

Aktuelle Trends in der österreichischen Forschung

Berichte der ÖGK beim 11. Österreichischen Geodätentag
am 9. Mai 2012

Weather and Climate: Signal and Noise for Geodesy

T. Nielsen (Rinner – Preisträger)



DREILÄNDERTAGUNG D - A - CH

und 33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF



27. Februar bis 1. März 2013
in Freiburg



FREIBURG, 27. JULI 2012
WORLDVIEW-2 SATELLITE, 50 CM IMAGE

Satellitenaufnahme gesponsert durch:



www.euspaceimaging.com

© European Space Imaging / DigitalGlobe



Ausrichter:
Geomatik Tagungs-GmbH
Oststr. 2-18
48145 Münster

Registrierung: www.dgpf.de

Terminvormerkung



Österreichische Zeitschrift für
**Vermessung &
Geoinformation**

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

100. Jahrgang 2012

Heft: 3/2012

ISSN: 1605-1653

Schriftleiter: Dipl.-Ing. Andreas Pammer

Stellvertreter: Dipl.-Ing. Stefan Klotz

Dipl.-Ing. Ernst Zahn

A-1020 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

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

H. Schuh:

Vorwort

315

C. Atzberger, K. Richter:

**Kombination spektraler und räumlicher Information für
die fernerkundliche Erfassung von Vegetationsparametern**

316

W. Hausleitner, F. Moser:

**Präzise Absolutkalibration des Jason-2 Altimeters mit Hilfe eines
Mikrowellentransponders**

324

J. Otter:

**Transformationsflächen für die Umrechnung zwischen ETRS89 und
MGI in Österreich**

333

R. Weber:

**Aktuelle Multi-GNSS Implementierungsszenarien –
Sicht der Systembetreiber und des IGS**

341

T. Weinold, A. Grimm-Pitzinger:

Die Lagerung der Gleisvermessungen der ÖBB

348

H. Woschitz:

**Faseroptische Erweiterung des geodätischen Messlabors
der TU Graz**

353

H. Schuh:

Verleihung des Karl Rinner Preises 2010

365

T. Nilsson:

Weather and Climate: Signal and Noise for Geodesy

367



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

100. Jahrgang 2012 / ISSN: 1605-1653

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. Andreas Pammer, Tel. (01) 21110-5336, Dipl.-Ing. Stefan Klotz, Tel. (0662) 829319-21, Georg-Wagner-Gasse 8, A-5020 Salzburg, Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Tel. (01) 21110-3209, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. Fax (01) 2167551, E-Mail: 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. Johannes Böhm, Univ.-Prof. Dr. Werner Lienhart, Univ.-Prof. Dr. Norbert Pfeifer,

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. (0662) 829319-21, Georg-Wagner-Gasse 8, A-5020 Salzburg. 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.



<http://www.ovg.at>



<http://www.oegk-geodesy.at>

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, dass ein weiteres Beispiel für die äußerst konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen OVG und ÖGK. Beim Geodätentag in Velden wurden am 9. Mai 2012 im von der ÖGK zusammengestellten Teil insgesamt sechs 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 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.

Weiters wurde im Anschluss an die wissenschaftliche Vortragsreihe der ÖGK der Karl Rinner Preis zum 7. Mal vergeben. Die Präsentation des Karl Rinner Preisträgers 2010 wird in der vorliegenden Ausgabe der vgi nun schriftlich dokumentiert.

Prof. Dr. Harald Schuh
(Präsident der ÖGK)

Kombination spektraler und räumlicher Information für die fernerkundliche Erfassung von Vegetationsparametern



Clemens Atzberger, Wien und Katja Richter, München

Kurzfassung

Im Vergleich zu klassischen multispektralen Datensätzen ermöglichen hyperspektrale Aufnahmen eine verbesserte qualitative und quantitative Analyse von Vegetationsbeständen in Land- und Forstwirtschaft [1]. Trotz der verbesserten spektralen Auflösung sind jedoch weiterhin Probleme bei der Ableitung der gewünschten Vegetationsgrößen zu beobachten. Die Probleme hängen hauptsächlich damit zusammen, dass die fernerkundlich erfasste Bestandssignatur durch eine große Anzahl an Parametern bestimmt wird [2] [3] [4]. Dies hat zur Folge, dass sich eine gemessene Bestandssignatur nicht immer eindeutig einem einzigen Parameterset zuordnen lässt [5]. Anders ausgedrückt: das Schätzproblem ist unterbestimmt, da verschiedene Parameterkombinationen zu einer ähnlichen Spektralsignatur führen [6]. Weitere (zumeist externe) Informationen sind daher notwendig, um in solchen Fällen eine eindeutige Auswertung vornehmen zu können [7] [8] [9]. Externe Informationen können beispielsweise ALS Daten sein oder Daten aus einem anderen Wellenlängenbereich beinhalten [10].

Mit dem vorliegenden Beitrag wird gezeigt, dass ein Teil der zur Problemeingrenzung notwendigen Information aus dem räumlich mittel bis hoch aufgelösten Bild (Pixel ≤ 30 m) selbst gewonnen werden kann [11]. Dabei wird die Tatsache genutzt, dass die Charakteristika nah beieinander liegender Objekte ähnlicher sind als die weit(er) entfernt liegender Objekte [12] [13]. In landwirtschaftlich genutzten Flächen wird beispielsweise innerhalb einer Parzelle lediglich eine einzige Kulturpflanze angebaut. Ohne die genaue Kulturpflanze zu kennen ist damit zumindest sichergestellt, dass alle Pixel innerhalb dieser Parzelle die gleiche Art erfassen. Damit ist beispielsweise die Annahme gerechtfertigt, dass der Blatthaltungswinkel (ALA) für alle Pixel des gegebenen Feldes identisch sein muss, da der Blatthaltungswinkel eine artspezifische Konstante ist. Wie gezeigt werden wird, erleichtert diese Tatsache die flächenhafte Kartierung des Blattflächenindex (LAI), da beide bio-physikalischen Größen einen vergleichbaren Effekt auf die Spektralsignatur ausüben.

Aufbauend auf eigenen Vorarbeiten [11] [14] wird dieses Konzept in dieser Arbeit am Beispiel einer CHRIS/PROBA Aufnahme über landwirtschaftlichen Kulturpflanzenbeständen in Barrax, Südspanien vorgestellt. Zur Illustration wird eine „objekt-basierte“ Inversion eines weit verbreiteten, physikalisch-basierten Strahlungstransfermodells herangezogen. Das innovative Verfahren berücksichtigt bei der Schätzung des Blattflächenindex (LAI) nicht nur die Spektralsignatur des beobachteten Pixels, sondern auch die Signaturen benachbarter Pixel, die dem gleichen Objekt angehören. Es wird gezeigt, dass durch die Kombination spektraler und räumlicher Informationen höhere Genauigkeit in der LAI Schätzung erzielt wird, als unter Verwendung des klassischen „pixel-basierten“ Verfahrens. So sinkt der RMSE des geschätzten LAI von $1.46 \text{ m}^2/\text{m}^2$ auf $0.54 \text{ m}^2/\text{m}^2$, wenn statt des traditionellen Inversionsverfahrens ein objekt-basierter Ansatz gewählt wird.

Schlüsselwörter: Strahlungstransfermodellierung, Blattflächenindex, Inversionsproblematik

Abstract:

The recent availability of hyperspectral imagery allows improved qualitative and quantitative analyses of vegetation compared to classical multispectral data sets. Besides a wide range of application fields, main beneficiaries of this new data source will be the agricultural and forestry sectors. However, there are still problems regarding the deviation of vegetation biophysical variables from the remotely sensed data because the spectral signal combines the effects of many different structural and biochemical variables. Moreover, different combinations of the variables may produce almost identical spectra, resulting in significant uncertainties in the estimation of the biophysical vegetation variables. Several solutions have been proposed to solve this problem, such as the use of external or *a priori* information.

In this study we present an approach, which directly employs information from the same high to medium resolution (≤ 30 m) imagery data. The approach uses the geostatistical fact that the biophysical characteristics of nearby pixels are generally more similar than those at a larger distance. In agricultural areas, for instance, the characteristics of certain variables, such as the average leaf angle (ALA), can be assumed equal within one crop field. Such knowledge alleviates the estimation of the leaf area index (LAI), which has a very similar effect to ALA on the spectral signal.

Based on our own studies, we demonstrate this concept on a CHRIS/PROBA data set acquired in the agricultural area of Barrax, Spain. For illustration purposes, an object-based inversion approach of a widely used radiative transfer model is applied. Compared to a "pixel-based" approach the accuracy of LAI estimates could be improved from $RMSE = 1.46 \text{ m}^2/\text{m}^2$ to $RMSE = 0.54 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Therefore, the combination of spectral and spatial information potentially yields higher accuracies of LAI retrievals compared to traditionally applied approaches.

Keywords: radiative transfer modeling, LAI, ill-posed inverse problem, regularization

1. Fernerkundliche Quantifizierung biophysikalischer Vegetationsparameter

Flächendeckende und räumlich detaillierte Informationen über die raumzeitliche Ausprägung biophysikalischer Vegetationsparameter werden in den verschiedensten Anwendungsbereichen benötigt [15]. Eine der wichtigsten biophysikalischen Größe ist der Blattflächenindex (LAI in m^2/m^2) [16]. Darüber hinaus ist aber auch die Blattzusammensetzung wichtig, beispielsweise charakterisiert durch Blattchlorophyll- (Cab; $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) und Blattwassergehalte (Cw; cm) [17]. Die drei genannten biophysikalischen Größen werden unter anderem im sogenannten „precision farming“ benötigt, wo Dünge- und Pflanzenschutzmittel – in Abhängigkeit vom Wachstumszustand der Pflanzen – räumlich differenziert aufgebracht werden [18][19]. In der Forstwirtschaft ermöglichen Informationen über Struktur, Zusammensetzung und Vitalität der Bestände eine nachhaltigere Bewirtschaftung [20].

Die genannten biophysikalischen Parameter können prinzipiell aus der fernerkundlich erfassten Spektralsignatur der Vegetationsbestände abgeleitet werden, da diese die Reflexionscharakteristika der Vegetation beeinflussen [1]-[4]. Eine exakte Schätzung, zum Beispiel mittels physikalisch basierter Strahlungstransfermodelle (RTM), ist jedoch nicht immer möglich was u. a. damit zusammenhängt, dass eine Vielzahl von (biophysikalischen) Parametern (V_i ; $i = 1 : n$) das Reflexionsspektrum (ρ_λ) beeinflussen (plus zu-

sätzliche – meist bekannte – Randbedingungen, V_r ; $r = 1 : m$) [21]:

$$\rho_\lambda = f(V_i, V_r, \varepsilon) \quad (1)$$

Probleme treten insbesondere dann auf, wenn verschiedene Parameterkombinationen (V_i) in der Simulation des RTM („radiative transfer model“) zu ähnlichen Signaturen (ρ_λ) führen. In solchen Fällen können die gesuchten Größen (beispielsweise der LAI) nicht eindeutig bestimmt werden, es sei denn es gelingt einige der zur ‚Konfusion‘ beitragenden Parameter zu bestimmen [22].

2. Illustration des „ill-posed inverse problem“

Das grundlegende Problem bei der Arbeit mit Reflexionsmodellen besteht darin, dass teilweise sehr unterschiedliche Parameterkombinationen zu mehr oder weniger identischen Reflexionsspektren führen [17] [23]. Implizit bedeutet dies, dass die gesuchten biophysikalischen Parameter nicht mehr zweifelsfrei aus den aufgezeichneten Spektraldaten abgeleitet werden können. Man spricht hier im Sinne von Combal et al. [24] vom sogenannten „ill-posed inverse“ Problem. Ähnliche Sachverhalte sind im Bereich der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten gut bekannt, wenn zwei (oder mehr) Klassen sich im Merkmalsraum überlappen.

Zur Illustration des Sachverhaltes sind in Abb. 1(a) sechzehn mehr oder weniger iden-

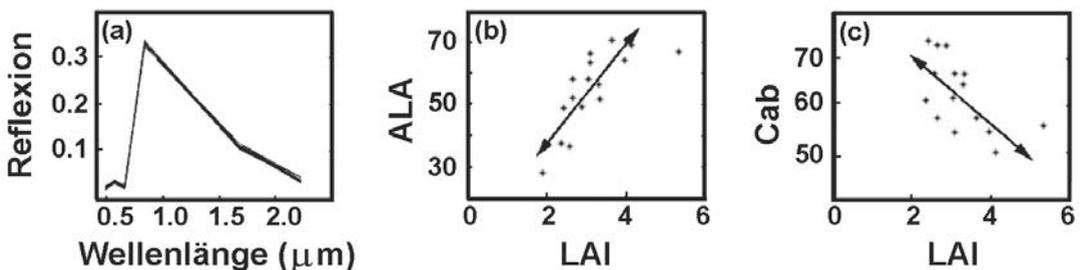


Abb. 1: Illustration des „ill-posed inverse problem“ mit Hilfe des PROSPECT+SAIL Strahlungstransfermodells. (a) 16 simulierte Reflexionsspektren eines Vegetationsbestandes in den sechs reflektiven Landsat-TM Spektralkanälen. (b) Gegenseitige Abhängigkeit des Blattflächenindex (LAI) und des Blatthaltungswinkels (ALA) für die 16 simulierten Spektren. (c) wie (b) für LAI und den Blattchlorophyllgehalt (Cab). Illustration aus [25].

tische Reflexionsspektren in den reflektiven TM-Kanälen dargestellt [25]. Die aus sehr unterschiedlichen Parameterkombinationen resultierenden Spektren sind visuell kaum zu unterscheiden. Eine Bestimmung der zu Grunde liegenden Parameterkombinationen wäre nur mit großen Fehlermargen möglich. Im gewählten Fall ist die Mehrdeutigkeit der Reflexionssignatur darauf zurückzuführen, dass sich die verschiedenen Parameter gegenseitig kompensieren (Abb. 1 (b) und (c)). So kann anscheinend eine Zunahme des LAI dadurch ausgeglichen werden, dass der Blatthaltungswinkel (ALA) zunimmt und/oder Blattchlorophyllgehalt (Cab) abnimmt. Wäre dagegen zumindest der Blatthaltungswinkel bekannt, könnten LAI und Cab mit weit höherer Genauigkeit aus den Reflexionsspektren abgeleitet werden.

Sehr effektiv lässt sich das Problem auch im 2-dimensionalen (Rot-nIR) Merkmalsraum illustrieren (Abb. 2) [14]. Dargestellt ist die Tatsache, dass sich je nach gewählter Bodenheiligkeit verschiedene „soil-isolines“ ergeben (A). Alle „soil-isolines“ eines gegebenen Pflanzenhabitus (mit entsprechendem Blatthaltungswinkel) kumulieren bei sehr hohem LAI in einem Punkt, da dann der Einfluss unterschiedlicher Bodenheiligkeiten verschwindet (B). Eine gegebene Rot-nIR Reflexion (im Kurvenschnittpunkt) wird im gewählten Beispiel durch fünf sehr unterschiedliche Kombinationen aus Blatthaltungswinkel (ALA), Bodenheiligkeit (α_{soil}) und LAI erzielt (C). Damit kann die gewünschte Größe – hier LAI – nicht eindeutig bestimmt werden. Wäre dagegen der

ALA und/oder die Bodenheiligkeit (α_{soil}) bekannt, wäre dies möglich.

3. Vorgeschlagener objekt-basierter Lösungsansatz

Zur Lösung des „ill-posed“ Problems wurden traditionell drei Strategien vorgeschlagen [22]:

- Berücksichtigung externer *a priori* Information [24] [26] [27] [28] [29] [30]
- Nutzung multi-temporalen Aufnahmen zur nachträglichen Glättung fehlerhafter LAI Schätzungen bzw. zur Generierung von *a priori* Information [31] [32] [33]
- Assimilation der (multi-temporalen) Bestandsreflexion in prozessorientierte Modelle [34] [35]

Die Berücksichtigung von externer *a priori* Information bringt spürbare Verbesserungen in der Schätzgenauigkeit, setzt allerdings voraus, dass die benötigte Information (z.B. Blatthaltungswinkel im jeweiligen Pixel) auch tatsächlich für jeden Pixel zur Verfügung steht.

Die Stetigkeit der LAI-Entwicklung im Entwicklungszyklus der Pflanze wird bei der multi-temporalen Strategie in Wert gesetzt. Dabei wird der LAI zunächst mit klassischen Verfahren für jeden einzelnen Aufnahmezeitpunkt geschätzt. Die so geschätzten LAIs werden dann als Funktion der Zeit durch eine semi-empirische Funktion gefittet. Die gefitteten LAIs zu den einzelnen Aufnahmezeitpunkten stellen dann in einem zweiten Schritt *a priori* Werte dar, mit denen die Modellinversion wiederholt wird. Der iterative Prozess wird so lange fortgesetzt, bis eine Stabilisierung der Ergebnisse auftritt.

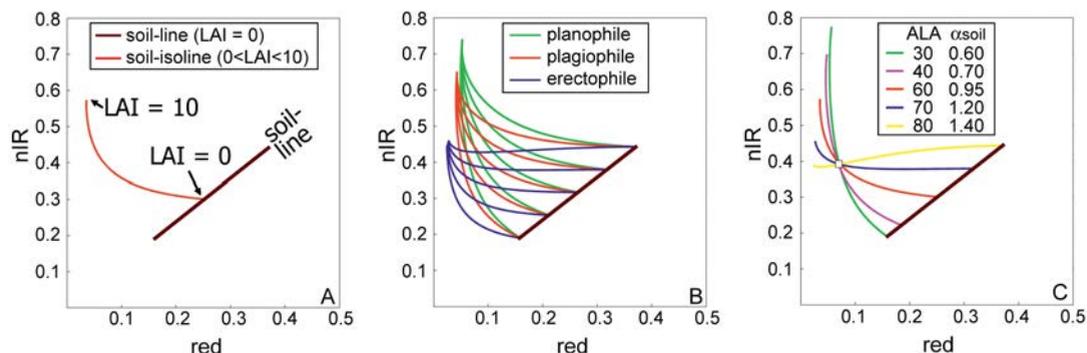


Abb. 2: Illustration des „ill-posed inverse problem“ im 2-dimensionalen Merkmalsraum (Rot-nIR). Die Simulationen wurden mit Hilfe des PROSPECT+SAIL Strahlungstransfermodells durchgeführt. Die optischen Blatteigenschaften wurden als konstant angenommen. (A) Abhängigkeit der Rot-nIR Reflexion vom Blatthaltungswinkel (LAI) und der Bodenheiligkeit (α_{soil}). Die Kurve wird als „soil-isoline“ bezeichnet. (B) Fünfzehn „soil-isolines“ für 5 Bodenheiligkeiten und 3 Blatthaltungswinkel. (C) Verschiedene Möglichkeiten, die gegebene Kombination aus Rot-nIR (Rechteck) durch geeignete Parameterkombinationen zu erzielen (entspricht dem „ill-posed inverse problem“). Illustration aus [14].

Die Assimilation von Fernerkundungsdaten in prozessorientierte Modelle verzichtet gänzlich auf eine Inversion des Reflexionsmodells. Vielmehr werden Prozess- und Reflexionsmodelle so miteinander gekoppelt, dass mit Hilfe der (klimatischen) Antriebsvariablen LAI-Entwicklungen simuliert werden, die wiederum die Berechnung temporaler Reflexionsprofile ermöglichen. Aufgezeichnete Reflexionsspektren zu einem oder mehreren Zeitpunkten werden dann in einem iterativen Verfahren dazu verwendet, Parameter des gekoppelten Prozess-/Reflexionsmodells anzupassen. Nach erfolgter Parameteranpassung können die zeitlichen Profile des simulierten LAI ausgegeben werden.

Mit der vorliegenden Publikation wird ein weiterer selbst entwickelter Lösungsansatz für die „ill-posed“ Problematik präsentiert [11] [14] [23]. Die Methodik berücksichtigt neben der eigentlichen Signatur des betrachteten Pixels auch die Spektralinformation räumlich angrenzender Pixel, um die gesuchten biophysikalischen Parameter zu bestimmen. Die vorgeschlagene Methodik ist in Abb. 3 illustriert und bezieht sich direkt auf Abb. 2 (C).

Bei der vorgeschlagenen objekt-basierten Methodik wird simultan zur eigentlichen Pixelsignatur die Spektralinformation der angrenzenden Pixel (d.h. die sogenannte „Objekt-signatur“) berücksichtigt, beispielsweise in einem gleitenden Fenster. Innerhalb einer landwirtschaftlichen Fläche (oder einer forstlichen Bestandseinheit) kann davon ausgegangen werden, dass alle Pflanzen den gleichen Habitus (ALA) haben. Auch ändert sich die Bodenhelligkeit meist nur graduell von

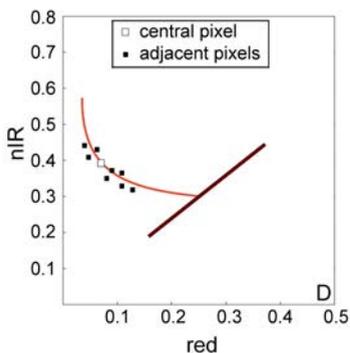


Abb. 3: Illustration des vorgeschlagenen Lösungsansatzes für das „ill-posed inverse problem“. Dargestellt ist das zu invertierende Pixel (leeres Rechteck) sowie die Rot-nIR Reflexion der 8 direkt angrenzenden Pixel (schwarze Rechtecke). Alle Simulationen wurden mit dem PROSPECT+SAIL Strahlungstransfermodell durchgeführt. Es wird angenommen, dass alle Pflanzen den gleichen Habitus haben (ALA) sowie mehr oder weniger identische Boden-helligkeiten (α_{soil}). Unter dieser Annahme gibt es lediglich eine einzige „soil-isoline“ (in rot), die die 9 Signaturen zufriedenstellend modelliert. Damit werden für die 3×3 Pixel eines gleitenden Fensters identische Boden-helligkeiten (α_{soil}) und Blatthaltungswinkel (ALA) ausgegeben, bei verschiedenen (pixel-spezifischen) LAI. Illustration aus [14].

Pixel zu Pixel. Unter diesen Annahmen werden sich die Pixel in einem (3×3) gleitendem Fenster, beispielsweise wie in Abb. 3 gezeigt, abbilden. Nur eine einzige „soil-isoline“ wird alle neun Signaturen zufriedenstellend simulieren. Das heißt nur eine einzige Kombination aus $ALA \times \alpha_{soil}$ ist für alle neun Signaturen zielführend, womit der LAI des zentralen Pixels (und der angrenzenden Pixel) eindeutig bestimmt werden kann. Gleiches gilt für die Arbeit im n-dimensionalen Merkmalsraum, der hier allerdings nicht illustriert werden kann.

4. Anwendung des objekt-basierten Ansatzes auf Satellitendaten

Der beschriebene objekt-basierte Inversionsansatz wurde an Hand eines 8-kanaligen CHRIS/PROBA Datensatzes über Barrax (Spanien) überprüft (N $30^{\circ} 3'$, W $2^{\circ} 6'$) (Abb. 4) [14]. Referenzmessungen zur Validierung des Verfahrens wurden innerhalb der inter-disziplinären ESA SPARC 2004 Kampagne [36] im Juli 2004 durchgeführt. Der Überflug fand am 16. Juli 2004 um 11:25 UTC statt. Ausgewertet wurde die Nadir-nächste Beobachtungsrichtung (8.4°) bei einem Sonnenzenitwinkel von 21° und einem relativen Azimut von 138° . Für die vorliegende Arbeit beschränkte man sich auf 3 Kulturen, für die das gewählte Strahlungstransfermodell (PROSPECT+SAIL [37] [38]) zufriedenstellend genau arbeitet: Luzerne, Knoblauch und Zuckerrübe. Details zum ausgewählten Datensatz finden sich in [14], sowie in [39] [40].

Zur Inversion des Strahlungstransfermodells wurde auf eine klassische LUT-Prozedur zurückgegriffen [30] [41] [42]. Bei diesem Ansatz wird eine große Anzahl von synthetischen Spektren simuliert und gemeinsam mit den korrespondierenden Parameterkombinationen in einer Datenbank (look-up-table) gespeichert. Ein gegebenes Reflexionsspektrum wird dann mit allen simulierten Spektren verglichen um die beste geeignete Parameterkombination zu bestimmen („matching“ Verfahren).

In der vorliegenden Arbeit wurde die LUT-basierte Inversion 2-fach durchgeführt: (1) mit Hilfe des vorgeschlagenen objekt-basierten Ansatzes, und (2) zu Vergleichszwecken in der klassischen

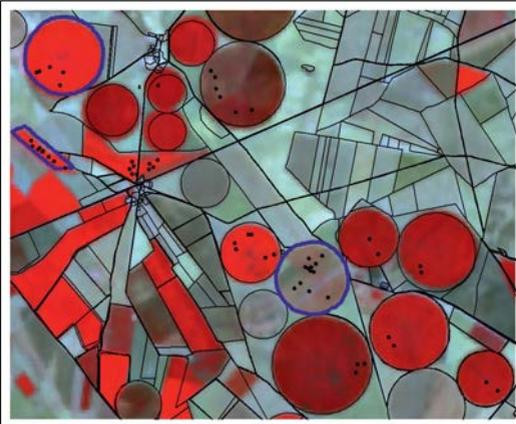


Abb. 4: Barrax Testgebiet in Südspanien (N 30° 3', W 2° 6') während der ESA SPARC 2004 Feldkampagne. Gezeigt ist ein Falschfarben RGB-Komposit des verwendeten CHRIS/PROBA Satellitensensors vom 16. Juli 2004. Die schwarzen Punkte stellen die Positionen der LAI-Feldmessungen dar. Blau umrandet sind die drei Felder, die für die vorliegende Arbeit ausgewertet wurden. Illustration aus [14].

(pixel-weisen) Variante (Abb. 5). Details finden sich in [14].

4.1 Räumliche Kohärenz der invertierten biophysikalischen Größen

Bevor die geschätzten LAI Werte mit zeitgleich am Boden gemessenen Referenzwerten verglichen werden, sollen zunächst einige andere bio-physikalische Parameter auf ihre Plausibilität überprüft werden. Ein solcher Ansatz ist in Abb. 6 gewählt. Dargestellt sind die aus CHRIS/PROBA Daten geschätzten Bodenhelligkeiten (α_{soil}) aus dem traditionellen (links) und dem vorgeschlagenen Ansatz (rechts). Außerdem ist ein Profil durch das Zentrum des bewässerten Luzerne Feldes („Alfalfa“) dargestellt (unten). Es ist deutlich zu erkennen, dass der pixel-basierte Ansatz (in rot) eine hohe räumliche Variabilität der Bodenhelligkeit suggeriert, die wenig plausibel ist. Über sehr kurze räumliche Distanzen ergibt der pixel-basierte Ansatz Bodenhelligkeiten zwischen den Extremen ‚sehr hell‘ und ‚sehr dunkel‘. Plausibel erscheint dagegen das Ergebnis des vorgeschlagenen objekt-basierten Ansatzes (in blau) bei dem die Bodenhelligkeit nur graduell, und nur innerhalb engerer Grenzen, variiert.

Eine zu starke Variabilität und fehlende räumliche Kohärenz kann auch für die zwei anderen Kulturen sowie den Blatthaltungswinkel (ALA), die Bodenhelligkeit (α_{soil}) und den Blattchlorophyllgehalt (Cab) attestiert werden (Abb. 7). So sind beispielsweise Variationen (innerhalb eines Feldes) des Blatthaltungswinkels zwischen $ALA = 20^\circ$ und $ALA = 70^\circ$ völlig unplausibel, da alle Pflanzen genetisch identisch und in einem vergleichbaren Entwicklungsstadium sind. Zu-

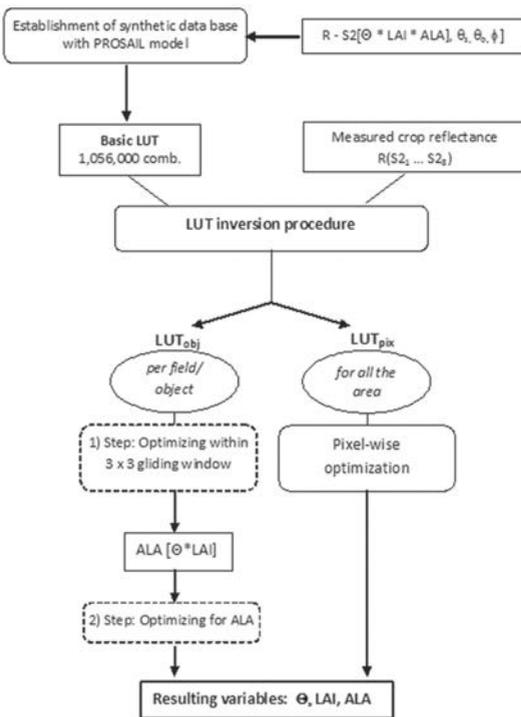


Abb. 5: Illustration des vorgeschlagenen objekt-basierten (links) und des klassischen (pixel-basierten) Inversionsansatzes unter Zuhilfenahme eines look-up-table (LUT) Verfahrens. Illustration aus [14].

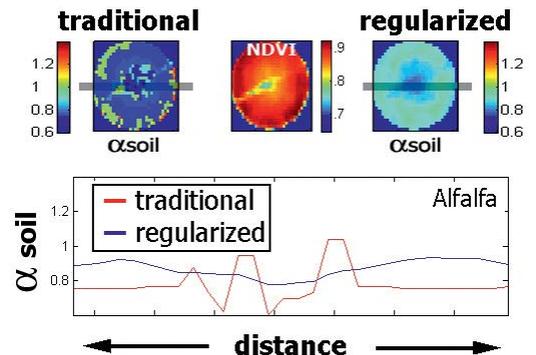


Abb. 6: Erzielte Ergebnisse für das Luzerne („alfalfa“) Feld. Dargestellt sind die geschätzten Bodenhelligkeiten (α_{soil}). (links) Klassischer (pixel-basierter) Inversionsansatz. (rechts) Vorgeschlagener objekt-basierter Ansatz. (unten) Horizontale Profile durch das Zentrum des Bewässerungsfeldes. Illustration aus [14].

dem wurden alle Felder bewässert und waren in einem ungestörten Zustand.

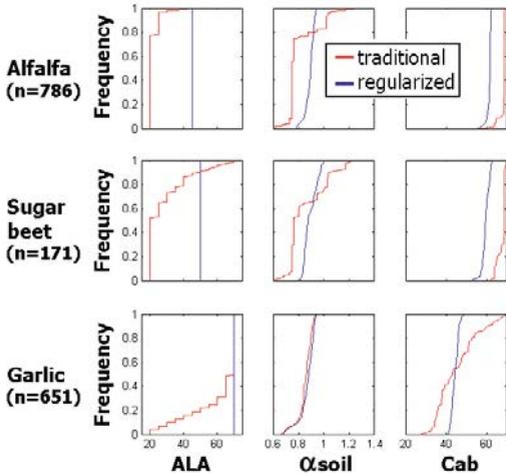


Abb. 7: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der geschätzten bio-physikalischen Größen Blatthal tungswinkel (ALA), Bodenhelligkeit (α_{soil}) und Blattchlorophyllgehalt (Cab) für die drei untersuchten Kulturen: Luzerne („alfalfa“), Zuckerrübe („sugar beet“) und Knoblauch („garlic“). Die Ergebnisse des klassischen (pixel-basierten) Ansatzes sind in rot dargestellt, die Ergebnisse des vorgeschlagenen objekt-basierten Ansatzes in blau. Die Skalierung der x-Achsen entspricht typischerweise vorkommenden Minimal- und Maximalwerten. Illustration aus [14].

4.2 Vergleich gemessener und geschätzter LAI

Neben der Plausibilität der geschätzten Parameter wurde ein Vergleich der geschätzten und am Boden gemessenen LAI-Werte durchgeführt (Abb. 8). Insbesondere für die Messungen über Luzerne und Zuckerrübe ergab der pixel-basierte Ansatz einen insgesamt zu niedrigen (flachen) Blatthal tungswinkel (siehe auch Abb. 7 links). Diese ‚Fehlschätzung‘ wurde bei der pixel-basierten Modellinversion durch einen zu geringen LAI ‚kompensiert‘ (Abb. 8 rechts). Der objekt-basierte Ansatz (links) ergibt dagegen eine insgesamt wesentlich bessere LAI-Schätzung mit einem RMSE von $0.54 \text{ m}^2/\text{m}^2$ im Vergleich zu 1.46 im pixel-basierten Ansatz. Ähnlich starke Differenzen wurden auch im Rahmen einer synthetisierten Datenreihe ermittelt [11].

5. Schlussfolgerungen

In verschiedenen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die Verwendung physikalisch basier-

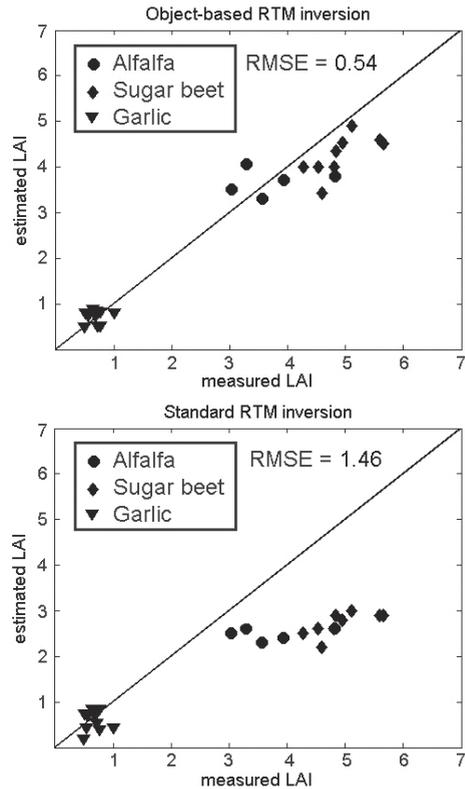


Abb. 8: Am Boden gemessene Referenzmessungen des LAI versus den aus CHRIS/PROBA Daten geschätzten Werten. (oben) Ergebnisse des vorgeschlagenen objekt-basierten Ansatzes. (unten) Traditioneller pixel-basierter Ansatz. RMSE in m^2/m^2 . Illustration aus [14].

ter Reflexionsmodelle Vorteile gegenüber empirisch-statistischen Verfahren bietet. Gleichzeitig hat die Illustration des sogenannten „ill-posed“ Problems aber auch deutlich gemacht, dass selbst etablierte physikalisch basierte Reflexionsmodelle wie PROSPECT+SAIL an ihre Grenzen stoßen können. Dies ist immer dann der Fall, wenn verschiedene Parameterkombinationen zu sehr ähnlichen Reflexionssignaturen führen. In solchen Fällen kann das Inversionsergebnis stark variieren. Dies bedeutet, dass die Lösung im n-dimensionalen Merkmalsraum der bio-physikalischen Größen nicht eindeutig lokalisiert ist und teilweise zwischen verschiedenen Orten springt. Das Ergebnis ist mehr oder weniger zufällig und in vielen Fällen falsch.

Die bislang zur Lösung des „ill-posed“ Problems vorgeschlagenen Ansätze setzen allesamt Informationen voraus, die entweder extern beige-steuert werden müssen oder aber aus multi-tem-

poralen Aufnahmesequenzen abzuleiten sind. Um davon unabhängig zu werden, wurde ein Ansatz entwickelt, der die benötigten Informationen aus dem zu bearbeitenden Bild selbst extrahiert. Mit Hilfe der sogenannten Objektsignatur lassen sich wichtige bio-physikalische Vegetationsparameter (beispielsweise der Blattflächenindex LAI) mit höheren Genauigkeiten schätzen, als beim pixel-basierten Ansatz. Gleichzeitig nimmt die räumliche Kohärenz der invertierten Parameterfelder zu, womit ein insgesamt plausibleres Ergebnis präsentiert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] *Curran, P.J., 1994*: Imaging spectrometry.- Progress in Physical Geography, 18(2): 247-266.
- [2] *Baret, F., 1991*: Vegetation canopy reflectance: Factors of variation and application for agriculture.- Hunt (Ed.): Physical measurements and signatures in remote sensing, France, 145-167.
- [3] *Danson, F.M., Curran, P.J., 1993*: Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations.- Remote Sensing of Environment, 43: 55-65.
- [4] *Guyot, G., Guyon, D., Riom, J., 1989*: Factors affecting the spectral response of forest canopies: A review.- Geocarto International, 3: 43-60.
- [5] *Goel, N.S., 1987*: Models of vegetation canopy reflectance, their use in estimation of bio-physical parameters from reflectance data.- Remote Sensing Reviews, 4: 1-212.
- [6] *Tarantola, A. (2005)*: Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Society for Industrial and Applied Mathematics, 358 pages.
- [7] *Dorigo, W., Richter, R., Baret, F., Bamler, R. and Wagner, W. (2009)*: Enhanced automated canopy characterization from hyperspectral data by a novel two step radiative transfer model inversion approach. Remote Sensing, 1(4), 1139-1170.
- [8] *Houborg, R., Soegaard, H., Boegh, E. (2007)*: Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. Remote Sensing of Environment, 106, 39-58.
- [9] *Houborg, R., Anderson, M., & Daughtry, C. (2009)*: Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. Remote Sensing of Environment, 113, 259-274.
- [10] *Clevers, J. G. P. W. & van Leeuwen, H. J. C. (1996)*. Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. Remote Sensing of Environment, 56(1), 42-51.
- [11] *Atzberger, C. (2004)*: Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. Remote Sensing of Environment, 93, 53-67.
- [12] *Curran, P.J. & Atkinson, P.M. (1998)*: Geostatistics and remote sensing. Progress in Physical Geography, 22(1), 61-78.
- [13] *Blaschke, T. (2010)*: Object based image analysis for remote sensing. ISPRS International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (1), 2-16.
- [14] *Atzberger, C., Richter, K. (2012)*: Spatially constrained inversion of radiative transfer models for improved LAI mapping from future Sentinel-2 imagery.- Remote Sensing of Environment, 120: 208-218.
- [15] *Asrar, G. (1989)*: Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Wiley Series in Remote Sensing.
- [16] *Asner, G.P., Scurlock, J.M.O., Hicke, J.A. (2003)*: Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. Global Ecology and Biogeography, 12(3), 191-205.
- [17] *Baret, F., Fourty, T., 1997*: The limits of a robust estimation of canopy biochemistry. – Guyot & Phulpin (Ed.): Physical measurements and signatures in remote sensing, Balkema, Rotterdam, 413-420.
- [18] *Schueller, J.K., 1992*: A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production.- Fertilizer Research, 33: 1-34.
- [19] *Moran, S.M., Inoue, Y., Barnes, E.M., 1997*: Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. – Remote Sensing of Environment, 61: 319-346.
- [20] *Franklin, S.E., 2001*: Remote sensing for sustainable forest management. – Boca Raton, Lewis Publishers
- [21] *Baret, F., Weiss, M., Troufleau, D., Prevot, L., Combal, B., 2000*: Maximum information exploitation for canopy characterisation by remote sensing. – Aspects of Applied Biology 60 – Remote sensing in agriculture: 71-82.
- [22] *Baret, F., Buis, S. (2008)*: Estimating canopy characteristics from remote sensing observations. Review of methods and associated problems. In S. Liang (ed.), Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application. Springer Netherlands, pp. 172-301.
- [23] *Verstraete, M.M., Pinty, B., Myneni, R.B., 1996*: Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing.- Remote Sensing of Environment, 58: 201-214.
- [24] *Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Macé, D., Pragnère, A. (2002b)*: Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. Remote Sensing of Environment, 84, 1-15.
- [25] *Atzberger, C. (2003)*: Möglichkeiten und Grenzen der fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter mittels physikalisch basierter Reflexionsmodelle. – Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 1: 51-61.
- [26] *Goel, N.S. (1989)*: Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: G. Asrar (Ed.), Theory and Applications of Optical Remote Sensing, Wiley, New York, 205–251.
- [27] *Jacquemoud, S. (1993)*: Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. Remote Sensing of Environment, 44, 281-292.
- [28] *Jacquemoud, S., Baret, F., Andrieu, B., Danson, F.M., & Jaggard, K. (1995)*: Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT +SAIL

- models on sugar-beet canopy reflectance data – application to TM And AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 52, 163-172.
- [29] *Combal, B., Baret, F. and Weiss, M. (2002a)*: Improving canopy variables estimation from remote sensing data by exploiting ancillary information. Case study on sugar beet canopies. *Agronomie* 22 (2), 205-215.
- [30] *Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., Cho, M.A. (2008)*: LAI and chlorophyll estimated for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63(4), 409-426.
- [31] *Koetz, B., Baret, F., Poilve, H., & Hill, J. (2005)*: Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 95, 115-124.
- [32] *Lauvernet, C., Baret, F., Hascoët, L., Buis, S., Le Dimet, F.-X. (2008)*: Multitemporal-patch ensemble inversion of coupled surface-atmosphere radiative transfer models for land surface characterization. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 851-861.
- [33] *Poilve, H., 2002*: CROMA: Crop Reflectance Operational Models for Agriculture, Final report, EC research project EVG1-CT-2000-00027.
- [34] *Delecolle, R., Maas, S., Guerif, M., Baret, F., 1992*: Remote sensing and crop production models: Present trends. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 47: 145-161.
- [35] *Atzberger, C. (1997)*: Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop growth modelling. A case study on the Camargue region. Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin.
- [36] *Moreno, J., Melia, J., Sobrino, J. A., et al. (2004)*: The SPECTRA Barrax Campaign (SPARC): Overview and first results from CHRIS data. *Proceedings of 2nd CHRIS/PROBA Workshop, Frascati, Italy, ESA-ESRIN*.
- [37] *Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., Francois, C., & Ustin, S.L. (2009)*: PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, 56-66.
- [38] *Verhoef, W. (1984)*: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- [39] *Richter, K., Atzberger, C., Vuolo, F., Weihs, P. D'Urso, G. (2009)*: Experimental assessment of the Sentinel-2 band setting for RTM-based LAI retrieval of sugar beet and maize. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(3), 230-247.
- [40] *Richter, K., Atzberger, C., Vuolo, F., D'Urso, G. (2010)*: Evaluation of Sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat, sugar beet, and maize. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2): 458-464.
- [41] *Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnere, A., & Knjazikhin, Y. (2000)*: Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie*, 20, 3-22.
- [42] *Kimes, D., Knjazikhin, Y., Privette, J. L., Abuelgasim, A. and Gao, F. (2000)*: Inversion methods for physically-based models. *Remote Sensing Reviews*, 18, 381-440.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Clement Atzberger, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Geoinformation (IVFL) an der Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien.
E-Mail: clement.atzberger@boku.ac.at

Dr. Katja Richter, Department für Geographie, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians Universität München, Luisenstraße 37, 80333 München.
E-Mail: k.richter@iggf.geo.uni-muenchen.de

Präzise Absolutkalibration des Jason-2 Altimeters mit Hilfe eines Mikrowellentransponders



Walter Hausleitner und Florian Moser, Graz

Kurzfassung

Die Satellitenaltimetrie ist eine Schlüsseltechnologie zur globalen Untersuchung der Ozeandynamik und der Meeresspiegelveränderung. Um ein klares Bild dieser Prozesse zu erhalten sind zuverlässige Altimeterdaten in homogener Qualität von aktuellen und künftigen Satellitenmissionen zur Erstellung langer Beobachtungszeitreihen enorm wichtig. Zahlreiche global verteilte und eigens dafür eingerichtete Stationen bilden eine wichtige Infrastruktur zur Kalibrierung von Satellitenaltimetern und Validierung der entsprechenden Produkte.

Die Österreichische Akademie der Wissenschaften betreibt an der Cal/Val Station Gavdos (GR) direkt an einem Jason-2 Kreuzungspunkt einen Transponder. Der Hauptvorteil einer Kalibrierung mit Hilfe eines Transponders liegt darin, dass sich die Signalreflexion auf eine stabile Referenz bezieht, d.h. unabhängig von der momentanen lokalen Meeresspiegelveränderung (Gezeiten, Wellen, etc.) ist. Poseidon-3, das Jason-2-Altimeter wird bei jedem Überflug in den sog. DIODE/DEM Modus geschaltet, der es erlaubt, das Transpondersignal zu empfangen. Für die Analyse der dabei generierten Altimeter-Waveforms wurden vier verschiedene Retracking-Algorithmen implementiert. Im Zuge einer Kalibrationskampagne wurde aus 26 Überflügen ein sehr präziser und zwischen den Methoden konsistenter Altimeterbias von 6.8 ± 0.3 cm berechnet.

Schlüsselwörter: Altimetrie, Transponder, Absolutkalibration, Jason-2

Abstract

Satellite radar altimetry is considered a key technology for the investigation of the sea level variation on a global scale. In order to achieve a clear picture of this process reliable data of homogeneous quality from previous, current and future missions are needed for a seamless concatenation of sufficiently long observation periods. Numerous altimeter calibration sites around the world build up a dedicated scientific infrastructure for accurate calibration and validation of altimeter satellites and related products.

At the cal/val site Gavdos, Greece, the Austrian Academy of Sciences operates an altimeter transponder, located directly beneath a Jason cross-over point. The main advantage of altimeter calibration by means of a transponder is to refer to a stable reference point of pulse reflection not being affected from any local sea surface dynamics (tides, ocean waves, etc.). For every overpass the Jason-2 altimeter, Poseidon-3, is switched to the DIODE/DEM mode which allows an adjustment of the ranging gate to the transponder's elevation. For the waveform analysis we implemented four retracking algorithms following different strategies. A calibration campaign comprising 26 passes yields a very precise bias value of 6.8 ± 0.3 cm with a good agreement among all the implemented methods.

Keywords: altimetry, transponder, absolute calibration, Jason-2

1. Einleitung

Für die Erforschung des Klimawandels spielen die Ozeandynamik im Allgemeinen und der säkulare Anstieg des mittleren Meeresspiegels im Besonderen eine zentrale Rolle. Aktuelle und prädiizierte Anstiegsraten zeichnen ein bedrohliches Bild und stehen daher ganz besonders im Fokus von Öffentlichkeit und Forschung.

Während des letzten Jahrhunderts ist der Meeresspiegel im Mittel mit einer Rate von 1.5 mm/Jahr gestiegen [1], wobei eine ständige Beschleunigung zu verzeichnen ist. Während der letzten zwei Dekaden ist die Anstiegsrate sogar auf 3.2 ± 0.4 mm/Jahr angestiegen (Abbildung 1).

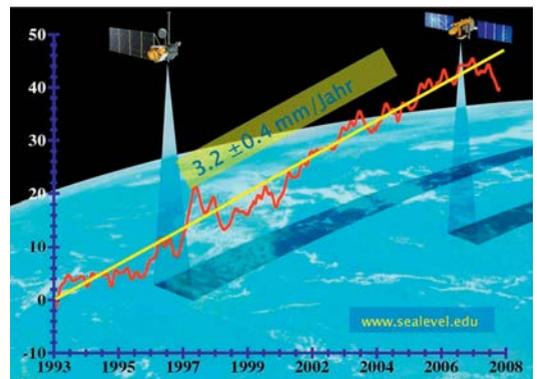


Abb. 1: Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels (Quelle: www.sealevel.edu)

Globale Beobachtungsdaten von Altimetermissionen in hoher homogener Qualität und über entsprechend lange Zeiträume sind eine wesentliche Grundlage zur Erfassung von zuverlässigen und aussagekräftigen Klimadaten-sätzen. Für die Erstellung langer missionsübergreifender Beobachtungszeitreihen ist es enorm wichtig die Altimeterinstrumente bestmöglich zu kalibrieren und Missionen damit vergleichbar zu machen. Die Altimeterkalibration basiert auf dem Vergleich von beobachteten Distanzen mit entsprechenden unabhängig bestimmten Werten und soll systematische Messfehler des Altimeters weitestgehend eliminieren.

Dafür sind in Küstengebieten unter oder nahe an Satellitenspuren Altimeterkalibrationsstationen eingerichtet. Diese sind mit Instrumenten wie Gezeitenstationen, GPS-Bojen und im Meer verankerten Sensoren (Druck, Temperatur, Salinität, etc.) ausgestattet und erfassen permanent in-situ Beobachtungen des lokalen Meeresspiegels für Kalibrationszwecke. Die prominentesten dieser Cal/Val Stationen befinden sich auf der Harvest Ölplattform (CA, USA, [2]), Bass Strait (AUS, [3]), Korsika (F, [4]), Ibiza (E, [5]) und Gavdos (GR, [6]).

Ein Vergleich der aus den Altimetermissionen Topex/Poseidon, Jason-1 und Jason-2 abge-

leiteten absoluten Meereshöhen (Abbildung 2) zeigt eklatante Differenzen im Dezimeterbereich (9 cm zwischen Jason-1 und Topex; 18(!) cm zw. Jason-2 und Topex, [7]). Dieser Umstand war etwa ein Jahrzehnt lang nicht erklärbar und zeigt die enorme Notwendigkeit der Instrumentenkalibration und Datenvalidierung durch möglichst unabhängige Methoden. Erst 2011 wurde die Ursache im inkorrekten Phasenzentrum der Jason-Altimeter gefunden [8]. Die verhältnismäßig große Streuung dieser Werte (ca. 3-3.5 cm) resultiert aus dem hochgradig dynamischen Zustand der Meeresoberfläche.

Die Station auf der Insel Gavdos, südlich von Kreta ist neben den konventionellen Instrumenten mit einem speziellen – vom Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften betriebenen – Altimeter-Transponder ausgestattet. Ein Transponder stellt – im Gegensatz zu der sehr dynamischen Meeresoberfläche – eine sehr stabile künstliche Reflexionsfläche (d.h. Referenzhöhe) für Altimetersignale dar. Dadurch werden alle aus der Ozeandynamik resultierenden Fehlerquellen, wie Meereswellen, Gezeiten, Strömungen oder atmosphärische Auflasteffekte eliminiert.

Es ist für eine derart kleine Insel wie Gavdos (ca. 25 km²) ziemlich einzigartig, an einem Kreu-

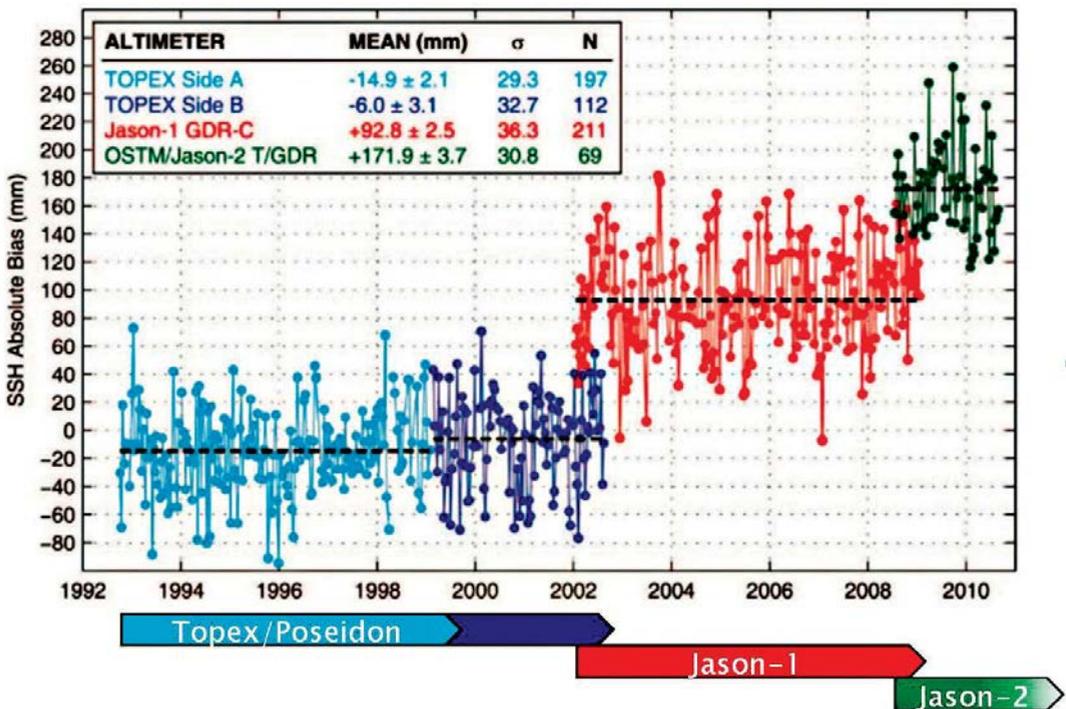


Abb. 2: Biaswerte der aus Absolutkalibration verschiedener Altimetermissionen abgeleiteten Meereshöhen [7]

zungspunkt zu liegen, was den großen Vorteil hat, einerseits quasi im offenen Meer zu messen und andererseits sowohl auf- als auch absteigende Bahnbögen beobachten zu können, was nicht nur die Beobachtungsrate verdoppelt, sondern auch damit verbundene systematische Effekte eliminiert.

Dieser Beitrag zeigt, dass die Kalibration von Satellitenaltimetern durch den Einsatz von Transpondern mit signifikant höherer Genauigkeit möglich ist und die bewährten konventionellen Methoden sinnvoll ergänzt [9].

2. JASON-2 und das Prinzip der Altimetrie

Das Prinzip der Satellitenaltimetrie basiert auf einer Zwei-Weg-Laufzeitmessung eines kurzen Radarpulses, der vom Altimeter an Bord des Satelliten ausgesandt und von der Meeresoberfläche wieder zurück zum Satelliten reflektiert wird. Die Größe der ausgeleuchteten Meeresfläche, der sog. Altimeter-Footprint (Abbildung 3, oben) hängt beim pulslimitierten Altimeter von der Pulslänge (ca. 105 μ s), der Flughöhe und der vorherrschenden Wellenhöhe ab und liegt bei etwa 5-50 km² für Jason-2 in 1336 km Höhe [10]. Aus dem empfangenen Radarecho (Abbildung 3, unten) kann daher nicht nur die Distanz, sondern z.B. auch der Rückstreukoeffizient, die signifikante Wellenhöhe, der Antennenausrichtungsfehler etc. abgeleitet werden [11].

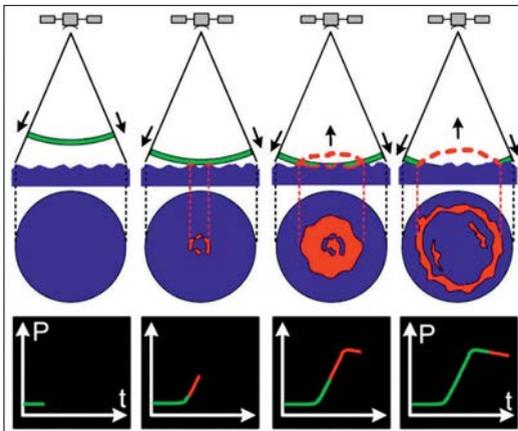


Abb. 3: Der Footprint eines pulslimitierten Altimeters (oben) und das empfangene Radarecho (unten)

Jason-2, ein von der NASA, CNES und NOAA betriebener Satellit (Abbildung 4, links), wurde 2008 als Nachfolgemission des sehr erfolgreichen Jason-1 gestartet. Die Bahnkonfiguration (10 Tages-Orbit) gewährleistet eine Ozeanüberdeckung von ca. 90% bei einer Spurseparation

von 315 km. Das Hauptinstrument ist Poseidon-3 (Abbildung 4, rechts), ein Altimeter der jüngsten Generation. Daneben sind noch einige für die Altimetrie und Bahnbestimmung relevante Instrumente (Radiometer, DORIS, GPS, LRA) an Bord.



Abb.4: Jason-2 (links) und Poseidon-3 Altimeter (rechts)

Poseidon-3 ist ein Zweifrequenzaltimeter (13.6 / 5.3 GHz) mit einer Pulswiederholfrequenz von 2060 Hz, welches in vier verschiedenen Betriebsmodi (Acquisition-, Tracking-, Calibration- und DIODE/DEM Modus) arbeiten kann. Beim Übergang von Land auf Ozean schaltet das Altimeter automatisch vom Acquisition- auf den Tracking-Modus. Auf den DIODE/DEM-Modus wird weiter unten speziell im Zusammenhang mit der Transponderkalibration eingegangen.

3. Altimetertransponder

Ein Altimetertransponder ist vom Prinzip ein Mikrowellen-Repeater, d.h. er empfängt Radarpulse und sendet einen stark verstärkten Echopuls zurück. Die Hauptbestandteile eines Transponders sind eine Empfangs- und eine Sendeantenne mit einem Durchmesser von jeweils 42 cm und einem dazwischen liegenden Verstärker. Die Verstärkung des Gesamtsystems von 149 dB gewährleistet eine dem natürlichen Ozeanecho entsprechende Empfangsenergie am Altimeter. Der Transponder arbeitet im Ku-Band in derselben Frequenz und Bandbreite (13.75 ± 0.3 GHz) wie das Altimeter.

Im Gegensatz zu einem typischen Ozeanecho, welches dem charakteristischen Brown-Modell (vgl. Abb. 3, unten) entspricht, trägt ein Transponderecho die typische Charakteristik einer punktuellen Reflexionsquelle mit sehr engen Signalspitzen. Die interne Signalverzögerung des Transponders (ca. 13 ns) bestimmt die Lage des exakten effektiven Reflexionspunktes.

Das Gerät ist auf einem Betonfundament befestigt und mit einem gegen Regen, Staub und Wind schützenden Gehäuse untergebracht (Abbildung 5). Zudem ist die Station mit einem GPRS-Modem für die Steuerung per Fernzugriff ausgestattet. Die exakte Position und Höhe des

Transponders wurde im Zuge einer von der TU Kreta durchgeführten GPS-Kampagne bestimmt.



Abb. 5: Die Transponderstation und ihre Position auf Gavdos am Kreuzungspunkt von Jason-2

4. Das Konzept der Altimeterkalibration

Im Gegensatz zur konventionellen Kalibrationsmethode, welche auf in-situ Vergleichsmessungen basieren, die durch verschiedene Sensoren (z.B. Pegelmesser) in Küstennähe gemacht werden (Abbildung 6, grüne Linien), beziehen sich die Kalibrationsmessungen im Transponderverfahren direkt auf die Transponderstation (Abbildung 6, gelbe Linien). Darüber hinaus können die Altimetermessungen auch bereits für die Schrägdistanzen zwischen Transponder und dem überfliegenden Satelliten erfasst werden (Abbildung 6, rote Linien).

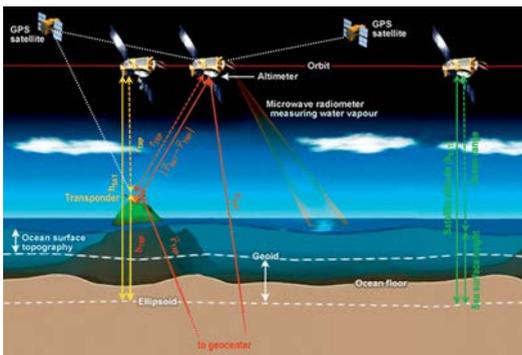


Abb. 6: Konzept der Kalibrierung mittels Transponder (gelb, rot) und konventionelle Methode (grün)

Der Altimeterbias, $B = d_{TRP} - r_{TRP}$, ist dabei definiert als die Differenz aus dem geometrischen

Abstand, d_{TRP} , zwischen Transponder und Satellit – berechnet aus der Orbitinformation (rot durchgezogene Linie) – und der entsprechenden Altimetermessung, r_{TRP} (rot gestrichelte Linie).

In der praktischen Durchführung dieser Transponderkalibration, die für mehrere Satellitenmissionen wie ERS-1/2 [12] und Envisat [13] schon seit Jahren erfolgreich durchgeführt wurden, stößt man bei Altimetern der jüngsten Generation, wie sie an Bord von Jason betrieben werden, auf Probleme in der Signalerfassung. Die extrem sensitive Elektronik dieser Altimeter (AutomaticGainControl, AGC) sowie die adaptiven Ranging-Gates schalten das Altimeter beim Transponderüberflug automatisch in den Acquisition-Mode. In einer engen Kooperation mit CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse) wurden in der Folge eine Reihe von Experimenten (Überflug im Kalibriermodus CAL-2) durchgeführt und schließlich ein spezieller DIODE/DEM-Modus aktiviert, um den Transponder im Signal identifizieren zu können. Nachdem dieser Modus für die regulären Altimetermessungen nicht genutzt wird, wird das Altimeter lediglich beim Transponderüberflug für ca. 5 Sekunden in den DIODE/DEM Modus umgeschaltet (Abbildung 7).

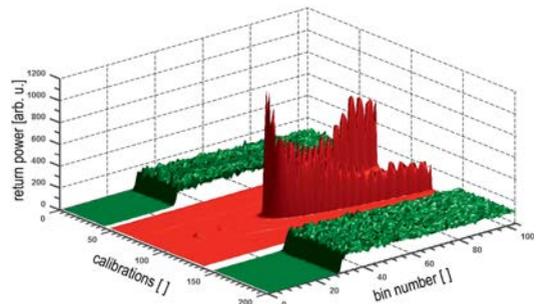


Abb. 7: Altimetersignal während eines Transponderüberfluges (Ozean-Return: grün, Transponder-Echo: rot)

Während dieser Zeit werden etwa 50-60 Einzelkalibrationen (IC) für die Schrägdistanzen durchgeführt. Jede dieser Einzelkalibrationen ist ein über 50 ms bzw. 90 Messungen gemittelte Energiekurve, welche mit einer Rate von 3.125 ns in 128 Bins gesampelt wird.

Abbildung 8 (links) zeigt die Gesamtheit der Transponder-Waveforms eines Transponderüberfluges, wobei zwei Einzelkalibrationen (magenta und blau) exemplarisch herausgegriffen wurden. Die typische spitze Signalstruktur wird durch das punktuelle Transponderecho generiert. Der DIODE/DEM Modus ist derart konfiguriert, dass sich

das Messfenster für Entfernungsmessung zum festen Transponderpunkt in Nadir-Richtung auf Bin 32 bezieht. Dieser sog. Tracker-Range, r_{TR} , ergibt zusammen mit dem sog. Bin-Range, r_{BR} , – das ist das Entfernungsäquivalent zwischen Bin 32 und dem eigentlichen Transponder-Echo –, die rohe unkorrigierte Schrägdistanz, r_{TRP} , zwischen Satellit und Transponder (Abbildung 8, rechts).

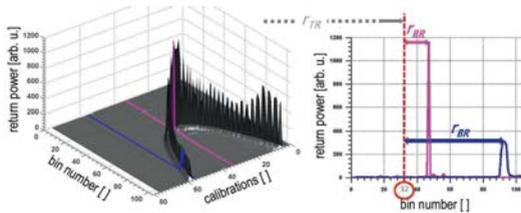


Abb.8: Transponder-Waveforms (links) und zwei exemplarisch herausgegriffene Einzelkalibrationen

Die Qualität der Kalibrierung hängt stark mit der Genauigkeit des sog. Waveform-Retrackings, d.h. der Ableitung des exakten Reflexionszeitpunktes aus den Einzelkalibrationen ab. Naheliegende Maße sind das Maximum der gemessenen oder approximierten Signalstärke, die halbe max. Signalstärke an der Anstiegsflanke, oder der Schwerpunkt des integrierten Signalverlaufs.

5. Waveform Retracking und Berechnung des Altimeterbias

In Abbildung 9 ist das Berechnungsschema für die Bestimmung des Altimeterbias basierend auf zwei Datenprodukten dargestellt, die beide die 20 Hz Waveform-Daten sowie die Orbitinformation mit mittlerer (MOE in S-IGDR) und hoher Genauigkeit (POE in S-GDR) enthalten. Für jeden Überflug werden zuerst die Einzelkalibrationen extrahiert und die Altimetermessung zwischen Satellit und Transponder berechnet. Für jede dieser Waveforms wird andererseits auch die Distanz zwischen Transponder und dem Satellit basierend auf der Orbitinformation berechnet. Nach Anbringen aller relevanten Korrekturen liefert der Vergleich durch Differenzbildung einen Biaswert pro Einzelkalibration, aus denen ein für den gesamten Überflug repräsentativer Bias berechnet wird.

5.1 Waveform Retracking

Für die Berechnung der Altimeterbiasen haben wir mehrere Algorithmen implementiert und getestet. Eine Bewertung dieser Verfahren hat gezeigt, dass die folgenden vier Methoden für die Signalanalyse sehr geeignet sind:

1. Gauss-Fit
2. Energy-Centroid
3. Sinc-Funktion
4. Zero-Padding.

Der Bin-Range, r_{BR} , d.h. die Entfernung, welche sich aufgrund des Transponder-Echo-Bins relativ zum Referenz-Bin 32 ergibt (siehe Abbildung 8), wird bestimmt durch

$$r_{BR} = (-b_{ref} + \hat{b}_*) \cdot n_{BR} \cdot c/2, \text{ mit } b_{ref} = 32,$$

der zeitlichen Auflösung n_{BR} eines Bins (3.125 ns), der Lichtgeschwindigkeit c und \hat{b}_* ($\in \hat{b}_1 \dots \hat{b}_4$), den aus den vier Methoden resultierenden Return-Bins.

Die Gauss-Fit Methode approximiert das Echosignal durch eine Gauß'sche Kurve, wobei das Maximum als die Epoche der Reflexion, \hat{b}_1 , angenommen wird.

Die Energy-Centroid Methode bestimmt den geometrischen Flächenschwerpunkt \hat{b}_2 des integrierten Signals. Diese Methode ist sehr sensitiv bzgl. des Signal-Rausch-Verhaltens. In einem Zwischenschritt wird daher das Rauschen bestmöglich reduziert.

Die Sinc-Funktion Methode basiert auf einer Approximation einer modifizierten sinc-Funktion des ebenfalls rauschreduzierten Signals, wobei wieder das Maximum das Returnbin \hat{b}_3 definiert.

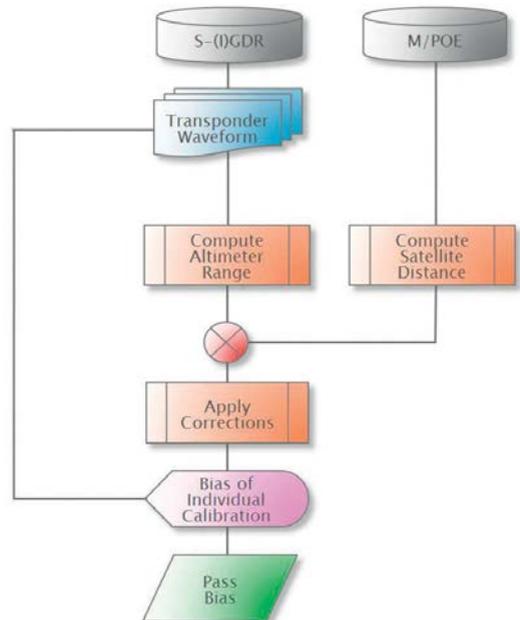


Abb. 9: Berechnungsschema der Altimeterbiasen

Bei der vierten Methode wird die Auflösung des Signals mittels Zero-Padding erhöht. Die Zero-Padding Methode nutzt den Vorteil, durch Ergänzung des Altimetersignals mit Nullen, d.h. Multiplikation mit einer Rechteckfunktion eine höhere Frequenzgenauigkeit der diskreten Fourier-Transformation zu erreichen, d.h. die Auflösung des Signals zu steigern [14]. Auf das so verdichtete Signal wird schließlich eine Gauß'sche Kurve

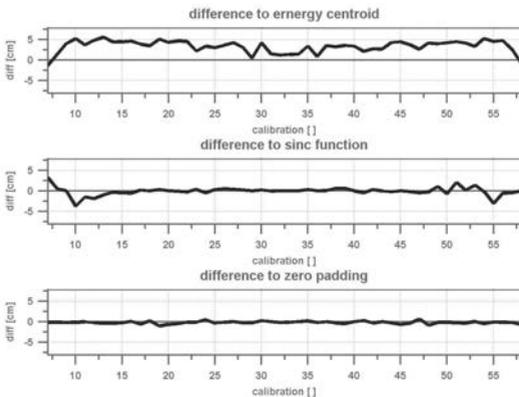


Abb. 10: Abweichungen der Methoden (Energy-Centroid, Sinc-Function und Zero-Padding) zur Gauss-Fit Methode

approximiert, wobei wieder das Returnbin \bar{b}_4 am Maximum der Kurve angenommen wird.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich dieser Retracking-Algorithmen als Differenz bzgl. der Gauss-Fit Methode. Aufgrund der Tatsache, dass Gauss-Fit und Zero-Padding auf einer Gauß-Approximation basieren, liefern sie weitgehend idente Ergebnisse. Die Sinc-Function Methode stimmt über einen weiten Bereich der zentralen Kalibrationen mit den oben genannten Methoden überein, zeigt aber deutliche Abweichungen in den äußeren Kalibrationen, welche aufgrund der flacheren Signalstruktur mit weitaus geringerer Energie und schlechterem Signal-Rausch-Verhältnis entstehen. Die Energy-Centroid Methode zeigt über den gesamten Kalibrationssatz hinweg etwas größere Abweichungen, was aus der Tatsache, dass hier mit unaufbereiteten Signaldaten und den angewandten Filterkriterien für die Signalerkennung gearbeitet wird, herrührt.

Im nächsten Schritt wird – wieder getrennt für alle vier Methoden – aus den Echo-Bins und dem Tracker-Range eine Transponderrohmessung abgeleitet. Dazu wird ein Polynom zweiter Ordnung durch diese Messungen gelegt, welches einerseits einen exakten Zeitpunkt des Überfluges (Point of closest approach, PCA) liefert und an-

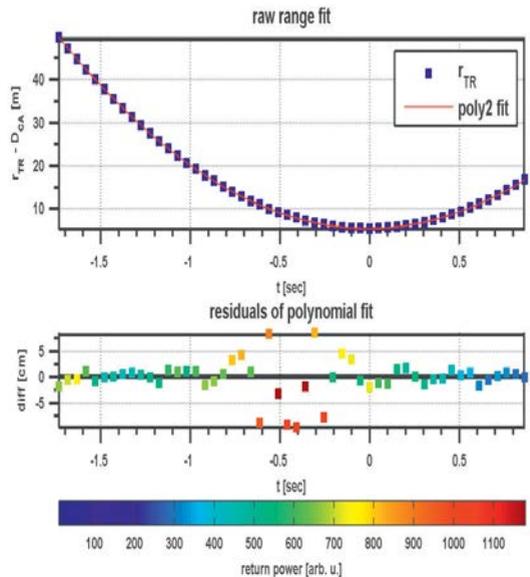


Abb. 11: Ausgleichspolynom der Altimetermessungen relativ zu Zeitpunkt und Entfernung des transpondernächsten Punktes (oben) und Residuen der Return-Bins mit farbcodierter maximaler Energie (unten)

dererseits die Ableitung von Fehlerinformationen der verschiedenen Berechnungsmethoden erlaubt. Abbildung 11 (oben, rote Linie) zeigt dieses Polynom relativ zu Zeitpunkt und Entfernung des PCA. Aus den darunter dargestellten Residuen bzgl. des Ausgleichspolynoms erkennt man die relativ großen Abweichungen der zentralen Kalibrationen mit einem hohen Energieniveau. Dieser Effekt resultiert aus der kritischen zeitlichen Auflösung, d.h. Verhältnis der Samplingrate zur Signalbreite. Aus diesem Grund wird die Schätzung der Parabel iterativ und gewichtet durchgeführt. Das Gewicht entspricht dabei dem inversen Energieniveau.

Die so berechneten Rohdistanzen aus der Altimetermessung werden mit den aus den Bahndaten berechneten Distanzen verglichen (vgl. Abbildung 9 rechts). Die Distanz zwischen Transponder und Orbitposition wird rein geometrisch bestimmt. Die Transponderposition wurde dabei aus einer GPS-Kampagne bestimmt (vgl. Kapitel 3) und die Orbitposition entweder aus dem S-IGDR oder dem S-GDR Datenprodukt entnommen. Die unterschiedlichen Bahngenauigkeiten werden mit 2.5 cm (S-IGDR, Latenzzeit: 1-2 Tage) bzw. mit 1.5 cm (S-GDR, Latenzzeit: ca. 60 Tage) angegeben [15].

Für die Korrektur der oben abgeleiteten Altimetermessungen sind eine Reihe von Signallaufzeit und -ausbreitungseffekten zu berücksichti-

gen. Grundsätzlich kann man diese Korrekturen einteilen in Instrumenteneffekte seitens des Altimeters (Δr_{ALT}) und des Transponders (Δr_{TRP}), Ausbreitungseffekte (Δr_{PROP}), geophysikalische Effekte (Δr_{GEO}) sowie prozedurale Korrekturen (Δr_{PROC}). Die Transponderentfernung ist daher

$$r_{TRP} = r_{TR} + r_{BR} + \sum \Delta r,$$

mit der Summe der Korrekturen

$$\sum \Delta r = \Delta r_{ALT} + \Delta r_{TRP} + \Delta r_{PROP} + \Delta r_{GEO} + \Delta r_{PROC},$$

welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Die Altimeter-Instrumentenkorrekturen umfassen den internen Signallaufpfad sowie Massenschwerpunkt- und DORIS Oszillatorkorrekturen. Transponderseitig werden die gesamte elektronische und geometrische Signallaufzeitverzögerung sowie die Verzögerung durch die Transponderabdeckung korrigiert. Die Ausbreitung des Radarpulses durch die Erdatmosphäre wird verzögert durch die Ionosphäre sowie des Trocken- und Nassanteils der Troposphäre. Ebenfalls müssen die relevanten geophysikalischen Korrekturen wie Gezeiten der festen Erde, Folgezeiten und gezeitenbedingte Auflasteffekte, die zu einer Höhenänderung der Transponderposition führen, berücksichtigt werden. Schließlich wird noch eine Doppler-Korrektur berücksichtigt und ein Offset in der Altimeter-Absolutzeiterfassung [16] angebracht.

Type of Corr.	Description		Source
Δr_{ALT}	Δr_{path}	Altim. Internalpathdelay	GDR
	Δr_{cog}	Altim. Phase centre wrt COG	GDR
	Δr_{iso}	DORIS USO driftcorr.	GDR
Δr_{TRP}	Δr_{elec}	Transp. electronic delay	HF lab calibr.
	Δr_{geom}	Transp. Freeairpath	Manufacturer
	Δr_{pmma}	Delay oftransp. housingroof	HF lab
Δr_{PROP}	Δr_{iono}	Ionosphericrangecorr.	GIM model
	Δr_{dry}	Dry troposphericrangecorr.	GDR
	Δr_{wet}	Wettroposphericrangecorr.	AMR@ECMWF
Δr_{GEO}	Δr_{solid}	Solid Earth tides	GDR
	Δr_{pole}	Pole tides	GDR
	Δr_{load}	Tidalocceanoading	GDR
Δr_{PROC}	Δr_{dopp}	Transp. related Doppler corr.	Computed
	Δr_{dat}	Pseudo datationbiascorr.	CNES

Tab. 1: Übersicht aller Korrekturen für die Transponderkalibration relevanten Korrekturen

5.2 Berechnung des Altimeterbias

Es wurde bereits oben darauf hingewiesen, dass sowohl die Altimetermessung, r_{TRP} , als auch der entsprechende geometrische Abstand zwischen Transponder und Satellit, d_{TRP} , für jede einzelne

Kalibrationen mit einer Rate von 20 Hz berechnet werden. Im Zuge eines Satellitenüberfluges werden daher in der Regel ca. 50 „individuelle Biaswerte“ bestimmt, aus denen letztlich ein für den gesamten Überflug repräsentativer Bias bestimmt wird. Im konkreten Fall wird dies mittels einer robusten Ausgleichsgerade aller Einzelwerte (Abbildung 12) durchgeführt. Auch hier kommt wieder eine inverse Gewichtung nach der Energie zur Anwendung.

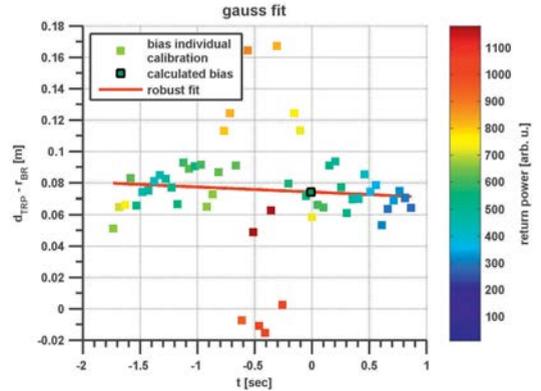


Abb. 12: Bestimmung des Altimeterbias (schwarzes Quadrat) für den Satellitenpass durch robuste Ausgleichung der Biases der Einzelkalibrationen

Der letztlich resultierende Bias wird von dieser Ausgleichsgeraden am Punkt der geringsten Annäherung bestimmt. Es bleibt anzumerken, dass die Steigung der robust geschätzten Geraden statistisch nicht signifikant ist.

6. Ergebnisse und Diskussion

Für diese Arbeit wurde eine Kalibrationskampagne von Oktober 2010 bis Jänner 2012 mit insgesamt 26 Transponderüberflügen durchgeführt. Die im Kapitel 5.1 vorgestellten Analysemethoden wurden für alle Passes angewandt, wobei sowohl die Altimeter- als auch Orbit-Daten aus dem Level-2 Produkt S-GDR-T stammen. Die „T“-Version berücksichtigt die in der Einleitung angesprochene Korrektur des Tracker-Ranges von 18,8 cm, um den jüngst entdeckten Fehler im Poseidon-3 Antennenphasenzentrum zu korrigieren [7].

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Gauß Methode sowie die relativen Abweichung der übrigen drei Methoden.

Die Spannweite der Biases liegt bei etwa 5 cm, während diese bei den konventionellen Methoden bei etwa dem Dreifachen liegt. Eine Korrelation zwischen den Biaswerten und der maximalen Energie kann nicht gefunden werden.

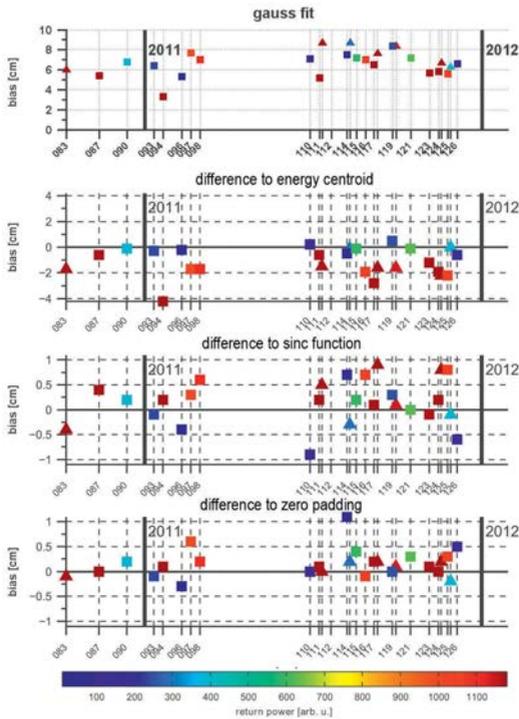


Abb. 13: Ergebnisse der Altimeterbiases aus den vier Methoden (Dreieck: aufsteigend; Quadrat: absteigend)

Ebenso gibt es keinen statistisch signifikanten Trend in den Biases. Es können zudem keine signifikanten Unterschiede zwischen aufsteigenden und absteigenden Passes festgestellt werden. Tabelle 2 gibt einen Vergleich der wichtigsten statistischen Größen (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwertes, Median), die eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Methoden zeigen. Die Energy-Centroid Methode ergibt geringfügig höhere Standardabweichungen der individuellen und der mittleren Pass-Biases.

Aus Abbildung 13 ist ebenfalls ersichtlich, dass mit wenigen Ausnahmen (z.B. geringe Energie im Cycle 114) die Sinc-Function und die

Analyse-Methode	Ergebnisse aus S-IGDR-T Daten [cm]			
	Mittelw. \bar{x}	Std. d. Mittelw. s_x	Std. s_i	Median \bar{x}
Gauss-Fit	6.8	0.3	1.6	6.8
Energy-Centroid	5.7	0.4	2.1	6.0
Sinc-Function	7.1	0.3	1.8	7.1
Zero-Padding	7.0	0.3	1.7	6.9

Tab. 2: Statistische Parameter der aus S-IGDR-T Daten berechneten Bias-Werte

Zero-Padding Methode mit Abweichungen von weniger als 1 cm mit der Gauß Methode übereinstimmen.

Die Differenzen der Energy-Centroid Methode sind (mit Ausnahme von Cycle 094) kleiner als 3 cm. Sehr wohl kann eine starke Korrelation zwischen der Return-Energie und den Bias-Differenzen zur Gauß Methode nachgewiesen werden, der wohl in der oben erwähnten kritisch geringen Auflösung der vorherrschenden Signalstruktur zu begründen ist.

Schließlich wurde die gesamte Analyse sowohl mit S-IGDR als auch mit S-GDR Daten, welche unterschiedliche Orbit-Genauigkeiten aufweisen, durchgeführt. Die Ergebnisse der S-GDR Daten zeigen eine deutlich geringere Streuung und der über alle Passes resultierende mittlere Bias ist für S-GDR-Daten mehr als 5 mm kleiner als der von S-IGDR ermittelte mittlere Bias.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das primäre Ziel dieser Arbeit war es, die Stärken der Altimeter-Absolutkalibration mittels Transponder zu demonstrieren.

Der mittels Transpondermethode berechnete Absolutbias für das Jason-2 Altimeter liegt bei 6.8 cm.

Die aus den verschiedenen Analysemethoden resultierende Präzision dieser Technik ist tatsächlich sehr beeindruckend. Während konventionelle Methoden, die sich auf in-situ Messungen der momentanen Meereshöhe mittels GPS und Pegelmesser beziehen, Standardabweichungen von typischerweise 1-2 cm ergeben, ist mit der Transpondermethode eine Kalibrierung mit signifikant geringerer Standardabweichung von weniger als 3 mm möglich.

Die Ursache für diese konstante systematische Abweichung ist noch nicht restlos geklärt, liegt aber vermutlich an einem überholten Transponderkalibrierwert, als Folge eines Alterungsprozesses des Transponders. Das Gerät ist seit mehreren Jahren sehr starken Umwelteinflüssen (extreme Hitze, Staubstürme, etc.) ausgesetzt, was zu einer Beeinträchtigung der Messgenauigkeit geführt haben könnte und die nun durch Rekalibration wieder hergestellt werden sollte.

Diese Präzision einerseits und die extrem flexiblen Anwendungsmöglichkeiten machen die Transpondertechnik für weitere Altimetermissionen, wie Saral/AltiKa, Jason-CS, etc. sehr interessant. Die Portabilität des Transponders ermöglicht auch neuartige Anwendungen, wie etwa der Betrieb des Gerätes in bestmöglicher Nähe einer SLR-Station, um über die Bestimmung einer

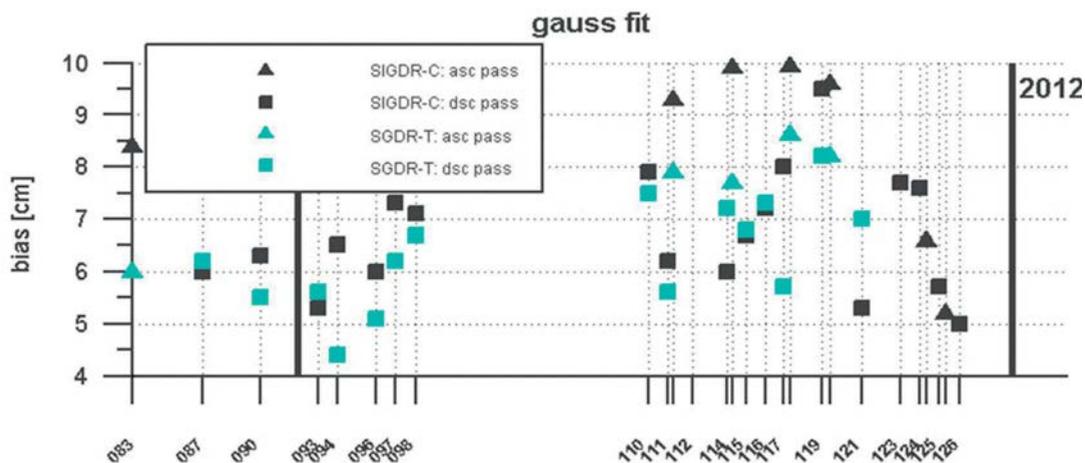


Abb. 14: Biaswerte (berechnet nach der Gauß Methode) basierend auf S-IGDR (schwarz) und S-GDR (cyan) Daten

hochgenauen Radialkomponente des Satellitenorbits mittels SLR, die Kalibriergenauigkeit des Altimeters noch weiter zu steigern.

Literaturverzeichnis

- [1] Douglas B.C., 1997: Global Sea Rise: A Redetermination, *Surveys in Geophysics*. Vol. 18, No. 2-3, 279-292, doi: 10.1023/A:1006544227856.
- [2] Hains B.J., D. Dong, G.H. Born, S.K. Gill, 2003. *The harvest experiment: monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California offshore platform*. In: Special issue of Jason-1 calibration/validation, Part 1. *Marine Geodesy* 26(3-4): 239-259.
- [3] Watson C.S., N. White, R. Coleman, P. Morgan, R. Govind, 2004: Topex/Poseidon and Jason-1 absolute calibration in Bass Strait, Australia. In: Special issue on Jason-1 calibration/validation, Part 2. *Marine Geodesy* 27(1-2):107-131.
- [4] Bonnefond P., P. Exertier, O. Laurain, Y. Menard, A. Orsoni, G. Jan and E. Jeansou, 2003: Absolute Calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica. *Marine Geodesy* 26(3-4):261-284.
- [5] Martinez-Benjamin J.J., M. Martinez-Garcia, S. Gonzales Lopez, A. Nunez Andres, F. Buill Pozuelo, M. Espinola Infantes, J. Lopez-Marco, J. Martin Davila, J. Garate Pasquin, C. Garcia Silva, P. Bonnefond, O. Laurain, A. M. Baron Isanta, M. A. Ortiz Castellon, J. Talaya Lopez, B. Perez Gomez, E. Alvarez Fanjul, G. Rodriguez Velasco, D. Gomis, M. Marcos, Y. Menard, G. Jan, E. Jeansou and F. Lyard & L. Roblou, 2004: Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results, *Marine Geodesy*. Vol. 27, Issue 3-4, doi: 10.1080/01490410490883342.
- [6] Mertikas S.P., R.T. Ioannides, I.N. Tziavos, G.S. Vergos, W. Hausleitner, X. Frantzis, A. Tripolitsiotis, P. Partsinevolos, D. Antrikopoulos, 2010: Statistical Models and Latest Results in the Determination of the Absolute Bias for the Radar Altimeters of Jason Satellites using the Gavdos facility. *Marine Geodesy*, 33: S1, 114-149, doi: 10.1080/01490419.2010.488973.
- [7] Vignudelli S., A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste, (2011): Coastal Altimetry, 259-296, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- [8] Willis J. 2011: Report of the 2011 Ocean Surface Topography Science Team (OSTST) Meeting. San Diego, CA, October 19-21.
- [9] Hausleitner, W., Moser, F., Desjonqueres, J.-D., Boy, F., Picot, N., Weingrill, J., Mertikas, S., Daskalakis, A. (2012): A new method of precise Jason-2 altimeter calibration using a microwave transponder, *Marine Geodesy*, Special Issue, Vol. 3, in print.
- [10] Chelton D.B., E.J. Edward, J.L. MacArthur, 1988: Pulse Compression and Sea Level Tracking in Satellite Altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society.
- [11] Rosmorduc V., J. Benveniste, O. Lauret, M. Milagro, N. Picot, 2006: Radar Altimetry Tutorial, (<http://www.altimetry.info>)
- [12] Denys P.H., A.R. Birks, P.A. Cross, J. Powell, 1993: Precise Height Determination using the ERS-1 Radar Altimeter and Active Ground Based Transponders. Final Report 93/0804, Version 4.0
- [13] Cristea E. and P. Moore, 2007: Altimeter Bias Determination Using Two Years of Transponder Observations. Proceedings of the Envisat Symposium, 23-27 April 2007, Montreux, Switzerland, ESA SP-636.
- [14] Richards M.A., 2005: Fundamentals of Radar Signal Processing, ISBN 0-07-144474-2, McGraw-Hill Verlag.
- [15] Dumont J.P., V. Rosmorduc, N. Picot, S. Desai, H. Bonekamp, J. Figa, J. Lillebridge, R. Scharroo, 2009: OSTM/Jason-2 Products Handbook, Issue: 1 rev 3, CNES: SALP-MU-M_OP-15815-CN, JPL: OSTM-29-1237, January 20, 2009.
- [16] Desjonqueres J.-D., N. Picot, 2011: OSTM/Jason-2 Absolute Bias Technical Note. Reference: TP3-JPOS3-NT-1627-CNES, Edition: 01/00.

Anschrift der Autoren

Dr. Walter Hausleitner, Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schmiedlstraße 6, 8042 Graz.
E-Mail: Walter.Hausleitner@oeaw.ac.at

Dipl.-Ing. Florian Moser, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz.
E-Mail: Florian.Moser@TUGraz.at



Transformationsflächen für die Umrechnung zwischen ETRS89 und MGI in Österreich

Jürgen Otter, Wien

Kurzfassung

Die Punktbestimmung mit globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) hat sich längst als Standardverfahren im Vermessungswesen etabliert. Die ermittelten Positionen sind dabei auf ein globales Koordinatensystem (z.B. ETRS89) bezogen. Sehr häufig werden aber auch Koordinaten im derzeitigen nationalen System MGI in möglichst guter Anpassung an bereits vorhandene Daten benötigt. Bei kleinräumigen Vermessungen ist die 7-Parameter-Transformation für den Systemübergang von ETRS89 nach MGI eine gute Lösung. Um für größere Gebiete eine optimalere Anpassung zwischen den Systemen zu erzielen, stellt die flächenbasierte Transformation eine bessere Möglichkeit dar. Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) hat im Jahr 2011 mit dem „GIS-Grid“ ein Werkzeug zur flächenbasierten Lage-Transformation von ETRS89 nach MGI bereitgestellt. Diese Transformationsfläche im NTV2-Format ermöglicht den Systemübergang mit einer Genauigkeit von besser als 15cm über ganz Österreich. Das Problem der Unstetigkeiten am Rand zweier benachbarter Gebiete, die mit unterschiedlichen 7-Parametersätzen transformiert wurden, ist mit dieser Lösung nicht mehr gegeben. Um schließlich auch eine Transformation für die, besonders im ALS (Airborne Laser Scanning), wesentliche Höhenkomponente zu ermöglichen, wurde vom BEV kürzlich das „Höhen-Grid“ entwickelt. Diese aus Nivellement- und Schweredaten bestimmte Transformationsfläche ermöglicht nunmehr auch den stetigen Übergang von GNSS-Höhen auf MGI-Höhen für ganz Österreich. Die Transformationsflächen des BEV für Lage und Höhe und deren Anwendung in der Praxis wird hier vorgestellt.

Schlüsselwörter: Transformation, Höhe, MGI, ETRS89, Airborne Laserscanning, Höhen-Grid, GIS-Grid, NTV2

Abstract

The point determination with Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is well-established as a standard surveying task nowadays. Thereby, the determined positions are based on a global coordinate system (e.g. ETRS89). However, in many cases coordinates in the local Austrian coordinate frame MGI are required, in good adjustment to already existing coordinates. In the case of small project areas, the spatial similarity transformation is a good solution for the transformation between ETRS89 and MGI. If the project areas are more large-scale, the use of an area-based transformation is a better solution. In the year 2010 the Federal Office of Meteorology and Surveying (BEV) developed an area-based transformation grid, the GIS-grid. This transformation grid in the NTV2 format allows a planar transformation between ETRS89 and MGI with an accuracy of better than 15cm. The problem of discontinuities at the transformation boundaries, which appear when using several transformation parameter sets of the spatial similarity transformation, is not relevant in this area-based solution. For the transformation of the height component, which is particularly important for Airborne Laser Scanning (ALS) data, the BEV introduced the Height-grid recently. This transformation grid, developed by using levelling and gravimetric data, allows the continuous transformation of GNSS-heights into MGI-heights for the whole area of Austria. The transformation grids of the BEV and their implementation in practice are introduced in this article.

Keywords: transformation, height, MGI, ETRS89, Airborne Laserscanning, Height-grid, GIS-grid, NTV2

1. Einleitung

Die 7-Parameter-Transformation zur Datums-Transformation zwischen dem österreichischen Landessystem MGI [2] und dem europäischen Bezugssystem ETRS89 [1] stellt längst ein Standardverfahren dar. Die Güte der transformierten Koordinaten ist dabei von den zur Ermittlung der Parameter verwendeten Modellpunkten, der Ausdehnung des zu bearbeitenden Gebietes sowie zu einem erheblichen Teil von der Modellierung der in den Modellpunkten verbleibenden Restklaffungen abhängig. Verwendet man für benachbarte Gebiete jeweils einen eigenen Parametersatz, so ist im gemeinsamen Bereich

meist kein kontinuierlicher Übergang gegeben, wodurch die Genauigkeit zusätzlich beeinträchtigt wird.

Bei einer Transformationsfläche hingegen wird ein regelmäßiges Raster über ein bestimmtes Gebiet, z.B. das österreichische Staatsgebiet, gelegt. Die Datumstransformation zwischen MGI und ETRS89 erfolgt dabei durch Interpolation von Verschiebungswerten aus den „Shifts“ der Rasterpunkte.

Ein großer Vorteil dieser Methode liegt darin, dass für den gesamten Definitionsbereich der Transformationsfläche ein stetiger Transformationsverlauf gegeben ist. Somit ergeben sich bei

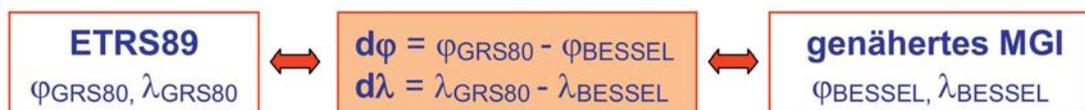


Abb. 1: Datumsübergang mit den Verschiebungswerten $d\varphi$ und $d\lambda$ des GIS-Grid

der Transformation benachbarter Gebiete keine Unstetigkeitsstellen im Übergangsbereich.

2. GIS-Grid

Das GIS-Grid [3], [4] ist eine vom BEV im Jahr 2010 entwickelte Transformationsfläche für den Datumsübergang zwischen dem Europäischen Bezugssystem ETRS89 und dem System der österreichischen Landesvermessung MGI. Das GIS-Grid wurde aus 28.120 Triangulierungspunkten 1.-5. Ordnung abgeleitet, für die neben den Landeskoordinaten auch Koordinaten im ETRS89 vorlagen. Punkte mit aus Mehrfachmessungen nachgewiesenen Bodenbewegungen wurden von der Modellbildung ausgenommen. Aus diesen Modellpunkten wurde mit dem Kriging – Interpolationsverfahren ein regelmäßiges Raster im System MGI generiert, wobei die Rasterweite 30" in Länge und 45" in Breite beträgt. Dies entspricht einem Punktabstand von etwa 1000m in Ost-West als auch in Nord-Süd.

Jedem dieser Stützpunkte ist jeweils ein Verschiebungswert $d\varphi$ und $d\lambda$ zugewiesen, welche zur Umrechnung zwischen den Ellipsoiden GRS80 und Bessel an die ellipsoidischen Koordinaten φ und λ anzubringen sind. Durch Interpolation der Shiftwerte $d\varphi$ und $d\lambda$ für einen beliebigen Punkt kann dieser in das jeweils andere Datum übergeführt werden (siehe Abb. 1). Unter Verwendung dieser Transformationsfläche ist eine österreichweite Lagetransformation mit einer absoluten Genauigkeit von kleiner als 15cm möglich [4], wobei die Transformation zwischen den beiden Systemen ETRS89 und MGI bidirektional anwendbar ist.

2.1 Datenformat NTV2

NTv2 ist ein in Kanada entwickelter Standard, der ursprünglich zur Realisierung der Transformation zwischen den nationalen kanadischen Bezugssystemen NAD27 und NAD 83 entwickelt wurde. Mittlerweile ist dieser Standard in zahlreichen GIS-Applikationen implementiert. NTV2 ermöglicht eine rasterbasierte Lagetransformation auf Basis eines regelmäßigen Rasters von Stützpunkten im geographischen Koordinatensystem, wobei jedem dieser Stützpunkte jeweils ein Shiftwert zugeordnet ist. Die Transformation

der Höhenkomponente ist im NTV2-Standard nicht definiert.

Das NTV2-Format ermöglicht auch die Verwendung mehrerer Sub-Grids. Zusätzlich zu einem Basis-Grid (Parent) können in derselben Datei auch lokal verdichtete Teilraster (Sub) beschrieben werden. Bei der Ermittlung der Verschiebungswerte für einen Punkt wird dann das Teilraster mit der höchsten Auflösung an der gesuchten Stelle herangezogen. Ist an der Stelle nur das Parent-Grid vorhanden, so wird dieses zur Interpolation verwendet. Das GIS-Grid besteht nur aus dem Parent-Grid, zusätzliche Sub-Grids sind nicht vorgesehen.

Die NTV2-Datei kann als ASCII-Datei mit der Dateiendung GSA oder als binäre Datei mit der Dateiendung GSB vorliegen. In den meisten Softwarepaketen wird ein NTV2-Grid als binäre Datei benötigt. Der Dateiheder der NTV2-Datei des GIS-Grid ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Längengrade sind nach Westen positiv und nach Osten negativ zu bezeichnen. Diese Eigenheit rührt daher, dass das Format für Kanada (westlich von Greenwich) entwickelt wurde. Die Datensätze werden von der südöstlichen Ecke des Definitionsbereichs des Grids zeilenweise von Süd nach Nord angeschrieben. Innerhalb einer Zeile werden die Datensätze von Ost nach West angegeben. Der letzte Datensatz eines NTV2-Grids liegt daher in der nordwestlichen Ecke des Grids. Die vollständige Beschreibung des NTV2-Formats ist im NTV2 developers guide [7] und im NTV2 users guide [8] der Geodetic Survey Division, Geomatics Canada enthalten. Die Daten des für Österreich entwickelten GIS-Grid werden als binäre NTV2-Datei auf der Homepage des BEV [4] zum kostenlosen Download bereitgestellt.

2.2 GIS-Grid und der Echtzeitpositionierungsdienst APOS

Die im GIS-Grid enthaltenen Daten wurden, erweitert mit einer Höhenkomponente, auch als kostenloser Dienst in den Echtzeitpositionierungsdienst APOS des BEV integriert. Für eine vom Rover an die APOS-Zentrale gesendete Näherungsposition im System ETRS89 wird aus dem GIS-Grid ein 4×4 Teilraster mit den Shifts in

Header	Bezeichnung gemäß NTV2 developer's guide [7]
NUM_OREC 11	Number_of_Overview_Header_Records
NUM_SREC 11	Number_of_Sub_File_Header_Records
NUM_FILE 1	Number_of_Grid_Shift_Sub_Files
GS_TYPE SECONDS	Grid_Shift_Data_Type
VERSION NTv2.0	Version_ID_of_Distortion_Model
SYSTEM_FMGI	Reference_System_From
SYSTEM_TETRS89	Reference_System_To
MAJOR_F 6377397.155	Semi_Major_Axis_From [m]
MINOR_F 6356078.963	Semi_Minor_Axis_From [m]
MAJOR_T 6378137.000	Semi_Major_Axis_To [m]
MINOR_T 6356752.314	Semi_Minor_Axis_To [m]
	Beginn Sub-Grid (= GIS-Grid)
SUB_NAMEMGI	Sub_File_Name
PARENT NONE	Parent_File_Name
CREATED 15-03-10	Creation_Date
UPDATED 15-03-10	Last_Revision_Date
S_LAT 166860.000000	Lower_Latitude_Limit [seconds]
N_LAT 176580.000000	Upper_Latitude_Limit [seconds]
E_LONG -61785.000000	Lower_Longitude_Limit [seconds]
W_LONG -34200.000000	Upper_Longitude_Limit [seconds]
LAT_INC 30.000000	Latitude_Grid_Interval [seconds]
LONG_INC 45.000000	Longitude_Grid_Interval [seconds]
GS_COUNT 199550	Number_of_Grid_Shift_Records
	Beginn der Datensätze des Sub-Grid (= GIS-Grid)
0.000001 0.000001 0.005000 0.005000	Latitude_Shift; Longitude_Shift; Latitude_Accuracy; Longitude_Accuracy Werte in Sekunden Ende des Sub-Grids mit „END“
0.000001 0.000001 0.005000 0.005000	
...	
-1.505653 -3.441625 0.005000 0.005000	
-1.507145 -3.435539 0.005000 0.005000	
...	
END	

Tab. 1: Header der NTV2-Datei des GIS-Grid

Länge, Breite und Höhe ($d\phi$, $d\lambda$ und dH) erzeugt und an den Rover zurück gesendet. Zur Bestimmung dieser Shiftwerte wird in der APOS-Zentrale die Software TTG (Trimble Transformation Generator) eingesetzt. Auf Roverseite werden aus diesem Teilraster mit der bilinearen Interpolation

die Korrekturwerte bestimmt. Die Geoidundulation ist in der Höhenkomponente implizit enthalten.

Voraussetzung zur Nutzung dieses Dienstes ist ein APOS-Zugang für Mobile Internet (NTRIP) sowie ein Empfänger, der das RTCM3.1 Format verarbeiten kann. Die RTCM-Message 1021 be-

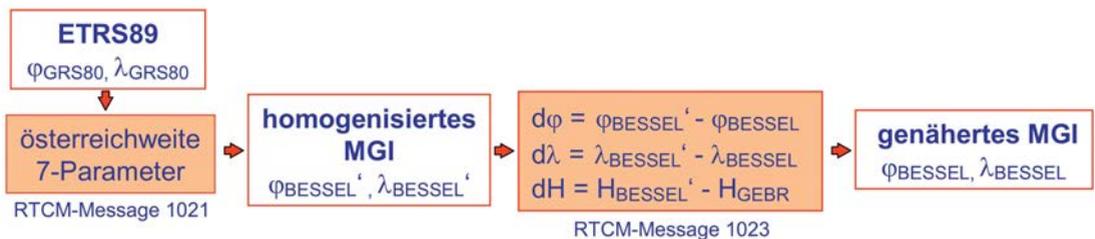


Abb. 2: Anwendung des GIS-Grid im Echtzeitpositionierungsdienst APOS

inhalte die Transformationsparameter für die österreichweite 7-Parametertransformation, die RTCM-Messung 1023 enthält das 4×4 Teilraster zur Interpolation der Korrekturwerte $d\phi$, $d\lambda$ und dh . Die interpolierten Korrekturwerte stellen dabei die Abweichung der homogenisierten MGI-Koordinaten zu den genäherten MGI-Koordinaten dar (siehe Abb. 2)

Die Transformationsgenauigkeit in Lage und Höhe ist in 99% der Fälle besser als 15 cm.

2.3 GIS-Grid zur Analyse des Festpunktfeldes

Das GIS-Grid wird BEV-intern in einer GIS-Umgebung über eine graphische Darstellung als Analysetool zur Qualitätssteigerung des Festpunktfeldes eingesetzt (siehe Abb. 3).

Dabei werden die Abweichungen zwischen Eingangsdaten und Modellwert ($dd\phi$, $dd\lambda$ und ddh) an den zur Modellbildung verwendeten Stützpunkten (Reproduzierbarkeit) einerseits und an jedem in ETRS89 neu hinzu kommenden Punkt (aus APOS-Messung oder Berechnung) andererseits analysiert. Liegen diese Differenzen $dd\phi$, $dd\lambda$ und ddh außerhalb der Messgenauigkeit werden die MGI- und ETRS89-Koordinaten des Punktes näher untersucht.

Bei Vorliegen von Mehrfachmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten sind dabei sehr häufig Bodenbewegungen sowie topographiebedingte Netzschwächen bei der ursprünglichen

Bestimmung der MGI-Koordinaten als Ursache festzustellen. In seltenen Fällen liegt die Ursache an der Messung oder Berechnung.

Die Differenzen liegen in 99% der Fälle innerhalb der für das GIS-Grid ermittelten Genauigkeit < 15 cm. Aus diesem Grund wird von einer Änderung des Produktes „GIS-Grid“ abgesehen und ein verfeinertes Modell, das Kataster-Grid, angestrebt.

2.4 Kataster-Grid

Betrachtet man die Problematik der Anwendung moderner Messmittel im historisch gewachsenen Festpunktfeld einerseits, und die Möglichkeiten einer rasterbasierten Transformation andererseits, so führt dies konsequenterweise zu der Idee der Weiterentwicklung des GIS-Grid zu einer katastertauglichen Transformationsfläche. Die ersten Schritte zur Entwicklung eines solchen Kataster-Grids werden im BEV derzeit gesetzt. Großer Wert wird dabei auf die Einbeziehung der Anwender gelegt werden, um nicht nur ein technisch sauberes, sondern auch ein praxistaugliches Produkt zu schaffen. Um die Auswirkungen auf die tägliche Katasterpraxis abschätzen zu können, werden Pilotprojekte in einzelnen Testgebieten die Entwicklung des Kataster-Grid einleiten.

Grundlage für das Kataster-Grid bildet ein Analyse-Grid aus sämtlichen TP mit ETRS89-

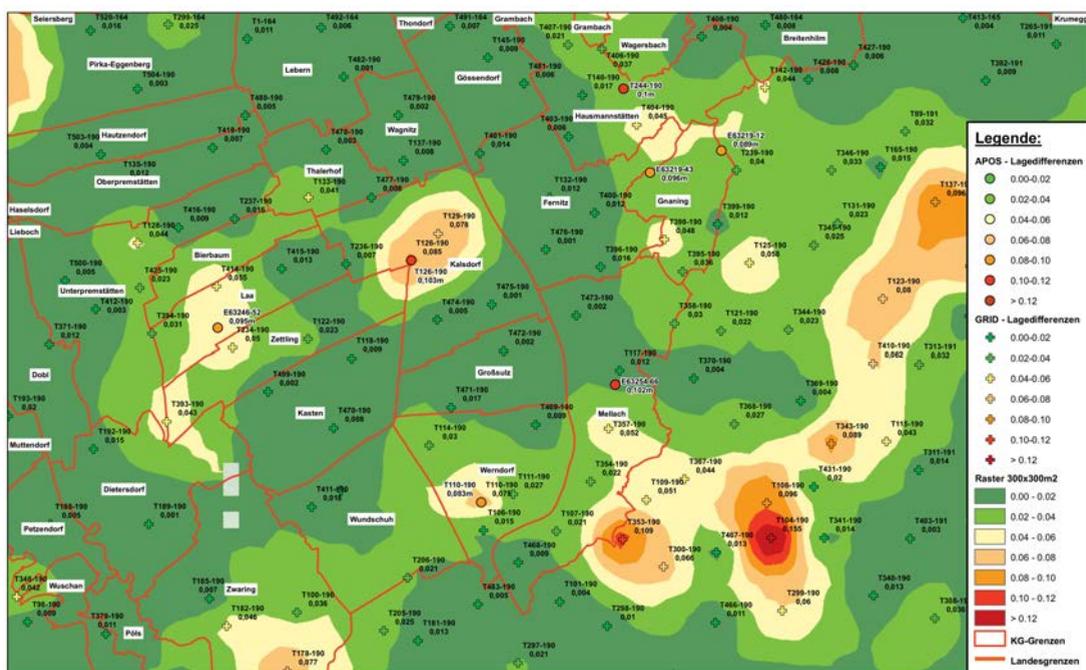


Abb. 3: Analysetool zur Qualitätssteigerung des Festpunktfeldes

Koordinaten. Es wird zur Qualitätskontrolle der im System ETRS89 bestimmten Festpunkte 6. Ordnung (Einschaltpunkte EP) als auch einzelner Grenzpunkte mit ETRS89-Koordinaten herangezogen. Liegt die Abweichung $dd\phi$, $dd\lambda$ der analysierten Punkte zum Analyse-Grid innerhalb einer noch festzulegenden Schranke kann die betreffende Katastralgemeinde für die Gridberechnung freigegeben werden, andernfalls werden im Bedarfsfall Maßnahmen zur Bereinigung der Punkte gesetzt.

Der genaue Projektablauf zur Erstellung des Kataster-Grid ist in Entwicklung und wird im Zuge der Pilotprojekte bei Bedarf noch adaptiert.

3. Höhen-Grid

Das Höhen-Grid [5], [6] wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), dem Land- und Forstwirtschaftlichen Rechenzentrum (LFRZ) und den ALS-Experten der Länder vom BEV erstellt. Es soll eine flächenbasierte 3D-Transformation von ALS-Daten ermöglichen. Während für die Lage-Transformation bereits das GIS-Grid zur Verfügung stand, war die Entwicklung einer Transformationsfläche für die Höhenkomponente noch ausständig.

Aufgabenstellung war daher die Bereitstellung einer Transformationsfläche für die Transformation zwischen ETRS89-Höhen, also ellipsoidischen Höhen bezogen auf das GRS80-Ellipsoid, und MGI-Gebrauchshöhen, bezogen auf den Pegel Triest. Die aus der Transformation mit dem Höhen-Grid resultierenden Gebrauchshöhen stellen dabei die bestmögliche Anpassung an

die Höhen des Nivellements des BEV dar. Um aufgrund der periodischen Durchführung der ALS-Befliegungen eine einfache Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Epochen zu erreichen, wurde das Höhen-Grid grundsätzlich als statische Transformationsfläche definiert. Das Höhen-Grid ist als kostenloser Download über das Portal des BEV [5] verfügbar.

3.1 Modellierung des Höhen-Grid

Das Höhen-Grid repräsentiert die Differenz der orthometrischen Höhe [11] zur Gebrauchshöhe ($H_{ORTH} - H_{GEBR}$). Diese Differenz lässt sich grundsätzlich für alle Punkte des Nivellements berechnen. Da die Linien des Nivellements im Regelfall entlang von Tälern geführt sind, ist das Höhenniveau der Alpen damit nicht ausreichend modelliert. Weiters ist die Maschenweite der Nivellements Schleifen im alpinen Bereich sehr groß. Es zeigen sich auch regional unterschiedliche Korrelationen der Differenz $H_{ORTH} - H_{GEBR}$ mit der Höhe, so dass eine Interpolation in die Fläche nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich ist. Als Lösungsweg wurde nach einem Vorschlag in [12] die Differenz $H_{ORTH} - H_{GEBR}$ in zwei Teildifferenzen zerlegt (H_{NORM} steht für Normalhöhe):

$$H_{ORTH} - H_{GEBR} = (H_{ORTH} - H_{NORM}) + (H_{NORM} - H_{GEBR}) = D2 + D1$$

Die Modellierung des Höhen-Grid auf Basis dieser Zerlegung in zwei Teilraster D2 und D1 wird in [5] und [6] beschrieben. Das endgültige Höhen-Grid ergibt sich in Folge aus der Summe der beiden Teildifferenzen. Es resultiert ein regelmäßiges Raster im Landessystem MGI mit

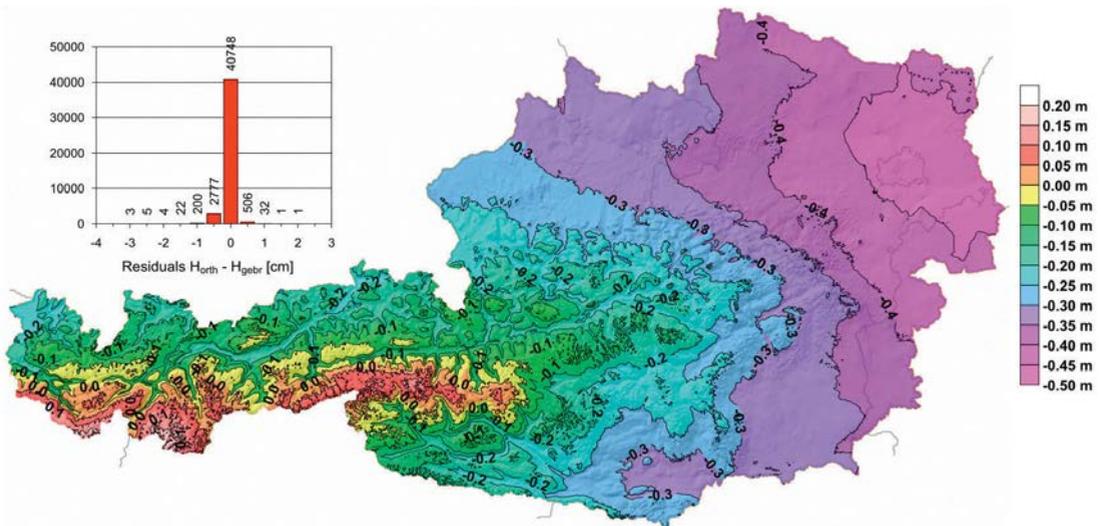


Abb. 4: Transformationsfläche Höhen-Grid

den zugehörigen Rasterwerten als Differenz zwischen orthometrischer Höhe und Gebrauchshöhe MGI (siehe Abb. 4). Die Rasterweite ist 15" in Breite und 22.5" in Länge, dies entspricht einem Punktabstand von etwa 500m in Ost-West als auch in Nord-Süd. Die Transformationsgenauigkeit (1 Sigma) des Höhen-Grid beträgt < 5 cm.

Um mit dem Höhen-Grid ellipsoidische Höhen, bezogen auf das GRS80-Ellipsoid (H_{GRS80}), in MGI-Gebrauchshöhen (H_{GEBR}) umzurechnen, müssen vorab die Geoidundulationen berücksichtigt werden. Dazu bietet das BEV ein Geoidmodell, bezogen auf das GRS80-Ellipsoid, an [13]. Die Umrechnung erfolgt dann mit:

$$H_{GEBR} = H_{GRS80} - N_{GRS80} - \Delta H_{HGRID}$$

Die Geoidundulation N_{GRS80} wird aus dem Geoidmodell interpoliert, ΔH_{HGRID} ist der jeweils aus dem Höhen-Grid ($H_{ORTH} - H_{GEBR}$) interpolierte Wert.

3.2 Korrekturwerte zum Höhen-Grid

Das Höhen-Grid ist bestmöglich an die Höhen des Nivellements angepasst. Die Höhen der Lagefestpunkte (Triangulierungspunkte TP) weichen vom Niveau der Nivellementhöhen oft aus folgenden Gründen erheblich ab:

- Es wurden 90% der TP-Höhen mit trigonometrischen Verfahren bestimmt. Der Einfluss der Refraktion und der Lotabweichung konnte dabei nicht immer berücksichtigt werden. Da die Höhen der Lagefestpunkte ursprünglich zum Zwecke der Streckenreduktion erfasst wurden, reichte die damit erreichte Genauigkeit auch aus. Im Vergleich zu den Höhen des Nivellements

ergeben sich dadurch Differenzen bis zu ± 30 cm.

- Wurden im Zuge einer Nivellementkampagne einzelne TP mit einer nivellitischen Höhe versehen, so musste aus Zeit- und Ressourcenmangel meist von einer Nachziehung der umliegenden TP abgesehen werden. Während also ein TP, dessen Höhe durch das Nivellement bestimmt wurde, sehr gut zum Niveau des Nivellements passt, können die unmittelbar angrenzenden TP doch erheblich davon abweichen.
- Ein weiteres Problem sind TP mit Bodenbewegungen. Weicht die Zeit zwischen ursprünglicher trigonometrischer Höhenbestimmung und Anschluss an das Nivellement erheblich voneinander ab, dann kommt hier zusätzlich eine Veränderung der Höhenkomponente zu tragen.

Um die an die Höhe eines Lagefestpunktes (TP bzw. LFP) angeschlossene terrestrische Geländeaufnahme mit einem aus ALS gewonnenen Höhenmodell vergleichen zu können, müssen die für den Höhenanschluss verwendeten TP-Höhen $H_{GEBR(LFP)}$ mit einem Korrekturwert k_{LFP} auf das Niveau des ALS, bzw. des Höhen-Grids gebracht werden.

$$H_{GEBR(NIV)} = H_{GEBR(LFP)} + k_{LFP}$$

Es entsteht dabei eine quasi-nivellitische Gebrauchshöhe $H_{GEBR(NIV)}$, die direkt mit den mittels Höhen-Grid ins Gebrauchshöhensystem transformierten ALS-Daten verglichen werden kann. Ein Anwendungsschema der Korrekturwerte zum Höhen-Grid für den Vergleich terrestrischer

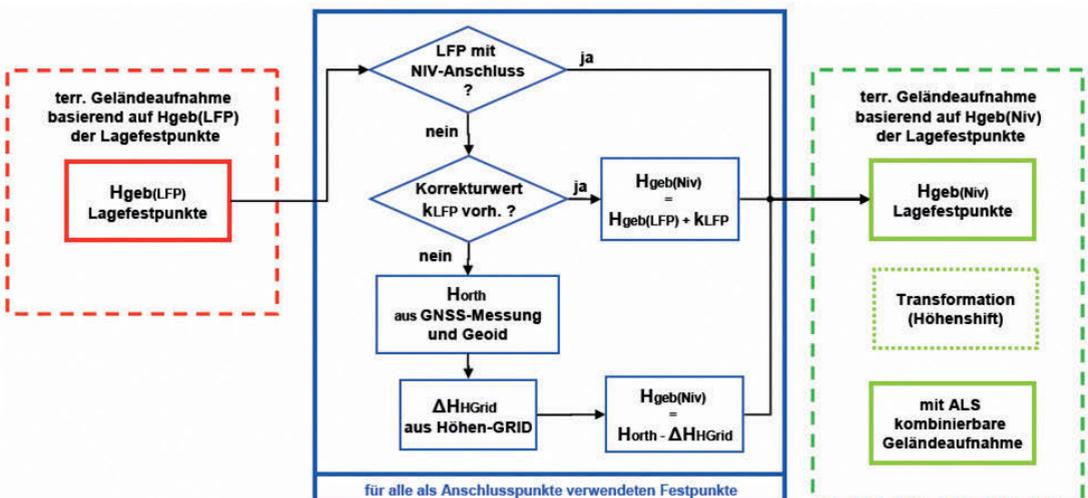


Abb. 5: Vergleich terrestrischer Geländeaufnahmen mit ALS-Daten

Aufnahmen (mit Anschluss an Lagefestpunkte) mit ALS-Daten zeigt Abbildung 5.

Die Korrekturwerte sind für alle Lagefestpunkte mit ETRS89-Koordinaten verfügbar. Steht für einen erforderlichen Punkt noch kein Korrekturwert zur Verfügung, kann er mit einer eigenen GNSS-Messung bestimmt werden:

$$k_{LFP} = H_{ORTH} - H_{GEBR(LFP)} - \Delta H_{HGRID}$$

Die orthometrische Höhe erhält man aus der GNSS-Messung ($H_{GRS80} - N_{GRS80}$), die Gebrauchshöhe des Lagefestpunktes $H_{GEBR(LFP)}$ aus der entsprechenden Punktkarte, und ΔH_{HGRID} aus der Interpolation im Höhen-Grid ($H_{ORTH} - H_{GEBR}$).

Die Korrekturwerte zum Höhen-Grid sind als kostenloser Download über das Portal des BEV erhältlich [5]. Eine Aktualisierung und Erweiterung der Liste der Korrekturwerte erfolgt bei Verfügbarkeit von weiteren TP mit ETRS89-Koordinaten.

3.3 Abgabeformate

Da der NTV2 Standard nur eine Lagetransformation vorsieht und es kein vergleichbares Format für eine Transformationsfläche der Höhenkomponente gibt, wird das Höhen-Grid als Koordinatenliste im ASCII-Format und als GeoTIFF abgegeben. Die Abgabe der Korrekturwerte zum Höhen-Grid erfolgt als Punktliste der betroffenen Lagefestpunkte. Alle zugehörigen Dateien sowie eine Schnittstellenbeschreibung sind über das BEV-Portal kostenlos abrufbar [5].

3.3.1 ASCII-Format

Das Höhen-Grid wird als CSV-Datei (Semikolon als Trennzeichen) in folgender Form zur Verfügung gestellt:

```
BREITE ; LAENGE ; HOEHENDIFFERENZ ;
EPSG_2D
46.3666667 ; 14.5562500 ; -0.253 ; 4312
46.3666667 ; 14.5625000 ; -0.265 ; 4312
46.3666667 ; 14.5687500 ; -0.269 ; 4312
46.3708333 ; 14.5500000 ; -0.250 ; 4312
46.3708333 ; 14.5562500 ; -0.256 ; 4312
46.3708333 ; 14.5625000 ; -0.280 ; 4312
46.3708333 ; 14.5687500 ; -0.293 ; 4312
46.3708333 ; 14.5750000 ; -0.251 ; 4312
46.3708333 ; 14.5812500 ; -0.244 ; 4312
46.3708333 ; 14.5875000 ; -0.250 ; 4312
...
```

Die erste Zeile beinhaltet die Namen der Datenfelder. "Breite" und "Laenge" sind die geographischen Koordinaten des Gitterpunktes im System MGI (in Dezimalgrad), "Höhendifferenz" ist der modellierte Wert $H_{ORTH} - H_{GEBR}$

für den entsprechenden Gitterpunkt (in Meter) und "EPSG_2D" bezeichnet den EPSG-Code für das System MGI (4312). Siehe dazu auch die Schnittstellenbeschreibung am BEV-Portal [5].

3.3.2 GeoTIFF

Das Höhen-Grid wird auch in Form eines GeoTIFFs abgegeben. GeoTIFF ist ein offener Standard und kann daher in vielen Softwarepaketen genutzt werden.

Die Stützpunkte des Rasters beziehen sich dabei auf das Zentrum des jeweiligen Pixels, der Wert $H_{ORTH} - H_{GEBR}$ (in Meter) für den entsprechenden Gitterpunkt entspricht dem Pixelwert (in Abb. 6 durch blaue Farbtöne dargestellt). Eine Darstellung des GeoTIFF-Headers befindet sich in der Schnittstellenbeschreibung des Höhen-Grids [5].

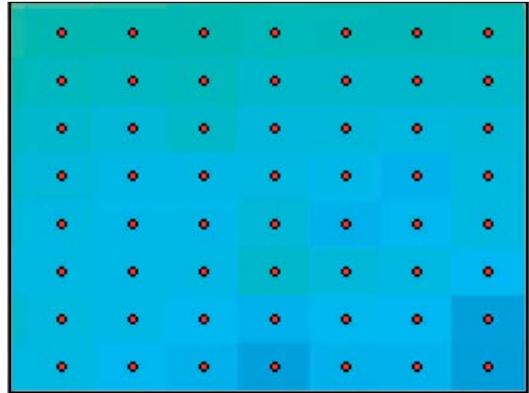


Abb. 6: Ausschnitt aus dem GeoTIFF des Höhen-Grid

3.3.3 Abgabeformat der Korrekturwerte zum Höhen-Grid

Die Abgabe der Korrekturwerte für das Höhen-Grid erfolgt ebenfalls als CSV-Datei in folgender Form:

```
PUNKTTYP ; OEK50 ; KG_NUMBER ; PUNKTNUMMER ;
AUFLAGE ; PUNKTIDENTIFIKATOR ; BREITE ; LAENGE ;
EPSG_2D ; KORREKTUR-WERT
TP ; 1 ; ; 13 ; 1 ; T00013-0001 ; 49.00968906 ;
15.03819459 ; 4312 ; -0.100
TP ; 1 ; ; 14 ; 1 ; T00014-0001 ; 49.01036346 ;
15.06709077 ; 4312 ; -0.184
TP ; 1 ; ; 18 ; 1 ; T00018-0001 ; 49.01480808 ;
15.02801417 ; 4312 ; -0.120
TP ; 3 ; ; 1 ; 3 ; T00001-0003 ; 48.75044055 ;
13.90534739 ; 4312 ; -0.008
TP ; 3 ; ; 3 ; 6 ; T00003-0003 ; 48.77137103 ;
13.85870085 ; 4312 ; -0.102
TP ; 3 ; ; 6 ; 3 ; T00006-0003 ; 48.76292110 ;
13.88327597 ; 4312 ; -0.034
TP ; 3 ; ; 7 ; 5 ; T00007-0003 ; 48.77229409 ;
13.84061958 ; 4312 ; -0.087
```

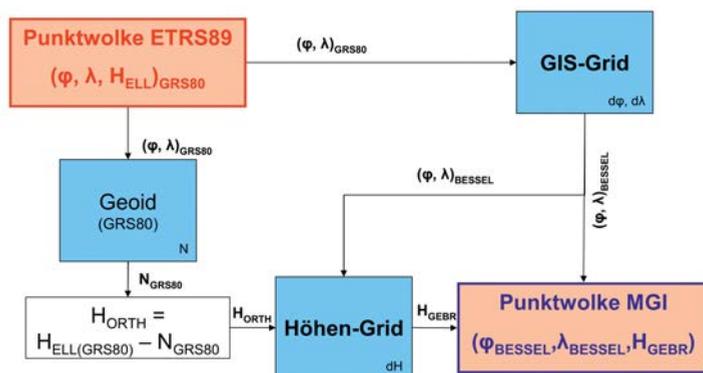


Abb. 7: Anwendungsschema der BEV-Transformationsflächen auf ALS-Daten

TP; 4; ; 1; 4; T00001-0004; 48.75483894;
14.82845297; 4312; -0.145
TP; 4; ; 7; 1; T00007-0004; 48.75929729;
14.82902801; 4312; -0.111
TP; 4; ; 8; 1; T00008-0004; 48.76481996;
14.82439205; 4312; -0.101

...

Die Beschreibung der einzelnen Datenfelder ist der Schnittstellenbeschreibung in [5] zu entnehmen.

4. Anwendung der Transformationsflächen auf ALS-Daten

Die Transformation von ALS-Daten mit den Transformationsflächen GIS-Grid und Höhen-Grid erfolgt nach dem Anwendungsschema in Abbildung 7. Zusätzlich zu diesen beiden Produkten ist auch das Geoidmodell des BEV mit den Geoidundulationen bezogen auf das GRS80-Ellipsoid notwendig. Der Systemübergang zwischen ETRS89 und MGI erfolgt für die Lage der Punkte mit dem GIS-Grid. Für die Höhenkomponente werden aus den ellipsoidischen Höhen (GRS80-Ellipsoid) mit dem Geoidmodell (Undulationen bezogen auf das GRS80-Ellipsoid) orthometrische Höhen gebildet und anschließend mit dem Höhen-Grid in Gebrauchshöhen transformiert. Auch der umgekehrte Weg (MGI nach ETRS89) ist möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] EUREF, http://www.euref-iag.net/euref_egrs.html, 15.10.2012
- [2] MGI, http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2157079&_dad=portal&_schema=PORTAL, 15.10.2012
- [3] Otter, J.: Transformationsflächen für die Umrechnung zwischen ETRS89 und MGI in Österreich. Präsentation im Rahmen der Österreichischen Geodätischen Kommission (ÖGK), 11. Österreichischer Geodätentag, Velden, 2012, <http://www.oegk-geodesy.at/archiv-2012-geodaentag.html>, 15.10.2012
- [4] BEV GIS-Grid, http://www.bev.gv.at/portal/page?_

[pageid=713,2157075&_dad=portal&_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2157075&_dad=portal&_schema=PORTAL), 15.10.2012

- [5] BEV Höhen-Grid, http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2204753&_dad=portal&_schema=PORTAL, 15.10.2012
- [6] Briese, C., Höggerl, N., Imrek, E., Otter, J., Ruess, D.: Transformation von GNSS-Höhen in österreichische Gebrauchshöhen mittels einer Transformationsfläche (Höhen-Grid). Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 99. Jg., 4/2011, 267-281, 2012, ISSN 1605-1653.
- [7] Junkins, D.R., Farley, S.A.: NTV2 Developers Guide; Geodetic Survey Division Geomatics Canada; 1995; <ftp://ftp.gov.nc/sig/ESRI/ntv2/NTV2DeveloperGuide.pdf>, 15.10.2012
- [8] Junkins, D.R., Farley, S.A.: NTV2 Users Guide; Geodetic Survey Division Geomatics Canada; 1995; http://www.geod.nrcan.gc.ca/pdf/ntv2_guide_e.pdf, 15.10.2012
- [9] Pail, R., Kühnreiter, N., Wiesenhofer, B., Hofmann-Welthenhof, B., Of, G., Steinbach, O., Höggerl, N., Imrek, E., Ruess, D., Ullrich, C.: The Austrian Geoid 2007. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 96. Jg., 1/2008, 3-14, 2008, ISSN 0029-9650.
- [10] Meurers, B., Ruess, D.: Compilation of a new Bouguer gravity data base in Austria. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg., 2/2007, ff 90-94, ISSN 0029-9650.
- [11] Höggerl, N., Ruess, D.: The new orthometric height system in Austria. Proceedings of the EUREF 2003 Symposium, Toledo, Spain. EUREF Publication No. 13. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 33, Frankfurt Main, 2004, ISSN 1436-3445, ISBN 3-89888-885-1.
- [12] Schlatter, A., Marti, U.: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95. Teil 12, Landeshöhenetz ‚LHN95‘. Bericht 20, 2007, Bundesamt für Landestopographie, Wabern, ISBN 978-3-302-10002-9.
- [13] BEV Geoid, http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2157077&_dad=portal&_schema=PORTAL, 15.10.2012

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Jürgen Otter, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Abt.V1-Grundlagen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.

E-Mail: juergen.otter@bev.gv.at



Aktuelle Multi-GNSS Implementierungsszenarien – Sicht der Systembetreiber und des IGS

Robert Weber, Wien

Kurzfassung

Mit dem Start der ersten Galileo-Testsatelliten und dem gleichzeitigen Aufbau des chinesischen COMPASS/Beidou Systems ab dem Jahr 2005 ist die vormals auf GPS oder auch GPS/GLONASS basierende satellitengestützte Navigation und Positionierung in ein echtes Multi-GNSS Umfeld getreten. Modernisierungsprogramme der bereits aktiven Systeme bieten eine Vielzahl neuer frei zugänglicher Signale. Die global agierenden Satellitennavigationssysteme werden zusätzlich durch regionale Augmentationssysteme wie WAAS, EGNOS oder auch QZSS komplettiert. In Summe werden dem Nutzer ab ca. 2016 knapp über 100 Navigationssatelliten mit rund 25 nutzbaren Navigationssignalen angeboten. Dieser Beitrag behandelt die aktuellen Implementierungspläne der Systembetreiber von GPS, GLONASS, Galileo, COMPASS/Beidou. Es werden allerdings auch die bei der Nutzung unterschiedlichster Systemsignale auftretenden Kompatibilitäts- und Kalibrierungsprobleme der am Boden genutzten Hard- und Softwarekomponenten beleuchtet.

Der Internationale GNSS Service (IGS) hat seit Februar 2012 ein globales Beobachtungsexperiment (MGEX) ins Leben gerufen, dessen Ziel es ist, neben dem nun deutlich komplexeren Datenfluss und den neuen Datenstandards (RINEX 3.0x, RTCM 3.x) auch die zugehörige erweiterte Datenanalyse zu erproben, um den IGS in den kommenden Jahren in einen wahren Multi-GNSS Dienst umzuwandeln.

Schlüsselwörter: GNSS, Signalkalibrierung, IGS MGEX Kampagne

Abstract

Since the launch of the first Galileo test satellite in 2005 and the almost simultaneous setup of the Chinese COMPASS/Beidou system satellite based PNT (Positioning, Navigation and Timing) has entered the new era of real multi-GNSS. Upgrade initiatives of the already active systems offer a multitude of new free accessible signals. These globally operable satellite navigation systems are accompanied by regional augmentation systems like WAAS, EGNOS or QZSS. As of around 2016 the user will be able to choose among 100 navigation satellites offering about 25 free signals. This article provides information about current implementation scenarios of the system operating agencies. On the other hand the multitude of signals also entails a number of compatibility and calibration issues which affect the quality of operation of the available receiver hard- and software.

To cope with this changing conditions the International GNSS Service (IGS) has launched a global initiative (Multi-GNSS Experiment = MGEX) with the goal to test the more complex data flow between IGS components and the user community, to establish new data standards (RINEX 3.0x, RTCM 3.x) capable to handle the new signals and last but not least to develop new data modelling techniques. This Experiment shall pave the way for IGS to a real Multi-GNSS Service.

Keywords: GNSS, calibration biases, IGS MGEX campaign

1. Einleitung

Stand dem Satellitennavigationsnutzer um das Jahr 2000 im Prinzip nur GPS mit seinen 2 Codesignalen als operables System zur Verfügung, so kann vor allem während der vergangenen 5 Jahre durchaus von einer Vervielfachung des System-, Satelliten-, und Signalangebots gesprochen werden. Mit dem Start der GPS II-RM und -IIF Satelliten bietet das amerikanische System zumindest einen weiteren zivilen Code (C2) und eine weitere freie Grundfrequenz (L5). GLONASS hat seit 2010 wieder seinen Vollausbau (24 operable Satelliten) erreicht.

Der Beginn des ‚modernen Zeitalters‘ kann grob mit dem Start des ersten Galileo GIOVE-

A Satelliten im Jahr 2005 gleichgesetzt werden (siehe Abb. 1). Das europäische Galileo-System kann inzwischen auf den erfolgreichen Betrieb der beiden Testsatelliten GIOVE-A und GIOVE-B als auch auf die Inbetriebnahme der 4 IOV-Satelliten verweisen. Wenngleich die GIOVE-Satelliten noch nicht die volle für Galileo definierte Signalfülle abstrahlten, waren doch erste Tests der Qualität der beiden im Frequenzspektrum benachbarten E5a- und E5b Signale (sowie der Breitband E5 Modulation) als auch für spezielle Empfänger des E6-Signals möglich.

Gleichzeitig, und für viele Nutzer fast unbemerkt, betreibt China mit Vehemenz den Ausbau seines COMPASS/Beidou-2 Systems. Das

COMPASS/Beidou-2 System besteht aus einer Kombination von typischen Navigationssatelliten im so genannten ‚Medium Earth Orbit (MEO)‘, einigen geostationären Satelliten (GEO) und zudem 5 inklinierten geostationären Satelliten (IGSO). Hier tritt ein weiterer starker Satellitennavigationsdienst auf den Plan, der großes technisches aber auch kommerzielles Potenzial besitzt. Wenngleich offiziell mit 2020 terminiert, wird das chinesische System wahrscheinlich bereits 2016/17 seinen Vollausbau mit rund 35 Satelliten erreichen.

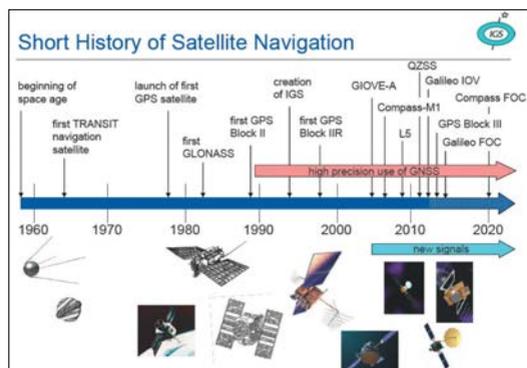


Abb.1: Entwicklung der Satellitennavigationssysteme (Quelle: U. Hugentobler, TU-München)

Alle 4 oben genannten Systeme werden nun kurz im Detail behandelt. Auf die so genannten SBAS (Satellite Based Augmentation Systems, z.B. WASS, EGNOS, QZSS, SDCM, etc.) wird in diesem Artikel nicht eingegangen.

2. GNSS Status und Implementierungsszenarien

2.1 GPS (US Global Positioning System)

GPS kann nun seit fast 20 Jahren auf ein stabiles voll operables Raumsystem verweisen. Im Rahmen diverser Erneuerungsprogramme wurden die Satellitentypen IIR, IIR-M als auch IIF gestartet, welche sowohl neue zivile als auch militärische Signale anbieten. Dementsprechend wird die Nutzung der derzeitigen Kreuzkorrelations-signale P1, P2 ab 2020 nicht mehr garantiert. Der nächste Entwicklungsschritt wird mit dem Start der GPS-III Satelliten (voraussichtlich ab 2015/16) eingeläutet, die neben der bereits ab den IIF-Satelliten verfügbaren neuen zivilen L5 Frequenz auch einen weiteren qualitativ hochwertigen C1-Code anbieten werden. Gleichzeitig wird die Kontrollsoftware des Bodensegments (OCX) weiter entwickelt, sodass in naher Zukunft von einer Steigerung der SIS (Signal in Space) Performance (UERE von 0.6-0.8m) auszugehen

ist. GPS verfügt zum Termin 20. September 2012 über 31 aktive Satelliten in 6 Bahnebenen.

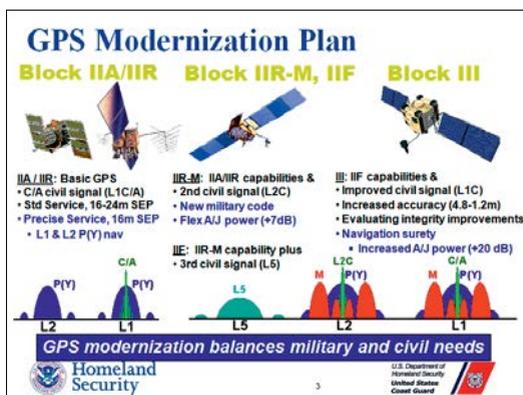


Abb.2: GPS Modernisierungsplan (Quelle: US Department of Homeland Security)

2.2 GLONASS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema)

Das von Verteidigungsministerium der Russischen Föderation kontrollierte GLONASS hat seit 2010 seinen nominellen Vollausbau mit zumindest 24 aktiven Satelliten in drei Bahnebenen (Bahnhöhe 19100km, Inklination 64.8 Grad) wieder erreicht. Derzeit befinden sich vorrangig Satelliten der Typen GLONASS-M und einige GLONASS-K Satelliten im All. Bemerkenswert sind jedenfalls die Pläne, dass künftige Satelliten sowohl die bisher bewährten FDMA-(Frequency Division – Multiple Access; Satellitenunterscheidung durch individuelle Frequenz) Signale als auch CDMA-Signale (Code Division – Multiple Access) aussenden werden, was vor allem die Kompatibilität zu GPS und Galileo steigert. Des Weiteren plant GLONASS zumindest eine neue Frequenz (L3; 1207.14 MHz), möglicherweise aber sogar noch zusätzlich Signale auf der neuen Trägerfrequenz L5 (1176.45 MHz; GPS und Galileo kompatibel) anzubieten. Die Satelliten (Satelliten Typ GLONASS-K2) mit den neuen CDMA-Signalen und der Trägerwelle L3 werden ab ca. 2014/15 zum Einsatz kommen. Es sei nicht zuletzt auf das weitgehend bereits heute aktive neue russische SBAS-System SDCM hingewiesen, welches (abgesehen von den derzeit noch fehlenden Bodenstationen) auch weite Gebiete Europas abdeckt und damit durchaus zu EGNOS in Konkurrenz stehen wird.

2.3 Galileo

Am 21. Oktober 2011 erfolgte der erfolgreiche Start der ersten beiden europäischen GALILEO-

GLONASS Constellation Status at 20.09.2012 based on both the almanac analysis and navigation messages received at 13:00 20.09.12 (UTC) in IAC PNT TsNIImash

Orb. slot	Orb. pl.	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	Operation ends	Life-time (months)	Satellite health status		Comments
								In almanac	In ephemeris (UTC)	
1	1	01	730	14.12.09	30.01.10		33.2	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
2	1	-4	728	25.12.08	20.01.09		44.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
3	1	05	744	04.11.11	08.12.11		10.6	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
4	1	06	742	02.10.11	25.10.11		11.6	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
5	1	01	734	14.12.09	10.01.10		33.2	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
6	1	-4	733	14.12.09	24.01.10		33.2	+	+ 12:15 20.09.12	In operation
7	1	05	745	04.11.11	18.12.11		10.6	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
8	1	-6	743*	04.11.11			10.6			In commissioning phase
9	2	-2	736	02.09.10	04.10.10		24.6	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
10	2	-7	717	25.12.06	03.04.07		68.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
11	2	00	723	25.12.07	22.01.08		56.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
12	2	-1	737	02.09.10	12.10.10		24.6	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
13	2	-2	721	25.12.07	08.02.08		56.9	+	+ 12:45 20.09.12	In operation
14	2	-7	715	25.12.06	03.04.07		68.9	+	+ 13:44 20.09.12	In operation
15	2	00	716	25.12.06	12.10.07		68.9	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
16	2	-1	738	02.09.10	11.10.10		24.6	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
17	3	04	746	28.11.11	23.12.11		9.8	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
18	3	-3	724	25.09.08	26.10.08		47.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
19	3	03	720	26.10.07	25.11.07		58.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
20	3	02	719	26.10.07	27.11.07		58.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
21	3	04	725	25.09.08	05.11.08		47.9	+	+ 11:59 20.09.12	In operation
22	3	-3	731	02.03.10	28.03.10		30.7	+	+ 13:00 20.09.12	In operation
23	3	03	732	02.03.10	28.03.10		30.7	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
24	3	02	735	02.03.10	28.03.10		30.7	+	+ 13:45 20.09.12	In operation
21	3	-5	701	26.02.11			18.8			Flight Tests
14	2		722	25.12.07	25.01.08	12.10.11	56.9			Spares
7	1		712	26.12.04	07.10.05	14.12.11	92.9			Spares
17	3		714	25.12.05	31.08.06	19.12.11	80.9			Spares
3	1		727	25.12.08	17.01.09	08.09.10	44.9			Maintenance
22	3		726	25.09.08	13.11.08	31.08.09	47.9			Maintenance
8	1		729	25.12.08	12.02.09	10.09.12	44.9			Maintenance

Abb. 3: GLONASS Konstellation – Status 20. September 2012 (Quelle [8], Federal Space Agency – Information Analytical Center)

IOV Satelliten (Ort: Kourou; Rakete: Soyuz). Diesen folgten weitere zwei IOV-Satelliten am 12. Oktober 2012. Die IOV-Satelliten besitzen eine Masse von ca. 700kg und der Satellitenkörper weist eine Dimension von 3.02m x 1.58m x 1.59m auf. Die Solarpanele haben das stolze Ausmaß von jeweils knapp 7m. Die geplante Lebensdauer der Satelliten ist auf zumindest 12 Jahre ausgelegt. Wie alle Galileo-Satelliten umkreisen die IOV-Satelliten die Erde in einer Bahnhöhe von ca. 23220km mit einer Bahninklination von 56 Grad. Die derzeit von der Firma OHB gebauten nächsten 14 Satelliten werden im Zeitraum 2013-2015 gestartet. Damit wird Galileo ab 2016 IOC (Initial Operational Capability) erklären und zumindest den Open Service (OS) und den Public Regulated Service (PRS) anbieten. Über die Implementierung bzw. den Start des SAR (Search and Rescue) Service ist noch keine endgültige Entscheidung gefallen. Definitiv wird es keinen SoL-Service (Safety of Live; Integrity) über Galileo

geben, aber diese Funktionalität wird in Zukunft global über den Zusammenschluss der regionalen SBAS Dienste (in Europa: EGNOS) verfügbar sein. Der Commercial Service (CS) von Galileo ist weiterhin in Diskussion und es werden ab 2016 einige Geschäftsmodelle erprobt. Eine weitere Tranche von 8 Satelliten wurde bereits bestellt und wird im Zeitraum 2017-2019 das System auf 26 operable Satelliten erweitern (FOC = Full Operational Capability)). Die beiden Galileo Testsatelliten GIOVE-A und GIOVE-B wurden im Juli 2012 von der ESA außer Dienst gestellt.

Die Galileo Satelliten senden 10 Signale in zumindest drei Frequenzbändern aus. Im Frequenzband E1 (1575.42MHz; GPS kompatibel) finden sich die drei Signale E1A, E1B und E1C. E1B und E1C sind frei zugängliche Signale, wobei E1B auch Dateninformation aufmoduliert ist, während E1C ein hochqualitatives Ranging-Signal (Pilot) repräsentiert. E1A ist Teil des PRS und somit autorisierten Nutzern vorbehalten. E6 (1278.75

MHz) unterteilt sich ebenfalls in E6A, E6B und E6C wobei E6A wieder dem PRS und E6B und E6C dem CS (Commercial Service) zugeordnet sind. Galileo-Empfänger des Massenmarktes werden wohl vorerst E6 nicht unterstützen. Als Modulationstechniken wird im E1 und E6 Bereich BPSK, BOC(1,1) und BOCc(15,5) verwendet. Von höchstem Interesse ist das E5-Breitband Signal auf der Mittenfrequenz 1191.795 MHz (Modulation AltBOC(15,10)). Handelsübliche Empfänger können dieses Signal in zwei Teilsignale E5a (1176.45 MHz; GPS kompatibel) und E5b (1207.14 MHz) zerlegen, oder eben das volle Breitbandsignal E5 anbieten. Sowohl E5a als auch E5b sind wieder jeweils zwei um 90 Grad phasenverschobene Signale aufmoduliert. E5 zeichnet sich durch extrem geringes Rauschen (± 1 dm) gegen die Signale aller anderen Systeme aus. Welche Galileo-Signale schließlich von den verschiedenen Empfängerherstellern angeboten werden ist heute noch weitgehend unklar. Derzeit bieten die führenden Hersteller Geräte an, welche die Anmessung von 3-5 Signalen vorrangig im E1 und E5 Bereich erlauben.

Die nächste Ausbauphase von Galileo sieht jeweils den Ankauf und Austausch von Gruppen von 6-8 Satelliten vor (wie bei GPS). Technische Neuerungen sehen eine Reihe von Maßnahmen vor, die sich aber derzeit erst im Planungsstadium befinden. So wird der Übergang auf eine neue Satellitenplattform überlegt, da die derzeitige Plattform in punkto Aufnahmekapazität für neue Sensoren ihre Leistungsgrenze erreicht hat. Auch die Nutzung von ‚Intersatellite Links‘

(Kommunikations- und Streckenmessfunktionalität zwischen Satelliten) ist angedacht, was eine grobe Reduktion des benötigten Bodensegments erlauben würde. Die Nutzung von inklinierten geostationären Bahnen (IGSO; siehe auch Kapitel 2.4) für einige zusätzliche Satelliten wäre für die Systemüberwachung und Systemkommunikation von Vorteil. Nicht zuletzt könnten die Kosten für die Starts durch Nutzung einer neuen Antriebstechnik reduziert werden.

2.4 Compass/Beidou-2

Auch China entwickelt derzeit unter der Bezeichnung Compass/Beidou-2 ein global nutzbares Satellitennavigationssystem. Dieses baut auf das bereits aktive regionale chinesische SBAS System COMPASS auf und wird unter dem Namen Beidou-2 auf ein globales Navigationssystem erweitert. Die Besonderheit an Compass/Beidou-2 ist die gemeinsame Nutzung von geostationären (GEOs), inklinierten geostationären (Inclined Geostationary = IGSO) und ca. 25 ‚medium-orbit‘ (MEO) Satelliten. Die IGSO-Satelliten dienen einerseits einer sehr guten regionalen Abdeckung und bieten gleichzeitig eine ausgezeichnete Möglichkeit die Kommunikation zwischen allen Satelliten des Gesamtsystems unter Minimierung der benötigten Bodenstationen aufrecht zu erhalten. Zum Zeitpunkt Oktober 2012 verfügt Compass/Beidou-2 über 15 aktive Satelliten gleich verteilt in 5 GEO, 5 IGSO und 5 MEO Bahnen. Compass/Beidou-2 Satelliten besitzen eine Masse von 1500kg bis 2000kg, die Dimension des Satellitenkörpers beträgt 1.8m x 2.2m x 2.5m. Signale werden auf den Trägerfrequenzen B1 = 1561.10 MHz, B2 = 1207.14 MHz und B3 = 1268.52 MHz abgestrahlt. Damit überlagern sie allerdings auch reservierte Frequenzbereiche anderer Systeme wie z.B. die E5b und E6-Signale von Galileo. Offiziellen Darstellungen zur Folge ist FOC (Full Operational Capability) für Compass/Beidou-2 für das Jahr 2020 geplant. Angesichts der derzeitigen hohen Frequenz an Satellitenstarts ist hier aber auch schon für den Zeitraum 2016/17 mit einem Vollausbau zu rechnen.

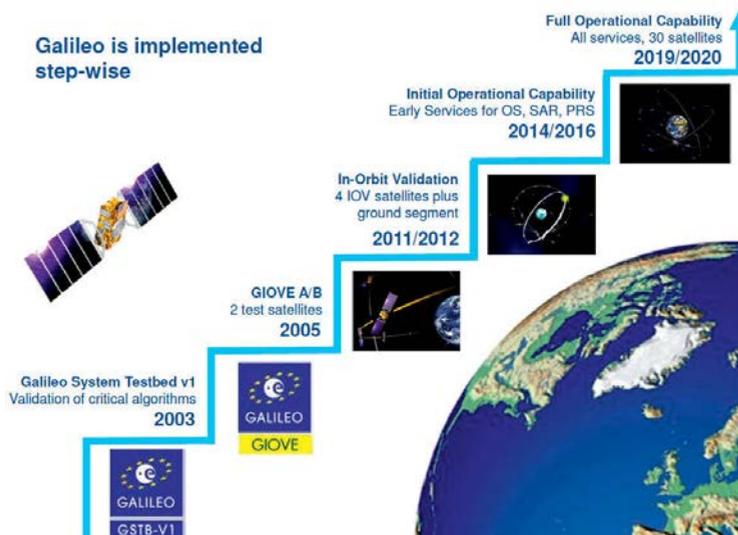


Abb. 4: Galileo Implementierungsszenario bis 2020 (Quelle: ESA)

Die Entwicklung von Compass/Beidou-2 fähiger Empfängerhardware wird vor allem in China vorangetrieben.

Für internationale Firmen ist dagegen der technologische Einstieg erschwert, da für Compass/Beidou-2 bis heute kein vollständiges ICD (Signal in Space – Interface Control Document) veröffentlicht wurde. Dies wurde von chinesischer Seite für Ende 2012 in Aussicht gestellt. Ohne Zweifel stellt Beidou-2 für die anderen Satellitennavigationsbetreiber eine ernst zu nehmende kommerzielle Konkurrenz dar. Aus diesem Grund ist die Frage der möglichst hohen Kompatibilität des eigenen Systems mit den anderen Systemen von entscheidender Bedeutung.

3. Signalkalibrierung

Die Vielzahl an Systemen, die hohe Zahl beobachtbarer Navigationssatelliten und nicht zuletzt die Fülle an freien Navigationssignalen verspricht dem Nutzer auf den ersten Blick ein wahres ‚goldenes Zeitalter‘ der Satellitennavigation. Auf den zweiten Blick stellt sich allerdings schon die Frage nach verfügbarer Multi-GNSS Empfängerhardware und auch entsprechender Software zur Auswertung der Messdaten. In weiterer Folge muss festgestellt werden, dass heute genutzte Standardformate des GNSS-Datenaustausch sowohl für Postprozessierung (RINEX) als auch Echtzeitübertragung (RTCM) noch keinesfalls für diese Signalfülle adaptiert wurden.

Für die Empfängerhersteller stellt sich vor allem die Frage der Signalkalibrierung um schlussendlich PNT-Information mit der vom Nutzer geforderten Genauigkeit basierend auf den Signalen von zumindest zwei Systemen zur Verfügung zu stellen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sei hier für den Fall eines kombinierten

GPS/GLONASS Empfängers die Problematik der Signal-Kalibrierung (Bereitstellung und Korrektur von Zeitdifferenzen hervorgerufen durch die Nutzung verschiedener Codes, verschiedener Trägerfrequenzen und verschiedener Systemzeiten) kurz dargestellt.

ISB (Intersystem Bias)

Im Empfänger werden generell die Signale verschiedener Satellitennavigationssysteme mit einer gewissen Zeitverzögerung zueinander registriert. Diese Kalibrierungsgröße könnte man auf den ersten Blick mit den verschiedenen Systemzeiten begründen. In der Realität sind die unterschiedlichen Systemzeiten allerdings nur eine Komponente dieses Effekts. Im Prinzip zeigt jeder Empfängertyp eine individuelle aber stabile Zeitdifferenz, welche häufig als zusätzliche Unbekannte zu den Ortskoordinaten und dem Empfängeruhrstand relativ zum Referenzsystem (meist GPS-> Uhrkorrektur zu GPS-Zeit) angesetzt wird.

DCB (Differential Code Bias)

DCBs bezeichnen durch die Hardware bedingte Signalverzögerungen bei der Anmessung unterschiedlicher Codes, selbst wenn diese der gleichen Trägerwelle aufmoduliert sind. So treten DCBs in der Größenordnung von Nanosekunden zwischen den C/A- und P1-Codesignalen von GPS auf. Gleiches gilt natürlich auch für GLONASS Codes im gleichen Frequenzband. Diese Zeitdifferenzen sind für die direkte Positionsberechnung vom Hersteller zu berücksichtigen bzw. können vom Nutzer auch in der Postprozessierung (speziell mit Hilfe der geometriefreien Linearkombination) berechnet werden.

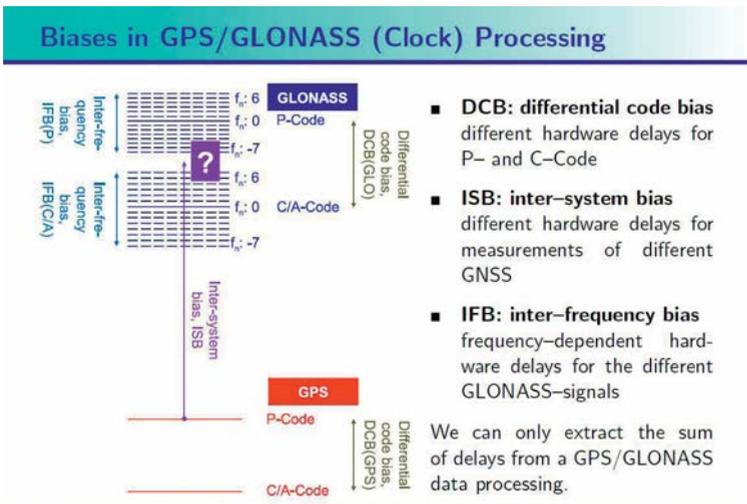


Abb. 5: GNSS Signalkalibrierung am Beispiel GPS/GLONASS (Quelle: R. Dach, M. Meindl, S., Schär; AIUB)

IFB (Interfrequency Bias)

Eine weitere Notwendigkeit zur Kalibrierung stellen die so genannten IFB dar. Dies sind wieder Zeitverschiebungen in der Signalabstrahlung oder auch dem Signalempfang, diesmal hervorgerufen durch unterschiedliche Trägerwellenlängen. Speziell bei der von GLONASS angewendeten FDMA (Frequency Division – Multiple Access) Technik sendet jeder Satellit auf einer individuellen Frequenz. Diese Zeitkorrektur

folgt weitgehend einem von der Frequenzzahl abhängigen, linearen Trend und kann deshalb entweder in der Datenauswertung oder bereits vom Hersteller des Empfangsgerätes bei der Datenaufnahme berücksichtigt werden.

Abbildung 5 dokumentiert die oben genannten Kalibrierungselemente. Leider muss gesagt werden, dass diese Effekte sowohl die Datenabstrahlung im Satelliten (hier abhängig vom Satellitentyp – Satellitenkalibrierungsgrößen sind aber zumindest zeitlich sehr stabil im Sub-Nanosekundenbereich) als auch den Empfang im Nutzergerät betreffen. Zudem ändern sich die Kalibrierungsgrößen bereits meist beim Einspielen einer neuen Empfängersoftware.

Neben den hier dokumentierten ‚Code-Biasen‘ gibt es ähnliche Effekte auch bei der Aufnahme der Phasendaten, welche derzeit noch weitgehend die schnelle Mehrdeutigkeitslösung in der Precise-Point-Positioning-Technik verhindern. Aus dem Gesagten soll der Leser aber den Schluss ziehen, dass die Entwicklung von ‚Multi-GNSS-Empfängern‘ ein schwieriges Unterfangen ist und jedes zusätzliche Signal oder jedes zusätzliche Satellitennavigationssystem den Aufwand erheblich erhöhen.

4. IGS Multi-GNSS Global Experiment 2012

Der IGS (International GNSS Service) befasst sich seit 20 Jahren führend mit der GNSS Datenaufnahme auf Basis eines globalen Beobachtungsnetzes, der Datenanalyse und der Erstellung von Produkten für eine Vielzahl von Applikationen mit höchsten Genauigkeitsansprüchen. Zu den Produkten zählen unter anderem Satellitenbahnen und Satellitenuhrkorrekturen, Erdrotationsparameter, Stationskoordinaten und Informationen über die atmosphärische Signalverzögerung. Bis 1998 war der IGS völlig auf GPS fokussiert. In den Jahren 1998-2000 wurde auch die Nutzung der GLONASS Signale im Rahmen der IGEX Kampagne [4], [5] evaluiert. Nach einigen Jahren mit sehr geringer Zahl aktiver GLONASS Satelliten wurde das System schrittweise wieder aufgebaut und spätestens seit 2008 sind GLONASS –Signale integraler Bestand der IGS Datenanalyse.

In Zukunft möchte der IGS das volle Spektrum der heute verfügbaren Satellitensysteme und Signale nützen. Um dieses Ziel zu erreichen muss zuerst das Beobachtungsnetz entsprechend mit Multi-GNSS Beobachtungsstationen erweitert werden. In der Folge sind sowohl Datenfluss, Standardformate, aber vor allem auch die Analysesoftware zu erweitern. IGS startete des-

halb entsprechend einer Empfehlung des IGS Workshops 2010 in Newcastle (Ende 2011) eine dementsprechende Kampagne (Multi-GNSS-Experiment = MGEX; [2]). Diese Kampagne soll auch bereits existierende Multi-GNSS Netze an den IGS anbinden bzw. die Zusammenarbeit zwischen IGS und den entsprechenden Betreiberorganisationen wie z.B. CNES, JAXA, DLR, BKG und GFZ vertiefen. MGEX ist zwar vorrangig auf die Datenauswertung in der Postprozessierung fokussiert, verfolgt allerdings auch die Anbindung und Verarbeitung von Datenströmen in Echtzeit. Die Koordination von MGEX obliegt der IGS GNSS Working Group in Zusammenarbeit mit einer Reihe weiterer IGS Arbeitsgruppen und dem IGS Governing Board.

Im Detail hat IGS im Rahmen von MGEX um den Beitrag folgender Komponenten angefragt:

- Multi-GNSS Beobachtungsstationen
- Multi-GNSS Datenzentren
- Multi-GNSS Datenanalysezentren
- Kooperierende Netzwerke, welche Multi-GNSS Netze bereits betreiben.

Unter dem Begriff Multi-GNSS werden neben GPS+GLONASS die Signale von Galileo, Compass/Beidou-2, QZSS, als auch der weiteren SBAS Systeme verstanden. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Akquirierung von Stationen beteiligten sich ab Februar 2012 ca. 20 Organisationen mit knapp 55 Stationen an diesem Experiment. Abb. 6 zeigt den Netzstatus im Juli 2012. Entsprechend der üblichen IGS Politik werden die gesammelten RINEX Daten allen Nutzern und Interessierten frei zur Verfügung gestellt. Der Kampagne haben sich in diesem Zusammenhang auch drei RINEX Datenzentren (BKG, CDDIS und IGN) angeschlossen. Echtzeitdatenströme standen im Sommer 2012 von nur ca. 15 Stationen zur Verfügung, wobei allerdings die Tendenz in den letzten Monaten ganz klar in Richtung der generellen Echtzeitdatenübertragung geht und RINEX Daten nur mehr im Anschluss aus den RTCM- oder proprietären Echtzeitdatenströmen abgeleitet werden. Die Echtzeitdaten stehen derzeit nur den in MGEX offiziell registrierten Nutzergruppen zur Verfügung.

Betreffend der Datenanalyse gab es positive Rückmeldungen von einer Reihe bereits heute aktiver IGS-Analysezentren, aber auch von drei bisher noch nicht in IGS involvierten Organisationen. Alle MGEX Operationen werden derzeit getrennt von den üblichen IGS-Datentransfer- oder

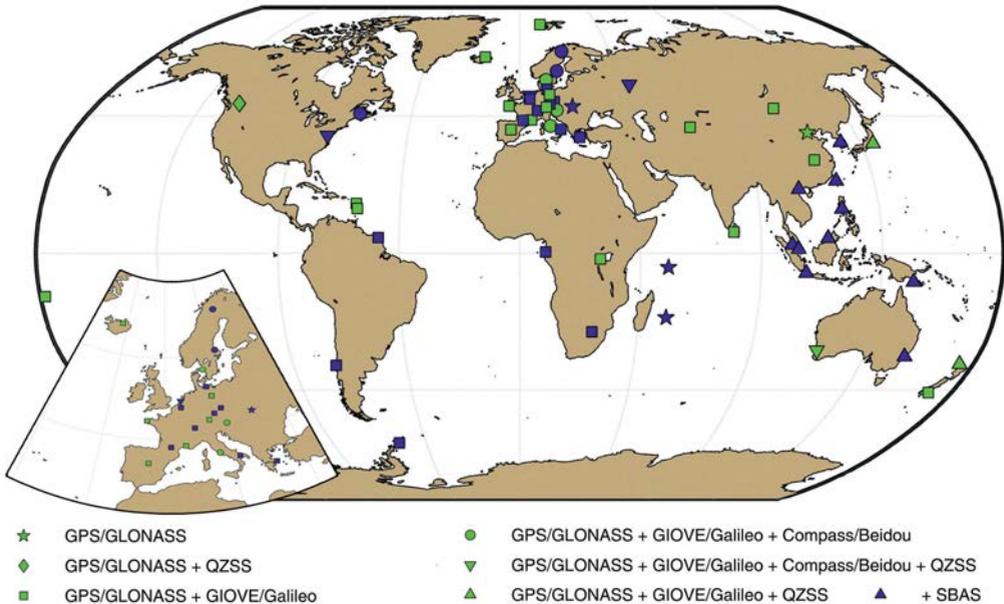


Abb. 6: MGEX Beobachtungsnetz, Status Juli 2012

Analyseabläufen betrieben, um die Stabilität in den IGS-Routineabläufen nicht zu gefährden.

Eine Übersicht des Projektstandes und die Ergebnisse der ersten Datenanalysen wurden im August am IGS Workshop 2012 in Olstyn präsentiert [6].

In den vergangenen Monaten war MGEX noch als IGS-Lernprojekt zu verstehen, welches die Empfängerqualität und die mögliche Nutzung verschiedener Signale für die Generierung von IGS-Core-Produkten (präzise Bahndaten und Uhrkorrekturlösungen) zum Ziel hatte. Zudem waren die nötigen Adaptierungen der Standardformate wie RINEX (in Zukunft RINEX 3.02) bzw. RTCM (in Zukunft RTCM-MSM) vorzunehmen. Die mittelfristigen Ziele von MGEX sind die Aufrüstung des gesamten IGS-Beobachtungsnetzes auf Multi-GNSS Stationen und die Generierung von typischen IGS Produkten inklusive Erdrotationsparameter und Atmosphärendaten basierend auf allen verfügbaren Signalen.

Abschließend sei auf die offizielle IGS-Website der MGEX Kampagne verwiesen [7], von der der aktuelle Status des Stationsnetzes abgefragt werden kann und der Zugang zu den RINEX 3.0x Messdaten geregelt ist. Zusätzlich findet man hier erste präzise Galileo und Compass-Bahnprodukte und kann nicht zuletzt den aktuellen Status der verschiedenen Raumsegmente abfragen.

Literaturverzeichnis

- [1] *China Satellite Navigation Office (2011): BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Test Version).*
- [2] *Hugentobler U., Neilan R. (2011): [IGSMail-6459], IGS Multi-GNSS Global Experiment, Call for Participation.*
- [3] *Hugentobler U. (2011): New Satellite Systems and New Signals, Proceedings des GNSS-R Workshop, Shanghai Astronomical Observatory, August 2011.*
- [4] *Slater J., Noll C., Gowey K., eds. (2000): International GLONASS Experiment – IGEX98. IGS Workshop Proceedings, Nashville, Tennessee.*
- [5] *Slater J., Willis P., Beutler G., Gurtner W., Lewandowski W., Noll C., Weber R., Neilan, R.E., Hein G., (1999): The International GLONASS Experiment (IGEX-98): Organisation, Preliminary Results and Future Plans; Proceedings ION GPS 99 Nashville, pp2293-2302.*
- [6] *Weber (2012): The IGS Multi-Signals Tracking Campaign MGEX – Planning, Status, Perspectives. Proceedings of the IGS Workshops 2012, Olstyn, Poland.*
- [7] www.igs.org/mgex. Website des IGS MGEX Experiments
- [8] www.glonass-center.ru/en/GLONASS/ Website of the Russian Federal Space Agency – Information Analytical Centre

Anschrift des Autors:

Dr. Robert Weber, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Höhere Geodäsie, Gusshausstrasse 27-29, A-1040 Wien.

E-Mail: robert.weber@tuwien.ac.at



Die Lagerung der Gleisvermessungen der ÖBB

Thomas Weinold und Albert Grimm-Pitzinger, Innsbruck

Kurzfassung

Die Definition von Koordinatensystemen sowie die Transformation zwischen diesen Systemen ist eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie. Selten wird dies so deutlich wie im Fall der unterschiedlichen Vermessungsmethoden der ÖBB (Österreichische Bundesbahnen) zur Bestimmung der Gleisgeometrie. Die Messsysteme verwenden nicht nur – aufgrund ihrer Verschiedenartigkeit – unterschiedliche Koordinatensysteme, sondern lagern diese auch noch unterschiedlich. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist damit eingeschränkt.

Es folgt eine stark verkürzte Beschreibung der Messsysteme, der damit verknüpften Koordinatensysteme und deren Datumsgebung.

Schlüsselwörter: Eisenbahnvermessung, Gleisvormessung, Pfeilhöhe, Sehnenvormessung

Abstract

The definition of coordinate-systems and the transformation between them is one of the central tasks of geodesy. Rarely this meets so clearly as in the case of the different methods of measuring the rail-geometry by the ÖBB.

The measurements systems use not only - because of their diversity - different coordinate systems, but also strongly divergent ways of defining the datum. The comparability of the results is therefore limited.

Below a much shortened description of the measurement systems, the associated coordinate systems and their definition of datum is given.

Keywords: Railway measurement, pre-rail measurement, camber, chord measurement

1. Messsysteme bei den ÖBB

Wir möchten uns hier nur auf den Bereich Bahnbau – Gleiserhaltung konzentrieren; andere Bereiche der ÖBB, in denen auch ge- oder vermessen wird, werden nicht behandelt.

1.1 Sehnmethoden

1.1.1 Kurz- oder Wandersehne

1.1.1.1 Verfahrensbeschreibung

Hier wird eine Sehne mit konstanter Länge an das Gleis angelegt, der Abstand in der Sehnmitte zum Gleis wird gemessen und als Pfeilhöhe bezeichnet. Dieser Wert ist in Näherung gleich der Krümmung des Gleises bzw. umgekehrt proportional zum Gleisradius. Stellt man das Gleis in einem Krümmungsdiagramm dar, können hier die Messwerte direkt eingetragen und Berechnungen durchgeführt werden. Dieser Vorteil und die einfache Messmethode haben zur langen Verwendung dieser Methode beigetragen.

$$f \approx \frac{s^2}{8R} = \frac{s^2}{8} \cdot k$$

f ... gemessene Pfeilhöhe

s ... Sehnlänge

R, k ... Radius bzw. Krümmung des Gleises an der Messstelle

1.1.1.2 Lagerung

Bei dieser Art der Messung kann nicht wirklich von Lagerung gesprochen werden. Die Messungen sind voneinander unabhängig. Die Anschreibung der Sehnendpunkte erfolgt mit einem Maßband, ausgehend von einem kilometerlich bekannten Punkt. Die Messungen werden also „nur“ bekannten Gleisstationen zugeordnet.

1.1.2 Optische Langsehne

1.1.2.1 Verfahrensbeschreibung

Die Fehleranfälligkeit der Wandersehenmethode hat schon Mitte letzten Jahrhunderts zur Erweiterung dieser Methode zur Langsehenmessung geführt. Hier wird eine Sehne optisch aufgespannt (z.B. durch einen Bautheodolit) und die Messwerte an regelmäßigen Abständen zwischen Gleis und Sehne an liegenden Messlatten abgelesen.

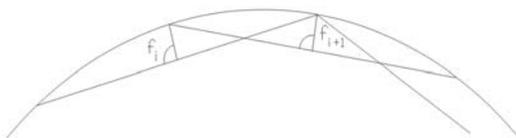


Abb. 1: Prinzip der Wandersehnenaufnahme

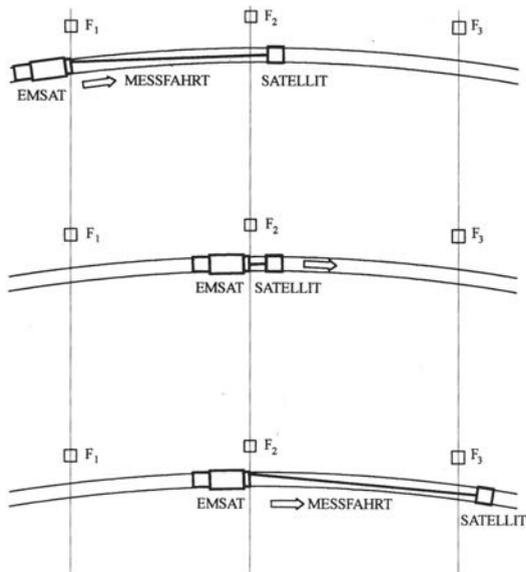


Abb. 4: Messprinzip des EM-SAT 120 (F_1 ... Mastbolzen)

Eine neue Entwicklung ist die Positionierung des Festpunktmessgeräts direkt auf dem EM120 (siehe Abbildung 5).



Abb. 5: Festpunktmessgerät auf EM-SAT 120

1.1.3.2 Lagerung

Die Lagerung aller Messungen erfolgt also auf die benachbarten Mastbolzen. Jeweils von Mast zu Mast wird hier ein neues Koordinatensystem aufgebaut. Die Unversehrtheit der Position der Mastbolzen ist Voraussetzung für diese Art der Messung.

1.1.4 Tachymetrische Langsehnenverfahren

1.1.4.1 Verfahrensbeschreibung

Verschiedene Hersteller haben auf Basis der Langsehnenmessung eigene Systeme entwi-

ckelt bzw. auf den Markt gebracht. Im geographischen Umfeld sind dies zum Beispiel

- Firma Amberg, System *Tamping VMS* (bei den ÖBB in der Erprobungsphase)
- Firma Sinning, System *GEDO CE* mit der Software *GEDO VorSys*
- Firma Rhomberg, System *Versinus D*

Dabei wird ein Tachymeter auf einem Gleismesswagen montiert und ein Vermessungsprisma auf einem zweiten Gleismesswagen. Der Tachymeter misst die Normalabstände zweier benachbarter Mastbolzen zum Gleis um sich zu positionieren. Danach wird das Prisma auf dem sich auf dem Gleis bewegenden Wagen eingemessen.



Abb. 6: Amberg Tamping VMS; Gleismesswagen mit Prisma bzw. Tachymeter

1.1.4.2 Lagerung

Auch hier erfolgt eine Lagerung durch zwei Festpunkte (Mastbolzen). Sind die Koordinaten der Mastbolzen bekannt und die Geometrie auch koordinativ vorhanden, kann aus der Ablotung der gemessenen Koordinaten auf die Solltrasse die Gleisverschiebung berechnet werden.

1.2 Koordinative Messverfahren

1.2.1 Messverfahren für den Bahnbau

1.2.1.1 Verfahrensbeschreibung

Eine Abwandlung der unter 1.1.4 beschriebenen Verfahren ist von den gleichen Firmen im Programm.

- Firma Amberg, System *GRP x000* (bei den ÖBB im Einsatz)
- Firma Sinning, System *GEDO CE*
- Firma Rhomberg, System *Versinus T*

Hier wird der Tachymeter abseits des Gleises im ungestörten Bereich (sofern das im Bahnbau auf befahrenen Strecken überhaupt möglich ist)

aufgestellt, wenn möglich auf Messpfeilern. Die Positionierung des Tachymeters erfolgt über eine „klassische“ freie Stationierung zu koordinativ bekannten Mastbolzen. Danach wird das Messprisma auf dem Gleismesswagen eingemessen. Die Steuerung erfolgt – wie auch schon bei den oben beschriebenen Varianten – über einen Feldkontroller am Messwagen, auf dem sich das Messprisma befindet. Auch hier kann aus der gemessenen Position und einer Ablotung auf das koordinativ bekannte Sollgleis die Gleisverschiebung berechnet werden.



Abb. 7: Sinning Gedo CE; Gleismesswagen mit Prisma (rechts am Wagen) und Feldkontroller

1.2.1.2 Lagerung

Hier erfolgt die Lagerung erstmals kontrolliert (falls für die freie Stationierung mehr als zwei Gleisvermarkungspunkte verwendet werden ©)! Da bei jeder Aufstellung verschiedene Festpunkte verwendet werden, die nicht absolut fehlerfrei bestimmt wurden bzw. seit der letzten Vermessung ihre Position verändert haben können, ist hier mit Spannungen im Übergangsbereich zweier Tachymeterstandpunkte zu rechnen.

Bei einer überbestimmten dreidimensionalen freien Stationierung kommt hier erschwerend die ungünstige Verteilung der Anschlusspunkte hinzu, die entlang der Bahnstrecke quasi aufgefädelt sind.

1.2.2 GPS

Satellitengestützte Verfahren zur Positionierung werden zum Beispiel bei EM80 oder EM250 verwendet. Dies sind Messfahrzeuge (der EM80 ist selbstfahrend, der EM250 ein umgebauter Wagon), die hauptsächlich für laufende, planmä-

ßige Inspektionsmessungen eingesetzt werden. Das Ergebnis dieser Messfahrten geht in den Instandhaltungsplan ein bzw. kann bei schweren Mängeln auch Sofortmaßnahmen erzwingen (Geschwindigkeitsreduktion oder Gleissperre).



Abb. 8: EM 250 hinter Taurus



Abb. 9: EM 80

1.2.2.1 Lagerung

Die Positionierung der Messungen erfolgt mit GNSS. Zur Verbesserung der Einzelmessungen wird der von den ÖBB mitinitiierte bzw. -betriebene dGPS-Dienst EPOSA verwendet. Die Georeferenzierung dieses Dienstes erfolgt im System WGS84/ITRF bzw. durch Transformationsparameter im österreichischen Gebrauchskoordinationssystem MGI.

2. Koordinatensysteme im Längsprofil - Achsdarstellung

Hier wird die Strecke abgewickelt und alle Objekte mit Abszisse (abgelotete Position im Längsprofil) und Ordinate (rechtwinkliger Abstand von der Abszisse) dargestellt. Alle Ordinaten sind rechtwinklig auf die Abszisse, aber sie sind (in der Natur) nicht parallel zueinander.

Je nach Anwendungsfall unterscheidet man hier noch die

- Bahnachse, als Mittellinie der Gleisachsen bei mehrgleisigen Strecken
- Gleisachse, als Mittellinie der Schienen
- Fahrkante. Diese ist als einzige Bezugslinie in der Natur vorhanden. Sie ist als Innenkante der

Außenschiene definiert und wechselt deshalb zwischen Links- und Rechtsbogen jeweils den Schienenstrang.

Kommt es im Rahmen von Umbaumaßnahmen zu Streckenlängenänderungen, führt dies manchmal zu Fehlerprofilen. Die entlang der Bahnstrecke befindlichen Infrastrukturen werden meist in einem Achssystem angeschrieben. Auch werden diverse Bahnanlagen durch Bescheide genehmigt, in denen diese Bahnkilometer als Bezug verwendet werden. Um nicht jedes Mal diese Anlagen neu einmessen zu müssen bzw. die Bescheide neu auszustellen, werden an geeigneten Stellen (meist an der Position eines Mastbolzens) Fehlkilometer definiert, die die Längenänderung abfangen. Im Bereich dieser Fehlkilometer „fehlt“ also bei positivem Fehlkilometer ein Stück Gleis, bzw. ist bei negativem Fehlkilometer ein Stück Gleis „doppelt vorhanden“.



Abb. 10: Fehlkilometer/Fehlerprofil in Bahnhof Jenbach

Bildnachweis

- Eigengrafiken
- Fotos von Testmessungen im Auftrag der ÖBB
- Grafiken und Bilder von Werbematerialien der angesprochenen Systeme
- Abbildung 5: Fa. Plasser & Theurer

Anschrift der Autoren

Dr. Thomas Weinold, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: thomas.weinold@uibk.ac.at

Ao. Prof. Dr. Albert Grimm-Pitzinger, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: albert.grimm@uibk.ac.at



Faseroptische Erweiterung des geodätischen Messlabors der TU Graz

Helmut Woschitz, Graz

Kurzfassung

Das geodätische Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz wurde 1990 eröffnet und seitdem stetig erweitert. Die wichtigsten Einrichtungen (Vertikalkomparator, Horizontalkomparator und Kreiselmesskammer) werden für Forschungsaufgaben und Serviceleistungen für die Wirtschaft verwendet.

Seit einigen Jahren bilden faseroptische Messsysteme einen neuen Schwerpunkt des Instituts, wobei der Fokus vor allem auf Dehnungs- und Temperaturmessungen liegt. Die Möglichkeit der Einbettung der Sensoren, und damit Informationen aus dem Inneren von Objekten zu erhalten, ist für die Ingenieurgeodäsie besonders interessant, da sie das klassische geodätische Messspektrum erweitern. Mittlerweile existieren verschiedenste kommerzielle faseroptische Systeme, die statische oder dynamische Messungen erlauben. Die Länge der Sensoren kann bis zu mehrere Meter betragen. Die Erfassung ihrer Längenänderungen ist mit Auflösungen im mm-Bereich sowie Abtastraten im kHz-Bereich möglich. Internationale Normen für faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessungen werden zurzeit aber erst erstellt, weshalb es anhand der gegebenen Informationen oft schwierig ist, die Leistungsfähigkeit der Systeme zu beurteilen.

Ein eigenes faseroptisches Labor befindet sich am IGMS im Aufbau, um detaillierte Untersuchungen, aber auch Sensoranfertigungen für Sonderanwendungen, durchführen zu können. Eine Testeinrichtung für faseroptische Sensoren wurde entwickelt, die die Bestimmung der statischen Kennlinie faseroptischer Messsysteme erlaubt. Eine weitere Einrichtung dient zur Untersuchung des Temperaturverhaltens der Systeme. Die neuen Testeinrichtungen werden vorgestellt und damit erzielte Ergebnisse exemplarisch gezeigt. Diese Laboruntersuchungen sind essentiell für die Qualitätsbeurteilung der Daten zu, da es im Feld kaum Möglichkeiten für eine unabhängige Verifikation gibt.

Schlüsselwörter: Faseroptische Dehnungsmessung, Testeinrichtungen, Hystereseeffekte, SOFO Sensoren, FBG Sensoren, geodätisches Messlabor

Abstract

The geodetic metrology laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems (EGMS) at the Graz University of Technology was established in 1990 and since then several calibration and testing facilities were set up.

Fiber optic sensing is one of the new research topics of EGMS. For engineering surveying, fiber optic strain and temperature sensing are of special interest. The sensors may be embedded in the structures and thus a new type of information is available, completing geodetic measurements. Today, a variety of fiber optic systems and sensors is commercially available, both for static and dynamic applications. The length of the sensors may be up to several metres with typical measurement resolutions in the μm -range and sampling rates up to several kHz.

However, there are no commonly used international standards for fiber optic sensing and thus it is difficult to evaluate system performance and state the uncertainty of measurement results. Therefore we established a separate fiber optic laboratory which is used for the investigation of fiber optic sensors and systems. A testing facility for the investigation of linearity was developed as well as a facility for studying temperature effects. These new facilities are described in the paper and some results are shown, demonstrating the importance of independent laboratory testing.

Keywords: fiber-optic strain measurements, laboratory testing facilities, hysteresis of SOFO sensors, FBG sensors, geodetic metrology laboratory

1. Einleitung

In der Ingenieurgeodäsie werden Deformationsmessungen seit etwa 100 Jahren durchgeführt. Daher hat das ingenieurgeodätische Monitoring einen hohen Reifegrad erreicht und liefert großräumige Informationen mit Millimeter-Genauigkeiten. Die Messungen liegen aber zumeist nur niederfrequent vor und können auch nur an der

Oberfläche der Objekte (z.B. Bauwerke, geotechnische Strukturen) durchgeführt werden.

Für mehrere Fachgruppen sind aber auch Informationen aus dem Inneren der Objekte wichtig, weshalb sich in den letzten Jahren mit dem „Structural Health Monitoring“ (SHM) ein neues Fachgebiet etabliert hat. Neben Langzeitbeobachtungen sind vor allem auch dynamische Messungen wichtig, um z.B. die vorhandenen

FEM Modelle der Bauwerke verifizieren zu können bzw. diese zu kalibrieren (Anpassung der oft unzureichend bekannten Materialparameter). Ohne Messungen sind treffsichere Aussagen über das Verhalten der Bauwerke und deren Integrität nicht möglich. Verwendet werden hierzu verschiedenste Sensortypen, die auch in die Bauwerke integriert werden.

Aber auch die Leistungsfähigkeit moderner Totalstationen und GNSS-Systeme wurden von diesen Gruppen erkannt und mittlerweile werden diese geodätischen „Sensoren“ auch von mehreren fachfremden Gruppen eingesetzt – und damit oft erstaunliche Ergebnisse erzielt.

Im Gegenzug dazu können auch die Tätigkeitsfelder der Ingenieurgeodäsie durch Hinzunahme direkter Dehnungs- und Temperaturmessungen erweitert werden, womit sich auch für unsere Berufsgruppe neue Aufgabengebiete erschließen lassen. Faseroptische Sensoren scheinen dafür besonders attraktiv, da sie sich leicht in Objekte integrieren lassen und damit die gewünschten Informationen aus dem Inneren liefern. Weitere Vorteile sind die möglichen großen Sensorlängen, hohen Messpräzisionen, Abstraten von mehreren 100 Hz oder darüber, die simultane Messung von vielen Sensoren auf einer Faser, die damit verbundene einfache Installation (nur ein Anschlusskabel für viele Sensoren), die optischen Messprinzipien (keine Spannungsversorgung der individuellen Sensoren, Messung in explosionsgefährdeten Bereichen) und die elektromagnetische Unempfindlichkeit der Signale (große Anschlusslängen, keine Signalstörungen).

Deshalb hat sich die faseroptische Sensorik in anderen Fachgruppen schon stark etabliert. In Österreich wird sie aber noch kaum eingesetzt. In der letzten Zeit ist aber auch im geodätischen Umfeld verstärktes Interesse feststellbar und einige wenige Kollegen aus der Praxis arbeiten schon aktiv mit faseroptischen Messsystemen.

Verglichen mit unseren gewohnten geodätischen Methoden ist die Präzision, die mit faseroptischen Dehnungssensoren erreicht werden kann, zumindest um den Faktor 10 besser, selbst wenn kalibrierte Totalstationen verwendet werden (siehe z.B. Woschitz, 2010a). Weiters werden durch die Einbettung der Sensoren in das Objekt präzise Informationen aus dem Inneren der Objekte zugänglich (Brunner und Woschitz, 2011). Die kombinierte Auswertung von geodätischen und objektintegralen Messungen erfordert neue Analysemethoden (siehe z.B. Li-

enhardt, 2007) und auch diese bieten neue Möglichkeiten.

Mittlerweile gibt es am Markt verschiedene kommerzielle faseroptische Systeme für Dehnungs- (ϵ) und Temperaturmessungen (t°) mit typischen Auflösungen von $\Delta\epsilon \approx 1 \mu\epsilon$ (i.e. $1 \mu\text{m/m}$) und $\Delta t^\circ \approx 0.1 \text{ K}$. Herausfordernd ist aber, dass es aufgrund der hohen Präzision der faseroptischen Systeme kaum möglich ist, im Feld unabhängige in-situ Messungen zur durchgreifenden Kontrolle der Resultate durchzuführen, insbesondere dann nicht, wenn die Sensoren in das Objekt integriert sind. Es bleibt oft nur die Möglichkeit, sich auf die Herstellerangaben und die versprochene Leistungsfähigkeit zu verlassen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es derzeit noch kaum internationale Normen für die faseroptische Sensorik gibt und daher die Datenblätter verschiedener Hersteller oft unterschiedlichen Informationsgehalt aufweisen. Erschwerend ist zudem, dass manche Begriffe von den Herstellern zwar verwendet, aber durchaus unterschiedlich interpretiert werden. Es ist daher für den Anwender schwierig, die gewünschte Information zu extrahieren. Einen ersten Schritt bildet die deutsche VDI/VDE 2660 Richtlinie für Faser-Bragg-Gitter Sensoren (VDI, 2010), nach der bereits erste Geräte spezifiziert werden. Zurzeit sind Bestrebungen im Gange, auch neue internationale Normen für die verschiedenen Techniken der faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessung zu erstellen (siehe Habel, 2012).

Bis diese Normen aber erstellt und in der Praxis etabliert sind, kommt den unabhängigen Untersuchungen der Instrumente, wie z.B. den Prototypenuntersuchungen in einem Messlabor, eine zentrale Rolle bei der Beurteilung der Qualität zu. In den letzten Jahren haben wir daher im IGMS Messlabor mehrere Test- und Prüfeinrichtungen aufgebaut. Die Anforderungen an diese werden in dieser Arbeit diskutiert und deren Aufbau vorgestellt. Die mit diesen Anlagen erzielten Ergebnisse belegen eindeutig den Bedarf an solchen Einrichtungen und unabhängigen Geräteüberprüfungen.

2. Faseroptische Messsysteme für Dehnungs- und Temperaturmessung

2.1 Überblick

Die Entwicklung von Faseroptischen Sensoren (FOS) und den zugehörigen Messsystemen ist eng mit der rasanten Entwicklung in der Telekommunikationsindustrie (Glasfasernetzwerke) der letzten Jahrzehnte verbunden. Mittlerweile

gibt es zahlreiche sehr weit entwickelte Messsysteme, die kommerziell erhältlich sind und in manchen Anwendungsbereichen wegen ihrer Vorteile gegenüber klassischen Sensoren (siehe Abschnitt 1) nicht mehr wegzudenken sind.

Das Kernelement aller Sensoren bildet die Glasfaser, deren prinzipieller Aufbau in Abbildung 1 dargestellt ist. Sie besteht aus dem lichtführenden Kern und dem diesen umgebenden Mantel, wobei sich der Brechungsindex dieser beiden aus Glas bestehenden Elemente geringfügig unterscheidet. Daher tritt an der Grenzfläche unter bestimmten Bedingungen Totalreflexion auf, was zur Lichtführung im Kern verwendet wird.

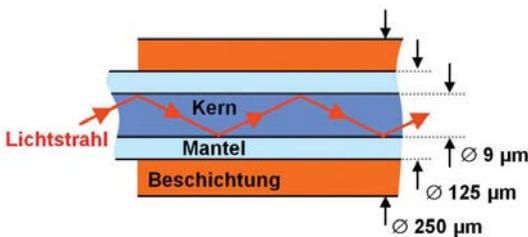


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau einer Stufen-Index-Faser

Um die Glasfaser bei mechanischer Beanspruchung gegen Bruch zu schützen, wird der Mantel noch von einer dünnen Beschichtung umgeben. Verschiedene Kunststoffe, aber auch andere Materialien (z.B. organisch modifizierte Keramiken) finden dabei Verwendung. Die Eigenschaften der Beschichtung (z.B. Temperaturbeständigkeit, Dehnungsübertragung auf die Glasfaser) sind für die Sensorik von großer Bedeutung.

Für die Sensorik können nun unterschiedliche physikalische Prinzipien verwendet werden, die hier nicht näher erläutert werden (siehe z.B. Udd und Spillman, 2011 oder Yu und Yin, 2002). Prinzipiell unterscheidet man aber zwischen a) Einzelpunktsensoren (Abbildung 2a), wo nur ein Sensor pro Anschlussfaser möglich ist, b) quasi-verteilten Sensoren (Abbildung 2b), bei denen auf jeder Anschlussfaser mehrere (z.B. 125 bei einigen Standardsystemen) Sensoren – auch unterschiedlichen Typs (z.B. Dehnungs-, Temperatur-, Neigungs- oder Beschleunigungssensoren) – möglich und gleichzeitig erfassbar sind, und den c) verteilten Sensoren. Bei den letztgenannten wird die Faser selbst als Sensorelement verwendet (Abbildung 2c), womit Dehnungs- oder Temperaturmessungen mit einer Ortsauflösung von einem Meter bis zu einer Entfernung von etwa 30 km zur Auswerteeinheit (RU, reading unit) erfassbar sind. Dies entspricht

einem System mit 30 000 Einzelsensoren. Allerdings sind bei den verteilten Systemen wegen der geringen Rückstreuereffekte, die zur Messung genutzt werden, und den dadurch bedingten längeren Integrationszeiten (z.B. 1 – 30 min) zurzeit nur statische Messungen möglich. Hingegen können bei den Einzelpunkt- und den quasi-verteilten Systemen auch dynamische Messungen (einige 100 Hz bis mehrere kHz) durchgeführt werden und die mögliche Anzahl an messbaren Sensoren kann auch bei diesen Systemen mit zusätzlichen Messkanälen beträchtlich gesteigert werden.

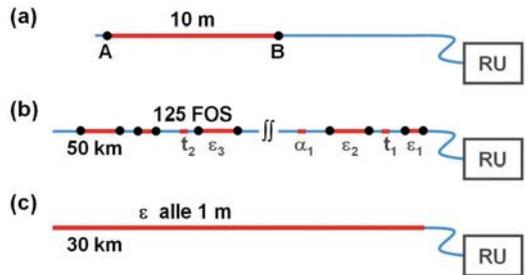


Abb. 2: Typen von faseroptischen Sensoren: (a) Einzelpunktsensoren, (b) quasi-verteilte Sensoren und (c) verteilte Sensoren

2.2 Dehnungssensoren für die Bauwerksüberwachung

Für repräsentative Dehnungsmessungen ist es wichtig, dass die Glasfaser fest mit dem Objekt verbunden ist. Zusätzlich sollte die Glasfaser noch gegen mechanische Beanspruchung (Faserbruch) und gegen Wasser (erhöhte Dämpfung) geschützt sein. Daher ist – obwohl es mittlerweile eine beachtliche Zahl von Herstellern von FOS gibt – der prinzipielle Aufbau der Dehnungssensoren zumeist doch sehr ähnlich. Die Glasfaser wird zwischen den beiden Ankerpunkten A und B eingespannt, und zwischen diesen beiden Punkten wird ein integraler Dehnungswert erfasst.

In Abbildung 3a bildet ein in die Faser integriertes Faser-Bragg-Gitter (FBG, dargestellt als $—//—$) das Sensorelement. Da Glas ein dispersives Medium ist, ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwelle im Glas mit der Temperatur (Brechungsindexänderung von $\Delta n \approx 10 \text{ ppm/K}$ bei $\lambda \approx 1500 \text{ nm}$), weshalb die erfassten Messwerte um die Temperatur zu korrigieren sind. Im Falle des FBG-Sensors erfolgt dies im Post-Processing anhand der Werte eines separaten FBG- t° -Sensors, der außerhalb der Messstrecke lose und damit vom Objekt ent-

koppelt angebracht ist, sodass er auf Dehnungsänderungen nicht reagieren kann. Beim SOFO Sensor (Abbildung 3b) wird die Temperaturkorrektur schon während der Messung mithilfe einer zweiten Glasfaser durchgeführt, wobei diese Referenzfaser wiederum lose und damit insensitive gegenüber Dehnungen ist.

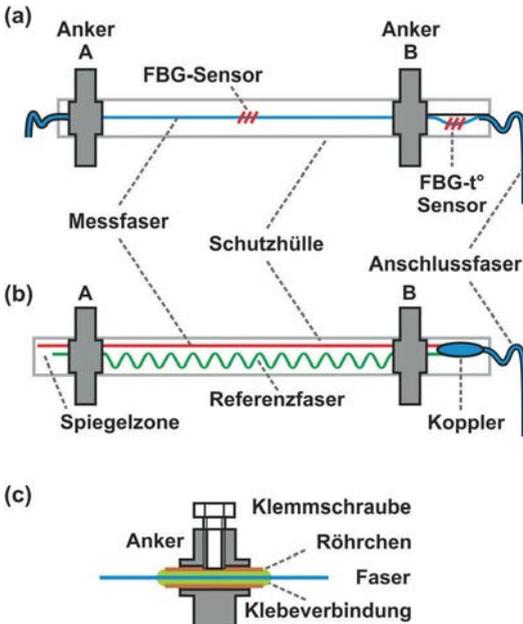


Abb. 3: Schema eines (a) FBG Sensors und eines (b) SOFO Sensors zur Dehnungsmessung sowie (c) eine mögliche Verbindungsvariante zwischen Faser und Anker

Die Messfaser wird in der Regel vorgespannt eingebaut, um auch negative Dehnungen erfassen zu können. Daher ist zur Verbindung der Faser mit dem Anker-element – vor allem aus Produktionsgründen – die Verwendung einer Zwischenhülle sinnvoll (Abbildung 3c). In dieser kann in einem ersten Verarbeitungsschritt die Klebeverbindung zur Faser ordentlich aushärten, bevor die Faser vorgespannt wird. Damit werden z.B. Hystereseeffekte reduziert.

Bei Sensoren für verteilte Systeme entfallen in der Regel die Ankerpunkte. Die Faser ist daher direkt mit der Schutzhülle verbunden und deren Übertragungsverhalten bestimmt im Wesentlichen die Sensoreigenschaften. Für die Temperaturkorrektur wird wieder eine lose Faser parallel geführt.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch zwei kommerzielle 0.25 m lange Dehnungssensoren und

zwar einen quasi-verteilten FBG Sensor (Sylex, Typ SC-03), Abbildung 4a, und einen Einzelpunktsensor vom Typ SOFO (Smartec, Roctest), Abbildung 4b. Die Anker sind in Abbildung 4c (\varnothing 20 mm) und Abbildung 4d (\varnothing 15 mm) vergrößert dargestellt, was den äußerlich doch unterschiedlichen Aufbau zeigt. In Abbildung 4d sind auf der linken Seite die beiden Fasern des SOFO Sensors durch die transparente Schutzhülle hindurch sichtbar.

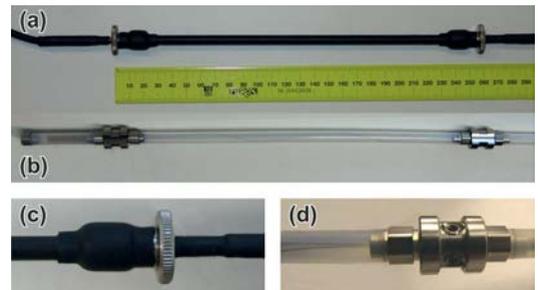


Abb. 4: Foto eines (a) FBG und (b) eines SOFO Sensors mit den entsprechenden Vergrößerungen der Anker (c) und (d)

Die möglichen Sensorlängen variieren herstellerbedingt und können zwischen einigen Zentimetern bis etwa 10 m liegen. Für FBG-Sensoren wird als zuverlässiger Dehnungsbereich oft $\pm 5\,000\ \mu\epsilon$ ($\pm 0.5\%$) angegeben. Dies deckt sich mit Werten in der Literatur, wo für Langzeitbeobachtungen (20 Jahre Messzeit, 0.1 % Ausfallwahrscheinlichkeit) angegeben wird, dass die größte auftretende Dehnung maximal etwa 1.4 % betragen sollte (Kashyap, 2010, S.432).

2.3 Am IGMS vorhandene faseroptische Messsysteme

Für Überwachungsaufgaben sind insbesondere Systeme mit einer hohen Langzeitstabilität interessant. Aber auch die dynamische Erfassung von Bauwerksdeformationen hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zur Erfüllung dieser Messaufgaben sind am IGMS die in Tabelle 1 angeführten faseroptischen Auswerteeinheiten verfügbar.

Die SOFO-Static RU wurde von der Fa. Smartec für Langzeitbeobachtungen entwickelt und bietet insbesondere bei Verwendung sehr langer Sensoren Vorteile, da ihre hohe Präzision unabhängig von der Sensorlänge ist. Für dynamische Messungen ist aber ein separates Instrument (SOFO-Dynamic RU) notwendig, das mit denselben Sensoren betrieben werden kann. Wesentlicher Vorteil der SOFO Systeme ist die durch das

	SOFO-Static	SOFO-Dynamic	MuST si425
			
Messgröße	Längenänderung	Längenänderung	Dehnung / Temperatur
Anwendung	statisch	dynamisch	statisch und dynamisch
Bezug der Messung	absolut	relativ	absolut
Messfrequenz	0.1 Hz	1000 Hz	250 Hz
Messbereich Gerät	50 mm	± 5 mm	50 nm ¹⁾
Präzision	2 µm	< 0.01 µm	1 pm ²⁾
Drift	keine	0.003 µm/s (< 0.5 µm/d)	keine
Temperaturkorrektur	sensorintegraler Bestandteil	sensorintegraler Bestandteil	Post-Processing
Sensoranzahl pro Kanal	1	1	1 – 32 ³⁾
Kanalanzahl	20 pro Multiplexer	2, 4 oder 8	4 (16 mit Multiplexer)
Sensorenängen	0.25 – 10 m	0.25 – 10 m	0.005 – ca. 2 m ⁴⁾
typ. Dehnungsbereich der Sensoren	-0.5 % + 1.0 %	-0.5 % + 1.0 %	-0.5 % + 0.5 %
Linearität Sensor	0.2 %	0.2 %	⁴⁾
Messprinzip	Niederkohärenzinterferometrie	Interferometrie	FBG, time-of-flight

¹⁾ optische Wellenlänge – entspricht bei Verwendung von nur einem Sensor etwa 42 000 µε für die Dehnungsmessung oder einem messbaren Temperaturbereich von weit über 1000°C

²⁾ entspricht 0.8 µε für die Dehnungsmessung bzw. 0.1 K für die Temperaturmessung

³⁾ abhängig von den auftretenden Dehnungen, siehe Text

⁴⁾ variiert bei den Angaben der verschiedenen Sensorhersteller, wird aber oft nicht angegeben

Tab. 1: Wesentliche Spezifikationen der am Institut vorhandenen FOS-Systeme (Herstellerangaben)

Messprinzip im Sensor realisierte Temperaturkorrektur. Allerdings können beide Systeme nur mit Einzelpunktsensoren arbeiten, weshalb die Sensoranzahl auf die Kanalanzahl des Gerätes beschränkt ist (SOFO-Dynamic) oder aber längere Messzeiten in Kauf genommen werden müssen (z.B. 10 min beim SOFO-Static mit drei Multiplexern). Sollen mit vielen Sensoren gleichzeitig Dehnungen erfasst werden, so ist ein quasi-verteiltes System wie es die MuST si425 darstellt, von Vorteil. Aktuell am Markt erhältliche Systeme erlauben bis zu 512 FBG Sensoren pro Kanal. Die Anzahl der damit messbaren Sensoren kann aber durchaus geringer sein, wenn bei den einzelnen Sensoren große und stark unterschiedli-

che Dehnungen auftreten. Grund hierfür ist, dass sich die Spektren der einzelnen Sensoren nicht überlagern dürfen, um die Signale eindeutig den einzelnen Sensoren zuordnen zu können. Bei Sonderanwendungen mit Dehnungen im mehrere 10 000 µε Bereich kann es sogar vorkommen, dass nur ein einziger Sensor pro Kanal sinnvoll erfassbar ist. Für eine optimale Verteilung der Sensoren sind daher gewisse Vorinformationen über den Dehnungsverlauf notwendig.

Das Funktionsprinzip der drei Systeme wurde bereits in Brunner (2009) sowie Woschitz und Brunner (2011) zusammengefasst, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

3. Beispiel aus der Praxis

Für die Untersuchung des Deformationsverhaltens von elastischen Eisenbahnzwischenlagen ($150 \times 160 \times 7 \text{ mm}^3$) wurde eine auf faseroptische Sensoren basierende Messzwischenlage (RASP, Rail Strain Pad) entwickelt, wobei während des Herstellerprozesses 9 FBG Sensoren in die Materialmatrix integriert wurden. Der Aufbau eines RASP ist schematisch in Abbildung 5 gezeigt.

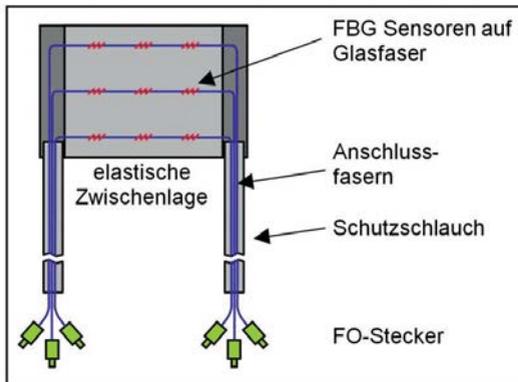


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines RASP

Die Entwicklung wurde ausführlich in Woschitz (2010b) beschrieben. Hier soll aber dennoch kurz erwähnt werden, dass es mit keiner anderen bekannten Technologie möglich ist, mit mehreren Sensoren gleichzeitig genaue Messungen aus dem Inneren dieses sehr kleinen Objektes durchzuführen, ohne dieses dadurch zu stören.

Mit mehreren Messzwischenlagen wurden intensive Untersuchungen auf einem Kraftprüfstand durchgeführt. Dabei wurden auch Zugsüberfahrten simuliert, wie sie für einen späteren Feldeinsatz erwartet wurden. Abbildung 6 zeigt das am Kraftprüfstand erfasste Signal eines Personenzuges (Taurus, 4 Personenwagen, $v = 58 \text{ km/h}$) im Vergleich mit dem auf einer Teststrecke bei realem Zugverkehr gemessenen Signal. Dabei wurde dasselbe RASP verwendet und gezeigt wird das Signal desselben FBG Sensors. Für diesen Vergleich wurde das RASP mit den größten im Feld aufgetretenen Dehnungen ausgewählt, da hier die Problematik besonders gut zu erkennen ist. Dargestellt werden – wie später argumentiert wird – die rohen optischen Signale (optische Wellenlängen des durch den FBG Sensor zurückreflektierten Lichts).

Im Vergleich zwischen den beiden Messsignalen ist zunächst auffallend, dass das Grundniveau um ca. $\Delta\lambda_B \approx 19 \text{ nm}$ versetzt ist, was einer Dehnung der Zwischenlage im Bereich des Sensors von etwa $16000 \mu\epsilon$ entspricht. Weiters

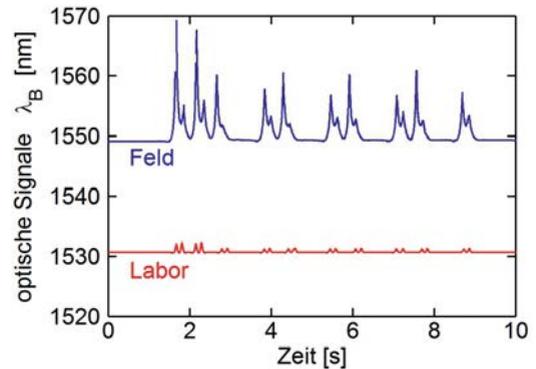


Abb. 6: Signal eines Personenzuges, erfasst mit demselben RASP am Kraftprüfstand (rot) und im Feld auf einer Teststrecke (blau)

fallen sofort die großen Signalamplituden im Feld auf, die mit 21 nm ($17500 \mu\epsilon$) etwa 13 mal größer sind als jene, die am Prüfstand bei Simulation desselben Zugs aufgetreten sind. Ursachen dafür könnten die Verschiebung der Zwischenlage im Feld und eine dadurch verursachte atypische starke Deformation des RASPs sowie die ungleichförmige, wesentlich stärkere Kompression des RASPs bei der Überfahrt sein. Der extrem enge Radius der Teststrecke sowie eine mögliche Hohllage der Schwelle sind mögliche Ursachen dafür.

Die im Feld im Bereich des Sensors aufgetretene Gesamtverformung beträgt etwa $31000 \mu\epsilon$, wenn man die Standarddehnungsempfindlichkeit der Glasfaser ($\Delta\lambda_B/\Delta\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$) zur Berechnung verwendet. Solch große Verformungen treten in der faseroptischen Sensorik üblicherweise nicht auf, weshalb für derart große Verformungen auch keine Erfahrungswerte vorliegen. Es ist daher unklar, ob die Standardwerte zur Berechnung der Dehnung in diesem Deformationsbereich überhaupt anwendbar sind. Es ist hier auch festzuhalten, dass die aufgetretene Dehnung etwa die Hälfte der Bruchdehnung einer Glasfaser beträgt und die Faser bei der Liegedauer im Feld eigentlich schon hätte gebrochen sein müssen. Daher wurde die Messzwischenlage ausgebaut und erneut am Prüfstand getestet, wobei deren einwandfreie Funktion festgestellt wurde.

Eine Evaluierung solch unerwarteter Signale im Feld ist aber praktisch nicht möglich, weshalb Laboruntersuchungen dieser Systeme eine wesentliche Rolle in der Qualitätssicherung zukommt. Die Notwendigkeit von Test- und Prüfeinrichtungen ist anhand dieses Beispiels leicht nachvollziehbar.

4. Faseroptisches Labor

Für Forschungsarbeiten ist neben den kommerziellen faseroptischen Messgeräten auch eine Auswahl an optischem und faseroptischem Zubehör notwendig. Deshalb wurde am IGMS in den letzten Jahren ein eigenes faseroptisches Labor eingerichtet. Im Rahmen von Sonderanwendungen können damit eigene Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, aber auch einzelne Messsysteme lassen sich nachbauen, damit beobachtete Effekte besser studiert werden können. Aus den damit gewonnenen Erfahrungen resultieren schlussendlich Empfehlungen für die Anwender in der Praxis. Das faseroptische Labor wird auch im Bereich der Lehre bei den Studierenden eingesetzt, die dort die für den praktischen Einsatz notwendigen Erfahrungen lernen.

Ein Kerngerät des faseroptischen Labors ist ein Spektrum-Analysator. Mit diesem Instrument können die Spektren optischer Signale detailliert analysiert werden, und zwar in einem zumeist größeren Wellenlängenbereich im Vergleich zu jenem der Messgeräte. Für die Messwerteerfassung selbst ist dieses Gerät jedoch ungeeignet, da es dafür zu langsam und zu teuer ist. Die damit durchführbare unabhängige Evaluierung der kommerziellen Messgeräte macht es dennoch zu einem wertvollen Gerät.

Exemplarisch soll hier das Signal des zuvor in Abschnitt 3 auffälligen FBG Sensors eines RASPs gezeigt werden. Abbildung 7a zeigt das Spektrum des FBGs bei unbelastetem RASP. Dieses ist typisch für einen Standard FBG Sensor und weist in diesem Fall eine Bandbreite (FWHM) von 0.16 nm auf. Die rote Linie markiert jene Wellenlänge, die mit der MuST si425 erfasst wurde. Diese sollte – sofern zwischen den Wellenlängen beider Geräte kein Offset besteht – im Maximum der Spektralkurve liegen.

Abbildung 7b zeigt das Spektrum desselben FBG-Sensors, wobei hier das RASP in der Teststrecke eingebaut ist. Das Spektrum ist nun wesentlich breiter und weist mehrere markante lokale Maxima auf. Die Ursache hierfür liegt in der direkten Einbettung der Glasfaser in der Materialmatrix und den damit fehlenden, wohldefinierten, Ankerpunkten. Aus weiteren Untersuchungen ist bekannt, dass das Dehnungsverhalten innerhalb der Messzwischenlagen stark nichtlinear ist. Dadurch treten im Bereich des FBG-Sensors unterschiedlich starke Dehnungen auf, wodurch es, vereinfacht betrachtet, zur Ausbildung mehrerer kurzer FBG-Sensoren mit ähnlicher Wellenlänge kommt. Die Überlagerung der einzelnen

Spektren ist in Abbildung 7b zu sehen. Solange aber bei den Messungen immer derselbe Peak detektiert wird, kann das Dehnungsverhalten der Zwischenlage dennoch präzise erfasst werden.

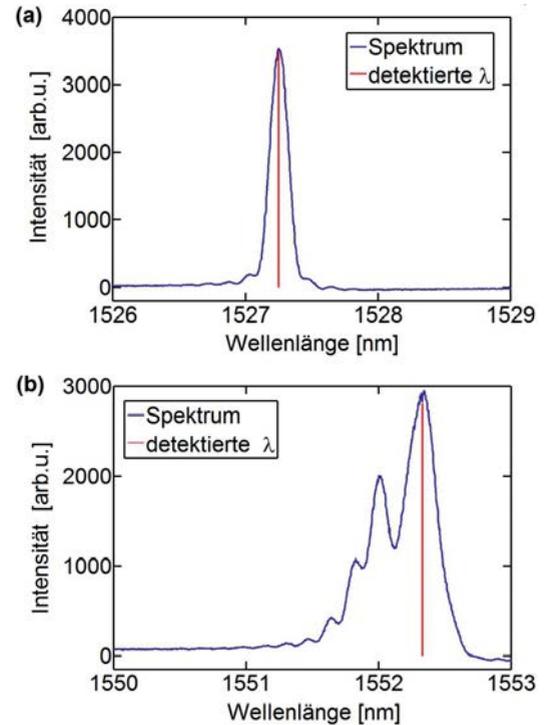


Abb. 7: Spektren eines in ein RASP integrierten FBG Sensors im (a) unbelasteten Zustand und (b) im belasteten Zustand, eingebaut in der Teststrecke

An dieser Stelle muss klar festgehalten werden, dass alternative Einbaumethoden wegen der kleinen Dimension der Zwischenlage und den Eigenschaften des Materials nicht möglich waren und alternative Messtechnologien in diesem Anwendungsfall nicht eingesetzt werden können. Es ist jedoch wesentlich, die möglichen Einflussfaktoren einer Messung zu kennen und damit die für die Analyse und Qualitätsbeurteilung notwendigen Informationen bereitzustellen. Mit dem neuen faseroptischen Labor ist dies möglich und es wird auch bei weiteren Anwendungen und Forschungsarbeiten die notwendigen Grundlagen liefern.

5. Testeinrichtungen im IGMS Messlabor

5.1 Geodätisches Messlabor

Das $33 \times 6.5 \text{ m}^2$ große Messlabor des IGMS ist voll klimatisiert und weist eine konstante Temperatur von 20°C auf (Temperaturstabilität: $\pm 0.5\text{K}$). Eine

der Haupteinrichtungen ist der Horizontalkomparator zur Kalibrierung von EDM-Geräten, dessen wesentlichste mechanische Komponente ein 30 m langer Betonbalken mit einem Querschnitt von $0,4 \times 0,6 \text{ m}^2$ ist. Dieser liegt zwangsfrei auf teflonbeschichteten Neoprengleitlagern auf der vom Gebäude getrennten Fundamentplatte des Labors auf (Reithofer und Schlauf, 1992) und wurde 1989 im Zuge der Errichtung des Messlabors betoniert.

Die Lage der Komparatorbank ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt, da sie bei den nachfolgend beschriebenen Testeinrichtungen eine zentrale Rolle spielt.

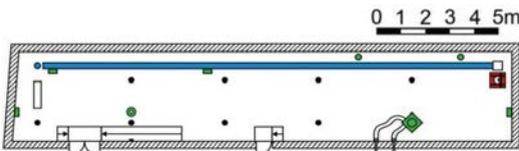


Abb. 8: Lage der 30 m langen Komparatorbank (blau) im Messlabor

5.2 Sensorbasis von 1 m Länge

5.2.1 Aufbau

Durch Temperaturänderungen werden typischerweise Driften in den Messwerten verursacht, die oftmals ein Vielfaches der Messpräzision betragen können und von einer Bewegung des Objektes kaum getrennt werden können. Um daher bei Feldeinsätzen vor dem Start der Messung sinnvolle Akklimatisationszeiten einhalten zu können, sind Informationen über das Temperaturverhalten der Instrumente notwendig. Datenblätter geben aber oft keine Auskunft. Daher ist es sinnvoll, das Aufheiz- und Akklimatisationsverhalten der Instrumente im Zuge von z.B. Prototypentests zu untersuchen. Diese dauern typischerweise einige Stunden bis einige Tage. Während dieser Zeit dürfen die an die Instrumente angeschlossenen Dehnungssensoren ihre Länge nicht ändern.

Für diese Untersuchungen wurden zwei jeweils 1 m lange Sensoren (ein SOFO und ein FBG Sensor) in der Mitte der Komparatorbank montiert, siehe Abbildung 9.

Für die Montage wurden speziell konstruierte Adapter auf einer dreipunktgelagerten Grundplatte aus Stahl verwendet, um mögliche Eigenbewegungen, die infolge geringer Temperaturschwankungen (kürzeste Regelzyklen der Klimaanlage ca. 10 min) auftreten können, so gering wie möglich zu halten. Daher wurde

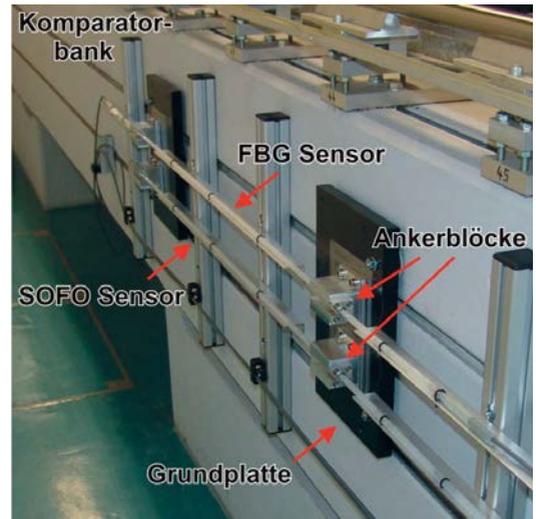


Abb. 9: Auf der Komparatorbank montierte 1 m-Sensorbasis

auch die Komparatorbank als Träger der Einrichtung gewählt, da diese wegen ihrer großen Masse eine hinreichend große Trägheit hat, und somit von Temperaturschwankungen weitgehend unbeeinflusst ist. Beide Sensoren wurden um 2 mm vorgespannt, um auch negative Dehnungen durch z.B. langfristiges Schrumpfen der Komparatorbank erfassen zu können. Um einen unkontrollierten Durchhang und damit verbundene Effekte zu vermeiden, liegen die Sensoren zwischen den beiden Ankerpunkten sowie im Bereich der Anschlussfasern flächig auf.

Konzipiert wurde die 1 m - Sensorbasis für die Untersuchung des SOFO-Static und der MuST si425, was infolge der Präzision dieser beiden Instrumente (siehe Tabelle 1) eine notwendige Stabilität von etwa $0,5 \mu\text{m}$ für die Ankerpunkte bedeutet. Diese ist mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

5.2.2 Beispiel: Aufheizeffekt

Die 1 m-Sensorbasis wurde zunächst aber für die Untersuchung des Aufheizeffektes der SOFO-Dynamic RU verwendet. Da die Präzision des Gerätes ($< 0,01 \mu\text{m}$) aber wesentlich besser als die vermutete Stabilität der Sensorbasis ist, sollte es damit auch möglich sein, mögliche Eigenbewegungen des SOFO Sensors der Sensorbasis zu detektieren. Daher wurde mit vier Tagen eine wesentlich längere Versuchsdauer veranschlagt, als zur reinen Bestimmung der Aufheizzeit notwendig gewesen wäre. Der Hersteller gibt für dieses Instrument eine Drift von $0,003 \mu\text{m/s}$ (nach einer einstündigen Aufwärm-

zeit) an bzw. $0.5\ \mu\text{m}/\text{Tag}$ bei Verwendung eines Referenzsensors (siehe unten). Das im Labor hinreichend akklimatisiert Gerät wurde unmittelbar vor Messbeginn (eine Minute) eingeschaltet. Abbildung 10 zeigt die Daten (Längenänderungen dL) des Referenzsensors und des Sensors der 1 m-Sensorbasis sowie die Labortemperatur.

Da es sich beim SOFO-Dynamic infolge des interferometrischen Messprinzips um ein relativ messendes Instrument handelt, beginnen die Zeitreihen in Abbildung 10a bei null. In den ersten 1.5 Stunden (Abbildung 10a) kommt es zu einer Art Einschwingvorgang mit Abweichungen von etwa $3\ \mu\text{m}$ zwischen den beiden Sensoren. Danach, bis etwa zur Stunde 18, ähnelt sich

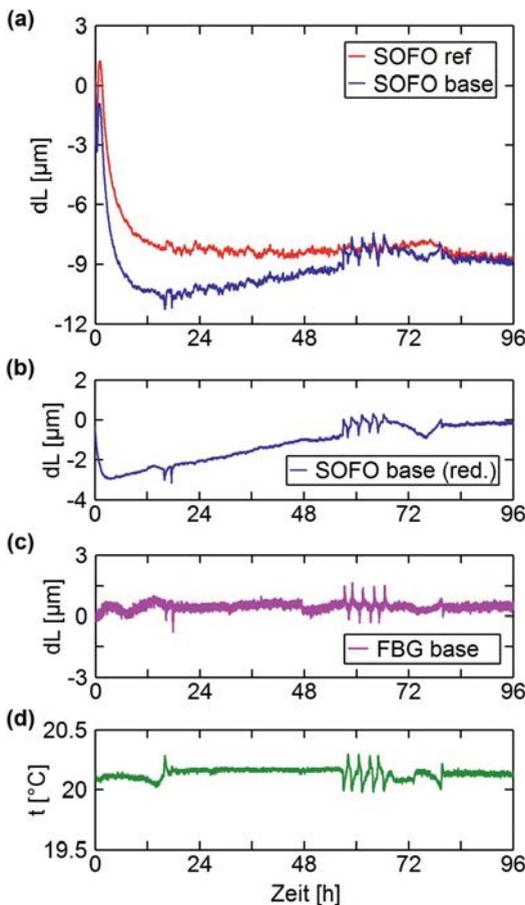


Abb. 10: Aufheizeffekte des SOFO-Dynamic, dargestellt anhand (a) der Messdaten des Referenzsensors (SOFO ref) und des SOFO Sensors der 1 m-Sensorbasis (SOFO base) sowie der (b) driftreduzierten Daten des SOFO Sensors; im Vergleich dazu die (c) Daten des FBG Sensors der 1 m-Sensorbasis sowie die (d) atypisch großen Temperaturschwankungen im Labor während des Versuchs

das Verhalten beider Sensoren sehr stark und es kommt bei beiden zu einer Verkürzung von etwa $10\ \mu\text{m}$. Danach bleiben die Werte des Referenzsensors annähernd stabil, die Werte der 1 m-Sensorbasis hingegen driften für zwei Tage mit $+1\ \mu\text{m}/\text{d}$, und danach mit etwa $-0.4\ \mu\text{m}/\text{d}$.

Beim Referenzsensor handelt es sich um einen Sensor ohne Anker, bei dem die beiden Fasern lose in der Schutzhülle liegen. Dieser ist daher insensitive auf Dehnungen und zeigt rein die (temperaturbedingten) Drifterscheinungen des SOFO-Dynamic. Die Grundidee ist es, damit die Daten der übrigen Sensoren zu reduzieren und damit deren Driften zu eliminieren. Da aber zusätzliche Driftanteile durch die ungleiche Temperaturverteilung in den Armen der zur Messung verwendeten Mach-Zehnder Interferometer verursacht werden, und ein solches für jeden Messkanal notwendig ist, können dadurch die Driften nicht vollständig eliminiert werden.

Abbildung 10b zeigt die driftreduzierten Daten des SOFO Sensors der 1 m-Sensorbasis (SOFO base - SOFO ref). Vor allem in den ersten 3 Stunden wirken sich die unterschiedlichen Driften aus, sodass in den reduzierten Daten eine Restlängenänderung von $3\ \mu\text{m}$ verbleibt. Die für den Bereich danach festgestellten Driften von zunächst $+1\ \mu\text{m}/\text{d}$ (von Stunde 3 bis 68) bzw. $-2.7\ \mu\text{m}/\text{d}$ und $+6.4\ \mu\text{m}/\text{d}$ (zwischen Stunde 69 und 79) verbleiben aber in den Daten, da in diesem Bereich der Referenzsensor kaum drifft. Ab Stunde 80 bleiben die Werte dann mit $+0.2\ \mu\text{m}/\text{d}$ annähernd stabil. Simultan zu den Messungen mit dem SOFO-Dynamic wurde auch der FBG Sensor der 1 m-Sensorbasis mit der aufgewärmten MuSt si425 erfasst. In diesen Daten können aber keine vergleichbaren Driften festgestellt werden (siehe Abbildung 10c, dargestellt sind jeweils die Mittelwerte von 100 Einzelmessungen). Daher können die zuvor festgestellten Driften des SOFO-Dynamic eindeutig dem entsprechenden Kanal des SOFO-Dynamic zugeordnet werden.

Bei allen Messungen sind insbesondere die sprungartigen Abweichungen am dritten Tag, aber auch jene gegen Ende des ersten Tages, auffallend. Beim SOFO Sensor betragen sie etwa $\pm 0.7\ \mu\text{m}$, beim FBG Sensor sind sie mit $\pm 1.0\ \mu\text{m}$ leicht größer. Diese sind eine Folge der mit $\pm 0.15\text{K}$ im Versuchszeitraum atypisch großen Temperaturänderungen, Abbildung 10d.

Da sowohl beim SOFO als auch beim FBG Sensor in etwa dieselben Abweichungen auftreten, die Werte des SOFO-Referenzsensors hingegen annähernd stabil sind, sind diese

Bewegungen wahrscheinlich auf Instabilitäten der Sensorbasis zurückzuführen. Die Bewegungen sind mit den Temperaturen negativ korreliert, was auf eine thermische Bewegung der Anker auf der Grundplatte deutet. Montagebedingt sind die Ankerblöcke auf der Grundplatte leicht exzentrisch angebracht (30mm pro Ankerblock), was aber nur etwa 1/4 der festgestellten Bewegungen erklären kann. Auch die bekannte Resttemperaturabhängigkeit des SOFO Sensors (0.5 ppm/K für $\Delta L \approx 40 \text{ mm}$, den Längenunterschied zwischen Mess- und Referenzfaser) ist zu klein, um die festgestellten Effekte verursachen zu können. Es ist daher davon auszugehen, dass die 1 m-Sensorbasis eine noch nicht bekannte thermische Abhängigkeit aufweist und daher ihre Stabilität derzeit nicht besser als etwa $1 \mu\text{m}$ ist. Eine zusätzliche thermische Abschottung sollte vorerst Abhilfe schaffen und die Effekte zumindest reduzieren. Erschwerend bei der Untersuchung der Ursachen ist es jedenfalls, dass eine unabhängige Verifikation mit anderen Messmitteln in diesem Genauigkeitsbereich kaum durchführbar ist.

Zur näheren Untersuchung der Driften des SOFO-Dynamic wurden mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dabei zeigte es sich, dass die Aufheizeffekte in den ersten drei Stunden gut reproduzierbar sind. Hingegen weisen die Drifterscheinungen ein eher zufälliges Verhalten auf und unterscheiden sich sowohl im Betrag als auch im Vorzeichen. Als Ursache werden nicht reproduzierbare thermische Ausgleichsströmungen im Inneren des SOFO-Dynamic vermutet, die die Referenzarme der Mach-Zehnder Interferometer unterschiedlich stark beeinflussen und damit für die Driften verantwortlich sind.

Ein weiterer Erfahrungswert aus Feldmessungen soll an dieser Stelle ebenfalls erwähnt werden. Während einer 14 Tage dauernden Messkampagne mit variierenden Umgebungsbedingungen traten Driften von bis zu 0.2 mm auf, die auch in diesem Fall durch den Referenzsensor nicht vollständig eliminiert werden konnten. Es ist aber nicht möglich – ohne weitere Annahmen zu treffen – zu entscheiden, ob es sich bei den verbleibenden Längenänderungen um tatsächliche Bewegungen oder nur um Drifteffekte handelt. Auch dies zeigt, dass das SOFO-Dynamic für dynamische und daher eher kurze Untersuchungen konzipiert wurde. Bei längeren Messkampagnen, wo nicht nur kurzzeitig auftretende Phänomene untersucht werden sollen, empfiehlt es sich daher, in periodischen Abständen zusätzliche Messungen mit dem langzeitsta-

bilien SOFO-Static durchzuführen und die Driften auf diese Weise zu reduzieren.

Auch aus der in diesem Abschnitt geführten Diskussion ist klar zu erkennen, dass Laboruntersuchungen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse wesentlich für die Interpretation der Ergebnisse und die möglichen (sinnvollen) Einsatzbereiche der Instrumente sind.

5.3 Testeinrichtung zur Bestimmung statischer Kennlinien

5.3.1 Aufbau

Für die Durchführung von Linearitätsuntersuchungen wurde eine weitere Anlage konzipiert. Herausfordernd dabei ist die hohe Präzision der faseroptischen Instrumente, die hohe Anforderungen an die Stabilität der Anlage und das Vergleichsmesssystem stellt. Daher wurde zunächst ein Prototyp der Anlage realisiert, um Erfahrungen in diesem Genauigkeitsbereich zu sammeln. Abbildung 11 stellt diese Anlage schematisch dar.

Die Prüfanlage wird auf den Schienen des Horizontalkomparators aufgebaut, wodurch bis zu 30 m lange Sensoren direkt (ohne Umlenkung der Sensoren) überprüft werden können. Diese

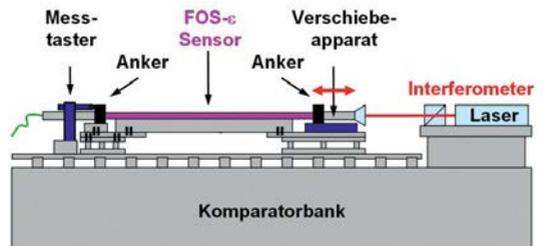


Abb. 11: Schematische Darstellung der Testeinrichtung zur Überprüfung der Linearität

Länge ist insbesondere für Untersuchungen der immer öfter eingesetzten verteilten faseroptischen Sensorensysteme interessant. Beim Prototyp wurde die Sensorlänge aus praktischen Gründen zunächst auf 5 m beschränkt. Bei der Montage wird ein Anker fix, der andere auf einem Verschiebeapparat und damit beweglich montiert. Die Bewegung wird simultan mit dem faseroptischen Messsystem und mit einem Laserinterferometer als Referenzsystem erfasst. Beim Aufbau wurde das Abbe'sche Komparatorprinzip streng eingehalten, um größere Cosinus-Fehler zu vermeiden. Die Stabilität des fix montierten Ankers wird während der Dehnung des Sensors mit zwei unabhängig gelagerten Messtastern ($0.1 \mu\text{m}$ Auflösung) überprüft. Die Genauigkeit der gesamten Anlage beträgt ca. $0.5 \mu\text{m}$.

5.3.2 Beispiel: SOFO-Dynamic

Bei einer ersten Untersuchung des SOFO-Dynamic wurde ein 5 m langer SOFO Sensor zweimal in 0.5 mm bzw. 1 mm Schritten über den gesamten Messbereich (10 mm, Tabelle 1) gedehnt und wieder entlastet. Abb. 12 zeigt den Vergleich zwischen den mit dem SOFO-Dynamic (dL) und den mit dem Interferometers (ΔL_{SOLL}) bestimmten Verschiebungen.

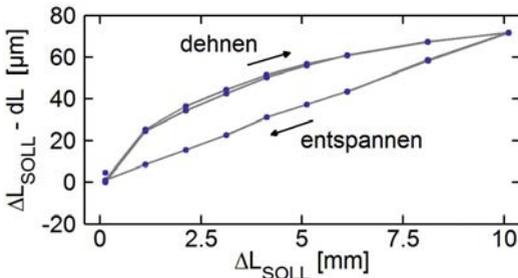


Abb. 12: Hystereseeffekte eines SOFO Sensors, gemessen mit der SOFO-Dynamic RU

Deutlich ist eine Hysterese (bis zu $25\mu\text{m}$ zwischen Hin- und Rückweg) zu erkennen, die sehr gut reproduzierbar ist und dem Sensor zuzuschreiben ist. Sie liegt aber durchwegs im Bereich der vom Hersteller angegebenen Linearität (0.2%) des Sensors. Weiters ist ein Maßstab von etwa 0.7% zu erkennen. Dieser stammt im Wesentlichen vom SOFO-Dynamic, was aus Linearitätsuntersuchungen desselben Sensors mit dem SOFO-Static ableitbar ist. Für Sonderanwendungen, wo dynamisch große Verformungen erfasst werden sollen, wird der Maßstab jedenfalls zu berücksichtigen sein.

Die Ursache der Hystereseeffekte ist noch unklar und wird durch weitere Untersuchungen zu klären sein.

5.3.3 Beispiel: MuST si425

Eine ähnliche Untersuchung wurde mit der MuST si425 mit einem Sylex Sensor (Typ SC-03) durchgeführt. Der FBG basierte Sensor ist 0.5 m lang und hat standardmäßig einen Arbeitsbereich von $\pm 5000\mu\epsilon$. In der gewählten Ausführung wurde die Faser um $2000\mu\epsilon$ vorgespannt, womit sich eine Verkürzung von 1 mm erfassen lässt, bevor die Faser lose durchhängt. In der Untersuchung wurde der Sensor dreimal in 0.5 mm Schritten gedehnt und wieder entspannt, siehe Abbildung 13.

Wie auch beim SOFO Sensor ist hier eine deutliche Hysterese (bis zu $15\mu\text{m}$ zwischen Hin- und Rückweg) zu erkennen, jedoch mit gegenläufigem Umlaufsinn. Ebenso ist ein Maßstab

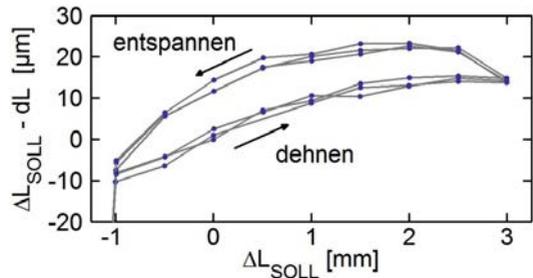


Abb. 13: Hystereseeffekte eines FBG Sensors, gemessen mit der MuST si425

zu erkennen, der wie zuvor 0.7% beträgt. Die Funktionsprinzipien der beiden faseroptischen Messsysteme sind allerdings fundamental unterschiedlich, und auch der Aufbau der Sensoren sowie der Typ der jeweils verwendeten Glasfaser und deren Beschichtung sind unterschiedlich. Daher werden weitere Untersuchungen mit einem größeren Stichprobenumfang zeigen, ob es sich dabei um einen Zufall handelt oder um einen bisher nicht bekannten systematischen Effekt.

5.4 Modifikation der Testeinrichtung

Die Ursache der in den beiden vorangegangenen Beispielen gezeigten Hystereseeffekte ist unklar. Sie könnte aber in einem visko-elastischen Verhalten der Schutzhülle des Sensors, der Verbindungsstelle zwischen Glasfaser und Anker oder dem Kriechen der Beschichtung der Glasfaser liegen.

Um die möglichen Effekte getrennt voneinander untersuchen zu können, sollten in die Testeinrichtung nicht nur vorkonfektionierte Sensoren, sondern auch blanke Fasern, die ja das eigentliche Sensorelement bilden, eingespannt werden können. Dies ist bei dem in Abschnitt 5.3 vorgestellten Prototypen der Test- und Prüfeinrichtung nicht ohne weiteres möglich. Zudem zeigten sich bei den Untersuchungen infolge des hohen Aufbaus auch geringe Bewegungen des „fixen“ Ankerpunktes, die in den vorangegangenen Abschnitten über die Werte der Mess-taster korrigiert wurden. Um die Stabilität der Anlage zu verbessern, den Messablauf zu automatisieren und eben auch ungeschützte Sensoren (blanke Glasfasern) überprüfen zu können, wurde ein neues, verbessertes Gesamtkonzept erstellt. Prinzipielle Überlegungen und Konstruktionsdetails sind in Presl (2009) enthalten.

Diese neue Anlage wurde mittlerweile gebaut und wird derzeit gerade getestet. Es ist daher zu früh, sie schon in diesem Beitrag vorzustellen. Jedenfalls ist sie mit den möglichen großen Sen-

sorlängen (bis 30m) und einem Verschiebeweg des bewegten Ankers von 0.3m einzigartig.

6. Resümee

Neue Entwicklungen in der faseroptischen Messtechnik und immer größere Chargen bei der Sensorherstellung lassen für die Zukunft eine Optimierung der Eigenschaften wie z.B. den gezeitigen Hystereseffekten erwarten.

Einschlägige Normen sind, obwohl es mittlerweile eine größere Anzahl an kommerziellen faseroptischen Messsystemen und faseroptischen Sensoren gibt, entweder nicht vorhanden oder noch nicht genügend etabliert. Die von den Herstellern bereitgestellten Spezifikationen erlauben es daher oftmals nicht, unterschiedliche Geräte miteinander zu vergleichen; zu unterschiedlich sind oft die Inhalte und zu inhomogen die Bedeutung der verwendeten Begriffe. Derzeit sind jedoch internationale Bestrebungen im Gange (IEC 86C WG2), entsprechende Normen zu erstellen und europaweit werden Anstrengungen unternommen (COST TD1001), die Grundlagen für neue Faseroptische Systeme und Sensoren mit noch höheren Reproduzierbarkeiten zu erarbeiten (siehe Habel, 2012).

Bis die Regelwerke erstellt und etabliert sind, bleibt dem Anwender nur, sich anderwärtig Informationen zu beschaffen. Dafür sind unabhängige Institutionen wesentlich, die mit den Messsystemen und Sensoren Prototypentests durchführen und die praxisrelevanten Informationen bereitstellen. Oft sind es Universitätsinstitute, die sich dieser Aufgabe annehmen und damit einen wichtigen Beitrag für die Etablierung neuer Technologien liefern. Die Messpräzisionen, die mit faseroptischen Systemen möglich sind, stellen jedoch auch hohe Ansprüche an die Test- und Prüfeinrichtungen, speziell, wenn diese zur Evaluierung des Langzeitverhaltens verwendet werden sollen. Dies zeigte sich auch bei den in den letzten Jahren im IGMS Messlabor aufgebauten Einrichtungen. Mit diesen konnten zwar schon wichtige Erkenntnisse für den praktischen Einsatz der Instrumente gewonnen werden, Stabilitäten im sub- μm Bereich oder im 0.01K Bereich – die für bestimmte Untersuchungen zumindest kurzzeitig vorherrschen sollten – sind jedoch nicht leicht zu erreichen. Oftmals sind die Anlagen basierend auf den gesammelten Erfahrungen zu adaptieren, insbesondere auch um neue, zuvor nicht offenkundige, Funktionalitäten zu realisieren. Diese Entwicklungsschritte hat auch die vorgestellte statische Test- und Prüfeinrichtung für faseroptische Dehnungssensoren durchlaufen. Eine verbesserte und erweiterte Version der Anlage steht nun nach mehrjähriger

Entwicklungszeit kurz vor ihrer operativen Inbetriebnahme. Intensive Untersuchungen sind damit geplant, worüber in naher Zukunft berichtet werden wird.

Referenzen

- [1] Brunner FK (2009): Faseroptische Sensorik. Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie. Öst. Z. f. Vermessung & Geoinformation 97: 335-342
- [2] Brunner FK, Woschitz H (2011): Über die Erweiterung des ingenieurgeodätischen Monitorings. Allg. Vermessungs-Nachrichten 118: 212-218
- [3] Habel WR (2012): Advances in Developing Standards for Fibre-Optic Sensors. In Boller C (ed.) Structural Health Monitoring 2012: CD-Proc. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 3.-6.07.2012, Dresden, 9 Seiten
- [4] Kashyap R (2010): Fiber Bragg Gratings. 2nd ed., Academic Press, San Diego, 614 Seiten
- [5] Lienhart W (2007): Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Series "Engineering Geodesy – TU Graz", Shaker Verlag, Aachen, 269 Seiten
- [6] Presl R (2009): Entwicklung eines automatisierten Messsystems zur Charakterisierung faseroptischer Dehnungssensoren. Unpubl. Diplomarbeit, FH Oberösterreich, 148 Seiten
- [7] Reithofer A, Schlauf S (1992): Geodäsie-Messlabor der TU Graz. In Matthias HJ, Grün A (Hrsg.) Ingenieurvermessung 92, Beiträge zum 11. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Bd. 1: II 17/1-8
- [8] Udd E, Spillman WB (2011): Fiber Optic Sensors, an Introduction for Engineers and Scientists. 2nd ed., Wiley, New Jersey, 498 Seiten
- [9] VDI (2010): Experimentelle Strukturanalyse – Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter – Grundlagen, Kenngrößen und deren Prüfung. Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE Richtlinie 2660, Beuth Verlag, Berlin, 43 Seiten
- [10] Woschitz H (2010a): Entwicklung einer langarmigen faseroptischen Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges. Österr. Z. f. Vermessung & Geoinformation 98: 29-39
- [11] Woschitz H (2010b): Entwicklung eines Rail-Strain-Pads unter Verwendung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. In Wunderlich T (Hrsg.) Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München 2010. Wichmann: 171-182
- [12] Woschitz H, Brunner FK (2011): Dynamic strain measurements using embedded fiber optic sensors. Österr. Z. f. Vermessung & Geoinformation 99: 191-196
- [13] Yu FTS, Yin S (2002): Fiber Optic Sensors. Marcel Dekker Inc., New York, 494 Seiten

Anschrift des Autors

Dr. Helmut Woschitz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-Mail: helmut.woschitz@tugraz.at

Verleihung des Karl Rinner Preises 2010

Festrede anlässlich der Verleihung des Karl Rinner Preises am 09. Mai 2012 an Herrn Dr. Tobias Nilsson

Sehr geehrte Gäste,

herzlich willkommen zur Karl Rinner Preisverleihung der Österreichischen Geodätischen Kommission (ÖGK) für das Jahr 2010. Diese öffentliche, gemeinsam mit der OVG ausgerichtete Veranstaltung, besteht aus der Preisverleihung, gefolgt vom Vortrag des Preisträgers. Es ist eine besondere Freude, hier während des Österreichischen Geodätentages 2012 in Velden am Wörthersee den Preis Herrn Dr. Tobias Nilsson, den ich Ihnen später näher vorstellen werde, zu überreichen. Vorher gibt es aber – wie schon üblich – noch einige Erläuterungen zum Karl Rinner Preis.

Die ÖGK ist froh darüber, daß wir viele hervorragende geodätische Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen in Österreich haben. Wir haben daher entschieden, einen Preis zu vergeben – und zwar jährlich und immer nur an *einen* besonders herausragenden, jungen, in Österreich lebenden Wissenschaftler oder Wissenschaftlerin. Nachdem die Österreichische Geodätische Kommission für alle wissenschaftlichen Bereiche zuständig ist, die unter das weite Dach der „Geodäsie“ fallen, sich also in Forschung und Entwicklung, in Messung und Verwaltung mit räumlichen Daten beschäftigen, haben wir nach einem entsprechenden Namen gesucht. Dabei kamen wir sofort auf Professor Karl Rinner, Präsident der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung (ÖKIE) von 1980-1987. Alle diejenigen, die Professor Rinner noch kannten, werden bestätigen, daß man ihn als „universellen Geodäten“ bezeichnen konnte. Er war wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, hat ungefähr 200 Publikationen geschrieben und auf den verschiedensten Gebieten der Geodäsie Lehrbücher verfasst; insbesondere denke ich dabei an die Fortführung des berühmten Werkes Jordan/Eggert/Kneissl „Handbuch der Geodäsie“, das z.B. ich als Student noch häufig verwendet habe. Rinner kann zweifellos als ein „Universalgenie“ der Geodäsie bezeichnet werden. Daher ist die Österreichische Geodätische Kommission besonders stolz darauf, den Namen Karl Rinner für den Preis verwenden zu dürfen.

Mit dem Karl Rinner Preis 2010 wird diese Auszeichnung zum 7. Mal vergeben (weitere Informationen zu den bisherigen Preisträgern sind den jeweiligen Ausgaben der vgi Nachrichten oder dem Portal der ÖGK – <http://www.oegk-geodesy.at/ehrungen-2.html> – zu entnehmen). Nachdem ich Ihnen Karl Rinner vorgestellt oder wieder ins Gedächtnis gerufen habe, soll nun der Karl Rinner Preisträger des Jahres 2010 vorgestellt werden.

Der Preisträger ist dieses Mal Dr. Tobias Nilsson von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie am Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien. Dr. Nilsson hat seine Dissertation, mit dem Titel „Measuring and modelling variations in the distribution of atmospheric water vapour using GPS“, an der Chalmers University, der Technischen Hochschule in Göteborg, Schweden im Jahr 2008 abgeschlossen. In seiner Doktorarbeit hat er die Einflüsse der Erdatmosphäre auf die Signale der geodätischen Weltraumverfahren untersucht. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Messung des Wasserdampfgehaltes der Troposphäre mittels GNSS und der Berücksichtigung atmosphärischer Turbulenzen bei GNSS- und VLBI- Beobachtungen.

Den Einflüssen dieser atmosphärischen Turbulenzen – jedem von Ihnen bekannt aus den Rüttelbewegungen eines Flugzeugs kurz vor der Landung – hat er sich auch nach seiner Dissertation weiter gewidmet, zuerst an der Chalmers Universität und seit 2009 an der TU Wien. Er hat ein Modell entwickelt, das die Laufzeitverzögerungen in einer turbulenten Atmosphäre sehr realistisch beschreibt. Dieses Modell wurde inzwischen schon vielfach erfolgreich eingesetzt, z.B. bei ausgiebigen Simulationsrechnungen für das zukünftige VLBI- System „VLBI2010“. Das Modell wurde von Nilsson in seinem Artikel „Impact of atmospheric turbulence on geodetic very long baseline interferometry“ beschrieben, der im renommierten „Journal of Geophysical Research“ der American Geophysical Union (AGU) im Jahr 2010 publiziert wurde. Für diesen in der Zwischenzeit international schon vielfach zitierten Artikel wird der Karl Rinner Preis 2010 an Dr. Nilsson verliehen.

An der TU Wien arbeitet Dr. Nilsson derzeit in einem von der DFG (Deutschen Forschungsgemeinschaft) über die Landesgrenzen hinweg geförderten Forschungsprojekt, in dem es um hochfrequente und episodische Variationen der Erdrotationsparameter geht. Darin werden von ihm die sog. subtäglischen Erdrotationsschwankungen untersucht, also kleine, aber messbare Variationen der Drehgeschwindigkeit und des Rotationspols der Erde (Polbewegung), die innerhalb eines Tages stattfinden. Verursacht werden diese vor allem durch die Meereszeiten, aber auch durch Verlagerung von Luftmassen, dem sogenannten atmosphärischen Effekt. Zur Messung dieser kurzfristigen Schwankungen der Erdrotation werden VLBI-, GNSS- und Ringlaser-Messungen verwendet, die von Herrn Nilsson gemeinsam ausgewertet und nach allen Regeln der Kunst analysiert werden. Ein anderer Teil dieses Projekt behandelt episodische, also sogenannte „sprungartige“ Erdrotationsvariationen, die z.B. von großen Erdbeben verursacht werden. Dr. Nilsson hat hier die Effekte der starken Erdbeben der letzten Jahre, wie demjenigen in Chile (Feb. 2010) und dem in Japan (März 2011) berechnet und mit den Messdaten verglichen.

Wie man aus Namen und Werdegang des Auszuzeichnenden schon schließen konnte, ist Herr Dr. Nilsson schwedischer Staatsbürger. Die Anforderungen der ÖGK, nämlich mindestens ein Jahr lang vor der Auszeichnung in Österreich tätig gewesen und gelebt zu haben, hat er selbstverständlich erfüllt. Wir sind deswegen besonders stolz darauf, im Sinne der europäischen Idee, den *österreichischen* Karl Rinner Preis 2010 einem besonders begabten, jungen *schwedischen* Wissenschaftler zu überreichen, der in Österreich von einer *deutschen* Forschungsförderorganisation finanziert wird. Ich habe nun die große Freude, Herrn Dr. Nilsson die Urkunde des Karl Rinner Preises 2010 zu überreichen. Herzliche Gratulation!

Lieber Herr Dr. Nilsson, dieser Preis – als höchste Auszeichnung, die ein junger Wissenschaftler in der Geodäsie in Österreich erhalten kann – soll nicht nur eine Anerkennung für das bisher geleistete sein, sondern insbesondere auch als Ansporn dienen, sich weiter mit höchstmöglichem Einsatz den vielen interessanten und spannenden Herausforderungen der Höheren Geodäsie zu stellen und die auftretenden Probleme phantasiereich zu lösen.

Das war der offizielle Teil; für den monetären Teil hat die ÖGK einen Sponsor gefunden, den ich Ihnen nun vorstellen möchte: Es ist die Firma Leica, die durch Herrn Hans-Ulrich Müller, dem General Manager von Leica Geosystems Austria GmbH vertreten wird. Ich möchte Herrn Hans-Ulrich Müller ersuchen, den Preis persönlich zu übergeben.

*Harald Schuh
(Präsident der ÖGK)*



Preisverleihung an Tobias Nilsson durch Hans-Ulrich Müller (Leica, li) und Harald Schuh (re)



Dr. Tobias Nilsson bei seinem Festvortrag



Weather and Climate: Signal and Noise for Geodesy

Tobias Nilsson, Wien

Abstract

The impact of the atmosphere on space geodetic techniques, like GNSS and VLBI, is reviewed. It is described how the atmospheric delays can be modelled in the data analysis of the space geodetic observations, and the limits of this modelling due to atmospheric turbulence are discussed. Furthermore, the possibility to use GNSS and VLBI can be used for atmospheric studies, e.g. for meteorology or in climate research are described.

Keywords: GNSS, VLBI, tropospheric delay, meteorology

Kurzfassung

Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Einflüsse der Erdatmosphäre auf die Signale der geodätischen Welt- raumverfahren wie GNSS und VLBI. Es wird erklärt und diskutiert, wie die Laufzeitverzögerung in der Auswertung von weltraumgeodätischen Beobachtungen modelliert wird, und wie die atmosphärische Turbulenz Grenzen für diese Modellierung setzt. Zusätzlich wird die Möglichkeit beschrieben, wie GNSS und VLBI für atmosphärische Studien verwendet werden können, z.B. in der Meteorologie oder in der Klimaforschung.

Schlüsselwörter: GNSS, VLBI, troposphärische Laufzeitverzögerung, Meteorologie

1. Introduction

The Earth's atmosphere is one of the most important error sources for space geodetic techniques like geodetic Very Long Baseline Interferometry (VLBI) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) such as the Global Positioning System (GPS). In order to obtain accurate results using these techniques, e.g. for the station coordinates, it is important that the atmospheric effects are modelled as good as possible. Since the atmospheric properties are highly variable – especially the water vapour content – this is a challenging task. On the other hand, the fact that the space geodetic observations are affected by the atmosphere also makes it possible to use space geodetic techniques to study the atmosphere. For example, GNSS and VLBI have turned out to be good techniques for measuring the amount of water vapour in the atmosphere, a quantity which is of great interest for meteorology and climatology.

This paper discusses how the atmosphere can be modelled in the data analysis of space geodetic observations (Section 2). The description concentrates on the microwave techniques such as GNSS and VLBI. For optical techniques such as Satellite Laser Ranging (SLR) the situation is slightly different (no ionospheric delay, less impact of water vapour), see e.g. [1] for more information about atmospheric modelling in SLR. The paper also describes some applications of

GNSS and VLBI for atmospheric studies (Section 3).

2. Atmospheric delays

As the signals of space geodetic techniques propagate through the Earth's atmosphere, they are affected by it. In the atmosphere, the signals are propagating slower than in vacuum, their paths are refracted, and they are attenuated. Since space geodetic techniques observe the travel time of the signals, the attenuation is not very important as long as the signals can be detected without problem. On the other hand, refraction and the decrease of the propagation velocity both affect the travel time (see Figure 1), causing a delay of the signals compared to if there would have been no atmosphere. These delays need to be considered when analysing space geodetic observations.

The atmospheric delay, ℓ_{atm} , of a signal can be expressed as:

$$\ell_{atm} = 10^{-6} \int_S N(s) ds + [S - G] \quad (1)$$

where N is the so-called refractivity of the atmosphere, S is the (bended) propagation path of the signal, and G is the geometric path length of the signal (the path the signal would have taken in vacuum). When considering the atmospheric delays of space geodetic signals the atmosphere is commonly divided into two parts: the ionosphere and the troposphere.

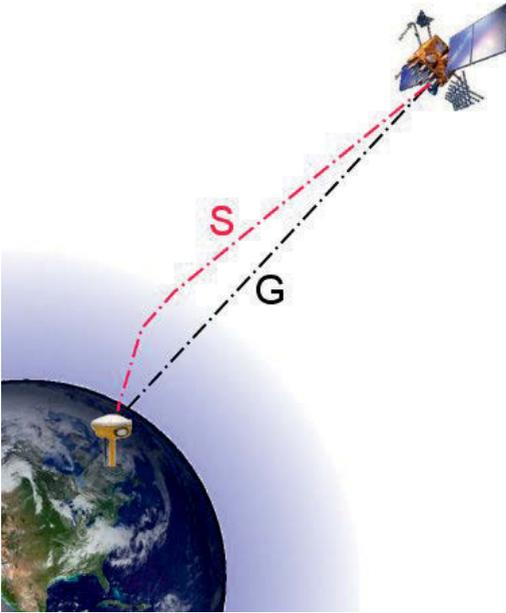


Fig. 1: The signals used by space geodetic techniques are delayed in the Earth's atmosphere because (i) the propagation speed in the atmosphere is lower than in vacuum, and (ii) the propagation path *S* is longer than the geometric path *G*.

2.1 Ionospheric delays

The upper part of the atmosphere consists of free electrons and ions and is called the ionosphere. The ionosphere is a dispersive medium meaning that the refractivity – and thus also the ionospheric delay – is frequency dependent. Approximately the ionospheric delay is proportional to f^2 , where f is the frequency. Hence, measurements at two different frequencies (f_1 and f_2) can be combined into an ionospheric free combination:

$$\ell_{if} = \frac{f_1^2 \ell_{atm}(f_1) - f_2^2 \ell_{atm}(f_2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2)$$

Since both GNSS and VLBI use (at least) two frequencies, this combination can usually be applied to get rid of the ionospheric effects. For conditions with high ionospheric activity it may be necessary also to consider higher order terms (f^3 etc.) [2], at least for techniques using relatively low frequencies (< 2 GHz) such as GNSS.

2.2 Tropospheric delays

The lower part of the atmosphere is neutral and is called the neutral atmosphere or the troposphere. The troposphere is non-dispersive for

microwaves, thus the refractivity is frequency independent and thus it is not possible to remove the tropospheric delay using measurements at several different frequencies. Hence it needs to be modelled in the data analysis. The refractivity in the troposphere is a function of the atmospheric density ρ , the partial pressure of water vapour p_w , and the temperature T [3]:

$$N = k_1 \rho R_d + k'_2 \frac{p_w}{T} + k_3 \frac{p_w}{T^2} \quad (3)$$

where R_d is the specific gas constant of dry air and k_1 , k'_2 , and k_3 are constants. Normally the refractivity is divided into a hydrostatic part N_h and a wet part N_w ($N = N_h + N_w$), where N_h depends only on ρ (first term in eq. (3)) while N_w only depends on p_w and T (second and third term of eq. 3). Subsequently the atmospheric delay are also divided into a hydrostatic part ℓ_h and a wet part ℓ_w .

Since the horizontal variations in the refractive index and the bending are relatively small, the atmospheric delay is approximately proportional to the geometrical distance travelled by the signal through the atmosphere. Thus, for elevation angles ϵ above 20° (were the curvature of the atmosphere can be ignored) ℓ_{atm} is proportional to $1/\sin(\epsilon)$. Since the partial derivative of the travel time w.r.t. the vertical coordinate of the receiving antenna is proportional to $\sin(\epsilon)$, it is obvious that there will be errors in the especially vertical coordinate estimates if the atmospheric delay is not corrected for.

2.3 Modelling of atmospheric delays in space geodesy

There are basically two ways of correcting for the atmospheric delays in the data analysis of space geodetic observations: The first method is to use external information about the tropospheric delay. External tropospheric delays can be obtained from ray-tracing through numerical weather prediction models (see e.g. [4] and references therein) or measured by other instruments such as water vapour radiometers [5]. A problem is that neither numerical weather prediction models nor other instruments are free from errors, and these errors will degrade the accuracy of the coordinates and the parameters estimated with the space geodetic techniques. Furthermore, external instruments for measuring tropospheric delays can be expensive and may not be able to operate under all weather conditions. For example, water vapour radiometers do not give reliable results during rain.

The other method is to estimate the tropospheric delays in the space geodetic data analysis. For high accuracy applications, this is the commonly used approach. To do this the atmospheric delays need to be parameterised as functions of the observation direction. The most common parameterisation is to model the tropospheric delay as function of the zenith hydrostatic delay ℓ_h^z , the zenith wet delays (ZWD) ℓ_w^z , and horizontal north and east gradients (G_n and G_e):

$$\ell_{atm} = m_h(\epsilon)\ell_h^z + m_w(\epsilon)\ell_w^z + m_h(\epsilon)\cot(\epsilon)[G_n \cos(\alpha) + G_e \sin(\alpha)] \quad (4)$$

where α and ϵ are the azimuth and the elevation angles, respectively, and m_h and m_w are the hydrostatic and wet mapping functions (see e.g. [6]). The zenith hydrostatic delay can accurately be estimated from surface pressure measurements [7], while the zenith wet delay and the gradients need to be estimated in the data analysis. The temporal variations of these quantities are normally modelled using piece-wise linear functions (or as a random walk process if a Kalman filter is used for the estimation). The problem in this approach is that there are more unknown parameters to be estimated in the data analysis, i.e. the degree of freedom is increased and thus the formal uncertainties of the estimates will be higher. Hence it gets even more important to have many observation with a good coverage of the sky above the station.

2.4 Atmospheric turbulence

The model for the tropospheric delay presented in eq. (4) is only an approximation because it assumes that the horizontal variations in the refractivity are linear. However there are non-linear small-scale variations in the refractivity caused by atmospheric turbulence. These variations are in principle impossible to model exactly, thus atmospheric turbulence will limit the accuracy that can be achieved by space geodesy. One way to investigate the impact of atmospheric turbulence on the space geodetic results is to use simulations. A method for simulating tropospheric delays of a turbulent atmosphere was presented by [8]. This method assumes that the atmospheric turbulence can be described using the theory of Kolmogorov turbulence [9], i.e. the structure function for the variations in the refractivity between r and $r + R$ is given by:

$$\langle [N(r) - N(r + R)]^2 \rangle = 10^{12} C_n^2 |R|^{2/3} \quad (5)$$

where C_n^2 is called the refractive index structure constant and $\langle \cdot \rangle$ denotes expectation value. Temporal variations can be modelled by assuming these are caused by the air moving with the wind. Examples of simulated wet tropospheric delays are shown in Figure 2. In these simulated delays small scale variations which cannot be modelled by eq. (4) can be seen.

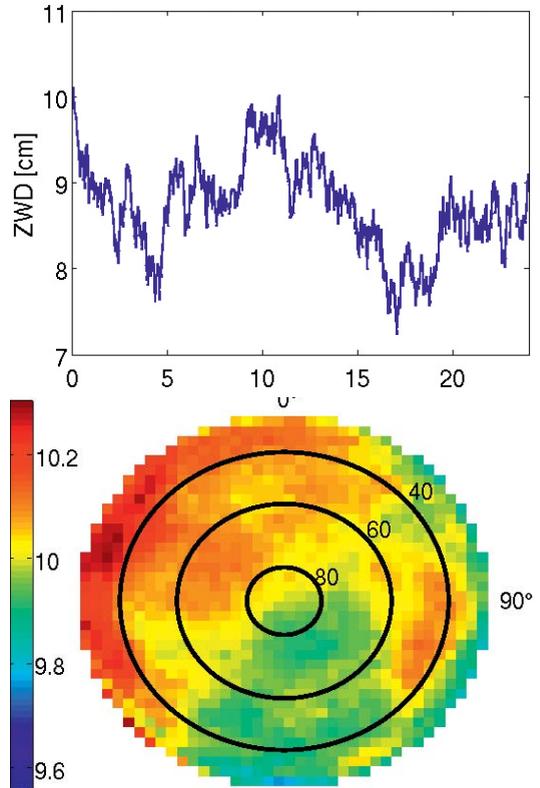


Fig. 2: Top figure shows simulated zenith wet delays for a 24 h long period. The bottom figure shows simulated equivalent zenith wet delays (slant wet delays divided by a mapping function) as function of direction. The delays were simulated using the method presented in [8], with $C_n^2 = 1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, effective tropospheric height $H = 2 \text{ km}$, and wind velocity 8 m/s.

In [8] VLBI observations were simulated considering the three most important random error sources for geodetic VLBI: tropospheric turbulence, clock errors, and observation noise. Tropospheric turbulence was found to be the most important error source for the current VLBI system. Similar simulations was performed in [10], aimed at evaluating the performance of the future VLBI system, VLBI2010. It was found that atmospheric turbulence will still be the major error

source and the limiting factor for the accuracy of station coordinates estimated using this system. If the goal of VLBI2010 (1 mm station position accuracy) are to be reached the modelling of the atmospheric delays needs to be improved.

3. Using space geodetic techniques for atmospheric studies

As mentioned in section 2.3 the normal way of handling the tropospheric delays in the data analysis is to estimate them as functions of ZWD and gradients. Although these parameters are normally considered as nuisance parameters by geodesists, they contain interesting information about the atmosphere. Most importantly, the ZWD are strongly related to the integrated water vapour content (IWV) above the observing station [11]. Several studies have been performed to evaluate the accuracy of the ZWD (or IWV) estimated from space geodetic techniques [12, 13]. In general it has been found that the ZWD obtained from GNSS and VLBI are at least as accurate as those obtained from other techniques (e.g. water vapour radiometers, radiosondes, numerical weather prediction models). Thus there is a big interest of using the tropospheric parameters estimated from space geodetic techniques e.g. in meteorology or for climate studies.

3.1 GNSS meteorology

In meteorology water vapour is a very important parameter, and good knowledge of its distribution in the atmosphere is needed for weather forecasts. Since the water vapour content is highly variable, continuous monitoring with high spatial resolution is needed. However, typical meteorological instruments for measuring the IWV – such as radiosondes – are relatively expensive to operate. Hence there exists a big interest from the meteorological community to use IWV estimated from the dense national networks of GNSS stations that have been established in the last decades (see Figure 3 for a map of some of the permanent GNSS stations in Europe). Several studies have been performed investigating how to best assimilate the GNSS results in the numerical weather prediction models and evaluating the impact on the weather forecasts (see e.g. [14, 15]). It has been shown that GNSS IWV improves the weather forecasts, especially for extreme weather conditions.

There are also attempts to use GNSS to also estimate the 3D structure of the tropospheric water vapour, so-called GNSS tomography. This is done by applying tomographic methods to the

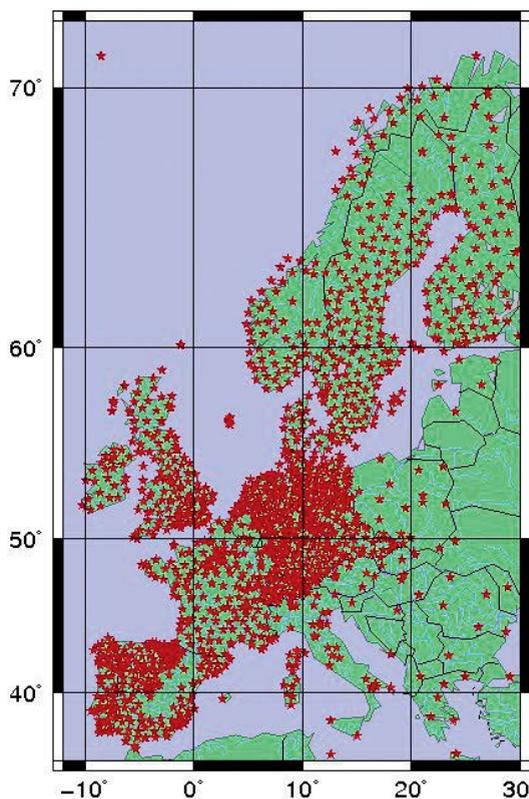


Fig. 3: Some of GNSS stations in Europe. The stations shown are those used in the E-GVAP project (<http://egvap.dmi.dk/>).

slant wet delays observed at several GNSS stations in a very dense (<10km baselines) network. Several implementations of this technique have been presented (e.g. [16, 17]). However, several problems still need to be resolved, like how to estimate the slant wet delays or how to handle the normally weak geometry of the observations (all stations are on the surface of the Earth and all satellites are above the top of the troposphere).

3.2 Climate studies

Water vapour is also an important parameter for climate research. It is the most important greenhouse gas, and the water vapour content in the atmosphere is (over longer time-scales) strongly correlated with the temperature. Thus water vapour will amplify warming caused by e.g. other greenhouse gases, and in order to predict the future climate this feedback mechanism needs to be well understood. Furthermore, this also means that a long-term increase of water vapour content is an indication of an increase in the temperature. Thus the atmospheric water vapour

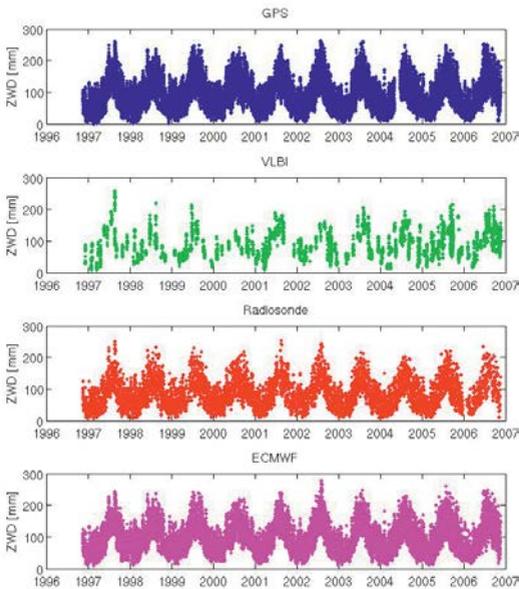


Fig. 4: Time series of ZWD estimated from various instruments at the Onsala Space Observatory, Sweden: GPS, VLBI, radiosondes, and ECMWF data.

content needs to be monitored with a high long-term stability, which is difficult to achieve. Space geodetic techniques could potentially provide the needed stability.

Several investigations on measuring long-term ZWD/IWV trends using GNSS and VLBI have been performed (see [18] and references ther-

Technique	Trend [mm/yr]
GPS	0.38
VLBI	1.06
Radiosonde	0.27
ECMWF	0.00
Common epochs GPS and VLBI	
GPS	1.12
VLBI	1.09
Common epochs GPS and Radiosonde	
GPS	0.42
Radiosonde	0.32
Common epochs GPS and ECMWF	
GPS	0.31
ECMWF	0.01

Tab. 1: ZWD trends 1996-2006 calculated from the time series shown in Figure 4

ein). Figure 4 shows the ZWD measured over a 10 year long period using four techniques – measured by GPS, VLBI, and radiosondes, and calculated from ECMWF numerical weather analysis data – at the Onsala Space Observatory on the Swedish west coast. The ZWD trends calculated from these time series are shown in Table 1. The trends calculated using all data for each technique do not agree with each other. This is because of the short time period (in climatology normally only time periods of 40 years and longer are considered), making the estimated trends very sensitive to the exact time epochs with ZWD measurements. The different techniques have different temporal resolutions which have varied over the time intervals, e.g. in 1996 there were sometimes four radiosonde launches per day, in 2006 normally only one. If the trends of two techniques calculated using only data from time epochs where both techniques observe, the agreement improves (except for ECMWF).

4. Conclusions

As discussed in this paper, the signals used by space geodetic techniques are delayed in the troposphere. This delay needs to be accurately modelled in the data analysis in order to avoid large errors in the results (e.g. the coordinate estimates). Nevertheless, since the accuracy that the tropospheric delay can be modelled with is limited (e.g. small-scale fluctuations due to turbulence cannot be modelled), the troposphere will in the end limit the precision that can be achieved. This is true for the current space geodetic systems, and will most likely be even more true for future systems. If future goals of 1 mm position accuracy are to be reached it is important to improve the modelling of the tropospheric delays.

However, the tropospheric delays are not only causing problems, they also open up new applications of space geodesy. The tropospheric delay estimates obtained from the analysis of GNSS and VLBI data have turned out to be useful for example in meteorology. Hence the troposphere can be considered both as signal and as noise for the space geodetic techniques, depending on the application.

References

- [1] V. B. Mendes and E. C. Pavlis: High accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths. Geophys. Res. Lett., 31, 2004. L14602, doi:10.1029/2004GL020308.
- [2] F. K. Brunner and M. Gu: An improved model for dual frequency ionospheric correction of GPS observations. Manuscripta Geodaetica, 16:205-214, 1991.

- [3] J. M. Rüeger: Refractive index formulae for radio waves. In Proc. XXII FIG International Congress, Washington DC, USA, 2002. FIG.
- [4] V. Nafisi, L. Urquhart, M. C. Santos, F. G. Nievinski, J. Böhm, D. D. Wijaya, H. Schuh, A. A. Ardalan, T. Hobiger, R. Ichikawa, F. Zus, J. Wickert, and P. Geogout: Comparison of ray-tracing packages for troposphere delays. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 50:469-481, 2012.
- [5] T. R. Emdarson, G. Elgered, and J. M. Johansson: External atmospheric corrections in geodetic very-long-baseline interferometry. *J. Geodesy*, 73:375-383, 1999.
- [6] J. Böhm, B. Werl, and H. Schuh: Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European centre for medium-range weather forecasts operational analysis data. *J. Geophys. Res.*, 111:B02406, 2006.
- [7] J. Saastamoinen. *Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites*. In S. W. Henriksen et al., editors: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, volume 15, pages 247–251, AGU, Washington, D.C., 1972.
- [8] T. Nilsson and R. Haas: Impact of atmospheric turbulence on geodetic very long baseline interferometry. *J. Geophys. Res.*, 115:B03407, 2010.
- [9] V. I. Tatarskii: *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1971.
- [10] A. Pany, J. Böhm, D. MacMillan, H. Schuh, T. Nilsson, and J. Wresnik: Monte Carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurement errors on the repeatability of VLBI positions. *J. Geodesy*, 85:39-50, 2011.
- [11] M. Bevis, S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteorology*, 33(3):379-386, 1994.
- [12] D. M. Tralli and S. M. Lichten: Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements. *Bull. Geod.*, 64:127-159, 1990.
- [13] K. Teke, J. Böhm, T. Nilsson, H. Schuh, P. Steigenberger, R. Dach, R. Heinkelmann, P. Willis, R. Haas, S. Garcia-Espada, T. Hobiger, R. Ichikawa, and S. Shimizu: Multitechnique comparison of troposphere zenith delays and gradients during CONT08. *J. Geodesy*, 85(7):395-413, 2011.
- [14] P. Poli, P. Moll, F. Rabier, G. Desroziers, B. Chapnik, L. Berre, and S. B. Healy: Forecast impact studies of zenith total delay data from European near real-time GPS stations in Météo France 4DVAR. *J. Geophys. Res.*, 112:D06114, 2007.
- [15] A. Karabatic, R. Weber, and T. Haiden: Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria. *Adv. Space Res.*, 47(10):1691-1703, 2011.
- [16] T. Nilsson, L. Gradinarsky, and G. Elgered: Water vapour tomography using GPS phase observations: Results from the ESCOMPTE experiment. *Tellus A*, 59:574-682, 2007.
- [17] M. Bender, G. Dick, M. Ge, Z. Deng, J. Wickert, H.-G. Kahle, A. Raabe, and G. Tetzlaff: Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Adv. Space Res.*, 47(10):1740-1720, 2011.
- [18] T. Nilsson and G. Elgered: Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data. *J. Geophys. Res.*, 113:D19101, 2008.

Anschriř des Autors

Dr. Tobias Nilsson, Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Austria.
E-Mail: tobias.nilsson@tuwien.ac.at

Veranstaltungskalender

International LiDAR Mapping Forum

11.-13.2.2013 Denver, Colorado, USA
www.lidarmap.org

17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl

17.-23.2.2013 Obergurgl, Ötztal, Österreich
vermessung.uibk.ac.at/veranstaltung/obergurgl.html

Dreiländertagung D-A-CH der DGPF, OVG und SGPF und 33. Wissenschaftlich- Technische Jahrestagung der DGPF

27.2.-1.3.2013 Freiburg, Deutschland
www.dgpf.de

Geoinformatik 2013 Geo together - Geoinformatik verbindet

13.-15.3.2013 Heidelberg, Deutschland
www.geoinformatik2013.de

12. Internationales 3D-Forum Lindau

19.-20.3.2013 Lindau, Deutschland
www.3d-forum.li

18. Münchner Fortbildungsseminar Goinformationssysteme

8.-11.4.2013 München, Deutschland
www.rtg.bv.tum.de/

ENC 2013 - The European Navigation Conference Navigation – Expanding our Horizons!

23.-25.4.2013 Wien, Österreich
www.enc2013.org/

6. Deutschen GeoForum 2013 Smart Cities und Geoinformationen

24.-25.4.2013 Berlin, Deutschland
www.geoforum.ddgi.de

FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability

6.-10.5.2013 Abuja, Nigeria
www.fig.net/fig2013

ISPRS Hannover Workshop 2013 High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information

21.-24.5.2013 Hannover, Deutschland
www.ipi.uni-hannover.de/ipi-workshop.html

FOSSGIS Konferenz 2013

12.-14.6.2013 Rapperswil, Schweiz
www.fossgis.de/konferenz/2013

Munich Satellite Navigation Summit 2013

18.-20.6.2013 München, Deutschland
www.munich-satellite-navigation-summit.org

RIEGL LIDAR 2013 International Airborne, Mobile, Terrestrial, and Industrial User Conference

25.-27.6.2013 Wien, Österreich
www.riegl.com

AGIT

3.-5.7.2013 Salzburg, Österreich
www.agit.at

26th International Cartographic Conference (ICC) From Pole to Pole

25.-30.8.2013 Dresden, Deutschland
www.icc2013.org

IAG Scientific Assembly 2013

1.-6.9.2013 Potsdam, Deutschland
www.iag2013.org

54th Photogrammetric Week From High Definition Point Clouds to 3D Virtual Reality Models

9.-13.9.2013 Stuttgart, Deutschland
www.ifp.uni-stuttgart.de

INTERGEO 2013

8.-10.10.2013 Essen, Deutschland
www.intergeo.de

17. Internationaler Ingenieurvermessungskurs

14.-17.1.2014 Zürich, Schweiz
www.igp.ethz.ch/iv2014/

extrem mobil



Austrian Map mobile

Topographische Landkarten
extrem mobil

Ganz Österreich auf ihrem iPhone oder iPad
(In Kürze als Android Version verfügbar)

