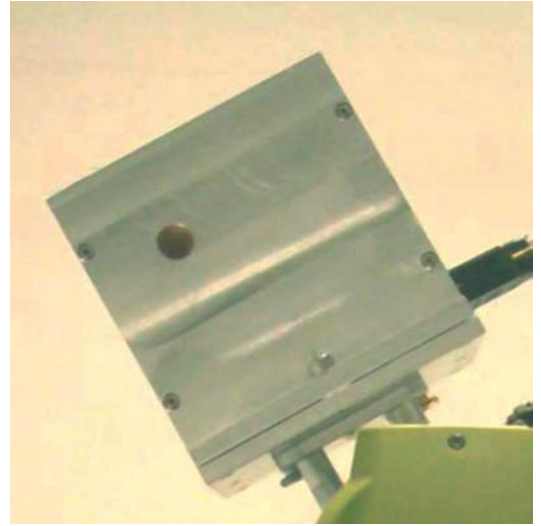


Abb. 3: links, Blick ins innere des FO-TM Versuchsmusters; rechts, FO-TM in geneigter Position

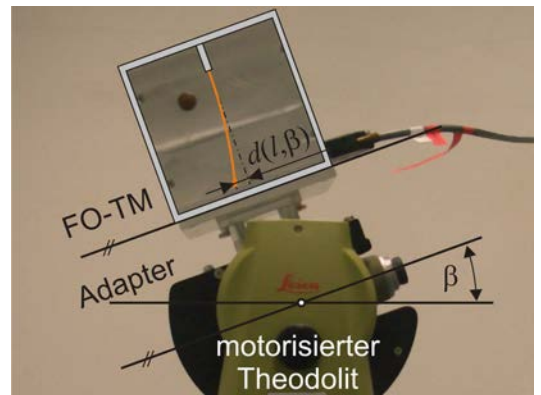
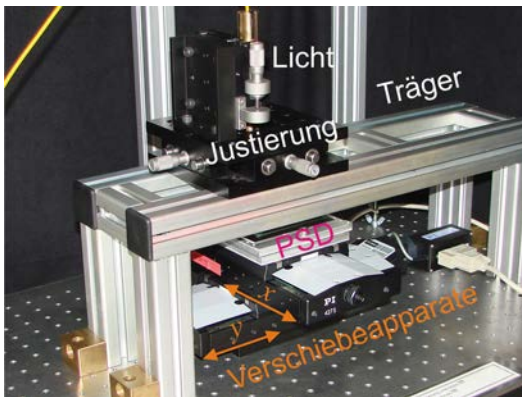


Abb. 4: links, Einrichtung zur Kalibrierung der PSD; rechts, Einrichtung zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Faserauslenkung  $d$  und Neigungswinkel  $\beta$

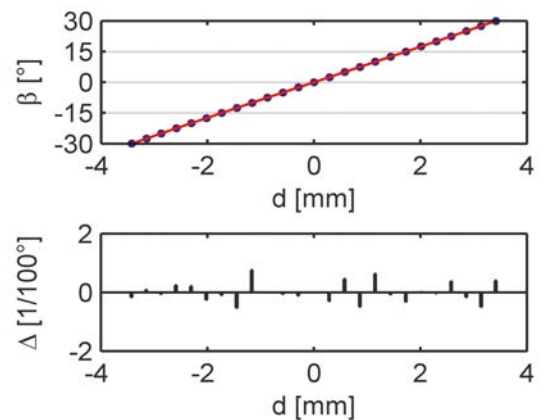
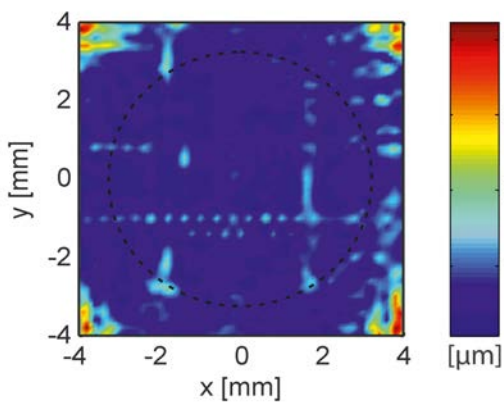


Abb. 5: links, Ergebnis der Positionskalibrierung; rechts, Beispiel einer Kalibrierfunktion Auslenkung  $d$  vs. Neigung  $\beta$

Kompensation der systematischen Effekte der PSD, siehe [20], wird eine Positionskalibrierung durchgeführt. Aus den kalibrierten Positionswerten wird durch eine Neigungskalibrierung der Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und Faserauslenkung bestimmt. Die beiden dafür entwickelten Kalibriereinrichtungen sind in Abb. 4 dargestellt.

Eine Einrichtung aus zwei orthogonal angeordneten Verschiebeapparaten (Physik Instrumente M-410.DG) dient der simultanen Erfassung von PSD- und Referenzpositionen. Die systematische Verzeichnung der PSD kann somit erfasst und korrigiert werden. Die Residuen überbestimmter bikubischer Transformationen, siehe z. B. [21], von PSD-Positionen ins System der Referenzwerte zeigt Abb. 5 (links; Raster:  $0.2 \times 0.2$  mm, jeweils 25 Identpunkte). Der strichlierte Kreis kennzeichnet die im statischen Fall auftretenden Auslenkungen bei  $\pm 30^\circ$ .

Die Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Faserauslenkung und Neigungswinkel erfolgt mit Hilfe eines adaptierten motorisierten Theodolits (z. B. Leica TM1100, vgl. Abb. 4, rechts). Ein Adapter ermöglicht die Aufnahme des FO-TM, ein Steuerungs- und Messprogramm ermöglicht den Kreisabgriff des Theodolits, die Neigung des Fernrohrs mit aufgesetztem Sensor sowie die Erfassung der auftretenden Faserauslenkungen. Einer Richtungsabhängigkeit des Betrags der Auslenkungen  $d$ , z. B. verursacht durch Asymmetrien der Einspannung, wird durch Verdrehung des FO-TM relativ zum Adapter in einem Lochkreisabstand von  $15^\circ$  und der Bestimmung mehrerer richtungsabhängiger Kalibrierfunktionen Rechnung getragen. Ein Beispiel einer geschätzten Kalibrierfunktion wird in Abb. 5 (rechts) gezeigt, wobei die Residuen  $\Delta$  alle kleiner als  $0.01^\circ$  sind.

## 4. Leistungsfähigkeit des Versuchsmusters

### 4.1 Statische Kenngrößen

An statischen Kenngrößen wurden für den FO-TM in [11] Wiederholbarkeit, Genauigkeit, Einschaltverhalten und Drift sowie Stabilität des Nullpunktes untersucht. Exemplarisch werden hier das Einschalt- bzw. Driftverhalten sowie Wiederholbarkeit und Genauigkeit gezeigt.

Das Einschaltverhalten wurde für das nicht aufgewärmte Versuchsmuster bei statischer Aufstellung bestimmt (Abb. 6, links). Referenzmessungen mit einem Nivel 20 in unmittelbarer Nähe zeigen keine Neigungsänderungen an. Unmittelbar nach dem Einschalten finden scheinbare

Neigungsänderungen von bis zu  $0.03^\circ$  statt, die jedoch nach einer Zeit von  $t_0 = 1.2$  h abklingen. Der hier mit  $t_0$  idente Zeitpunkt  $t_1$  zeigt das Ende zusammenhängender Ausreißer in Bezug auf ein lineares Modell (Drift) an. Die Größenordnung der Driften für beide Neigungskomponenten liegt im Bereich jener von kommerziell erhältlichen Sensoren, vgl. [7].

Die Wiederholbarkeit wurde mit Hilfe der Einrichtung für die Neigungskalibrierung (Abschnitt 3.2) durch ein quasi-statisches Experiment bestimmt, indem verschiedene Neigungen über den gesamten Arbeitsbereich insgesamt sechs Mal aus unterschiedlichen Richtungen angefahren und anschließend eine Wartezeit von 60 s eingehalten wurde. Ein eigens entwickeltes Modell zur Hysteresekompensation wurde aktiviert, das Ergebnis zeigt Abb. 6 (rechts). Die Differenzen  $\Delta$  zwischen Soll- und Ist-Neigungen sind kleiner als  $0.04^\circ$  (0.13 % FSO, vgl. [22]). Die dem Quantil-Quantil-Plot entnommene Standardabweichung (Präzision) des FO-TM beträgt  $0.015^\circ$ .

### 4.2 Dynamische Kenngrößen

Das dynamische Sensorverhalten kann gemäß [23] mit Hilfe von Prüffunktionen, z. B. der Sprungfunktion, ermittelt werden. Das Überschwingverhalten bei schnell durchgeführten Neigungen und die damit verbundenen Abklingzeiten, d. h., jene Zeitspanne, nach der sich das Ausgangssignal auf den Wert nach dem Sprung einstellt, sind von besonderer Bedeutung im kinematischen Betrieb. Verschiedene auf den Einheitssprung normierte Neigungsänderungen sind in Abb. 7 (links) dargestellt. Je nach Betrag und damit zeitlicher Dauer der Neigungsänderung (realisiert mit der Einrichtung zur Neigungskalibrierung) sind unterschiedliche Überschwingungsamplituden festzustellen. Das Symbol  $\tau$  kennzeichnet die zeitliche Verzögerung des Ausgangssignals aufgrund der Filterverzögerung (Gruppenlaufzeit). Die normierten Überschwingungsamplituden weisen eine exponentielle Abhängigkeit von der Dauer der Neigungsänderung  $\Delta t$  auf (Abb. 7, rechts). Nachteilig auf das Sensorsignal wirken sich Neigungsänderungen aus, die innerhalb kurzer Zeit ausgeführt werden. Wird diese Änderung langsam ausgeführt, treten deutlich geringere Überschwingungen auf, selbst wenn die Neigungsänderung große Beträge annimmt.

Nach einer plötzlichen Neigungsänderung ist die Kenntnis über jenen Zeitraum bedeutend, nach dem das Sensorsignal wieder den korrekten Neigungswert anzeigt, also das Überschwingen

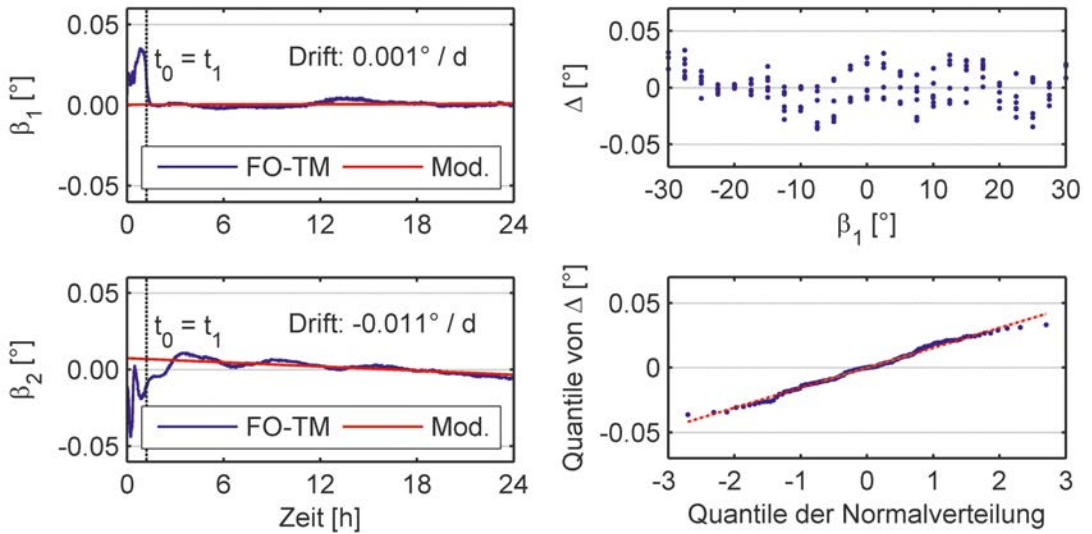


Abb. 6: links, Einschaltverhalten und Drift; rechts, Wiederholbarkeit und Präzision des Neigungswinkels (Komponente  $\beta_1$ )

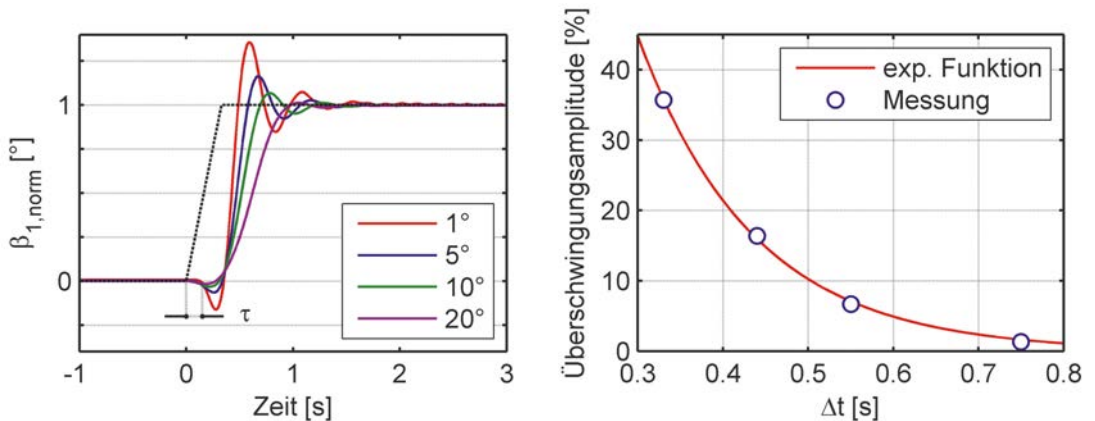


Abb. 7: links, normiertes Sensorsignal aus verschiedenen Neigungsänderungen (Legende); rechts, Abhängigkeit der Überschwingungsamplitude von der Dauer  $\Delta t$  der Neigungsänderung

abgeklungen ist. Diese Abklingzeiten betragen für den FO-TM ca. 1 s, wenn als zulässige Abweichung vom Sollwert 5 % der Sprunghöhe toleriert werden bzw. ca. 1.5 s für Abweichungen von max. 1 %. Details dazu sind in [11] dokumentiert.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Eignung eines faseroptischen SEs für die biaxiale Neigungsmessung gezeigt. Dafür wurde zunächst das Verhalten eines derartigen SEs modelliert, um die auftretenden Auslenkungen in Abhängigkeit von der Schwerkraft (statisch) und im Schwingungsfall (dynamisch) abschätzen zu können. Rahmenbedingungen für die Modellierung – abgeleitet aus

verschiedenen praktischen ingenieurgeodätischen Anwendungen – waren ein Arbeitsbereich von  $\pm 30^\circ$  und eine gewünschte Präzision von  $0.01^\circ$ . Für die Kalibrierung eines anschließend gebauten Versuchsmusters wurden zwei Einrichtungen entwickelt. Eine Präzision von  $0.015^\circ$  konnte über den gesamten Arbeitsbereich für (quasi-) statische Anwendungen mit der Einrichtung zur Neigungskalibrierung nachgewiesen werden.

Bei kinematischen Anwendungen verhindert die für die Elimination der Faserschwingungen erforderliche Filterung eine realistische Echtzeit-Schätzung des Neigungswinkels. Weiters können sich zusätzliche Störeinflüsse negativ auf die

Bestimmung der Neigungen auswirken. Um den Einfluss dieser limitierenden Faktoren zu reduzieren, wird eine Erweiterung des vorgestellten Sensorkonzepts angeregt. Diese Erweiterung könnte in der Hinzunahme eines zweiten anders abgestimmten SEs bestehen, dessen schnellere Reaktionsfähigkeit die Schätzung der Neigungswinkel im Rahmen einer gemeinsamen Auswertung verbessern könnte. An diesem erweiterten Konzept wird derzeit intensiv gearbeitet, Resultate werden in Kürze veröffentlicht werden.

### Danksagung

Der Vorstand des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz, **O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz K. Brunner**, auf dessen Ideen der faseroptische Neigungssensor zurückgeht, hat sämtliche Schritte der Entwicklung begleitet und damit maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen. Versuchsmuster und Kalibrieranlagen wurden von **Ing. Robert Presl** nach den von ihm erstellten Konstruktionszeichnungen in der institutseigenen Werkstätte gefertigt. Darüber hinaus beeinflussten seine Vorschläge und Diskussionsbeiträge die Arbeit mehrfach in eine positive Richtung. Die Abteilung Prototypenfertigung der **Fa. Anton Paar GmbH**, Graz, war beim Ablängen von Keramik-Ferrulen für die Massen der Sensorelemente behilflich.

### Referenzen

- [1] *E. Grillmayer, A. Wieser & F. K. Brunner (2000)*: Einrichtung der Stahlpylone der Donaubrücke bei Pöchlarn. In: K. Schnädelbach & M. Schilcher (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000*. Tagungsband des 13. Internationalen Ingenieurvermessungskurses. München, 13.-17. März 2000, S. 63-74
- [2] *C. Punz (2002)*: Entwicklung eines Messsystems zur Überwachung von Senkkästen während des Absenkvorganges. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
- [3] *R. Glaus, N. Lauener, U. Müller & M. Baumeler (2004)*: Der Gleismesswagen swiss trolley: Leistungsmerkmale und Anwendungen. In: H. Ingensand (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2004*. Tagungsband des 14. Internationalen Ingenieurvermessungskurses, Zürich, 15.-19. März 2004, S. 27-37
- [4] *W. Stempfhuber (2006)*: 1D and 3D Systems in Machine Automation. In: Tagungsband (CD) des 3. IAG bzw. 12. FIG Symposiums, Baden, 22.-24. Mai 2006
- [5] *W. Möhlenbrink (1984)*: Zur Entwicklung eines Meßverfahrens für die Bestimmung von Bauwerksverformungen aus Neigungs- und Beschleunigungsmessungen. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 307, München
- [6] *H. Ingensand (1985)*: Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmesssysteme für kontinuierliche Messungen. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 308, München
- [7] *H. Woschitz (2009)*: Test statischer Eigenschaften ausgewählter Neigungssensoren. In: *Technisches Messen*, Vol. 76, No. 10, S. 465-473

- [8] *K. Macheiner, H. Woschitz & F. K. Brunner (2009)*: Test dynamischer Eigenschaften ausgewählter Neigungssensoren. In: *Technisches Messen*, Vol. 76, No. 11, S. 509-516
- [9] *D. Gross, W. Hauger, W. Schnell & J. Schröder (2005)*: *Technische Mechanik 2. Elastostatik*. 8. Auflage. Springer, Berlin
- [10] *L. Meirovitch (2000)*: *Principles and Techniques of Vibrations*. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [11] *K. Macheiner (2010)*: Development of a fiber optic tiltmeter for static and kinematic applications. Dissertation, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
- [12] *H. Wenzel & D. Pichler (2005)*: *Ambient Vibration Monitoring*. John Wiley & Sons, Chichester
- [13] *W. Beitz & K.-H. Küttner (Hrsg.) (1981)*: *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 14. Auflage. Springer, Berlin
- [14] *D. Gross, W. Hauger, W. Schnell & J. Schröder (2004)*: *Technische Mechanik 3. Kinetik*. 8. Auflage. Springer, Berlin
- [15] *J. Hecht (2002)*: *Understanding Fiber Optics*. 4. Auflage. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [16] *J. Dolbow & M. Gosz (1996)*: Effect of out-plane properties of a polyimide film on the stress fields in micro-electronic structures. In: *Mechanics of Materials* 23 (1996), S. 311-321
- [17] *M. Hadjiprocopiou, G. T. Reed, L. Hollaway & A. M. Thorne (1996)*: Optimization of fibre coating properties for fibre optic smart structures. In: *Smart Materials and Structures* 5 (1996), S. 441-448
- [18] *A. V. Oppenheim & R. W. Schaffer (1999)*: *Discrete-Time Signal Processing*. 2. Auflage. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [19] *M. Morante, A. Cobo, J. M. López-Higuera & M. López-Amo (1996)*: New approach using a bare fiber optic cantilever beam as a low-frequency acceleration measuring element. In: *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 6, S. 1700-1706
- [20] *H. Woschitz, H. Hartinger & F. K. Brunner (2001)*: Entwicklung eines optischen Messsystems für die Bestimmung von hochfrequenten zweidimensionalen Positionsänderungen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 10/2001, S. 334-340
- [21] *K. Kraus (1993)*: *Photogrammetry*. Volume 1: Fundamentals and Standard Processes. 4. Auflage. Dümmler, Bonn
- [22] *W. Göpel, J. Hesse & J. N. Zemel (Hrsg.) (1989)*: *Sensors. A Comprehensive Survey*. Vol. 1: Fundamentals and General Aspects. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- [23] *P. Profos & T. Pfeifer (Hrsg.) (1994)*: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. 6. Auflage. Oldenbourg, München

### Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Klaus Macheiner, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz  
E-Mail: klaus.macheiner@tugraz.at



## Vom Punkt zur Fläche – vom Pixel zur Karte: Klassifikation der Landbedeckung mit der kNN-Methode



Tatjana Koukal, Christoph Adelman,  
Christoph Bauerhansl, Werner  
Schneider, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

### Kurzfassung

Die Nachfrage nach aktuellen, detailreichen Landbedeckungskarten ist groß. Die Fernerkundung kann einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung solcher Datensätze leisten. In diesem Artikel wird anhand von zwei aktuellen Beispielen demonstriert, wie die *k-nearest-neighbour* Methode in Kombination mit Satellitenbildern für die Landbedeckungskartierung eingesetzt werden kann. Im ersten Beispiel werden ausgehend von terrestrisch erhobenen Stichprobendaten der Österreichischen Waldinventur flächendeckende Waldkarten erzeugt. Im zweiten Beispiel wird gezeigt, wie aus stark generalisierten und teilweise veralteten Landbedeckungskarten (CORINE) aktualisierte und räumlich verfeinerte Karten mit Hilfe von multisaisonalen Satellitenbildern erstellt werden.

**Schlüsselwörter:** Fernerkundung, *k-nearest-neighbour* Methode, Landbedeckung, Waldinventur, CORINE

### Abstract

There is a great demand for up-to-date and detailed land cover maps. Remote sensing is a fundamental tool to make this kind of information available. In this article, it is shown how the *k-nearest-neighbour* method can be used in combination with satellite images for land cover mapping. Two recent studies are presented. In the first one, field data from the national forest inventory of Austria are used to map forest parameters. In the second study, it is shown how land cover maps that are rather out-dated and that have a high level of generalisation (CORINE) serve as valuable reference data to compile up-to-date land cover maps using multi-seasonal satellite images.

**Keywords:** remote sensing, *k-nearest-neighbour* method, land cover, forest inventory, CORINE

### 1. Einleitung

Der Bedarf an raumbezogenen Daten ist groß. Ein Beispiel ist etwa die steigende Nachfrage nach aktuellen, räumlich detaillierten Landbedeckungskarten.

Informationen über Flächenausdehnung und Flächenbilanzen von Landbedeckungsklassen liegen oft in Form von punktförmig erhobenen Stichprobendaten vor. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es um thematisch sehr detaillierte Landbedeckungsinformationen geht und das Erhebungsgebiet zu groß wäre, um mit vertretbarem Aufwand flächendeckende Informationen zu gewinnen. Oftmals macht es die Fragestellung auch gar nicht notwendig, flächenhafte Daten zu erheben. Möchte man etwa den Waldanteil einer Gemeinde oder eines Bezirks wissen und ist es nicht relevant, wo konkret sich die Waldflächen befinden, so ist eine Stichprobenerhebung das geeignete Mittel zum Zweck. Ein Energieversorger hingegen, der eine Trasse zu planen hat, ein Handnetzbetreiber, der geeignete Sendemast-Standorte auswählen möchte, oder ein Habitatmodellierer, der geeig-

nete Lebensräume für eine bestimmte Tierart ausweisen oder bewerten soll, ist auf flächig vorhandene Daten, also auf Informationen in Kartenform, angewiesen.

Aufgrund des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwands, mit dem die Datenerhebung verbunden ist, ergibt sich oft auch die Notwendigkeit, vorhandene Datensätze mehrfach zu nutzen. Dies kann dazu führen, dass mit Daten gearbeitet werden muss, die aufgrund der – ursprünglich zweckmäßigen – Erhebungsmethodik (z.B. Stichprobendesign, Generalisierung, etc.) nur bedingt für die jeweilige Fragestellung geeignet sind. Neben dem räumlichen Aspekt ist auch der zeitliche zu bedenken, denn oft ist die Aktualität vorhandener Datensätze für die zu bearbeitende Fragestellung unzureichend.

In diesem Beitrag wird anhand von zwei aktuellen Beispielen gezeigt, wie aus Stichprobendaten bzw. räumlich stark generalisierten Daten mit Hilfe von Fernerkundungsbildern räumlich höher auflösende Karten generiert werden können, die beispielsweise für räumliche Modellierungen benötigt werden. Die vorhandenen Datensätze



finden dabei als thematische Referenzinformation Eingang in eine automatisierte Auswertung von Satellitenbildern. Das Ergebnis sind Landbedeckungskarten mit einer den Satellitenbildern entsprechenden räumlichen Auflösung und Aktualität.

In beiden Beispielen kommt die *k-nearest-neighbour* Klassifikationsmethode zum Einsatz. Diese ist Verfahren zur räumlichen Interpolation [1] ähnlich (z.B. *nearest-neighbour* Interpolation beim Projizieren (Resampling) von Bildern, *inverse-distance-weighted* Interpolation). Es handelt sich beim Klassifikationsverfahren jedoch um eine Interpolation nicht im geographischen Raum, sondern im Merkmalsraum (z.B. im spektralen Merkmalsraum). Die Methode wurde in der Literatur bereits ausführlich beschrieben [2], [3], [4]. und ihre Anwendungsmöglichkeiten wurden in den verschiedensten Fachbereichen diskutiert. Im vorliegenden Artikel werden daher nur die Grundzüge der Methode erläutert. Der Schwerpunkt wird auf die Einsatzmöglichkeiten in der Fernerkundung im Bereich Landbedeckungskartierung (inklusive Waldkartierung) sowie auf eine spezielle methodische Erweiterung gelegt, die bei der Aktualisierung vorhandener Karten wichtig ist.

Im ersten Beispiel werden ausgehend von terrestrisch erhobenen Stichprobendaten der Österreichischen Waldinventur flächendeckende Waldkarten erzeugt (Kap. 3). Es handelt sich dabei um die Übertragung einer in Ländern mit einfacher Topographie und homogener Bestandesstruktur bewährten Methode [5], [6], [7] auf österreichische Verhältnisse, wo mit kleinräumiger Bestandesstruktur, teilweise steilem Gelände und besonders inhomogenen Schutzwäldern eine besonders schwierige Ausgangssituation gegeben ist.

Im zweiten Beispiel wird gezeigt, wie aus stark generalisierten und teilweise veralteten Landbedeckungskarten aktualisierte und räumlich verfeinerte Karten mit Hilfe von multi-saisonalen Satellitenbildern erstellt werden können (Kap. 4). In diesem Beispiel wird ein neues methodisches Element, nämlich die sogenannte Ausreißereliminierung, eingesetzt.

## 2. Methodik

### 2.1 *k-nearest-neighbour* Methode

Die *k-nearest-neighbour* (*kNN*) Methode (Abbildung 1) ist ein Verfahren, das zur überwachten Klassifizierung eingesetzt werden kann [8], [9], [3]. Darunter versteht man die Einteilung von

Objekten in Klassen aufgrund ihrer Merkmale, basierend auf Objekten mit bekannter Klassenzugehörigkeit (Referenzdaten). Im Falle der Bildklassifikation sind die Pixel des Bildes die Objekte und die Pixelwerte (z.B. Spektralsignatur) die Merkmale.

Zur Klassifikation eines Pixels  $(y, x)$  mit der Klassenzugehörigkeit  $y_i \in \{1, \dots, c\}$  und dem Merkmalsvektor  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$  werden aus dem Referenzdatensatz  $R = \{(y_i, x_i), i = 1, \dots, n_R\}$  bestehend aus  $n_R$  Referenzpixeln die  $k$  spektral ähnlichsten Pixel (also die  $k$  nächsten Nachbarn)  $(y_{(1)}, x_{(1)}), \dots, (y_{(k)}, x_{(k)})$  mit Hilfe einer Distanzfunktion  $d(x, x_i)$  ausgewählt:

$$d(x, x_{(1)}) \leq d(x, x_{(2)}) \leq \dots \leq d(x, x_{(k)}) \quad (1)$$

wobei  $d(x, x_{(1)})$  das Minimum der Distanzen zu allen Pixeln des Referenzdatensatzes ist. Als Distanzmaß wird hier die Euklidische Distanz verwendet. Die Merkmale (Pixelwerte in den einzelnen Kanälen) können mit unterschiedlichen Gewichten  $w_p$  versehen werden.

$$d(x, x_i) = \sqrt{\sum_{p=1}^P w_p^2 (x_p - x_{ip})^2} \quad (2)$$

Für  $k$  kann jeder ganzzahlige Wert zwischen 1 und der Anzahl der verfügbaren Referenzpixel  $n_R$  gewählt werden. Üblicherweise liegt  $k$  im Bereich von 1 bis etwa 10, jedenfalls aber im Bereich  $1 < k \ll n_{\min}$ , wobei  $n_{\min}$  die Anzahl der Referenzpixel der im Referenzdatensatz am schwächsten vertretenen Klasse ist [3].

Von den  $k$  nächsten Nachbarn mögen  $k_m$  Pixel der Klasse  $m$  angehören, mit

$$\sum_{m=1}^c k_m = k \quad (3)$$

Das zu klassifizierende Pixel wird jener Klasse  $l$  zugewiesen, für die gilt

$$k_l = \max_m (k_m) \quad (4)$$

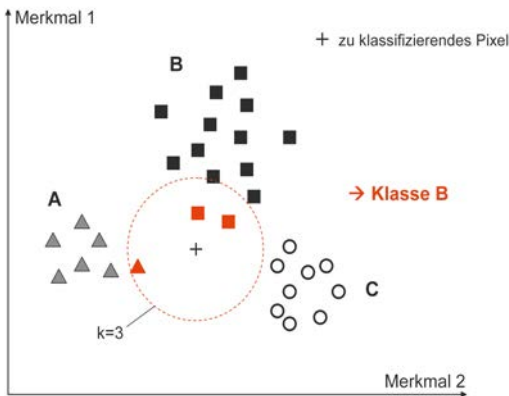
Die nächsten Nachbarn können bei der Bildung des Modalwerts aber auch mit einem distanzabhängigen Gewicht berücksichtigt werden [10], wobei das Gewicht mit zunehmender Distanz abnimmt, z.B. kann das Gewicht als Kehrwert der Distanz berechnet werden. Die Gewichte der nächsten Nachbarn werden auf 1 normiert. Wenn  $g_m$  die Summe der normierten Gewichte aller Referenzpixel unter den  $k$  nächsten Nachbarn bezeichnet, die der Klasse  $m$  angehören, dann wird das zu klassifizierende Pixel jener Klasse  $l$  zugewiesen, für die gilt

$$g_i = \max_m(g_{im}) \quad (5)$$

Die *kNN*-Methode kann auch zur Schätzung von kontinuierlichen Zielvariablen ( $Y$ ) verwendet werden. Anstatt des Modalwertes wird der (gewichtete) Mittelwert der nächsten Nachbarn berechnet:

$$Y = \sum_{i=1}^k g_i \cdot Y_i \quad (6)$$

Die Suche nach ähnlichen Referenzpixeln kann im geographischen Raum, also bezüglich geographischer horizontaler und vertikaler Entfernung vom zu klassifizierenden Pixel, eingeschränkt werden (horizontaler und vertikaler Suchradius).



**Abb. 1:** *k*-nearest-neighbour Methode (2-dimensionaler Merkmalsraum, 3 Klassen – A, B und C,  $k=3$ ). Das zu klassifizierende Pixel wird der Klasse B zugeschlagen.

Im Gegensatz zu Klassifizierungsalgorithmen wie *Minimum-Distance* oder *Maximum-Likelihood* zählt das *kNN*-Verfahren zu den nicht-parametrischen Verfahren. Das bedeutet, dass bei der Klassifikation keine Verteilungsparameter wie Mittelwert oder Standardabweichung der Pixelwerte verwendet werden, die aus den Referenzdaten geschätzt werden. Dies hat den Vorteil, dass keine Bedingungen hinsichtlich der Verteilung der Spektralwerte (z.B. Normalverteilung) erfüllt sein müssen. So sind z.B. auch mehrgipfelige Verteilungen möglich. Die besondere Struktur mancher Landbedeckungsklassen (inkl. Waldklassen) bringt es mit sich, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Spektralsignaturen analytisch nicht beschreibbar sind. Daher ist die *kNN*-Methode als nicht-parametrische Methode für derartige Anwendungen besonders geeignet. Es kann jedoch nur dann ein gutes

Klassifizierungsergebnis erzielt werden, wenn ein großer Referenzdatensatz zur Verfügung steht, der die Verteilungen gut repräsentiert.

Ein weiterer Vorteil des *kNN*-Algorithmus besteht darin, dass er nicht nur zur Klassifikation, sondern auch zur Schätzung von kontinuierlichen Zielvariablen (z.B. Holzvorrat, Abbildung 6) verwendet werden kann. Außerdem können mehrere Zielvariable gleichzeitig kartiert, also mehrere Kartenlayer simultan erzeugt werden, wobei die Kovarianzstruktur der Zielvariablen erhalten bleibt [5]. Dies war besonders für die in Kap. 3 vorgestellte Anwendung ein entscheidendes Kriterium für die Verwendung der *kNN*-Methode.

## 2.2 Kreuzvalidierung

Mit Hilfe der Kreuzvalidierung [11] werden die Parameter des *kNN*-Algorithmus ( $k$ , Gewichtung der Spektralkanäle, Funktion zur Gewichtung der Nachbarn, Suchradien) vor der Erstellung der Karte optimiert (Kap. 2.3). Die Methode wird außerdem dazu verwendet, die Qualität des Referenzdatensatzes zu überprüfen (Kap. 2.4) und die Klassifikationsgenauigkeit abzuschätzen.

Die Kreuzvalidierung ist ein Verfahren zur Schätzung der Güte von Algorithmen und Modellen. Das Grundprinzip besteht darin, dass der aus  $n_R$  Elementen bestehende Referenzdatensatz in  $m$  Teilmengen gleicher Größe aufgeteilt wird und 1 Teilmenge zum Testen und die restlichen  $m - 1$  Teilmengen zum Training dienen. Es erfolgen  $m$  Durchläufe, bis jede Teilmenge einmal zum Testen verwendet wurde. Je nach Teilung des Referenzdatensatzes werden verschiedene Formen der Kreuzvalidierung unterschieden. Eine davon ist die hier verwendete *Leave-one-out* Kreuzvalidierung, bei welcher der Referenzdatensatz in  $n_R$  Teilmengen aufgeteilt wird. Konkret wird für ein Referenzpixel nach dem anderen (Testkandidat) die Klassenzugehörigkeit als eine Unbekannte behandelt und mit Hilfe der restlichen Referenzpixel (Trainingsmenge) durch Klassifizierung ermittelt. Die Klasse, welche das Pixel auf diese Weise erhält, wird mit der tatsächlichen (Soll-)Klasse verglichen. Das Ergebnis der Kreuzvalidierung kann in Form einer Fehlermatrix übersichtlich dargestellt werden, die Aufschluss darüber gibt, bei welchen Klassen Verwechslungen auftreten. Außerdem können Fehlermaße berechnet werden, um mehrere Klassifizierungsdurchläufe (etwa mit unterschiedlichen *kNN*-Parametern) vergleichen zu können.

### 2.3 Wahl der $kNN$ -Parameter

Die Wahl der  $kNN$ -Parameter ( $k$ , Gewichtung der Spektralkanäle, Funktion zur Gewichtung der Nachbarn, Suchradien) erfolgt immer in Hinblick auf eine bestimmte Größe, die optimiert werden soll. Bei einer Klassifikation kann das beispielsweise entweder die Gesamtgenauigkeit oder die Genauigkeit einer bestimmten Klasse sein. Die zu optimierende Größe wird mit Hilfe der Kreuzvalidierung (Kap. 2.2) für verschiedene Parameterwerte (z.B.  $k$ -Werte) geschätzt. Jene Parameterwerte, für welche diese Größe ihr Optimum erreicht, werden schließlich für die Kartierung verwendet.

Die Optimierung der  $kNN$ -Parameter, insbesondere der Gewichte der Spektralkanäle oder anderer Merkmale, kann mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus automatisiert werden. Beispiele sind das Downhill-Simplex-Verfahren [12], genetische Algorithmen [13] oder Tabu-Suche [14]. Nach den bisherigen Erfahrungen hat die Gewichtung der Spektralkanäle bei Verwendung von nur wenigen Spektralkanälen (etwa 3 bis 6) nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis, weshalb bei den hier diskutierten Anwendungen auf die Verwendung eines derartigen Optimierungsalgorithmus verzichtet wurde.

Einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat die Wahl von  $k$ . Der geeignete  $k$ -Wert hängt maßgeblich von der Verteilung der Klassen im Merkmalsraum sowie von der Zusammensetzung des Referenzdatensatzes ab. Er muss daher für jeden Referenzdatensatz separat ermittelt werden. Je schlechter die Trennbarkeit der zu unterscheidenden Klassen ist, desto größer sollte  $k$  sein. Außerdem ist die Anzahl der Referenzpixel pro Klasse ein entscheidender Faktor. Klassen, die im Referenzdatensatz schwach vertreten sind, werden durch ein großes  $k$  in der resultierenden Karte unterrepräsentiert sein. Nachteilige Auswirkungen großer  $k$ -Werte können durch die in Kap. 2.1 beschriebene Gewichtung der nächsten Nachbarn vermindert werden. Je größer  $k$  ist, desto eher können Rückschlüsse gezogen werden, ob die Klassifikation eindeutig ist oder nicht.

Je kleiner  $k$  ist, desto weniger robust ist die Klassifikation gegenüber Fehlern im Referenzdatensatz (Ausreißer).

### 2.4 Erkennung und Eliminierung von Ausreißern

Als Ausreißer werden hier Referenzpixel bezeichnet, deren spektrale Signatur im Widerspruch zum Klassenlabel steht. Ursachen dafür kön-

nen z.B. Veränderungen der Landbedeckung zwischen Erhebung der Referenzdaten und Bildaufnahme, fehlerhafte Verortung der Referenzpunkte oder Mischpixel sein. Fehlerhafte Referenzpixel führen zu Fehlklassifikationen und müssen daher aus dem Referenzdatensatz eliminiert werden.

Man unterscheidet statistisch-parametrische und nicht-parametrische Methoden zur Erkennung von Ausreißern [15]. Wenn die Spektralsignaturen von Landbedeckungsklassen, wie in Kap. 2.1 beschrieben, nicht normalverteilt sind oder einer sonstigen analytisch beschreibbaren Verteilung entsprechen, sind parametrische Methoden zur Erkennung von Ausreißern ungeeignet. Es wurde daher eine nicht-parametrische Methode entwickelt, die sich das Grundprinzip des  $kNN$ -Algorithmus in Kombination mit der Kreuzvalidierung zu Nutze macht (Abbildung 2).

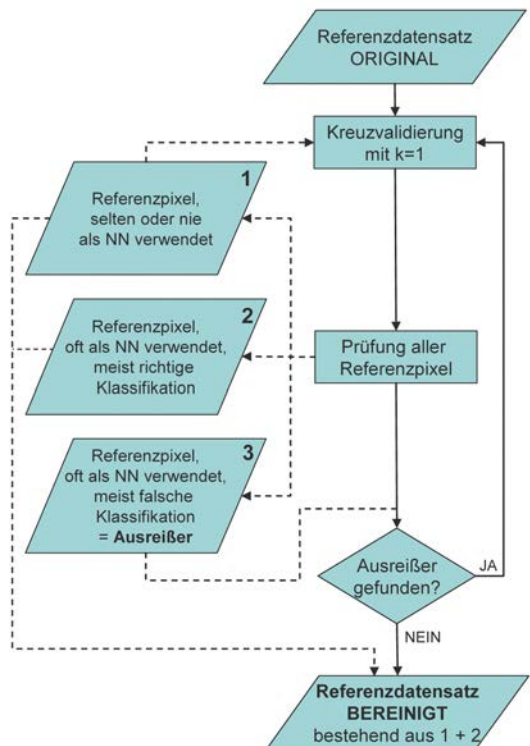


Abb. 2: Ablaufdiagramm zur Eliminierung fehlerhafter Referenzpixel

Fehlklassifikationen aufgrund von Ausreißern treten besonders bei kleinen  $k$ -Werten auf. Die Ausreißersuche ist daher mit  $k = 1$  am effizientesten. Für jedes Referenzpixel wird der nächste Nachbar (NN) ermittelt und es wird festgestellt, ob

das Referenzpixel mit Hilfe seines nächsten Nachbarn richtig klassifiziert wurde oder nicht. Für jedes Referenzpixel wird anschließend aufsummiert, wie oft es als nächster Nachbar ausgewählt wurde und wie oft es davon zu einer falschen Klassifikation geführt hat. Anschließend werden jene Referenzpixel eliminiert, die häufig als nächster Nachbar ausgewählt wurden und in einer überwiegenden Zahl der Fälle zu einer falschen Klassifikation geführt haben. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis keine Ausreißer mehr gefunden werden, wobei sich die erneute Ausreißersuche nur auf jene Referenzpixel beschränkt, die im vorangegangenen Durchgang nur selten oder gar nicht als nächste Nachbarn ausgewählt wurden. Der bereinigte Referenzdatensatz setzt sich schließlich aus jenen Referenzpixeln zusammen, die selten oder nie als nächste Nachbarn ausgewählt wurden (Abbildung 2, Gruppe 1) bzw. die oft als nächste Nachbarn ausgewählt wurden und meist zu einer richtigen Klassifikation geführt haben (Abbildung 2, Gruppe 2). Die Richtigkeit der Referenzpixel der Gruppe 1 wird im Zuge der Ausreißersuche nicht bestätigt. Um die Repräsentativität des Referenzdatensatzes jedoch nicht zu gefährden, verbleiben diese Referenzpixel im Referenzdatensatz und es werden nur eindeutige Ausreißer eliminiert. Voraussetzung für eine erfolgreiche Erkennung von Ausreißern mit Hilfe der beschriebenen Methode ist die Dominanz korrekter Referenzpixel.

### 3. Waldkarte basierend auf Daten der Österreichischen Waldinventur

Durch Kombination von punktförmig vorliegenden Daten der Österreichischen Waldinventur (Kap. 3.1) und Satellitenbildern (Kap. 3.2) können forstlich relevante Informationen flächendeckend für ganz Österreich berechnet und in Kartenform dargestellt werden. Die vorgestellte Methode wurde am Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (IVFL) der BOKU Wien im Rahmen eines vom Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanzierten Projektes in Zusammenarbeit mit dem Institut für Waldinventur des BFW<sup>1</sup> entwickelt [16]. Die Methode wird nun am BFW operationell umgesetzt. Derzeit sind für das gesamte österreichische Bundesgebiet eine Wald-/Nichtwaldkarte, eine Bestandestypenkarte (Nadelwald, Laubwald, Mischwald, Schlagflächen) sowie eine Karte über den Holzvorrat pro Hektar verfügbar [17]. Im Folgenden werden nach einer kurzen Vorstellung der nationalen Waldinventur

Österreichs die Erstellung der Karten beschrieben und ausgewählte Ergebnisse gezeigt.

#### 3.1 Österreichische Waldinventur

Die Österreichische Waldinventur (ÖWI) basiert auf einem terrestrischen Stichprobenverfahren mit systematischer Verteilung der Erhebungseinheiten. Die Erhebungseinheiten sind in einem Rasterabstand von 3,89 km gleichmäßig über das Bundesgebiet verteilt. Jede Erhebungseinheit besteht aus einem Cluster von 4 quadratisch im Abstand von 200 m angeordneten Probeflächen (Trakt; Abbildung 4). Es handelt sich um permanente Probeflächen (Dauerprobeflächen). Seit 2000 werden die Koordinaten der Probeflächen mit differentiellem GPS erfasst.

Im Rahmen der ÖWI werden umfangreiche und detaillierte Informationen über den österreichischen Wald erhoben. Auf jeder Probefläche, die auf Wald fällt, das sind für ganz Österreich in Summe ca. 10.400, werden zahlreiche forstliche Merkmale wie Alters- und Wuchsklasse, Baumartenanteile, biometrische Daten, wie Baumhöhen und Brusthöhendurchmesser, Stammzahl, Schlussgrad etc. ermittelt. [18]

Das Stichprobendesign der ÖWI ist so konzipiert, dass daraus statistisch abgesicherte Daten bundesweit, für die einzelnen Bundesländer und in eingeschränktem Maße auch für Bezirke (Bezirksforstinspektionen) geschätzt werden können. Eine Darstellung der Ergebnisse in Kartenform ist jedoch nicht bzw. nur in kleinstem Maßstab (Überblick über ganz Österreich) möglich.

#### 3.2 Bilddaten

Als Bilddaten werden Aufnahmen des Satelliten LANDSAT mit einer Pixelgröße von 30 m verwendet. Ausschlaggebend für die Wahl dieser Daten waren die vergleichsweise geringen Kosten, die verfügbaren Spektralkanäle (inkl. mittleres Infrarot!) und die pro Szene abgedeckte Fläche, wodurch eine große Anzahl von Referenzpunkten (Probeflächen) pro Bild verfügbar wird.

Die georeferenzierten Bilder müssen vor der Klassifizierung radiometrisch-topographisch korrigiert werden, um Fehlklassifikationen in Bereichen mit ausgeprägtem Geländere relief aufgrund von Beleuchtungsunterschieden in verschiedenen geneigtem und exponiertem Gelände zu vermeiden. Dazu ist ein digitales Geländemodell erforderlich (z.B. SRTM, DGM des BEV). Mit Hilfe des Sonnenstandes zum Zeitpunkt der Aufnahme und der Geländeform werden die Pixelwerte des

1) Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (<http://bfw.ac.at/>)



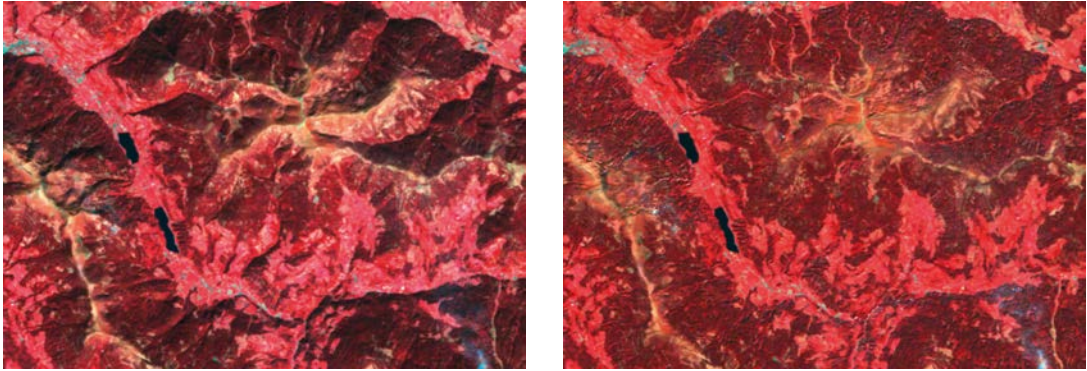


Abb. 3: Ergebnis der radiometrisch-topographischen Korrektur (Ausschnitt: Wöllaner Nock; Kärnten)

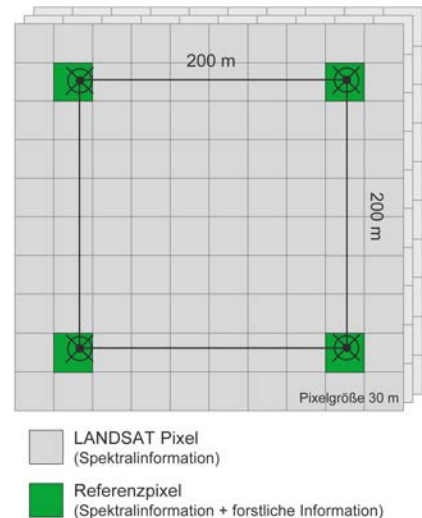
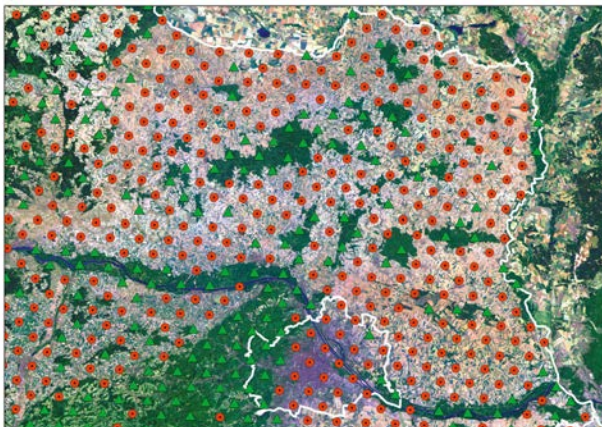


Abb. 4: LANDSAT-Bild überlagert mit den Stichprobepunkten (Trakte) der Österreichischen Waldinventur (links: Ausschnitt Weinviertel, grün: Wald, rot: Nichtwald; rechts: schematische Darstellung eines Trakts)

Satellitenbildes auf die Beleuchtungssituation in der Ebene normalisiert. Da sich die Auswertung der Bilddaten auf die Klasse Wald konzentriert, wird die Sun-Canopy-Sensor (SCS) Methode verwendet, die speziell für bewaldete Flächen entwickelt wurde [19], [20]. Nach erfolgreicher Korrektur erscheint das Gelände vollkommen flach also ohne Relief (Abbildung 3).

### 3.3 Verknüpfung der Inventur- und Bilddaten

Durch Überlagerung von Satellitenbild und ÖWI-Stichprobendaten (Abbildung 4) wird der Referenzdatensatz für die Klassifizierung erstellt. Dieser beinhaltet für jede Probefläche sowohl die Spektralinformationen aus dem Satellitenbild als auch die terrestrisch erhobenen Waldinformationen, wie beispielsweise Baumartenanteile oder Holzvorrat pro Hektar. Der so gewonnene Referenzdatensatz muss auf fehlerhafte Daten-

sätze überprüft werden. Beeinträchtigungen durch Wolken, fehlerhafte GPS-Koordinaten und Veränderungen der Bestockung (Nutzungen, Windwurf, etc.) führen dazu, dass Spektralinformation und Waldinformation einander nicht entsprechen. Derartige Referenzpunkte würden zu Fehlklassifikationen führen und müssen daher eliminiert werden. Dies geschieht mit der in Kap. 2.4 beschriebenen Methode der Ausreißer-Eliminierung.

### 3.4 Klassifizierung

Die Klassifizierung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird durch Verwendung aller Probeflächen (Wald und Nichtwald) eine Wald-/Nichtwaldkarte erstellt. Anschließend werden für alle in dieser Karte als Wald ausgewiesenen Pixel die gewünschten Waldparameter ermittelt. Bei bei-



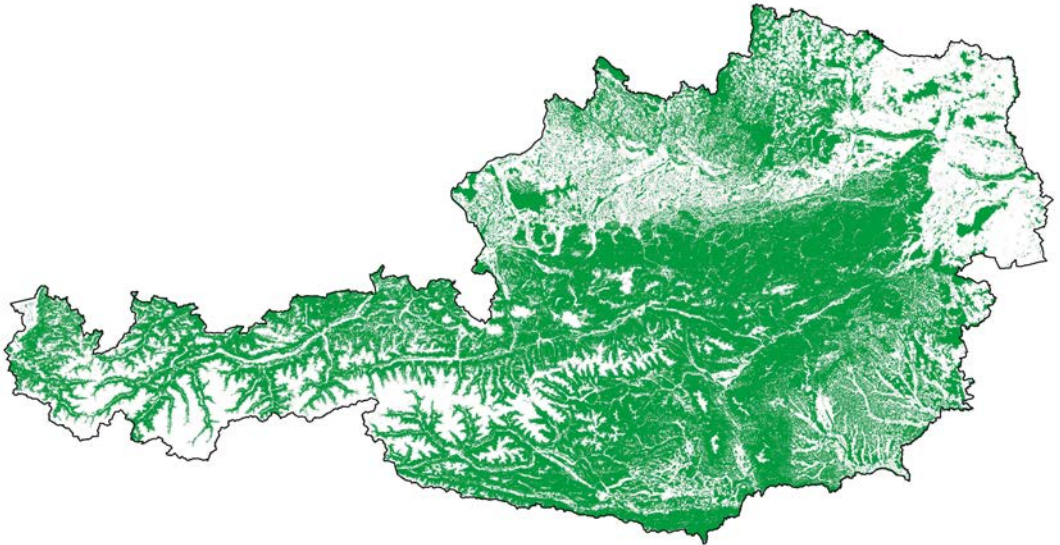


Abb. 5: Wald-/Nichtwaldkarte für Österreich

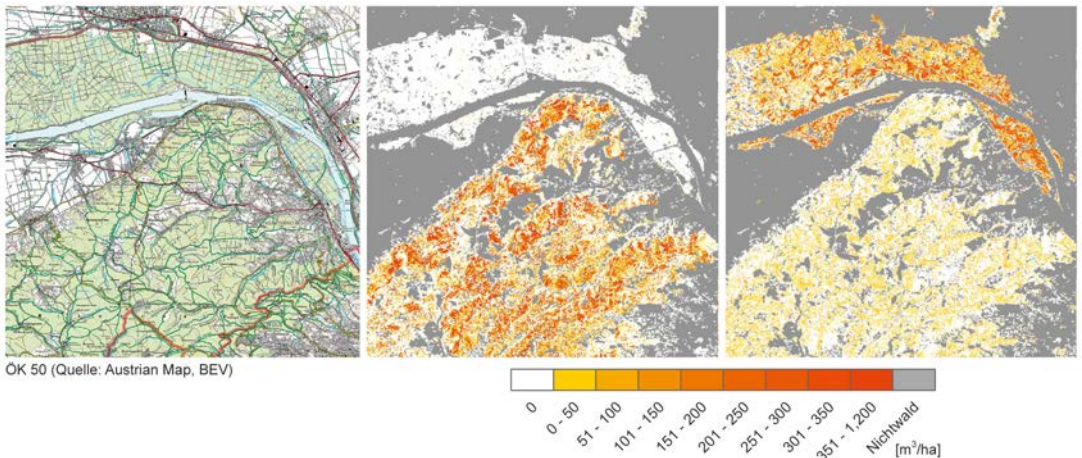


Abb. 6: Schätzung des Holzvorrats am Beispiel von Buche (Mitte) und Weichlaubhölzern (Pappel, Weide, Erle, ...) im Wienerwald und in den Donauauen bei Klosterneuburg

den Schritten kommt die *kNN*-Methode (Kap. 2) zur Anwendung.

### 3.5 Ergebnisse

Für jedes forstliche Merkmal wird ein eigener Kartenlayer erzeugt (Abbildungen 5 und 6). Die erstellten Karten können außer zur Visualisierung auch als Ausgangsdatensätze beispielsweise in Modellierungen verwendet werden. Sie sind außerdem Basis für die Berechnung forstlicher Kenngrößen für verschiedene Verwaltungseinheiten oder andere frei wählbare Befundeinheiten. Gegenwärtig wurden diese Kenngrößen vom BFW für Bundesländer, Bezirksforstinspek-

tionen (BFI) und Gemeinden berechnet. Im Gegensatz zu den statistischen Auswertungen, die rein auf den Probestflächen beruhen, ist nun die erzielbare Genauigkeit nicht von der Anzahl der Probestflächen abhängig, die innerhalb der jeweiligen Befundeinheit liegen. Dadurch kann auch für Befundeinheiten, in denen sich für eine rein statistische Auswertung zu wenige Probestflächen befinden, Ergebnisse mit zufriedenstellender Genauigkeit erzielt werden (kleine BFIs, Gemeinden, etc.). Nach einer Untersuchung, die für BFIs in Niederösterreich durchgeführt wurde, konnte beispielsweise der Fehler bei der Schätzung des

Holzvorrates pro Hektar im Mittel über 13 BFIs von  $\pm 9\%$  (herkömmliche ÖWI-Auswertung) auf  $\pm 4\%$  (*kNN*-Auswertung) reduziert werden.

#### 4 Aktualisierte Landbedeckungskarte basierend auf CORINE Land Cover

##### 4.1 CORINE<sup>2</sup> Land Cover

*CORINE Land Cover* (CLC) ist ein Programm für die EU-weite und teilweise darüber hinausgehende Erhebung der Bodenbedeckung bzw. Landnutzung. Es handelt sich um ein Teilprojekt eines umfangreichen, im Jahr 1985 von der Kommission der Europäischen Union gestarteten Programms zur Erfassung umweltrelevanter Daten. Die Daten werden nach einheitlichen Richtlinien erhoben und sollen der EU als Hilfsmittel bei umweltrelevanten Entscheidungen und Maßnahmen dienen. Der CLC-Datensatz ist für nicht kommerzielle Zwecke kostenlos erhältlich.

Die Bodenbedeckung bzw. Landnutzung wird durch visuelle Interpretation von LANDSAT-Bildern erfasst. Zur Unterstützung der visuellen Satellitenbild-Interpretation werden topographische Karten und Luftbilder zur Hilfe genommen. Die kleinste Erhebungseinheit ist 25 Hektar, die Mindestbreite bei länglichen Elementen beträgt 100 m. Der CLC-Datensatz wird regelmäßig aktualisiert. Dabei werden auch Änderungen der Landbedeckung erfasst, und zwar genauer mit einer kleinsten Erhebungseinheit von 5 ha (bei gleichbleibender Mindestbreite von 100 m). [21]

In Österreich ist das Umweltbundesamt für die Umsetzung des CLC-Projekts zuständig. Die Ersterfassung erfolgte in den 1990er Jahren (CLC90). Die erste Aktualisierung wurde im Jahr 2004 abgeschlossen (CLC2000). Beide Datensätze sind öffentlich zugänglich. Die zweite, im Jahr 2008 fertig gestellte Wiederholungsaufnahme ist noch nicht veröffentlicht. [22] Von den insgesamt 44 unterschiedenen Klassen der CLC Nomenklatur sind in Österreich 28 relevant. Aufgrund der kleinsten Erhebungseinheit von 25 Hektar und einem Erfassungsmaßstab von 1:100.000 handelt es sich bei der CLC-Karte um eine stark generalisierte Darstellung der naturräumlichen Gegebenheiten. Dies stellt für kleinmaßstäbliche bzw. EU-weite Betrachtungen und Fragestellungen kein Problem dar. Für viele nationale oder gar regionale Anwendungen kann der Datensatz jedoch nur bedingt eingesetzt werden.

##### 4.2 Aktualisierung und räumliche Verfeinerung

Am IVFL wird in einem aktuellen Projekt untersucht, inwieweit basierend auf dem bestehenden Datensatz durch Klassifizierung aktueller Satellitenbilder ein aktueller, räumlich verfeinerter Datensatz erstellt werden kann. Die Grundidee dabei ist, die für die Klassifizierung erforderlichen Referenzdaten aus dem vorhandenen Datensatz zu gewinnen. Aufgrund von Veränderungen der Landbedeckung und infolge der Generalisierung enthält der Referenzdatensatz zunächst fehlerhafte Elemente. Diese weisen Inkonsistenzen zwischen der Spektralinformation des Satellitenbildes und der Landbedeckungsinformation auf und müssen durch ein geeignetes Verfahren gefunden und eliminiert werden. Hier kommt ein besonderes Potenzial der *kNN*-Methode zur Ausreißer-Eliminierung zum Einsatz (Kap. 4.4). Die verwendeten Daten, die Arbeitsschritte sowie erste Ergebnisse werden in den Kap. 4.3 bis 4.7 präsentiert.

##### 4.3 Bilddaten

Es werden Aufnahmen des Satelliten ASTER verwendet. Die Pixelgröße beträgt 15 m und es stehen die Spektralkanäle grün, rot und nahes Infrarot zur Verfügung. Die Kanäle des mittleren Infrarots sind aufgrund eines technischen Defekts am Sensor zum Zeitpunkt der Aufnahmen nicht verwendbar. Das Untersuchungsgebiet umfasst zwei ASTER-Szenen im Grenzgebiet Niederösterreich/Oberösterreich. Um vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen genauer differenzieren zu können (Grünland/Acker), wird ein multi-saisonaler Ansatz verfolgt. Pro Szene stehen je eine Aufnahme von April 2008 und August 2008 zur Verfügung.

Die Bilder werden bereits georeferenziert geliefert. Um die relative Lagegenauigkeit der beiden Zeitpunkte zu optimieren, müssen die beiden Bilder einer Szene jeweils relativ zueinander so verschoben werden, dass idente Objekte in beiden Bildern möglichst zur Deckung kommen. Eine radiometrisch-topographische Korrektur ist nicht erforderlich, da das Untersuchungsgebiet kein stark ausgeprägtes Geländereief aufweist.

##### 4.4 Erzeugung des Referenzdatensatzes

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Referenzdaten für eine Klassifizierung zu generieren. Übliche Wege sind die visuelle Interpretation von Bilddaten oder Erhebungen direkt im Gelände. Beides ist für größere Untersuchungsgebiete mit

einem erheblichen Aufwand verbunden. Eine mögliche Alternative ist die Verwendung eines bestehenden Landbedeckungsdatensatzes, um daraus Referenzinformationen zu gewinnen. Auch wenn dieser Datensatz nicht aktuell ist, kann davon ausgegangen werden, dass Fehler aufgrund zeitlicher Veränderungen nur einen geringen Prozentsatz der Fläche betreffen. Bevor ein derartiger Referenzdatensatz in der Klassifizierung eingesetzt werden kann, müssen diese fehlerhaften Elemente, sogenannte Ausreißer, beseitigt werden.

Für die zufällige Stichprobenauswahl wird ein Punktraster mit einem Punktabstand von 500 m verwendet. An diesen Punkten werden sowohl die Landbedeckung bzw. Landnutzung aus dem CLC2000-Datensatz als auch die spektrale Information aus den ASTER-Bildern ausgelesen. Neben zeitlichen Veränderungen führt auch die Generalisierung des CLC2000-Datensatzes zu Fehlern im Referenzdatensatz. Fehlerhafte Referenzpunkte werden mit der in Kap. 2.4 beschriebenen Methode der Ausreißer-Eliminierung ermittelt und eliminiert. Um zu testen, wie effizient mit dieser Methode ein Referenzdatensatz bereinigt werden kann, wurden absichtlich 120 fehlerhafte Referenzpunkte eingefügt. Über 90 % dieser Referenzpunkte konnten als Fehler im Datensatz erkannt werden.

#### 4.5 Adaptierung der CORINE Nomenklatur

Das bei CLC verwendete Klassenschema (CORINE Nomenklatur) muss für die weitere Verwendung teilweise adaptiert werden. Dies hat folgende Gründe:

Im Untersuchungsgebiet sind 20 der 28 in Österreich vorkommenden Klassen vertreten. Es handelt sich dabei sowohl um Landbedeckungs- als auch um Landnutzungsklassen. Unter Landbedeckung wird die Bedeckung der Erdoberfläche verstanden, z.B. Vegetation, Gewässer, Felsen. Bei der Landnutzung wird zusätzlich die Funktion der Landbedeckung berücksichtigt, z.B. kann eine Wiese als Weideland oder als Golfplatz genutzt werden. Bei einer pixelweisen, automatisierten Auswertung von Fernerkundungsdaten, wie sie in diesem Projekt durchgeführt wird, kann nur die Landbedeckung, nicht aber die Landnutzung erfasst werden. Ein weiterer Grund, der eine Adaptierung erfordert, besteht darin, dass manche eher nutzungsorientierte CLC-Klassen mehrere Landbedeckungsklassen umfassen. Die Ausweisung solcher Flächen ist bei visueller, segmentweiser Auswertung kein Problem, kann

aber bei automatischer Klassifizierung nicht realisiert werden.

Es werden daher Klassen, die durch ein kombiniertes Vorkommen mehrerer Landbedeckungsklassen definiert sind, weggelassen. Sie werden durch die einzelnen Landbedeckungsklassen der CLC-Nomenklatur abgedeckt (z.B. Flughafen – Wiese und versiegelte Fläche; Mischwald – Laubwald und Nadelwald). Außerdem werden Klassen zusammengeführt, die bei einer pixelweisen Betrachtung nicht trennbar sind (z.B. Flächen durchgängig städtischer Prägung und Flächen nicht durchgängig städtischer Prägung). Die Anzahl der im Untersuchungsgebiet relevanten Klassen reduziert sich auf diese Weise von 20 auf 9 Klassen (Tabelle 1).

#### 4.6 Kontrolle

Um die Qualität des Klassifizierungsergebnisses beurteilen zu können, wird ein vom Referenzdatensatz unabhängiger Kontrolldatensatz generiert. Dazu werden über das Untersuchungsgebiet unter Verwendung eines Punktrasters Punkte gelegt, an denen die tatsächlich vorkommende Landbedeckung nach dem modifizierten Klassenschema durch visuelle Interpretation der ASTER-Bilder und unter Zuhilfenahme von Orthofotos bestimmt wird (in Summe ca. 700 Punkte). An diesen Punkten wird anschließend das Ergebnis der *k*NN-Klassifizierung mit der visuell bestimmten Landbedeckungsklasse verglichen und daraus die Genauigkeit der erstellten Landbedeckungskarte abgeschätzt.

Klasse	Kontrollpunkte
Versiegelte Flächen	189
Abbauflächen	26
Nicht bewässertes Ackerland	82
Wiesen und Weiden	106
Laubwald	86
Nadelwald	130
Sümpfe	12
Gewässerläufe	48
Wasserflächen	52
<b>Gesamt</b>	<b>731</b>

*Tab. 1: Unterschiedene Landbedeckungsklassen (hergeleitet vom CORINE Land Cover Klassenschema) und Anzahl der Kontrollpunkte pro Klasse*



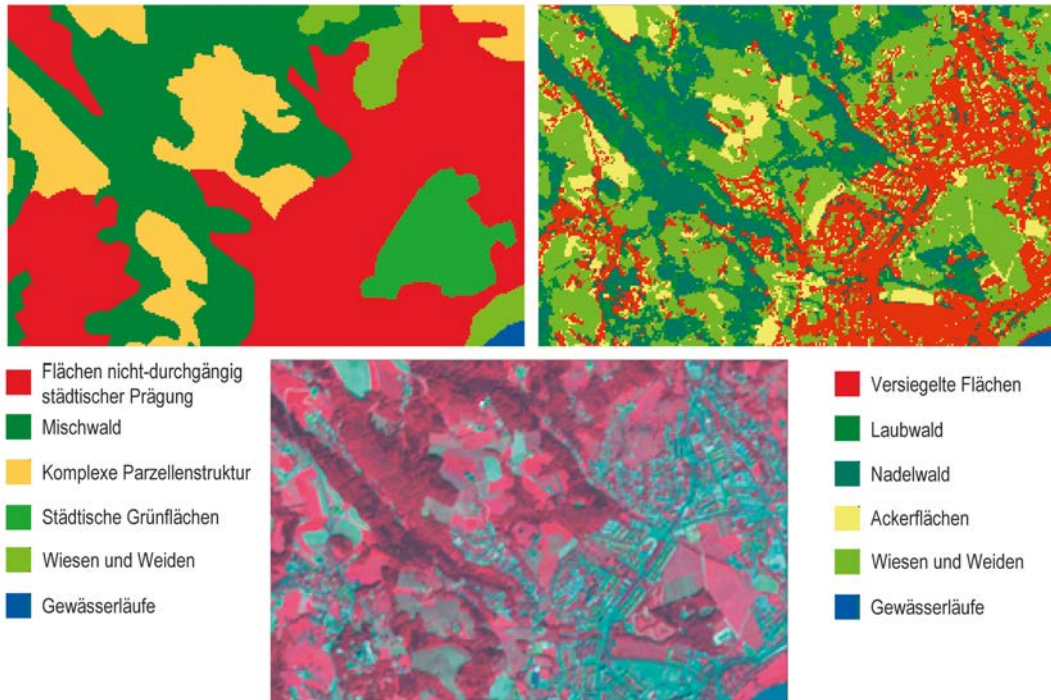


Abb. 7: CORINE Land Cover Datensatz (links oben) und  $kNN$ -Landbedeckungskarte (rechts oben); Ausgangsbild: ASTER (unten)

Aufnahmezeitpunkt	Gesamtgenauigkeit <sup>3</sup>	Kappa <sup>4</sup>
April 2008	0,79	0,69
August 2008	0,80	0,72
April + August 2008	0,89	0,85

Tab. 2: Klassifikationsgenauigkeit bei Verwendung mono- und multi-saisonaler Bilddaten ( $k = 13$ )

#### 4.7 Ergebnisse

Die erstellte Landbedeckungskarte ist räumlich detaillierter als der CLC-Datensatz. Es sind feinere Strukturen der Landbedeckung erkennbar als beim Ausgangsdatsatz (Abbildung 7). Da für die Klassifizierung Satellitenbilder aus dem Jahr 2008 verwendet wurden, konnte gegenüber dem CLC-Datensatz außerdem eine Aktualisierung erreicht werden. Hinsichtlich der differenzierten Klassen unterscheiden sich die beiden Datensätze dahingehend, dass die mit  $kNN$  erstellte Karte nur Landbedeckungskategorien aufweist, während bei CLC auch Landnutzungskategorien vorkommen.

Die Klassifikationsgenauigkeit wurde mit Hilfe des Kontrolldatensatzes (Kap. 4.6) bestimmt. Die Verwendung des zweiten Aufnahmezeitpunkts führt zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeit (Tabelle 2). Eine besonders deutliche Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit konnte bei den Klassen „Wiesen und Weiden“ und „Ackerflächen“ erzielt werden. Die erreichte Gesamtgenauigkeit von fast 90 % ist für eine Klassifikation mit 9 Klassen sehr zufriedenstellend, besonders unter Berücksichtigung der Tatsache, dass keine speziell erhobenen Referenzdaten notwendig sind und dass pro Zeitpunkt nur jeweils 3 Spektralkanäle (grün, rot, nahes Infrarot)

3) Die Gesamtgenauigkeit gibt den Anteil der richtig klassifizierten Kontrollpunkte an.

4)  $Kappa$  ist ein über alle Klassen berechnetes Maß für die Klassifikationsgenauigkeit, das angibt, wie stark sich das Klassifikationsergebnis von einer rein zufälligen Klassenzuordnung unterscheidet (0 ... Zufallsergebnis, 1 ... perfekte Klassifizierung).

verwendet wurden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedliche Landschaftstypen und Landschaftsverhältnisse wird in zukünftigen Projekten erfolgen.

## 5. Zusammenfassung

Die *k*-nearest-neighbor Methode ist vielseitig einsetzbar. Dies liegt vor allem daran, dass es sich um eine nicht-parametrische Methode handelt (Kap. 2). Die *k*NN-Methode ist insbesondere dann parametrischen Methoden (wie z.B. *Maximum-Likelihood*) überlegen, wenn die Referenzdaten nicht normalverteilt sind, und stellt in diesen Fällen eine geeignete Alternative dar. Weitere Vorteile der *k*NN-Methode bestehen darin, dass sie nicht nur für Klassifizierungsaufgaben, sondern auch zur Schätzung von kontinuierlichen Variablen (z.B. Holzvorrat) eingesetzt werden kann, und dass sie das Potenzial zur Ausreißer-Eliminierung hat und damit auch mit fehlerhaften Referenzdaten gute Ergebnisse bringen kann.

## Referenzen

- [1] *Burrough, P. A., McDonnell R. A. (2000)*: Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press.
- [2] *Mitchell, T. M. (1997)*: Machine learning. McGraw-Hill.
- [3] *Dasarathy, B. V. (1991)*: Nearest Neighbor (NN) norms: NN pattern classification techniques. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.
- [4] *Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G. (2000)*: Pattern classification. Wiley Interscience, New York.
- [5] *Tomppo, E. (1991)*: Satellite image-based national forest inventory of Finland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 28: 419-424.
- [6] *McRoberts, R. E., Nelson, M. D., Wendt, D. G. (2002)*: Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the *k*-nearest neighbors technique. *Remote Sensing of Environment*, 82: 457-468.
- [7] *Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O., Katila, M. (2008)*: Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment*, 112: 1982-1999.
- [8] *Cover and Hart (1967)*: Nearest neighbor pattern classification in IEEE Transactions on Information Theory 13; p.21-27.
- [9] *Fix and Hodges (1951)*: Discriminatory analysis, non-parametric discrimination: Consistency properties; Technical Report 4, U.S. Air Force, School of Aviation Medicine, Randolph Field, TX.
- [10] *Hechenbichler, K. & Schliep, K. (2004)*: Weighted *k*-nearest-neighbor techniques and ordinal classification., SFB 386, Discussion Paper 399, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- [11] *Efron, B., Tibshirani, R.J. (1993)*: An Introduction to the Bootstrap, London: Chapman & Hall.
- [12] *Franco-Lopez, H., Ek, A. R., Bauer, M. E. (2001)*: Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the *k*-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment*, 77: 251-274.
- [13] *Tomppo, E., Halme, M. (2004)*: Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in *k*-NN estimation: a genetic algorithm approach. *Remote Sensing of Environment*, 92: 1-20.
- [14] *Tahir, M. A., Bouridane, A., Kurugollu, F. (2007)*: Simultaneous feature selection and feature weighting using hybrid Tabu Search/*k*-nearest neighbor classifier. *Pattern Recognition Letters*, 28: 438-446.
- [15] *Ben-Gal, I. (2005)*: Outlier detection. In: Maimon, O., Rockach, L. (Hg.). Data mining and knowledge discovery handbook: a complete guide for practitioners and researchers. Kluwer Academic Publishers.
- [16] *Koukal, T. (2004)*: Non-parametric assessment of forest attributes by combination of field data of the Austrian forest inventory and remote sensing data. Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation.
- [17] *Bauerhansl, Ch. (2009)*: Waldkarten aus Satellitenbildern. In: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) (Hg.), Jahresbericht 2008, S. 10, Wien.
- [18] *Gabler, K. und Schadauer, K. (2008)*: Methods of the Austrian Forest Inventory 2000/02 – Origins, approaches, design, sampling, data models, evaluation and calculation of standard error. BFW-Berichte, Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Nr. 142, 121 S.
- [19] *Gu, D. und Gillespie, A. (1998)*: Topographic normalization of Landsat TM images of forest based subpixel sun-canopy-sensor geometry. *Remote Sensing of Environment* 64: 166-175.
- [20] *Koukal, T., Schneider, W., Suppan, F. (2005)*: Radiometric-topographic normalization in mountainous terrain for Landsat-TM-based forest parameter assessment by the *k*NN method. In: Oluić, M. (Ed.): New strategies for European remote sensing. Proceedings of the 24th symposium of the European association of remote sensing laboratories, Dubrovnik, Croatia, 25-27 May 2004, 239-246.
- [21] *European Environmental Agency (2007)*: CLC2006 technical guidelines. EEA Technical report, No. 17, Copenhagen.
- [22] *Umweltbundesamt*: CORINE – Flächendeckende Erfassung der Flächennutzung. <http://www.umweltbundesamt.at/umwelt/raumordnung/flaechennutzung/corine/> (30.09.2009)



**Anschrift der Autoren**

**Dr. Tatjana Koukal**, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien.

E-Mail: [tatjana.koukal@boku.ac.at](mailto:tatjana.koukal@boku.ac.at)

**Christoph Adelman**, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien.

E-Mail: [c.adelman@students.boku.ac.at](mailto:c.adelman@students.boku.ac.at)

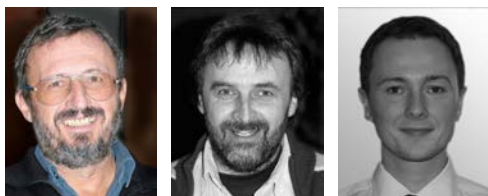
**DI Christoph Bauerhansl**, Institut für Waldinventur, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Seckendorff-Gudent-Weg 8, A-1131 Wien.

E-Mail: [christoph.bauerhansl@bfw.gv.at](mailto:christoph.bauerhansl@bfw.gv.at)

**Univ.Prof. Dr. Werner Schneider**, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien.

E-Mail: [werner.schneider@boku.ac.at](mailto:werner.schneider@boku.ac.at)

vgt



## kHz Satellite Laser Ranging – Innovative Applikationen

Georg Kirchner, Franz Koidl, Daniel Kucharski, Graz

### Kurzfassung

Die Laserstation Graz – Lustbühel misst seit 1982 Entfernungen zu Satelliten mit kurzen Laserpulsen; seit 2004 als einzige Station weltweit mit 2 kHz. Dies hat nicht nur enorme Vorteile für diese Messungen selbst (z.B. Genauigkeiten im sub-mm-Bereich), sondern ermöglicht auch eine ganze Reihe von innovativen Zusatz-Applikationen. Die routinemäßig gemessenen Entfernungen ermöglichen eine extrem genaue Bestimmung der Spin-Daten von Satelliten; parallel zu diesen Entfernungsmessungen können Seeing-Werte der Atmosphäre erfasst werden; die kHz Laserpulse werden zusätzlich für LIDAR-Zwecke verwendet; eine Übertragung bzw. Vergleich von Zeitskalen im sub-ns-Bereich, sowie eine Übertragung von Daten mit Hilfe der kHz Laserpulse ist im Aufbau.

**Schlüsselwörter:** Satellite Laser Ranging, SLR, Satellite Spin, Seeing, LIDAR, Zeittransfer

### Abstract

Since 1982, the laser station Graz – Lustbuehel measures distances to satellites using short laser pulses; since 2004 as the only station with 2 kHz. This is not only an enormous advantage for these distance measurements (e.g. sub-mm accuracies), but also allows several additional and innovative applications.

The routinely measured distances allow an extremely accurate determination of spin parameters of satellites; in parallel, atmospheric seeing measurements are evaluated and registered; the kHz pulses are additionally used for LIDAR purposes; a transmission of, and comparison between time scales in the sub-ns range, as well as a data transmission concept using kHz laser pulses is in development.

**Keywords:** Satellite Laser Ranging, SLR, Satellite Spin, Seeing, LIDAR, Time Transfer

### 1. Einleitung

Die Laserstation Graz misst Entfernungen zu Satelliten mit Hilfe von sehr kurzen (10 ps) und relativ schwachen (400  $\mu$ J bei 532 nm Wellenlänge) Laserpulsen, mit einer Pulsrate von 2 kHz; die Laserpulse werden durch Retro-Reflektoren an den Satelliten reflektiert; von den etwa  $10^{14}$  gesendeten Photonen pro Puls werden – je nach Entfernung des Satelliten – EIN Photon pro 1000 Pulse (GPS-Satelliten, GIOVE / GALILEO etc. in Entfernungen von 20.000 km und mehr) bis zu einigen 100 Photonen (bei niedrigen Satelliten wie z.B. GOCE in etwa 250 km) in Graz detektiert, und die Laufzeit gemessen. Die dabei erzielte Genauigkeit beträgt etwa 2-3 mm; damit ist Graz nicht nur seit etwa 5 Jahren die einzige Laserstation mit 2-kHz-Routine-Betrieb, sondern auch eine der genauesten [1] SLR-Stationen der Welt (Abb. 1)

Diese Routine-Messungen werden von zahlreichen Institutionen für vielfältige Anwendungen benötigt und verwendet, z.B.:

- POD: Precise Orbit Determination
- Stationskoordinaten und deren Bewegungen; Plattentektonik
- Terrestrial Reference Frame / Center of Mass / Scale

- Gravitationsfeld-Bestimmung und dessen zeitliche Veränderung
- Polbewegung und Tageslänge
- POD und Kalibrierung für Altimetermissionen (Meere, Eisflächen)
- Massenverteilung auf der Erde und deren Änderungen
- Grundlagenforschung (Tether-Anwendung, Relativitätstheorie, Frame Dragging etc.)
- Spin-Parameter von passiven Satelliten (Periode, Orientierung, Richtung) usw.

Neben diesen Routine-Messungen – die natürlich ebenfalls laufend verbessert werden – gibt es aber zusätzlich eine ganze Reihe von neuartigen Anwendungen, die im folgenden beschrieben werden.

### 2. Bestimmung von Spin-Parametern von passiven Satelliten

Eine ganze Reihe von Satelliten wurde speziell für SLR-Messungen entwickelt, und in meist kreisförmige Umlaufbahnen in Höhen zwischen 300 km und > 20.000 km gebracht; diese Satelliten sind komplett passive Kugeln, mit Retro-Reflektoren an ihrer Oberfläche; alle diese Satelliten wurden mit einem Initial-Spin versehen (je nach Größe und Masse: Von ca. 40 s / Umdrehung (ETA-

## Hitotsubashi Univ. Orbital Analysis

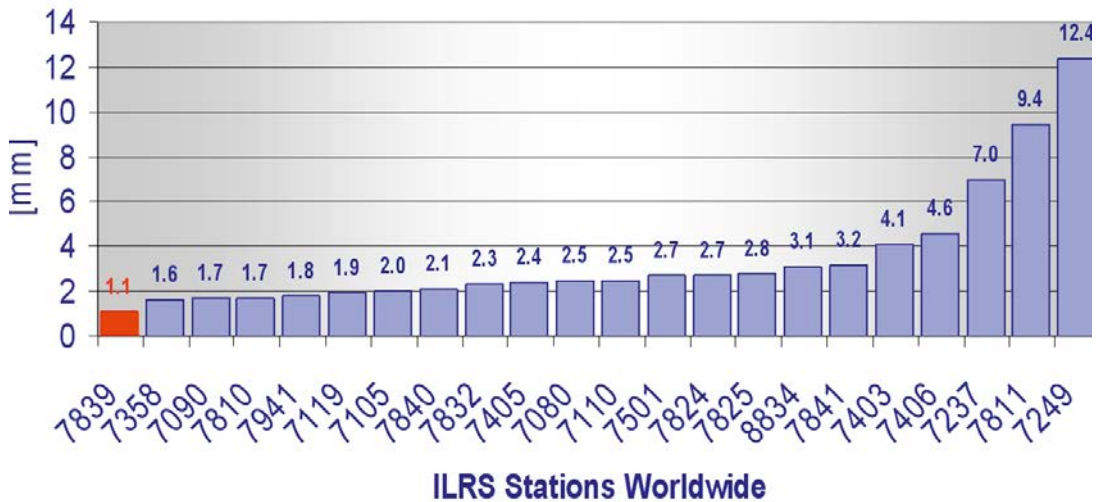


Abb. 1: Genauigkeit der einzelnen SLR-Station (7839: Graz)

LON) bis < 1 s (LAGEOS)), der aber – je nach Konstruktion, Material und Masse – im Laufe der Zeit abnimmt bzw. ganz aufhört. Während diese Rotation bei den kleineren Satelliten wie Starlette (Kugel mit 24 cm Durchmesser, ca. 47 kg) schon nach relativ kurzer Zeit (etwa 1 Jahr) aufhört, kommen größere Satelliten wie LAGEOS-1 (Kugel mit 60 cm Durchmesser, ca. 407 kg) erst nach etwa 30 Jahren zum Stillstand [4a].

### 2.1 ... am Beispiel des Satelliten AJISAI

Der 1986 von Japan gestartete, rein passive Satellit AJISAI (Abb. 2) wiegt etwa 685 kg ; zwischen den 318 auf seiner Oberfläche montierten Spiegeln sind insgesamt 120 Retroreflektoren für Lasermessungen in 15 Ringen angeordnet. Der ca. 685 kg schwere Satellit umrundet die Erde in knapp 1500 km Höhe [1].

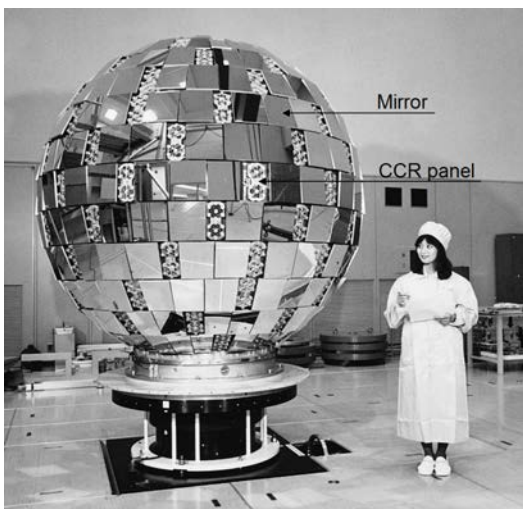


Abb. 2: Satellit AJISAI: Ca. 215 cm Durchmesser; jeweils zwischen mehreren Spiegeln sind die – etwas dunkleren – Retroreflektorpanele erkennbar.

Durch die hohe Laser-Pulsrate von 2 kHz können diese rotierenden Satelliten recht genau „abgetastet“ werden; die Rotation der einzelnen Retro-Reflektoren bildet sich in den Messdaten ab (Abb. 3). Die hier abgebildeten Messdaten sind Residuen (gemessene minus berechnete Entfernung) während eines 2 Sekunden langen Abschnittes eines AJISAI – Passes; darin sind gut die mehr oder weniger regelmäßigen Schwankungen der Entfernung durch die Rotation des Satelliten zu erkennen.

Eine spektrale Analyse dieser Residuen nach Lomb [2] ergibt deshalb auch sehr ausgeprägte Spektren (Abb. 4); die verschiedenen Frequenzen ergeben sich durch die unterschiedliche Anzahl von Retro-Panelen auf dem Umfang des Satelliten, (es gibt Ringe zu je 12 / 9 / 6 / 3 Retros) bzw. auch aus deren Überlagerungen. Mit diesen Daten können nun mehrere Spin-Parameter bestimmt werden: Spin-Periode, Spin-Richtung und auch die Orientierung der Spin-Achse [3,4].

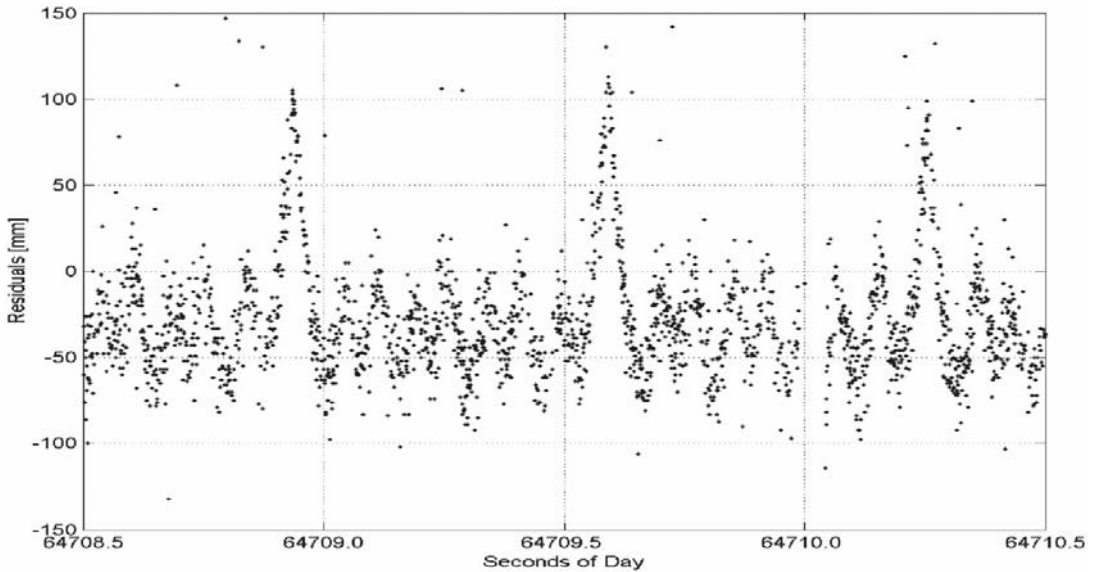


Abb. 3: Satellit AJISAI: Residuen von 2 Sekunden Lasermessungen; deutlich erkennbar: Die regelmäßigen Entfernungsschwankungen durch die Rotation des Satelliten.

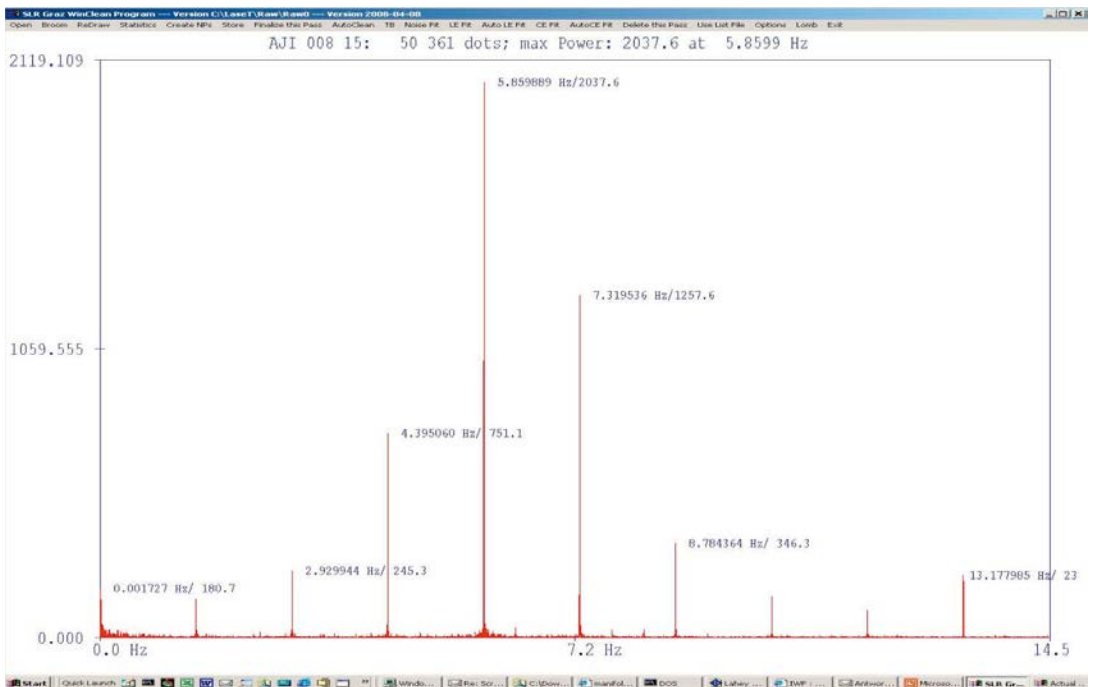


Abb. 4: Spektralanalyse eines AJISAI Passes: Unterschiedliche Anzahl von Retros entlang des Umfanges des rotierenden Satelliten ergeben diverse Frequenzen; auch mit zusätzlichen Überlagerungen.

Eine spektrale Auswertung aller verfügbaren SLR-Daten von AJISAI seit dem Start im Jahre 1986 ergibt eine langsame Zunahme der Spin-Periode [3,4], von ursprünglich 1.48 s auf etwa 2.08 s im Jahre 2009 (Abb. 5); während mit den

Daten von 10-Hz-SLR-Stationen die Spin-Periode immerhin noch mit etwa 0.1% Genauigkeit bestimmt werden kann, erreicht man mit den 2-kHz-Daten von Graz bereits < 0.01% Genauigkeiten.

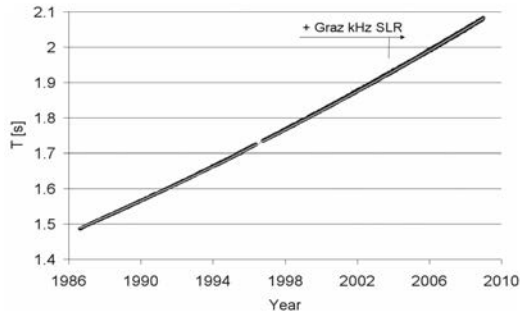


Abb. 5: AJISAI: Zunahme der Spin-Periode im Laufe von 22 Jahren; Schwarz: Werte der einzelnen Passes; Grau: Ausgleichskurve. Die Genauigkeit beträgt etwa 0.1% (10-Hz-Stationen) bzw. <0.01% für Graz kHz Daten.

**2.2 ETALON Spin**

Die Bestimmung der Spin-Periode der beiden ETALON-Satelliten [1] (ca. 1415 kg, 1.3 m Durchmesser, in knapp 20.000 km Höhe über der Erde, je 2146 Retros; Abb. 6) ist wesentlich schwieriger: Die durchschnittliche Return-Quote liegt – wegen der großen Entfernung – nur noch bei etwa 0.3 % (bei 2 kHz ergibt das aber immer noch etwa 6 Echos pro Sekunde !); durch die große Zahl der Einzel-Retros sind dadurch

aber keine Spektrallinien einzelner Retros mehr erkennbar. Dafür jedoch hinterlassen die relativ stark ausgeprägten „Gaps“ der Retro-Verteilung auf der Oberfläche der Satelliten (Abb. 6) eine – wenn auch schwache – spektrale Spur. Damit ist nicht nur die Spin-Periode sowie deren Zunahme im Laufe der Zeit (Abb. 6, unten) meßbar, sondern auch die Spin-Periode unmittelbar nach dem Start extrapolierbar: Sie betrug nur etwa 50% des berechneten (und ursprünglich angenommenen) Wertes [5].

**2.3 Spin-Daten von weiteren Satelliten**

Im Prinzip können Spin-Daten von fast allen rotierenden Satelliten mit Hilfe von SLR – Daten bestimmt werden (Tab. 1); in Graz wurde dies bereits bei einer ganzen Reihe von solchen Satelliten durchgeführt [6,7]; da auch weiterhin solche passiven SLR-Satelliten gestartet werden bzw. in Planung sind (BLITS /2009; ANDE/2009, LARES /2010, PERCS / 2014 usw.), werden diese Spin-Parameter-Bestimmungen auch weiterhin in Graz durchgeführt; die Genauigkeit wird in Zukunft durch die nun absehbare Inbetriebnahme von weiteren kHz-SLR-Stationen verbessert werden können.

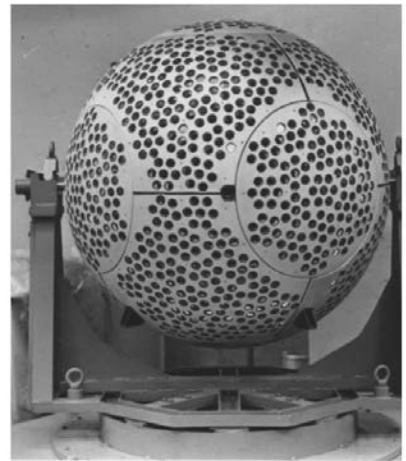
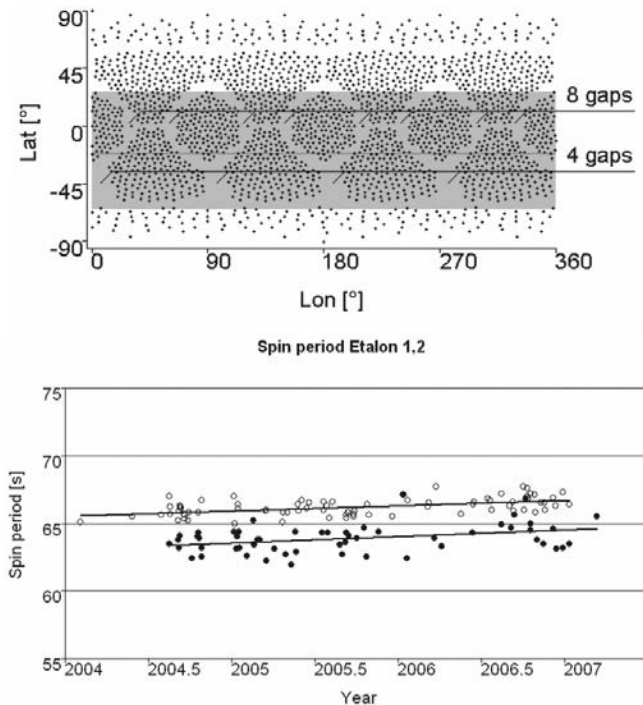


Abb. 6: Satellit ETALON: Die „gaps“ in der Verteilung der Retros hinterlassen eine schwache spektrale Spur in den Echos; daraus kann wiederum die Spin-Periode abgeleitet werden.



Satellit	Spin-Periode [s]	Erreichbare Genauigkeit	Spin-Achse bestimmbar	Spin-Richtung bestimmbar	Anmerkung
AJISAI	2.04	0.01 %	Ja	Ja	Nur mit kHz SLR so genau
LAGEOS-1	6000	3 %	Ja	Teilweise	Kaum mehr Spin (Launch 1976)
LAGEOS-2	600	1 %	Ja	Ja	Spin noch vorhanden (Launch 1992)
GP-B	75.9	1.2 %	Ja	Ja	
ETALON 1	63.0	1.5 %	Nein	Nein	Return Rate < 0.1 %
ETALON-2	65.5	0.8 %	Nein	Nein	Return Rate < 0.1 %

Tab. 1: Beispiele für Spin-Parameter-Bestimmungen mit Hilfe von SLR Daten (Graz + International)

### 3. Bestimmung von atmosphärischen Seeing-Werten durch kHz SLR

Der Laserstrahl wird durch das Sendeteleskop Richtung Satellit gelenkt. Der auf dem Weg durch die Atmosphäre produzierte Backscatter wird mit einer CCD-Kamera im Empfangsteleskop erfasst; die Bilder dieser CCD-Kamera werden im PC aufgezeichnet. Die Ablenkungen des Laserstrahls durch atmosphärische Turbulenzen - im Bogensekundenbereich - werden an Hand der aufgezeichneten Bilder in Echtzeit im PC vermessen; die Bewegungen der Laserstrahlspitze definieren dabei den Bereich des aktuellen „Astronomical Seeings“ [8]. Die Kalibrierung dieser Messungen erfolgte durch astronomische

Standardmethoden (Hartmann-Shack Wellenfrontsensor).

Eine solche - während einer Routine-SLR-Messung des Satelliten AJISAI - aufgezeichnete astronomische Seeing-Messung zeigt die Elevationsabhängigkeit des Seeing-Wertes (Abb. 7) - und mit den eher schlechten Seeing-Werten auch die relativ ungünstige Lage der SLR-Station Graz-Lustbühel (Stadt Nähe, nur 500 m MSL, asphaltierte Parkplätze, beheizte aber kaum isolierte Arbeitsräume mit entsprechender Wärmeabstrahlung etc.). Zusätzlich verschlechtert die relativ schnelle Bewegung des Teleskops ebenfalls das Seeing.

### Day 2006/037: Seeing vs. Elevation

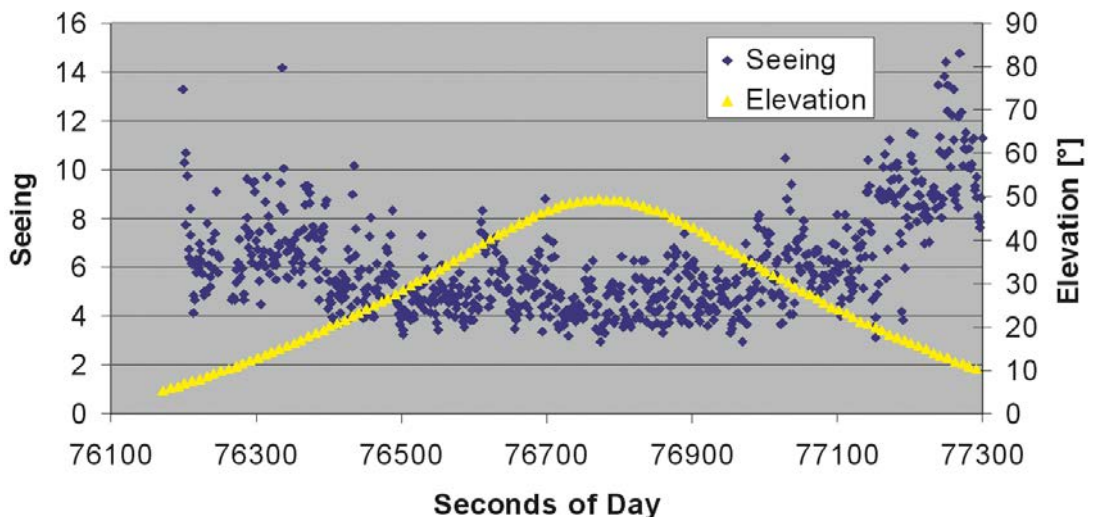


Abb. 7: Das astronomische Seeing, gemessen durch Auswertung des Laserstrahl-Backscatters während eines Routine-SLR-Passes des Satelliten AJISAI, zeigt die Abhängigkeit von der Elevation.

Diese Seeing-Bestimmungen erfolgen automatisch und parallel zu allen Nacht-SLR-Messungen.

#### 4. kHz SLR als LIDAR

Bei allen Routine-SLR-Messungen kann der Backscatter der kHz Laserpulse auch für LIDAR-Messungen verwendet werden: Die von der Atmosphäre rückgestreuten Photonen werden mit einem SPCM (Single Photon Counting Modul) detektiert, und in insgesamt 4096 Zählern (denen jeweils ein Zeitfenster von 100 ns bzw. ca. 15 m Entfernung zugeordnet sind) aufsummiert; diese Integrationszeit ist vom Programm für jede einzelne Messung einstellbar. Damit können Reflektionen an Wolken, Kondensstreifen, atmosphärischen Schichten, Cirruswolken usw. sowohl bei Tageslicht als auch natürlich in der Nacht gut detektiert werden. Durch die gleichzeitige Aufzeichnung von Azimut und Elevation (mit Bogensekunden-Genauigkeit, aus der Teleskop-Steuerung) sowie der Entfernung (in 15-m-Slots) fallen 3-D-Koordinaten dieser Reflektions-Orte als Zusatz-Produkte bei allen SLR-Messungen an. Diese Daten können als Beiträge zur Atmosphärenbestimmung im Grazer Becken verwendet werden; für die Laserstation ist die Korrelation zwischen SLR Return-Raten und atmosphärischem Backscatter von Interesse; durch zusätzliche Scans (außerhalb von Routine-SLR) können Ausmaße und Entwicklung von Cumulo-Nimbus- (Gewitter-) Wolken, deren Tops etc. recht genau vermessen werden [9].

#### 5. Zeitvergleiche zwischen terrestrischen und Satelliten-Zeitkalen

Zum genauen (sub-ns) Vergleich des Frequenzganges von Frequenznormalen auf Satelliten (meist H-Maser) mit terrestrischen Normalen sind Verfahren im optischen Bereich (Laser) weit besser geeignet als Mikrowellen-Verfahren; ein solches Experiment wurde vor kurzem erstmals zwischen der SLR-Station Changchun / China und dem chinesischen GPS-Satelliten Compass-M1 erfolgreich durchgeführt [10]

Bei diesem Experiment misst die Station mit Hilfe von Laserpulsen die Entfernung zum Satelliten; auf diesem ist nun zusätzlich ein Detektor (im Zentrum des Retroreflektors) montiert; dieser misst die Ankunftszeit des Pulses, die mit Hilfe der normalen Telemetrie zu einer Bodenstation übertragen wird. In der SLR Station kann durch den Vergleich dieser Ankunftszeit mit den SLR-Daten (die ja ebenfalls die Epochezeiten der einzelnen Laserpulse enthalten) jeder Offset bzw.

jede Drift zwischen der terrestrischen und der Satelliten – Zeitskala bestimmt werden: In diesem Falle wurde eine differentielle Drift von 110 ps pro Sekunde zwischen den beiden Zeitskalen gemessen [10].

#### 6. Datentransmission durch Pulsphasenmodulation von kHz SLR

Eine weitere innovative Anwendung von kHz SLR wird derzeit gerade in Graz implementiert: Dabei wird mit Hilfe von Pulsphasenmodulation (engl.: Puls Position Modulation / PPM) eine Datenübertragung durchgeführt.

Im normalen Betrieb werden die Laserpulse immer im gleichen Abstand von ca. 500  $\mu$ s (= 2 kHz)  $\pm$  7 ns (Jitter des Lasers) gesendet; bei PPM-Betrieb kann dieser Abstand leicht verändert werden; wird diese Abweichung z.B. mit  $N \cdot 40$  ns definiert (mit  $N = 0 - 255$ ;  $N =$  ASCII Definition), kann dadurch pro Laserpuls ein Character mit ASCII Code „N“ übertragen werden. Beispiel:  $N = 65$  (ASCII „A“); Abweichung  $65 \cdot 40$  ns = 2.6  $\mu$ s; ein Laserpuls verzögert um 2.6  $\mu$ s gegenüber dem Standardraster überträgt damit den Buchstaben „A“. Bei einer 2 kHz SLR Station können damit im optimalen Fall 2 kB / s zu Satelliten übertragen werden (zum Vergleich: Software-Updates zum Satelliten CHAMP erfolgen derzeit mit einer Datenrate von 119 bytes / s). Weitere potentielle Vorteile:

- Derzeit sind mehrere kHz-SLR-Stationen im Aufbau; damit sind in absehbarer Zeit mehrere potentielle „Sende-Stationen“ vorhanden;
- Die Umrüstung auf PPM-Fähigkeit ist – für kHz SLR Stationen - relativ einfach durchzuführen;
- Die Datenübertragung kann gleichzeitig mit der ganz normalen SLR-Aktivität erfolgen;
- Bei Bedarf kann die Datenrate mit leicht geänderten Lasern (schwächere Einzelpulse, aber höhere Pulsraten) auch noch wesentlich gesteigert werden (z.B. 20 kHz Laser);
- Ein erster Check auf erfolgreiche Übertragung ist – neben Standardverfahren wie erweiterter oder mehrdimensionaler Paritätskontrolle – auch möglich durch Überprüfung der Echos vom Satelliten: Wenn die Station ein eindeutiges Echo vom Satelliten erhält, dann MUSS auch der Detektor am Satelliten diesen – dort noch ungleich stärkeren – Laserpuls detektiert haben.

#### 7. Zusammenfassung

Die SLR Station Graz-Lustbühel liefert nicht nur hoch präzise Laserentfernungsmessungen zu

Satelliten, sondern hat mittlerweile eine ganze Reihe von innovativen Zusatz-Applikationen entwickelt und / oder implementiert. Mit diesen Zusatzapplikationen wird der Nutzen der Anlage – bei annähernd gleichem Aufwand für deren Betrieb – beträchtlich erweitert und auf weitere Forschungsgebiete ausgedehnt.


#### Referenzen

- [1] *ILRS*: International Laser Ranging Service: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
- [2] *N. R. Lomb*: "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data" *Astrophysics and Space Science* 39, p. 447-462, 1976.
- [3] *G. Kirchner, W. Hausleitner, E. Cristea*: AJISAI spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 45, 201-205, 2007
- [4] *D. Kucharski, G. Kirchner, T. Otsubo*: 22 years of AJISAI spin period determination from standard SLR and kHz SLR data, *Advances in Space Research* (2009), in press
- [4a] *D. Kucharski, G. Kirchner, S. Schillak, E. Cristea*: Spin Determination of LAGEOS-1 from kHz laser observations, *Advances in Space Research*, 39 (2007), 1576-1581
- [5] *D. Kucharski, G. Kirchner, E. Cristea*: ETALON Spin Period Determination from kHz SLR Data, *Advances in Space Research*, S0273-1177(07)00912-X; DOI: 10.1016/j.asr.2007.08.030 ; JASR 9240
- [6] *D. Kucharski, G. Kirchner, F. Koidl, E. Cristea*: 20 Years of LAGEOS-1 and 15 Years of LAGEOS-2 Spin Period Determination from SLR Data, *Advances in Space Research* (2009), doi: 10.1016/j.asr.2009.01.019; Reference: JASR 9685
- [7] *G. Kirchner, D. Kucharski, E. Cristea*: Gravity Probe-B: New Methods to Determine Spin Parameters From kHz SLR DATA; *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Volume 47, pp 370-375
- [8] *Georg Kirchner, Daniel Kucharski, Franz Koidl, Jörg Weingrill*: "Measuring Atmospheric Seeing with kHz SLR", *Proceedings of SLR Workshop Canberra*; 11/2006: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
- [9] *Georg Kirchner, Franz Koidl, Daniel Kucharski, Walther Pachler, Matthias Seiss, Erich Leitgeb*: Graz kHz SLR LIDAR: First Results, *SPIE Paper Number: 7355-28*; *SPIE Digital Library*: <http://spiedl.org>
- [10] *I. Prochazka, F. Yang*: Photon counting module for laser time transfer via Earth orbiting satellite, *Journal of Modern Optics*, Vol. 56, Iss. 2 & 3; Jan. 2009, p. 253-260, ISSN 0950-0340

#### Anschrift der Autoren

Dipl. Ing. Dr. Georg Kirchner, Lustbühelstr. 46, A-8042 Graz,  
E-Mail: [Georg.Kirchner@oeaw.ac.at](mailto:Georg.Kirchner@oeaw.ac.at)

Ing. Franz Koidl, Lustbühelstr. 46, A-8042 Graz,  
E-Mail: [Franz.Koidl@oeaw.ac.at](mailto:Franz.Koidl@oeaw.ac.at)

Dipl. Ing. Dr. Daniel Kucharski, Lustbühelstr. 46, A-8042 Graz,  
E-Mail: [Daniel.Kucharski@oeaw.ac.at](mailto:Daniel.Kucharski@oeaw.ac.at) 



## Photogrammetrie + Laserscanning = Range imaging

Wilfried Karel und Stefan Niedermayr, Wien

### Kurzfassung

*Range imaging* bezeichnet die bildweise, geometrische Erfassung des Objektraums durch *range cameras* mittels simultaner Laufzeitmessungen optischer Signale. Diese aufkommende Technik verbindet und ergänzt wesentliche Stärken von Photogrammetrie und Laserscanning, zweier heute weit verbreiteter Methoden zur automatisierten Massenpunktbestimmung. *Range cameras* werden in einer bestimmten Bauweise mittlerweile zwar kostengünstig in Serie produziert, die rohen Distanzbeobachtungen weisen jedoch noch große zufällige, und vor allem systematische Fehler auf. Der vorliegende Beitrag beschreibt diese, zusammen mit den am IPF der TU Wien entwickelten Kalibriermethoden. Weiters wird eine erste geodätische Anwendung vorgestellt, bei welcher ein Teil einer Einkaufspassage aufgenommen und modelliert wird

**Schlüsselwörter:** Range imaging, Range camera, optische 3D-Messtechnik, 3D-Objekterfassung, 3D-Punktwolke, Photomischdetektor, PMD, lock-in Pixel, Kalibrierung

### Abstract

*Range imaging* denotes the image-wise, geometric capture of object space performed by *range cameras* using simultaneous time-of-flight measurements of optical signals. This emerging technique combines and supplements essential strengths of photogrammetry and laserscanning, nowadays two of the most popular methods for automated bulk point acquisition. A certain type of *range cameras* is manufactured cost-effectively in mass production today, but the raw range observations still feature high noise levels and, above all, large systematic errors. This article describes these errors and the respective calibration methods developed at IPF (TU Vienna). Furthermore, it presents a first geodetic application, which captures and models parts of a shopping arcade.

**Keywords:** range imaging, range camera, optical 3D measurement technique, 3D object capture, 3D point cloud, photonic mixer device, PMD, lock-in pixel, calibration

### 1. Einleitung

Beim *range imaging* (*RIM*) wird der Objektraum durch die Beleuchtungseinheit einer *range camera* angestrahlt, und das rückgestreute Licht über ein Objektiv auf den Sensor projiziert. Die Lichtquelle moduliert die meist im infraroten Frequenzbereich ausgesandte Strahlung derart, dass dieses Signal gleichzeitig an allen Pixeln des Sensors demoduliert werden kann, und so die Bestimmung seiner Laufzeit erlaubt, woraus wiederum die zu den einzelnen Pixeln korrespondierenden polaren Distanzen zu den Abtastflecken ableitbar sind. *Range cameras* ermöglichen somit die gleichzeitige, geometrische Erfassung ganzer Blickfelder. Im Gegensatz zur Photogrammetrie sind dazu lediglich eine Aufnahme und keine kontrastreiche Objektfläche nötig. Als wesentlicher Vorteil gegenüber Laserscannern ist der bei *range cameras* abwesende Scan-Mechanismus zu nennen, der bei Laserscannern erheblich zum Stromverbrauch, zum Gesamtgewicht und zu den Produktionskosten beiträgt [17]. Weiters erfassen Laserscanner Objektpunkte sequenziell, was die Aufnahme dynamischer Szenen und den Betrieb auf bewegten Plattformen er-

schwert. Andererseits verteilen sich beim *RIM* die ausgesandte und rückgestreute Energie auf einen ausgedehnten Raumwinkel bzw. sämtliche Sensorelemente, was sich besonders unter Beisein von Hintergrundstrahlung nachteilig auf das Signal-Rausch-Verhältnis auswirkt und unter Einhaltung der Augensicherheit, und damit einer beschränkten mittleren Leistung der Lichtquelle, den Distanzmessbereich stärker limitiert als bei Laserscannern bzw. höhere Anforderungen an Beleuchtung und Sensor stellt. Bemerkenswert ist der Umstand, dass *range cameras* durchwegs zeitlich hochauflösende Bildsequenzen erfassen, mit Bildraten von über 20 fps.

*Range cameras* werden in verschiedenen Bauweisen realisiert, von denen die am intensivsten verfolgten Ansätze in einem früheren Beitrag [6] ausführlicher beschrieben wurden. Um auch hier einen Überblick zu vermitteln und aktuelle Entwicklungen festzuhalten, seien diese nochmals kurz erwähnt. Weitere Bauweisen sind denkbar und wurden teilweise als Prototypen realisiert [20], Details bzgl. Aufbau und Leistungsfähigkeit wurden bisher jedoch nicht veröffentlicht.

**SPAD - basierte Kameras** verwenden eine Kombination aus extrem kurz gepulsten Laserquellen (Pulsbreite wenige 100 ps) und Einzelphotonendetektoren (*single photon avalanche diodes* – SPAD, *Geiger-mode avalanche photo diodes* – GMAPD). Auch bei Aufnahmedistanzen von über 100 Metern und bei Einsatz unter Tageslicht wurden eindrucksvolle Ergebnisse erzielt [12], welche jedoch vorerst militärischen Anwendungen vorbehalten sind. Im zivilen Bereich wurden Kameras dieses Typs als Prototypen für den Nahbereich realisiert [15].

**APD/PIN - basierte Kameras** verwenden Photokathoden, um am Objekt rückgestreute Laserpulse zu verstärken und an Lawinenphotodioden (*avalanche photo diodes* – APD) oder PIN (*positive intrinsic negative*) - Dioden zu detektieren. Entsprechende Ausleseelektronik ermöglicht die Digitalisierung der Echoform für jedes Pixel, wodurch mehrere Distanzen pro Pixel bestimmbar sind [18]. Die Anwendung des Verfahrens auf Distanzen über 1000 m wurde erfolgreich getestet [19]. Advanced Scientific Concepts bietet Modelle dieses Typs kommerziell an.

**MDSI** Bei der mehrfachen Kurzzeit-Doppelbelichtung (*multiple double short-time integration* – MDSI) werden die Echos einer gepulsten Lichtquelle wie bei herkömmlichen 2D-Kameras am Sensor integriert. Ein äußerst schneller, elektronischer Verschluss (min. Verschlusszeit < 50 ns) ermöglicht es jedoch, nur Bruchteile des Echos abzubilden. Durch die Kombination von Bildern mit vollständig und teilweise erfassten Echos und solchen mit inaktiver Beleuchtung werden die Einflüsse von Reflektivität und Hintergrundstrahlung eliminiert, sodass auf die Objektdistanz geschlossen werden kann. Realisierungen für Objektdistanzen bis zu einigen Zehnermetern und relativ niedrigen Sensorauflösungen werden v.a. für den Automobilssektor entwickelt [13]. Geräte mit höherer Sensorauflösung und für den Einsatz bis zu wenigen Metern weisen noch relativ geringe Distanzpräzision auf [9] und sind bereits kommerziell erhältlich. Presseberichte legen nahe, dass diese Technik demnächst bei Spielkonsolen Anwendung finden wird (Xbox, Project Natal).

**Photomischer** (*photonic mixer device* – PMD, *lock-in pixel*) - basierte Kameras beleuchten den Objektraum permanent, modulieren dabei jedoch die Intensität mit einigen 10 MHz (AM-CW). PMD erlauben die Mischung des rückgestreuten, amplitudenmodulierten Lichts mit einer elektrischen Referenzschwingung und die gleichzeitige Abtastung des Ausgangssignals,

typischerweise an zwei um 180° versetzten Phasenwinkeln. Werden Lichtquelle und Referenzsignal mit der gleichen Frequenz betrieben (homodyne Mischung) und zwei Aufnahmen mit jeweils um 90° versetzter Referenzschwingung getätigt, so können unter Annahme sinusförmiger Modulation die Signalamplitude und der Phasenwinkel des Echos bestimmt, und daraus die Objektdistanz rekonstruiert werden [8]. Vorteilhaft kann die Referenz auch mit abweichender Frequenz moduliert werden (heterodyne Mischung) [2].

Anders als bei den vorhin genannten Bauweisen gibt bei PMD-Kameras nicht die Signallaufzeit selbst, sondern die wesentlich längere Modulationsperiode der Lichtquelle den Arbeitstakt vor, weshalb PMD-Kameras kostengünstig hergestellt werden können: einerseits kann die Beleuchtung für Frequenzen bis etwa 30 MHz durch herkömmliche LEDs (*light emitting diodes*) verwirklicht werden, andererseits werden PMD-Schaltkreise im etablierten CMOS-Verfahren gefertigt. Die erreichbare Aufnahmedistanz liegt für automobiler Anwendungen mit kleinerem Blickfeld im Bereich bis 70 m [1], für höchstauflösende Kameras unter 10 m. Die Firmen Mesa Imaging, PMDtec und Canesta bieten diese Kameras kommerziell an.

Höchstauflösende PMD-Kameras bieten derzeit Sensoraufösungen von bis zu 204x204 Pixeln, bei einer stark von der empfangenen Signalamplitude abhängigen Präzision der Distanzbeobachtungen im Bereich von wenigen mm bis zu einigen cm. Die systematischen Fehler der Distanzmessung übertreffen jene der zufälligen noch um eine Größenordnung, weshalb am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Wien entsprechende Kalibriermethoden entwickelt und an einer PMD-Kamera erprobt wurden – Kapitel 2 widmet sich diesem Thema. Aufbauend auf dieser Kalibrierung wurde dieselbe Kamera außerdem für eine erste geodätische Anwendung verwendet, bei der eine Einkaufspassage aufgenommen und modelliert wird, worüber Kapitel 3 berichtet.

## 2. Kalibrierung von PMD-Kameras

Aufgrund der vorhin beschriebenen erheblichen systematischen Fehler der Distanzbeobachtungen von PMD-Kameras wurden entsprechende Kalibriermethoden entwickelt. Sämtliche diesbezüglichen Experimente wurden mit der am IPF vorhandenen Kamera Swissranger™ SR-3000 durchgeführt, deren technische Daten Tab. 1 wiedergibt.



Bildmatrix	[px2]	144x176
Blickfeld	[deg2]	39.6x47.5
max. Bildrate (Vollbilder)	[fps]	25
Beleuchtung	[W]	1
Trägerwellenfrequenz	[THz]	353
Trägerwellenlänge	[nm]	850
Modulationsfrequenz	[MHz]	5-30
Eindeutigkeitsbereich	[m]	30-5
Auflösung Distanz	[bit]	16
Auflösung Amplitude	[bit]	16
Abmessungen	[mm3]	50x67x42.3
Gewicht	[g]	162

Tab. 1: Technische Daten der PMD-Kamera Swissranger™ SR-3000 von MESA Imaging (Zürich, Schweiz)

## 2.1 Photogrammetrische Kalibrierung

Bei der photogrammetrischen Kalibrierung werden analog zu jener bei konventionellen Kameras die intrinsischen Projektionsparameter der Kamera bestimmt, welche aus der inneren Orientierung (Hauptpunktlage, Brennweite) und der Objektivverzeichnung bestehen. Hierzu hat sich auch für Luftbildkameras die Selbstkalibrierung durchgesetzt, bei welcher die Kalibrierparameter nicht direkt beobachtet werden, sondern unterschiedlich orientierte Aufnahmen eines bekannten Testfeldes dazu genutzt werden, um die äußeren und die innere Orientierung samt Verzeichnung gemeinsam in einer Bündelblockausgleichung zu bestimmen. Auch im Falle von *range cameras* kommen dazu zwar v.a. die Bildkoordinaten von aus dem Bildmaterial extrahierten Merkmalen in Frage (also nicht die Beobachtungen selbst), jedoch können diese Merkmale sowohl aus den Amplituden-, als auch aus den Distanzbildern stammen. Einerseits zeigt sich allerdings die Präzision der Amplitudenbeobachtungen gegenüber jener der Distanzbeobachtungen als überlegen, andererseits ist in Hinsicht auf eine kombinierte photogrammetrische und Distanzkalibrierung das Testfeld eben zu wählen (*scattering*, s. Kap. 2.2.1), was lokale Merkmale in den Distanzbildern ausschließt. Aus diesen Gründen basiert der vorgestellte Ansatz zur photogrammetrischen Kalibrierung ausschließlich auf Amplitudenbeobachtungen. Durch automatische Merkmalsextraktion und -verfolgung wird die hohe Bildrate von PMD-Kameras dazu benützt, um mit minimalem Aufwand gesamte Bildsequenzen zu orientieren und damit eine hohe Redundanz zu erreichen.

Abb. 1 zeigt ein eigens für die photogrammetrische Kalibrierung konzipiertes Testfeld. Dieses

weist eine gewisse Tiefe auf, wodurch die Parameter der äußeren Orientierung sich potentiell als geringer korreliert mit der Brennweite ergeben. Es wurde in 3 Sequenzen zu je 1000 Bildern abgelichtet, wobei die Drehung um die optische Achse während jeder Sequenz annähernd konstant gehalten und nur die beiden übrigen Rotationswinkel samt Position des Projektionszentrums variiert wurden. Die dritte Sequenz wurde mit einer um 180° um die optische Achse gedrehten Orientierung aufgenommen. Durch die oben beschriebene Kombination aus Merkmalsextraktion und -verfolgung können unter Vorgabe der Korrespondenzen zu den extern bestimmten Passpunkten für das jeweils erste Bild sämtliche weiteren Bilder ohne manuellen Eingriff vororientiert werden. Die Auswertungen der nachfolgenden Bündelblockausgleichungen für jede Sequenz ergeben einerseits Werte für die (radiale) Objektivverzeichnung, andererseits erlauben sie die (grobe) Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Objektivparameter, und des Einflusses der Schwerkraft aus dem Vergleich der Parameter von aufrecht und „kopfüber“ aufgenommenen Sequenzen. Während die Parameter für die ersten beiden Sequenzen kaum differieren, legen die Parameter der dritten Sequenz den Schluss nahe, dass die Sensorposition stark von der Lotrichtung beeinflusst wird [5].

## 2.2 Distanzkalibrierung

Im Zuge der Kalibrierung der Distanzbeobachtungen von PMD-Kameras stellt sich eingangs die Frage nach den Größen, welche die Distanzmessungen systematisch verfälschen. Die bisher berichteten Einflüsse werden in Kap. 2.2.1 wiedergegeben. Kap. 2.2.2 stellt sodann die entwickelte Kalibriermethode vor.

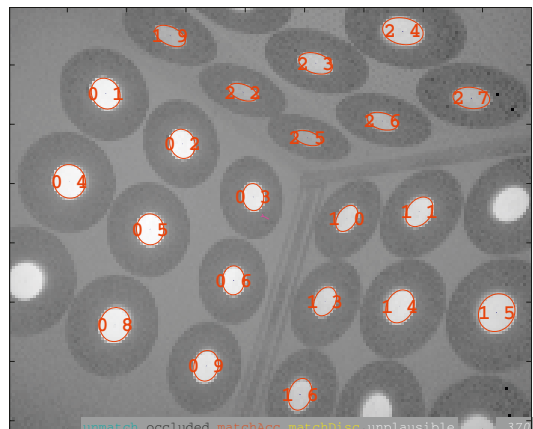


Abb. 1: 3D-Testfeld zur photogrammetrischen Kalibrierung

### 2.2.1 Systematische Fehlereinflüsse

Bisher wurde von folgenden Faktoren berichtet, welche lokal, d.h. pixelweise wirken:

- Objektdistanz (nicht-linear) [10, 4]
- Signalamplitude [3, 11]
- Inzidenzwinkel [4]
- externe und interne Temperatur [4]
- Position am Sensor [4]
- Integrationszeit [4, 11]

Hinzu kommen noch zwei weitere Faktoren, welche die Distanzmessungen in einer gewissen Nachbarschaft in der Sensormatrix verfälschen und durch die gleichzeitige, bildweise Messung ermöglicht werden:

- begünstigt durch den geringen Füllfaktor (optisch sensiblen / transparenten Flächenanteil) der PMD-Sensorelemente werden eintreffende Echos am Sensor teilweise zurückgeworfen, an der Objektiv-, Filter-, oder Gehäuseinnenseite erneut reflektiert, und schließlich an einer nicht der Projektion entsprechenden Stelle am Sensor mit dem direkt eintreffenden Signal vermischt. Während dieser Effekt auch bei konventionellen Kameras bekannt ist (*lens flare*, im PMD-Kontext: *scattering*), wirkt sich dieser in besonderem Maße auf die Bestimmung des Phasenwinkels aus [14].
- bei entsprechender Ausrichtung der Oberflächen am Objekt relativ zur Kamera kann das Messsignal auch im Objektraum mehrfachen Reflexionen unterworfen sein (*multipath*) [3].

Ref. [11] berichtet außerdem von gegenseitig abhängigen Einflüssen der Objektdistanz und Amplitude, was die Frage aufwirft, ob dies reproduzierbar ist und ob noch weitere Abhängigkeiten bestehen.

### 2.2.2 Kalibriermethodik und -anwendung

Einige Arbeiten untersuchen in streng kontrollierten Umgebungen mit hochpräzisen Instrumenten einzelne Einflussfaktoren – beispielsweise mittels Interferometern und Klimakammern [4]. Mit Hilfe dieser Versuche lassen sich die Einflüsse zwar nachweisen, aber nicht trennen bzw. lässt sich damit keine umfassende Kalibrierung für das Gesamtsystem bestimmen, die die systematischen Fehler im gesamten Einsatzbereich optimal reduziert.

Um die Auswirkungen der Störfaktoren und deren Abhängigkeiten zu untersuchen ist es vielmehr nötig, Distanzresiduen zu bestimmen, die unter verschiedensten Kombinationen von

Aufnahmebedingungen bestimmt wurden. Um den durch die Störfaktoren aufgespannten Parameterraum wenigstens grob mit Residuen abzudecken ist jedoch eine sehr hohe Anzahl an Bildern nötig (*Fluch der Dimensionalität*).

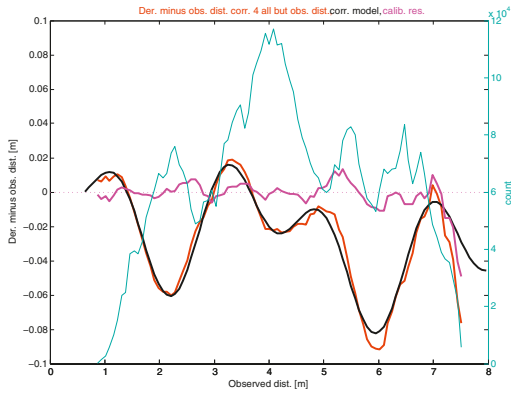
Diese hohe Anzahl an Residuen kann bei relativ kleinen Objektdistanzen (< 3 m) durch die Aufnahme von bewegten Bildsequenzen und automatisierte Merkmalsextraktion und -verfolgung gesammelt werden: [5] verwendet ein ebenes Testfeld, um den Einfluss von *scattering* zu minimieren, und *multipath* zu verhindern. Auf dem Testfeld befinden sich ebene Zielmarken, welche in den Amplitudenbildern erkannt und verfolgt werden. Während der Aufnahme werden die Position, Rotation und Integrationszeit variiert. Wiederum reicht die anfängliche Zuordnung von Merkmalen im Bild zu Passpunkten am Objekt, um lange, bewegte Bildsequenzen zu orientieren. Aufgrund der bekannten Planarität des Testfelds werden so Referenzdistanzen für jedes Pixel, und daraus wiederum Distanzresiduen bestimmt.

Bei größeren Objektdistanzen ist der Einfluss der Bewegungsunschärfe jedoch zu groß, um (hand-) bewegte Sequenzen verwenden zu können. Stattdessen werden Standbilder verwendet, die Algorithmen zur automatischen Bildorientierung unterworfen werden [7]. Um die Einflüsse der Störgrößen besser trennen zu können, werden außerdem zwei Testfelder unterschiedlicher Reflektivität verwendet. Die Residuen werden in der Folge als Funktion folgender 5 Störgrößen betrachtet:

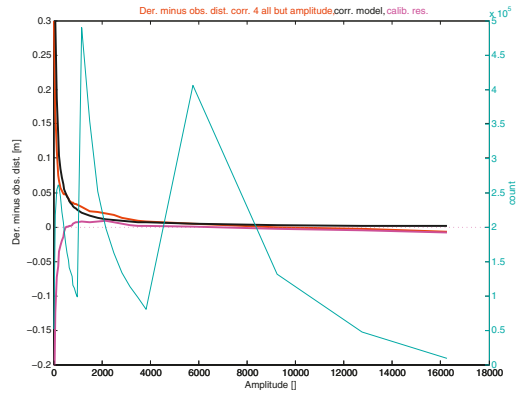
- (beobachtete) Objektdistanz
- (beobachtete) Signalamplitude
- Integrationszeit
- Position im Bild (2-dim)

An Hand von Plots der mittleren Residuen in Abhängigkeit von einer oder zwei dieser Merkmale werden in einem iterativen Prozess Kalibrierfunktionen gewählt, ausgetauscht oder verworfen, deren Parameter in einer gemeinsamen Ausgleichung neu geschätzt und die Plots mit korrigierten mittleren Residuen aktualisiert. Ferner werden wie üblich statistische Methoden angewandt, um Effektivität und Korrelationen der Parameter zu prüfen.

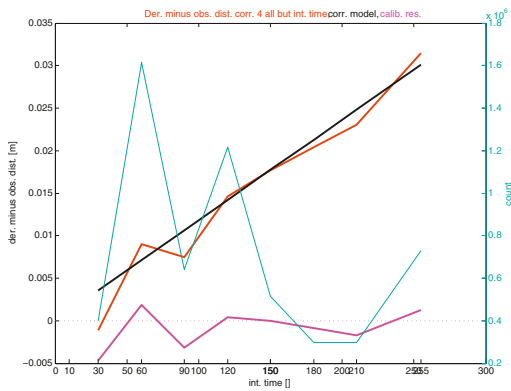
Abb. 2 zeigt die Distanzresiduen vor und nach Anbringung der endgültigen Kalibrierfunktionen (wobei jeweils eine Funktion nicht angebracht wurde), sowie die Funktionen selbst. Diese reduzieren den Betrag der Residuen über weite Be-



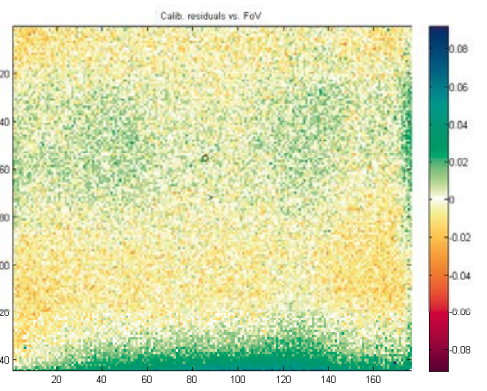
(a) nicht-linearer Einfluss der beobachteten Distanz: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



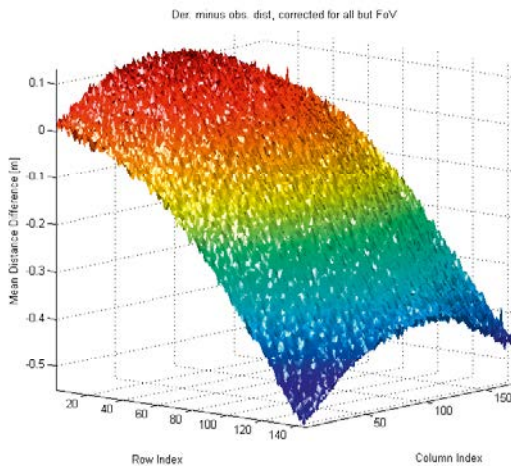
(b) Einfluss der beobachteten Signalamplitude: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



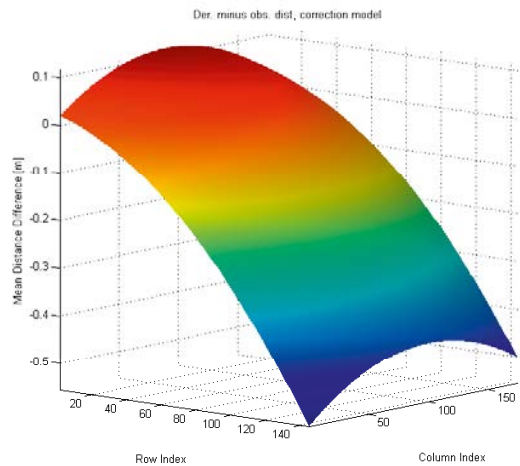
(c) Einfluss der Integrationszeit: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



(d) Einfluss der Position am Sensor: Residuen nach Kalibrierung



(e) Einfluss der Position am Sensor: Residuen vor Kalibrierung



(f) Einfluss der Position am Sensor: Kalibrierfunktion

Abb. 2: Distanzresiduen in Abhängigkeit von den untersuchten Störfaktoren: (a) nicht-linearer Einfluss der beobachteten Distanz (b) Einfluss der Signalamplitude, (c) der Integrationszeit, und (d),(e),(f) der Position am Sensor.

reiche erheblich, die Kalibrierung erweist sich allerdings für extrem niedrige Amplituden und sehr große Distanzen als nur eingeschränkt tauglich. Abgesehen von der Position am Sensor können keine gegenseitigen Abhängigkeiten nachgewiesen werden. Schließlich zeigen die Residuen nach Anbringung der Kalibrierung keine Abhängigkeiten vom Inzidenzwinkel oder der Position am Objekt.

### 3. Modellierung einer Passage mittels PMD-Kamera

Eine am IPF durchgeführte Diplomarbeit [16] verwendet die oben vorgestellte Kalibrierung beim erstmaligen Einsatz einer PMD-Kamera zu geodätischen Zwecken. Ziel der Arbeit ist die Aufnahme und Modellierung eines Teils einer Einkaufspassage (Palais Ferstel, Wien). Dabei herrschen erschwerte Bedingungen durch sehr große Distanzen am Rande des Eindeutigkeitsbereichs und daraus resultierenden extrem niedrigen Amplituden, stark reflektierende Oberflächen (Auslagen) und feine Objektstrukturen (Stuck, Gusseisen). Ferner muss bei der Aufnahme auf Passanten Rücksicht genommen werden, was die Aufstellungsmöglichkeiten einschränkt.

Um trotz der großen Objektdistanzen Distanzbeobachtungen hoher Präzision zu erhalten wird die Kamera auf einem Stativ montiert und mehrere gleich orientierte Bilder (*statische Sequenz*) gemittelt. Da jedoch die Wahl der Aufstellungspunkte eingeschränkt ist, werden pro Bild nur kleine Teile des Objekts abgebildet, weshalb eine hohe Zahl an Bildern zur Aufnahme der Passage nötig ist. Um deren automatisierte Orientierung zu ermöglichen, wird die Aufnahme der Bildsequenz zwischen den statischen Sequenzen nicht unterbrochen. Es ergibt sich vielmehr eine Bildsequenz, die den gesamten aufgenommenen Teil der Passage abbildet.

Diese Sequenz wird anschließend in statische und dynamische Teilsequenzen segmentiert, und jede statische Sequenz wird zu einem einzigen Bild erhöhter Präzision gemittelt (*Standbild*). In den dynamischen Sequenzen werden Merkmale extrahiert und über die gesamte Teilsequenz hinweg verfolgt. Durch Verwendung der Distanzbeobachtungen und unter Beachtung der exzentrischen Lagerung der Kamera am Stativ werden nun die relativen Orientierungen zweier durch eine dynamische Sequenz getrennter Standbilder bestimmt, wodurch sämtliche Standbilder eine erstaunlich genaue Vororientierung erfahren. Nun werden für alle Standbilder kartesische Punktwolken berechnet und diese durch eine

Variante des ICP (*iterative closest point*) - Algorithmus feinorientiert und abschließend gefiltert und trianguliert.

#### Referenzen

- [1] Buxbaum, B., Lange, R. und Ringbeck, T. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, Kap. 3D-imaging. 187-197.
- [2] Conroy, R. M., Dorrington, A. A., Künnemeyer, R. und Cree, M. J. (2009): Range imager performance comparison in homodyne and heterodyne operating modes. In Conf. Three-Dimensional Imaging Metrology. Bd. 7239 von SPIE.
- [3] Árni Guðmundsson, S., Aanæs, H. und Larsen, R. (2007): Environmental effects on measurement uncertainties of time-of-flight cameras. In International Symposium on Signals, Circuits and Systems.
- [4] Kahlmann, T. (2007): *Range imaging metrology: investigation, calibration and development*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.
- [5] Karel, W. (2008): Integrated *range camera* calibration using image sequences from hand-held operation. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS, Peking, China, Bd. XXXVII, 945-952.
- [6] Karel, W. (2008): *Range imaging: 3DPunktvolken in Echtzeit*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 96(1), 12-26.
- [7] Karel, W. und Pfeifer, N. (2009): *Range camera calibration based on image sequences and dense comprehensive error statistics*. In Three Dimensional Imaging Metrology. SPIE, Bd. 7239 von proc. SPIE.
- [8] Lange, R. (2000): 3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität-Gesamthochschule Siegen.
- [9] Leonardi, F., Covi, D., Petri, D. und Stoppa, D. (2009): Accuracy performance of a time-of-flight CMOS range image sensor system. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58(5), 1563-1570.
- [10] Lindner, M. und Kolb, A. (2006): Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors. In Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., Remagnino, P., Nefian, A., Meenakshisundaram, G., Pascucci, V., Zara, J., Molneros, J., Theisel, H. und Malzbender, T., Hg., Advances in Visual Computing, Springer, Bd. 4292/2006 von Lecture Notes in Computer Science. 524–533.
- [11] Lindner, M. und Kolb, A. (2007): Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-camera. In Casasent, D. P., Hall, E. L. und Roning, J., Hg., Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision. SPIE, Bd. 6764/1, 67640W.
- [12] Marino, R. M. und William R. Davis, J. (2005): Jigsaw: a foliage-penetrating 3d imaging Laser Radar system. Lincoln Laboratory Journal, 15(1), 23-36.
- [13] Mengel, P., Listl, L., Koenig, B., Pellkofer, M., Wagner, U. und Wertheimer, R. (2007): Timeof-flight camera for pedestrian protection and collision mitigation. In



- Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Transport Systems and Services. Aalborg, Dänemark.
- [14] Mure-Dubois, J. und Hügli, H. (2007): Optimized scattering compensation for time-of-flight camera. In Two- and Three-Dimensional Methods 8 Vermessung & Geoinformation 2/2010 for Inspection and Metrology V. Bd. 6762 von proc. SPIE.
- [15] Niclass, C., Favi, C., Kluter, T., Gersbach, M. und Charbon, E. (2008): A 128x128 singlephoton imager with on-chip column-level 10b time-to-digital converter array capable of 97ps resolution. In IEEE International Solid-State Circuits Conference. 44-46.
- [16] Niedermayr, S. (2010): Vervollständigung von Stadtmodellen mittels Distanzkameras. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien. Im Druck.
- [17] Rohner, M., Siercks, K. und Hinderling, J. (2005): Single-photon detection for high precision ranging – a trade-off study. In Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg., 1st Range imaging Research Day. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 33-42.
- [18] Stettner, R., Bailey, H. und Richmond, R. D. (2004): Eye-safe laser radar 3D imaging. In Kerman, G. W., Hg., Laser Radar Technology and Applications IX. SPIE, Bd. 5412/1, 111-116.
- [19] Stettner, R., Bailey, H. und Silverman, S. (2006): Three dimensional Flash LADAR focal planes and time dependent imaging. In International Symposium on Spectral Sensing Research. Bar Harbor, Maine, USA.
- [20] Stone, W., Juberts, M., Dagalakis, N., Stone, J. und Gorman, J. (2004): Performance analysis of next-generation Ladar for manufacturing, construction, and mobility. NISTIR 7117, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

#### Weblinks (Stand: Februar 2010)

Adv. Scient. Conc.: [www.advancedscientificconcepts.com/](http://www.advancedscientificconcepts.com/)  
 Project Natal: [www.xbox.com/en-US/live/projectnatal/](http://www.xbox.com/en-US/live/projectnatal/)  
 MESA Imaging: [www.mesa-imaging.ch](http://www.mesa-imaging.ch)  
 PMDTechnologies: [www.pmdtec.com](http://www.pmdtec.com)  
 CanestaTM: [www.canesta.com](http://www.canesta.com)

#### Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Wilfried Karel, Christian Doppler Labor „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ am Insitut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29/E122, A-1040 Wien.  
 E-Mail: [wk@ipf.tuwien.ac.at](mailto:wk@ipf.tuwien.ac.at)

Stefan Niedermayr, Schumannngasse 70/8, A- 1170 Wien  
 E-Mail: [s.niedermayr@atn.nu](mailto:s.niedermayr@atn.nu)

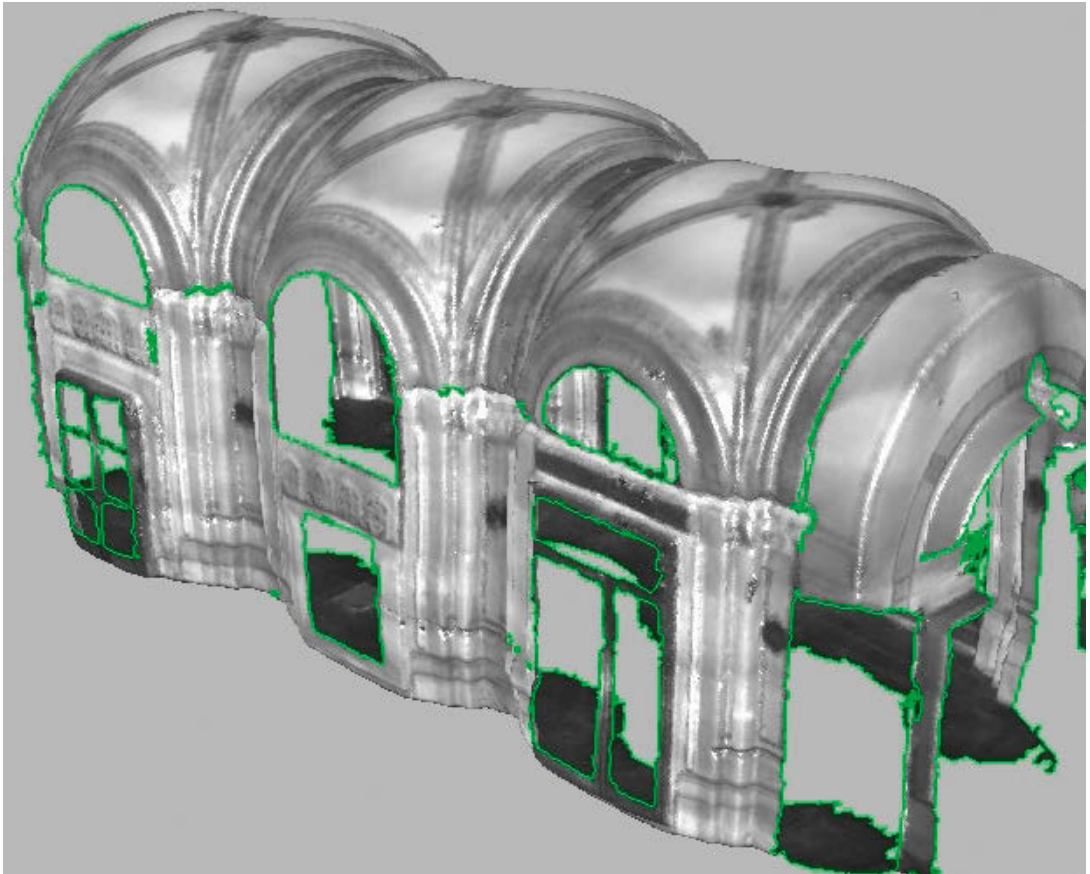


Abb. 3: Ansicht des triangulierten Modells aus [16]





Sigrid Böhm, Wien

## Der Einfluss der Gezeiten auf die Erdrotation

### Kurzfassung

Die Transformation zwischen einem himmelfesten und einem erdfesten Koordinatensystem ist von essentieller Bedeutung nicht nur für die geodätischen Weltraumverfahren, sondern generell für alle präzisen Positionierungs- und Navigationsaufgaben. Der Übergang von einem System in das andere erfordert eine gute Kenntnis der so genannten Erdorientierungsparameter (EOP). Die EOP beschreiben die Lage einer Referenzachse im Raum und relativ zum Erdkörper und den momentanen Winkel der Erdrotation, also die Verdrehung eines Bezugsmeridians. In diesem Artikel wird erläutert auf welche Weise die Verbindung zwischen zälestischen und terrestrischen Positionen nach aktuellen Konventionen herzustellen ist und wie die zugehörigen Transformationsparameter definiert sind. Zudem werden die wichtigsten äußeren und geophysikalischen Einflüsse, die Schwankungen der EOP hervorrufen, und ihre Handhabung behandelt. Im Detail wird auf die Effekte der Gezeiten der festen Erde, der Ozeane und der Atmosphäre auf die Orientierung der Erde eingegangen. Als Einblick in aktuelle Erdrotationsforschung wird eine Studie vorgestellt, welche die Überprüfung eines konventionellen Modells für die Auswirkungen langperiodischer fester Erdezeiten und Ozeangezeiten auf die Weltzeit durch Vergleich mit Beobachtungen der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) zum Ziel hatte. Die Untersuchung ergab Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung von mehr als 40 Mikrosekunden, was in etwa 2 cm an der Erdoberfläche entspricht.

**Schlüsselwörter:** Erdrotation, Gezeiten, Geodätische Weltraumverfahren

### Abstract

The transformation between space-fixed and Earth-fixed coordinate systems is of significant importance not only for space geodetic techniques but in general for all precise applications of positioning and navigation. The transition from one system to the other requires an adequate knowledge of the so called Earth orientation parameters (EOP). The EOP specify the attitude of a reference axis in space and with respect to the Earth and the instantaneous Earth rotation angle, which is actually the phase of a prime meridian. This article deals with the mode of establishing the connection between celestial and terrestrial positions according to present conventions and the definition of the respective transformation parameters. Furthermore the most important external and geophysical causes, which induce EOP variations and their handling is examined. Effects of solid Earth tides, ocean tides and atmospheric tides on Earth orientation are discussed in more detail. To give an insight into recent Earth rotation research an investigation is presented, the purpose of which was the revision of a conventional model for the impact of long periodic solid Earth tides and ocean tides on universal time by means of comparison to observations of Very Long Baseline Interferometry (VLBI). The investigation revealed discrepancies between model and observation of more than 40 microseconds, corresponding to approximately 2 cm on the Earth surface.

**Keywords:** Earth rotation, Tides, Space Geodetic Techniques

### 1. Einleitung

Fast alle Aufgaben der hochgenauen Positionierung und Navigation, die extraterrestrische Objekte als Referenzen verwenden, erfordern eine ausreichende Kenntnis der Lage dieser Objekte in Bezug zu Beobachtungsstationen auf der Erdoberfläche. Die Positionen der Stationen sind gegenüber einem himmelfesten oder raumfesten Bezugssystem zeitlichen Veränderungen unterworfen. Diese sind in großem Ausmaß bedingt durch die tägliche Umdrehung der Erde um ihre eigene Achse und ihre jährliche Revolution um die Sonne und in kleinerem Umfang durch die Unregelmäßigkeiten der beiden Bewegungen. Die Bestimmung der Bahn der Erde um die Sonne ist Gegenstand der so genannten Ephemeridenrechnung und soll im Rahmen dieses Artikels

nicht weiter behandelt werden. Für präzise Navigationsaufgaben und die Analyse der Messungen geodätischer Weltraumverfahren ist in erster Linie die Orientierung der Erde im Raum von Bedeutung. In der Praxis ist dies gleichzusetzen mit der Transformation zwischen einem raumfesten, geozentrischen Koordinatensystem und einem erdfesten Koordinatensystem. Die Orientierung der Erde im Raum und somit auch die Transformation unterliegen periodischen und unregelmäßigen Änderungen, die einerseits durch äußere Einwirkung der Himmelskörper und andererseits durch Vorgänge im Erdinneren oder nahe der Erdoberfläche hervorgerufen werden. Rein geometrisch betrachtet könnte der Übergang von einem raumfesten Bezugssystem in ein erdfestes Bezugssystem ganz einfach durch Drehung

um drei Winkel durchgeführt werden. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch wenig praktikabel, da sich die drei Parameter einer derartigen Transformation sehr schnell ändern würden. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Studium einzelner Anregungsmechanismen und Eigenschaften des Erdkörpers, die zu Rotationsschwankungen führen, nur erschwert möglich wenn nicht gar unmöglich wäre. Aus wissenschaftlichen und praktischen Gründen hat sich daher die Realisierung der Transformation mit fünf Parametern durchgesetzt. Je zwei Parameter beschreiben die Lage einer festgelegten Referenzachse bezüglich des raumfesten Systems sowie bezüglich des erdfesten Systems. Der fünfte Parameter gibt den aktuellen Winkel der Erdrotation, also die Phase eines erdfesten Bezugsmeridians wieder. Die Vorhersage aller Transformationsparameter für jeden Zeitpunkt ist der wünschenswerte Idealfall. Eine genaue Modellbildung ist aber bis dato nur für jene Komponenten möglich, die vorwiegend von den gut bekannten gravitativen Einflüssen der anderen Himmelskörper abhängen und nur in geringem Maße von geophysikalischen Eigenschaften und Prozessen, wie Mantelanelastizität, Beschaffenheit von innerem und äußerem Erdkern und großräumigen Massenverlagerungen und Strömungen in Ozeanen oder in der Atmosphäre. Die so hervorgerufenen Erdorientierungsschwankungen, die sich hauptsächlich in Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und der Lage der Referenzachse in Bezug zum erdfesten System manifestieren, werden durch Beobachtung mit geodätischen Weltraumtechniken ermittelt. Im Hinblick auf eine komplette Prädiktion der Orientierung der Erde im Raum wird aber gleichzeitig auch die Verbesserung vorhandener Modelle und Theorien auf Basis der beobachteten Gegebenheiten angestrebt. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich überblicksmäßig mit dem Einfluss der Gezeiten auf die Transformation zwischen raumfestem und erdfestem Referenzsystem und beschreibt als Beispiel aus aktueller Forschung eine Gegenüberstellung von Modellierung und Beobachtung gezeiteninduzierter Variationen in der Weltzeit.

## 2. Definition der Erdorientierungsparameter

Als Erdorientierungsparameter (EOP) bezeichnet man jene Elemente, mit denen die Transformation zwischen raumfestem und erdfestem Bezugssystem vollzogen wird. Die Realisierung solcher Referenzsysteme durch Festlegung der Koordinaten ausgewählter Himmelsobjekte bzw. terrestrischer Beobachtungsstationen nennt

man Referenzrahmen. Die Umsetzung und Aufrechterhaltung der Referenzrahmen ist Aufgabe des internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienstes (IERS [1]). Diese so genannten konventionellen Referenzrahmen sind der himmelsfeste International Celestial Reference Frame (ICRF) und der erdfeste International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Die aktuelle Version des ICRF wird als zweite Realisierung des internationalen himmelsfesten Referenzrahmens, ICRF2 [2], bezeichnet. Da sich die nächste Ausgabe des ITRF, der ITRF2008, nach wie vor in Vorbereitung befindet, ist die momentan offizielle Ausführung noch ITRF2005 [3].

### 2.1 Transformation nach IAU 2000 Resolutionen

Die genaue Definition der EOP hängt von der Art der gewählten Transformation ab. In den Konventionen des IERS [4] wird die Durchführung der Transformation gemäß den Resolutionen der International Astronomical Union (IAU) empfohlen (IAU Resolutions 2000 [5]). Der Übergang vom raumfesten (CRS) in das erdfeste System (TRS) wird durch eine Abfolge zeitabhängiger Drehmatrizen beschrieben:

$$[\text{TRS}] = \underbrace{R_1(-y_p)}_{W(t)} \cdot \underbrace{R_2(-x_p)}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_3(s')}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_3(\theta)}_{R(t)} \cdot \underbrace{R_2(X)}_{Q(t)} \cdot \underbrace{R_1(Y)}_{Q(t)} \cdot \underbrace{R_3(s)}_{Q(t)} \cdot [\text{CRS}] \quad (1)$$

Mit  $W(t)$  ( $W$  steht für das englische Wort „Wobble“) wird die Polbewegungsmatrix bezeichnet. Sie enthält als Parameter die Koordinaten  $x_p$ ,  $y_p$  des Referenzpols CIP (Celestial Intermediate Pole) im erdfesten System und den Korrekturwinkel  $s'$ , der die Position des Terrestrial Intermediate Origin (TIO) auf dem Äquator des CIP wiedergibt. Terrestrial (TIO) und Celestial Intermediate Origin (CIO) realisieren im jeweiligen System einen momentanen Bezugsmeridian. Diese Begriffe sind Bestandteil des Transformationskonzeptes mit dem so genannten Non-Rotating Origin, welches das ältere Konzept der Transformation mit Ekliptik und Äquinoktium abgelöst hat [4].  $R(t)$  ist die Erdrehungsmatrix, die den Earth Rotation Angle  $\theta$ , den Winkel zwischen TIO und CIO, beinhaltet. Die Präzessions-/Nutationsmatrix wird mit  $Q(t)$  abgekürzt. Sie umfasst die Drehungen um die Winkel  $X$  und  $Y$ , die Koordinaten des CIP im himmelsfesten System, und um den Korrekturwinkel  $s$ , der den CIO auf dem Äquator des CIP positioniert. Die für die Erdrotationsforschung relevante Größe  $d\text{UT1}$  kann über eine lineare Beziehung aus dem Erdrotationswinkel  $\theta$  abgeleitet werden.  $d\text{UT1}$  entspricht der Differenz

zwischen der auf der Erdrotation basierenden Weltzeit UT1 und der koordinierten Weltzeit UTC, die durch Atomuhren realisiert wird. Die Weltzeit unterliegt periodischen Schwankungen, die hauptsächlich durch Einflüsse der Gezeiten der festen Erde und Bewegungen in der Atmosphäre geprägt sind. In geringerem Ausmaß spielen auch Effekte eines flüssigen Erdkerns und ozeanische Strömungen und Gezeiten eine Rolle. Aus Änderungen in dUT1 lassen sich direkt Änderungen in der Rotationsgeschwindigkeit und in der Tageslänge (length of day, LOD) ableiten. Die Größe dUT1 kann unmittelbar nur mit Very Long Baseline Interferometry (VLBI) beobachtet werden. Den Satellitenverfahren, wie GNSS (Global Navigation Satellite System) oder SLR (Satellite Laser Ranging) ist aufgrund der Korrelation der Rotationsphase der Erde (UT1) mit Satellitenbahnparametern nur die zeitliche Ableitung von dUT1, das bereits erwähnte LOD, zugänglich.

Im Falle der Verwendung der Transformation nach IAU Resolutionen 2000 repräsentieren die fünf Größen  $\{x_p, y_p, dUT1, X, Y\}$  die Erdorientierungsparameter. Den Teilsatz  $\{x_p, y_p, dUT1\}$  nennt man üblicherweise Erdrotationsparameter (ERP).

## 2.2 Die Bewegung des Celestial Intermediate Pole

Der CIP ist der Referenzpol, auf welchen sich die Messungen geodätischer Weltraumverfahren beziehen, er definiert also quasi die beobachtete Achse. Dies ist eine reine Festlegung, die durch eine entsprechend angepasste Präzessions-/Nutationstheorie realisiert wird. Die Richtung des CIP entspricht keiner physikalischen Achse, wie etwa der Rotationsachse, der Figurenachse oder der Drehimpulsachse, kann jedoch rechnerisch mit all diesen Achsen in Beziehung gebracht werden. Per Definition ist der CIP eine Art Zwischenpol, der die Bewegung des Poles des TRS bezüglich des CRS in einen zälestischen und einen terrestrischen Teil aufspaltet. In Abbildung 1 ist diese Unterteilung skizziert.

Die Aufteilung erfolgt nach den Perioden der Bewegungen des CIP:

- der zälestische Teil (Präzession/Nutation,  $\{X, Y\}$ ) umfasst alle Bewegungen mit Perioden  $> 2$  Tage, betrachtet aus der Sicht des himmelfesten Systems. Dies ist gleichbedeutend mit Frequenzen zwischen  $-0,5$  und  $+0,5$  Zyklen pro Sterntag, wobei das Minuszeichen für retrograde Bewegungen, das Pluszeichen für prograde Bewegungen steht. Prograd bezeichnet

eine Bewegung im Sinne der Erdrotation, retrograd, entgegengesetzt;

- der terrestrische Teil (Polbewegung,  $\{x_p, y_p\}$ ) beinhaltet alle Bewegungen außerhalb des retrograden täglichen Bereiches im TRS. D.h. Frequenzen unter  $-1,5$  und über  $-0,5$  Zyklen pro Sterntag.

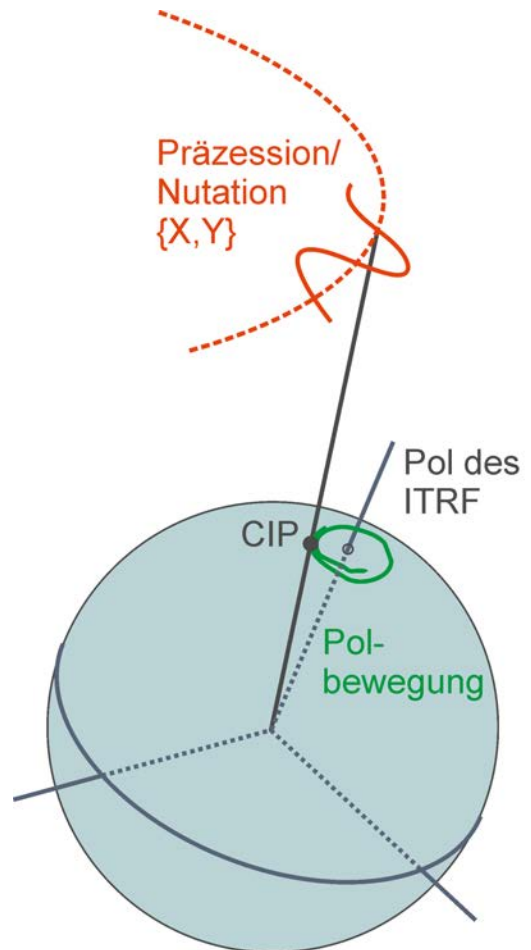


Abb. 1: Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP

Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abbildung 2 eine [4] entlehnte schematische Darstellung der konventionellen Unterscheidung zwischen Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP nach Frequenzen bzw. Perioden. Zwischen der Betrachtung der Bewegung bezüglich des TRS und bezüglich des CRS besteht eine Verschiebung um einen Zyklus pro Sterntag, aufgrund der Rotation des TRS gegenüber dem CRS.

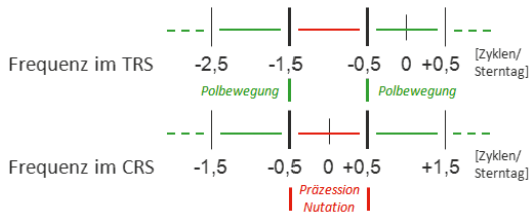


Abb. 2: Schema der Frequenzaufteilung von Präzession/Nutation und Polbewegung des CIP

Der zälestische Bewegungsanteil (Präzession/Nutation) des CIP kann zum Großteil aus einem konventionellen Präzessions-/Nutationsmodell berechnet bzw. präzidiert werden. Als gegenwärtig bestes Modell wird IAU 2006/2000A in der online verfügbaren aktualisierten Version der IERS Konventionen [6] empfohlen. Verbleibende Restanteile der zälestischen Bewegung können mittels VLBI beobachtet werden und sind vom IERS in Form der so genannten Celestial Pole Offsets  $\{\delta X, \delta Y\}$  erhältlich. Diese Modellzuschläge rühren von noch unzureichend modellierbaren Effekten, wie dem Phänomen der Free Core Nutation (FCN) her. Die FCN ist eine Eigenschwingung des Erdkörpers, die ihre Ursache in einer Abweichung der Rotationsachse des Mantels von der Rotationsachse des Erdkerns hat. Diese retrograde Bewegung hat eine Periode von ca. 430 Tagen im CRS und eine variierende Amplitude von bis zu 200 Mikrobogensekunden, was in etwa 6 mm an der Erdoberfläche entspricht. Ähnlich, wie bei einer weiteren freien Schwingung der Erde, dem Chandler Wobble (CW), sind auch die Anregungsmechanismen der FCN nicht hinreichend bekannt, um den Verlauf der Bewegung exakt vorhersagen zu können.

Der CW ist mit einer Amplitude von bis zu 6 m an der Erdoberfläche die größte Komponente der terrestrischen Bewegung (Polbewegung) des CIP. Das zweitgrößte Signal in der Polbewegung ist eine durch Druckschwankungen in der Atmosphäre verursachte jährliche Schwingung, deren Amplitude ca. 3 m ausmachen kann. Kleinere Schwankungen der Polbewegung werden durch Massenverlagerungen und Strömungen in den Weltmeeren, sowie die Gezeiten der festen Erde, der Ozeane und auch der Atmosphäre induziert. Die gesamte Polbewegung ist von vielen schwer erfassbaren und noch nicht genauer modellierbaren Faktoren abhängig. Auf der einen Seite sind dies globale dynamische Prozesse in Atmosphäre, Wasserhaushalt und im Erdinneren, auf der anderen Seite die rheologischen Eigenschaften (beschrieben durch Lovesche Zahlen) des Erdkörpers, die die Reaktion desselben auf

äußere Einwirkungen bestimmen. Mangels angemessener Vorhersagemöglichkeit wird die Polbewegung mit geodätischen Weltraumverfahren beobachtet und vom IERS in kombinierten Serien mit täglicher Auflösung veröffentlicht.

### 3. Gezeiteneffekte

Unter dem Begriff Gezeiten versteht man durch Gravitationswechselwirkungen mit Mond, Sonne und Planeten hervorgerufene periodische Deformationen der festen Erde, Änderungen der Meereshöhen und der atmosphärischen Auflast. Die Perioden, mit welchen diese Phänomene auftreten, entsprechen den Intervallen der Wiederholung bestimmter Bahnpositionen der Himmelskörper. Sowohl die Bahnen der Himmelskörper und damit die Gezeitenperioden, als auch die auf die Erde wirkenden Kräfte, in Form des Gezeitenpotenzials, sind heutzutage sehr gut bekannt. Verbesserungspotenzial gibt es dahingegen bei der Vorhersage der Reaktionen des Erdkörpers, der Ozeane und der Atmosphäre auf diese Einflüsse und die Berechnung ihrer Auswirkungen auf das Rotationsverhalten der Erde. Gezeiteninduzierte Erdrotationschwankungen treten mit Perioden von wenigen Stunden bis hin zu 18,6 Jahren auf (letzteres entspricht der Umlaufzeit des aufsteigenden Knotens der Mondbahn). Ihre Dimensionen (an der Erdoberfläche) reichen im bis zu monatlichen Periodenbereich von wenigen Zentimetern in der Polbewegung bis zu einem halben Meter in der Weltzeit. Die Amplitude der längsten Schwingung (18,6 Jahre) erreicht sogar einen Wert von ca. 170 ms, was beinahe 80 Metern am Äquator entspricht. Neben den periodischen Effekten ist der säkulare Effekt der Gezeitenreibung zu erwähnen, der infolge der verzögerten Ausbildung der Flutberge zu einer Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit und Zunahme der Tageslänge um ca. 2 ms pro Jahrhundert führt.

Die Abbildungen 3 und 4 geben einen schematischen Überblick der Größenordnungen der periodischen Gezeiteneffekte in den Erdrotationsparametern  $\{dUT1, x_p, y_p\}$ .

#### 3.1 Gezeiten der festen Erde

Die Gezeiten der festen Erde sind Verformungen der Erdkruste, die bis zu 50 cm betragen können. Tägliche feste Erdgezeiten bewirken kleine retrograde Polbewegungen der Referenzachse (CIP-Achse) mit täglicher Periode. Wegen der in Abschnitt 2.2 erläuterten Frequenzaufteilung des CIP, tauchen diese Bewegungen jedoch nicht in der Polbewegung auf, sondern werden als

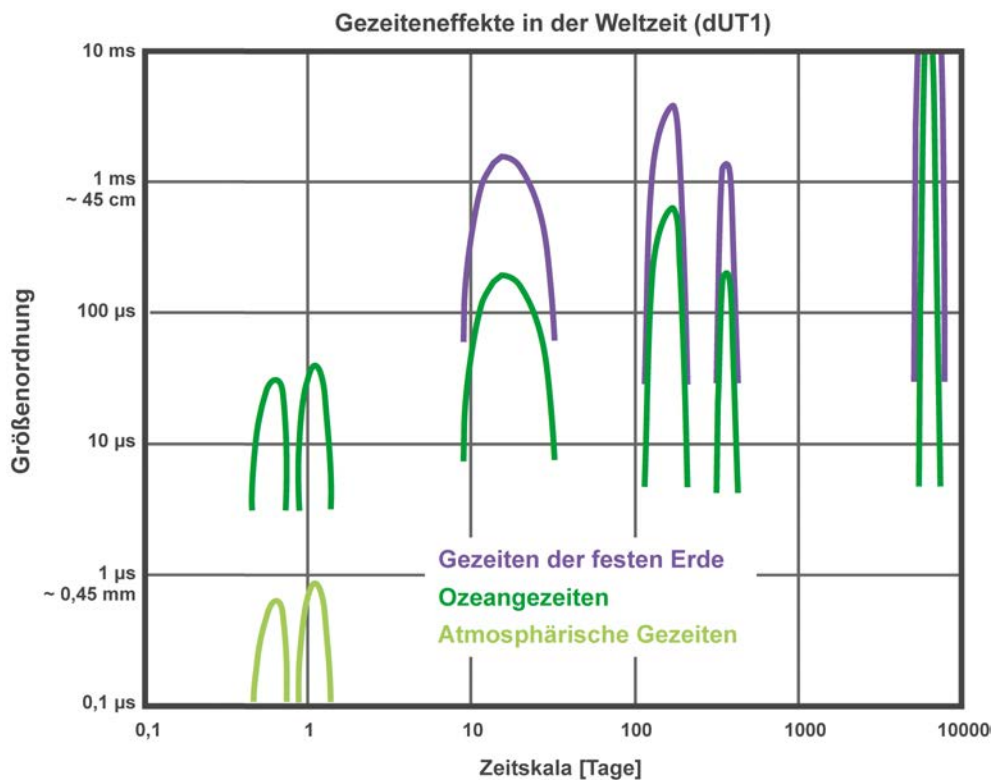


Abb. 3: Größenordnung der Gezeiteneffekte in der Weltzeit

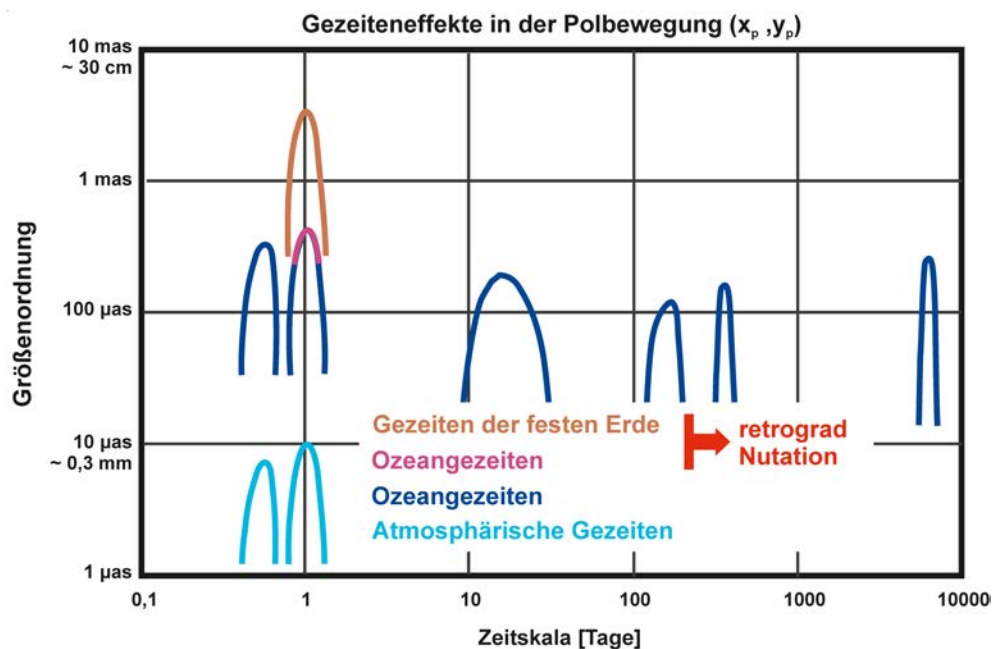


Abb. 4: Größenordnung der Gezeiteneffekte in der Polbewegung



langperiodische zälestische Variationen des CIP im Präzessions-/Nutationsmodell berücksichtigt. Jene Gezeiten, mit Perioden von wenigen Tagen bis zu 18,6 Jahren, sind nur von der Deklination bzw. Breite des gezeitenerzeugenden Körpers abhängig und daher rotationssymmetrisch. Sie haben deshalb keinerlei Auswirkungen auf die Orientierung der Referenzachse, sondern bewirken periodische Veränderungen des polaren Trägheitsmomentes der Erde. Gemäß dem Drehimpulserhaltungssatz hat dies entsprechende Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und somit der Weltzeit und des Parameters dUT1 zur Folge. Abgesehen von der bereits unter Punkt 3 erwähnten 18,6-Jahres-Periode, weisen jährliche, halbjährliche und vierzehntägige Terme die größten Magnituden auf.

### 3.2 Ozeangezeiten

Die Reaktion der Ozeane auf Gezeitenkräfte ist, bedingt durch die asymmetrische Verteilung der Kontinente und die Diversität von Ozeanbodentopographie und Küstenlinien, wesentlich komplizierter als jene der festen Erde. Ozeangezeiten jeder Periode, von halbtäglichen bis zu langjährigen, verursachen Variationen in allen Erdrotationsparametern. Halbtägliche und tägliche Meeresgezeiten rufen elliptische Polbewegungen hervor, die in einen prograden und einen retrograden Anteil aufgespalten werden können. Analog zu den Polbewegungsvariationen wegen der täglichen festen Erdgezeiten wird der retrograde Anteil der Schwankungen aufgrund der täglichen Ozeangezeiten der zälestischen Bewegung des CIP zugerechnet. Im Gegensatz zu halbtäglichen und täglichen Gezeiten der festen Erde erzeugen die der Ozeane auch halbtägliche und tägliche Variationen der Rotationsgeschwindigkeit bzw. der Weltzeit. Die langperiodischen Ozeangezeiten haben im Unterschied zu den langperiodischen festen Erdgezeiten keine rotationssymmetrische Ausprägung und erregen aufgrund dessen, neben Änderungen der Weltzeit, auch Polbewegungsvariationen.

### 3.3 Atmosphärische Gezeiten

Atmosphärische Gezeiten sind nur zu einem geringen Teil gravitativen Ursprunges. Die Hauptursache für die Entstehung atmosphärischer Gezeiten ist die unterschiedliche Aufheizung der Atmosphäre durch die Sonneneinstrahlung (thermische Gezeiten). Der Einfluss dieser täglichen und halbtäglichen Gezeitenwellen auf Polbewegung und Weltzeit ist um etwa eine Größenordnung kleiner, als der Einfluss der ozeanischen

Gezeiten und daher so gut wie nicht beobachtbar (Brzezinski et al. [7]).

## 4. Beobachtung versus Modellierung

Die Validierung und Weiterentwicklung von Modellen der ERP-Schwankungen ist eine zentrale Aufgabe der Erdrotationsforschung. Das Ziel ist zum einen die Vorhersage der Erdorientierung, um Echtzeitanwendungen und zukünftige Navigationsvorhaben zu optimieren. Zum anderen liefert der Vergleich mit Beobachtungen Erkenntnisse über bestimmte Modellparameter, mit denen z.B. Aussagen über das rheologische Verhalten der Erde getroffen werden können. In der hier beschriebenen Arbeit wurde ein momentan gebräuchliches Modell für Änderungen in der Weltzeit mit beobachteten Schwankungen, die aus VLBI-Messungen abgeleitet wurden, überprüft. Das Untersuchungsobjekt ist das in den letztgültigen IERS Konventionen empfohlene Modell für zonale Gezeiten in dUT1 bzw. LOD. Zunächst sei grob der Begriff der „zonalen“ Gezeiten erklärt: Entwickelt man ein globales Gezeitendeformationsfeld in Kugelflächenfunktionen, so kann man diese Entwicklung in zonale, sektorische und tesserale Terme einteilen. Sektorische Terme sind nur längenabhängig, tesserale sind sowohl längen-, als auch breitenabhängig. Zonale Terme sind wiederum nur breitenabhängig und dadurch rotationssymmetrisch. Diese Verformungsanteile verändern das polare Trägheitsmoment der Erde und bewirken folglich Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und damit in dUT1. Das Modell für zonale Gezeiten beinhaltet langperiodische Variationen ( $> 1$  Tag) der Weltzeit, die hauptsächlich durch feste Erdgezeiten, aber auch durch ozeanische Gezeiten induziert werden. Im Vergleich mit aus Beobachtungen verschiedener geodätischer Weltraumverfahren kombinierter Serien von Tageslängenschwankungen ergaben sich für dieses Modell relativ große Residuen, vor allem im Bereich der vierzehntägigen Perioden (Gross, [8]). In [8] wurde eine alternative Kombination mehrerer Modelle für elastische und anelastische feste Erdgezeiten und Ozeangezeiten vorgeschlagen. Als weitere unabhängige Evaluierung wurden beide Modelle einer Serie von dUT1-Variationen gegenübergestellt, die aus VLBI-Beobachtungen abgeleitet wurden.

### 4.1 Beobachtete dUT1-Schwankungen

Wie bereits erwähnt ist der Parameter dUT1 unmittelbar nur mit dem Verfahren VLBI messbar. Die Bestimmung von dUT1 (und der anderen EOP) erfolgt im Zuge der allgemeinen Parame-



Abb. 5: Ablaufschema der Signalverarbeitung

terschätzung, innerhalb welcher auch diverse andere Größen, wie Stationskoordinaten, Uhrenfehler etc. berechnet werden können. Für die Ableitung der hier herangezogenen dUT1-Serie wurde die VLBI-Software OCCAM 6.1 (Gauss-Markov-Modell) verwendet. Zur Auswertung kamen ausgewählte 24-Stunden-Sessionen aus dem Zeitraum 1984-2008. Koordinaten von Stationen und Radioquellen wurden jeweils auf ihre ITRF2005 bzw. ICRF-Extension-2 Positionen fixiert. Da ERP mit subtäglicher Auflösung bestimmt wurden, wurde für die Präzessions-/Nutationsparameter die Summe aus den Modellwerten von IAU2000A und IERS C0405 Celestial Pole Offsets festgehalten, um Korrelationen zu vermeiden. Eine solcherart berechnete dUT1-Serie enthält neben den zu untersuchenden Signalen noch einige andere Komponenten, die vor dem Vergleich reduziert werden müssen. Abbildung 5 zeigt ein Ablaufdiagramm der durchzuführenden Schritte der Signalvorverarbeitung.

Um eine Zeitreihe ohne Sprünge zu bekommen, sind zuerst die so genannten Schaltsekunden wieder anzubringen. Alle Schwingungen mit Perioden über 40 Tagen wurden aus der Serie gefiltert, da die Betrachtung in diesem Fall auf Terme mit Perioden bis zu 35 Tagen beschränkt wurde. Im Vergleich wurden die Residuen zum jeweiligen Modell angesehen, daher wurden die zu testenden Modelle vorher von der Beobachtungsreihe abgezogen. Die Weltzeit unterliegt außerdem nicht-gezeitenbezogenen atmosphärischen Einflüssen, die vorwiegend durch zonale Winde verursachte Schwankungen im gleichen Periodenbereich wie die zonalen Gezeiten hervorrufen. Diese atmosphärische Anregung von dUT1 kann aus so genannten atmosphärischen Drehimpulsfunktionen (die z.B. das Global Geophysical Fluids Centre des IERS zur Verfügung stellt) berechnet werden. Die verbleibenden dUT1-Variationen wurden als Pseudobeobachtungen in eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate eingeführt, um die Restamplituden zu den zu überprüfenden Modellen zu schätzen. Die Beobachtungsgleichung (2) ist eine Summe aus Einzelschwingungen, für die

jeweils eine Sinus- und eine Kosinusfunktion mit der entsprechenden (bekannten) Frequenz  $\xi_i$  angesetzt werden. Die Unbekannten sind die Amplituden  $A_i$  und  $B_i$  der Sinus- und Kosinusfunktion für jede Gezeitenwelle  $i$ .

$$\delta UT1 = \sum_{i=1}^{42} A_i \sin(\xi_i) + B_i \cos(\xi_i) \quad (2)$$

Sowohl das Modell nach IERS Konventionen 2003, als auch das Kombinationsmodell nach [8], bestehen aus 62 Termen mit Perioden von 5,64 Tagen bis zu 18,6 Jahren (die Modelle werden im Weiteren abkürzend mit IERS bzw. KOMB bezeichnet). Zum Vergleich herangezogen wurden lediglich Terme mit Perioden unter 35 Tagen. Demzufolge wurden im Ausgleich nur die Amplituden zu 41 entsprechenden Modelltermen bestimmt. Zur Beurteilung der Aussagekraft der mittleren Fehler der Schätzung wurde zusätzlich eine als Null-Term bezeichnete Komponente angesetzt, zu deren Periode kein gezeitenbezogenes Signal zu erwarten ist.

## 4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ausgleichung sind gemäß dem Ansatz als Zuschläge zu den Modellamplituden von IERS und KOMB zu verstehen. In Abbildung 6 sind die aus den beobachteten dUT1-Schwankungen geschätzten Amplitudenresiduen ( $\sqrt{A^2 + B^2}$ ) in Form eines Balkendiagrammes dargestellt. Die Hauptterme (jene mit den größten Modellamplituden) sind farblich hervorgehoben und mit ihrer auf George Darwin zurückgehenden Bezeichnung, sowie ihrer Periode in Tagen versehen. Die orange strich-punktierte Linie kennzeichnet den dreifachen formalen Fehler der Parameterschätzung, der verglichen mit dem Wert des Null-Terms als etwas zu optimistisch eingeschätzt werden kann.

Wesentliche Unterschiede in der Effizienz der beiden Modellkombinationen ergeben sich nur für die vierzehntägigen Terme  $Mf'$  und  $Mf$ . Hier erweist sich KOMB als deutlich besser geeignet, als das konventionelle Modell IERS, um beobachtete dUT1-Variationen zu reduzieren. Bei Anwendung des IERS Modells auf die Beobach-

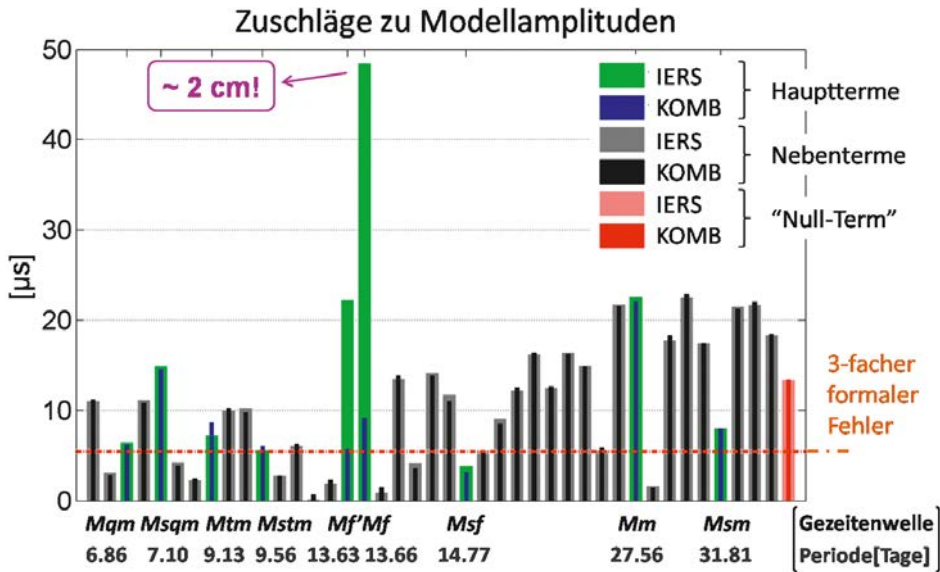


Abb. 6: Aus Beobachtungen geschätzte Zuschläge zu Modellamplituden

tungen verbleibt im vierzehntägigen Periodenbereich eine Restamplitude von bis zu knapp  $50 \mu\text{s}$ , was mehr als 2 cm am Äquator entspricht. In Anbetracht der Größe des Null-Terms von ca.  $12 \mu\text{s}$  und eines dreifachen formalen Fehlers von ca.  $5 \mu\text{s}$  ist diese Abweichung jedenfalls als signifikant einzustufen. Diese Studie bestätigt die Resultate aus [8] bezüglich der Insuffizienz des konventionellen Modells für die Effekte der zonalen Gezeiten auf dUT1, die im Besonderen die vierzehntägigen Terme betrifft. Im Rahmen der Untersuchung konnte auch gezeigt werden, dass die Kosinus-Amplitude, der so genannte „out-of-phase part“, den Hauptanteil des Residuums ausmacht. Dieser Term beschreibt eine verzögerte Reaktion des Körpers auf die Gezeitenkräfte und enthält zu einem kleinen Teil anelastische Effekte und zum größten Teil Effekte der ozeanischen Gezeiten. Ein großes Residuum im Kosinus-Term lässt also darauf schließen, dass die Effekte der Meeresgezeiten in IERS unzureichend modelliert sind. Der Modellvorschlag KOMB verwendet ein alternatives Modell für den Effekt der langperiodischen Ozeangezeiten (Kantha und Stewart [9]), welches offensichtlich besser geeignet ist, um tatsächlich beobachtete Einflüsse im vierzehntägigen Periodenbereich zu berücksichtigen. Die hier getestete Modellkombination wird als neues Modell für die Effekte der zonalen Gezeiten auf dUT1 bzw. LOD in die nächste Version der IERS Konventionen aufgenommen werden.

#### Referenzen

- [1] <http://www.iers.org>
- [2] The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry (2009), Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, Alan Fey, David Gordon, and Christopher S. Jacobs (eds.). (IERS Technical Note ; 35) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- [3] [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/ITRF2005.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php)
- [4] IERS Conventions 2003 (2004). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note; 32). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- [5] IAU-Resolutions 2000, [http://syre.obsppm.fr/IAU\\_resolutions/Resol-UA1.htm](http://syre.obsppm.fr/IAU_resolutions/Resol-UA1.htm)
- [6] <http://tai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt.html>
- [7] Brzezinski A., Bizouard Ch. and Petrov S.D. (2002): Influence of the Atmosphere on Earth Rotation: what new can be learned from recent atmospheric angular momentum estimates? *Surveys in Geophysics*, 23, pp. 33-69.
- [8] Gross R. S. (2009): Ocean tidal effects on Earth rotation, *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, Issues 3-5, pp. 219-225.
- [9] Kantha L.H. and Stewart J.S. (1998): Long-period lunar fortnightly and monthly ocean tides. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, NO. C6, pp. 12639-12647.

#### Anschrift der Autorin

Dipl.-Ing. Sigrid Böhm, Forschungsgruppe Höhere Geodäsie, Institut für Geodäsie und Geophysik E128/1, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.  
E-Mail: sigrid.boehm@tuwien.ac.at

# OVG-Vorträge

## Wintersemester 2010

### Wien

Technische Universität Wien  
Hörsaal für Geodäten, 3. Stock  
1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

**Mittwoch, Imaging Station, das bildgebende Messsystem von TOPCON**

15. September 2010,  
17 Uhr 15

*Dipl. Ing. Christine KNÖTZL, Dipl. Ing. Erwin TRUTTMANN*  
GEODIS

**Mittwoch, ViennaGIS - Das Geographische Informationssystem der Stadt Wien**

29. September 2010,  
17 Uhr 15

*Mag. Wolfgang JÖRG*  
ViennaGIS Koordinator

**Mittwoch, Aktuelle Entwicklungen in der modernen Kartographie**

20. Oktober 2010,  
17 Uhr 15

*Prof. Mag. Dr. Georg GARTNER*  
TU Wien, Institut für Geoinformation und Kartographie

Arbeitsbereich für Vermessung und  
Geoinformation  
Leopold-Franzens-Universität Innsbruck  
o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Chesi



Österreichische Gesellschaft für  
Vermessung und Geoinformation

HR Dipl.-Ing. Wolfgang Niedermayr

Arch+Ing



Kammer der  
Architekten und Ingenieurkonsulenten  
für Tirol und Vorarlberg

## Semesterprogramm – Winter 2010/11

- Donnerstag, 14. Oktober 2010, 18 Uhr 15**  
ab 17 Uhr  
Gerätepräsentation !  
**Der Einfluss neuer Technologien in Totalstationen auf klassische Vermessungsabläufe**  
*Dipl.-Ing. Daniel NINDL*  
Leica Geosystems AG, Heerbrugg
- Donnerstag, 18. November 2010, 18 Uhr 15**  
**Bildgestütztes Monitoring von Gletschern und Blockgletschern mit praktischen Beispielen**  
*Dr. Viktor KAUFMANN*  
Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie  
Technische Universität Graz
- Donnerstag, 2. Dezember 2010, 18 Uhr 15**  
**Vermessungsdienstleister in Europa – europäische Rahmenbedingungen für die Berufsausübung**  
*Dipl.-Ing. Rudolf KOLBE*  
Ingenieurkonsulent für Vermessungswesen, Schwertberg  
CLGE (Council of European Geodetic Surveyors)
- Donnerstag, 13. Jänner 2011, 18 Uhr 15**  
**noli me tangere – Stand und Perspektiven berührungsloser terrestrischer Beobachtungsverfahren**  
*Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas A. WUNDERLICH*  
TU München, Lehrstuhl für Geodäsie

Alle Veranstaltungen finden im HSB 6 der Universität Innsbruck, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck statt.

Um Ihnen in Zukunft Mitteilungen über die Veranstaltungsreihe rascher und aktueller zukommen lassen zu können, bitten wir Sie um Bekanntgabe Ihrer E-Mail Adresse:

- Anruf/Fax a. d. AB f. Vermessung und Geoinformation 0512 - 507 / 6751 507 / 2910
- Anruf/Fax an das Vermessungsamt Innsbruck 0512 - 58 80 91 / 1201 58 80 91 / 1254
- E-Mail an den Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation [geodaesie@uibk.ac.at](mailto:geodaesie@uibk.ac.at)



Neu

**A** Fly  
austrian  
map

extrem genau

# Austrian Map Fly 5.0

## Topographische Landkarte extrem genau

- Staatliche Österreichische Karte im Maßstab 1:50 000 mit Weg- und Straßenmarkierungen, 1:200 000 und 1:500 000
- Eigene Routen als Overlay perspektivisch darstellbar **Neu**
- Suche nach Namen und Koordinaten
- Export auf Handys **Neu**
- 2D/3D Darstellung – Flugmodus
- Anzeige der höchsten und niedrigsten Erhebung **Neu**

