

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft

Beiträge zum 157. DVW-Seminar am
21. und 22. Februar 2017 in Potsdam



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft

Beiträge zum 157. DVW-Seminar am
21. und 22. Februar 2017 in Potsdam

Redaktion:
Michael Mayer
Alexander Born

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 87
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 87

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des ausgewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Webadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname (abgekürzt)]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V.
(Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe,
Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg, 2017, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-108-5
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2017
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Public Domain, www.pixabay.com

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------------	---

Session 1: Grundlagen

Urs Hugentobler	
Globale Satellitennavigationssysteme – Status und Ausblick	9
Gunter Liebsch | Joachim Schwabe | Martina Sacher | Uwe Schirmer	
Zur Zukunft der Bestimmung physikalischer Höhen	23
H. Schuh | J. Wickert | G. Dick | M. Ge | M. Ramatschi | X. Li | Z. Deng | F. Alshawaf | C. Arras | B. Männel	
Der Beitrag von GNSS zum Monitoring des Systems Erde	43

Session 2: Anwendungsaspekte

Klaus Fritzensmeier | Uwe Ehrhorn | Barbara Görres | Rolf Hollmann | Michael Mayer | Florian Pollinger	
Zum Status einer DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren	57
Barbara Görres	
Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung	71
Andriy Konovaltsev | Manuel Cuntz | Achim Hornbostel	
Bedrohung von GNSS durch Jamming und Spoofing	85
Michael Hoppe	
GNSS-Anwendungen in der Schifffahrt	93

Session 3: Auswertetechnik und Dienste

Wolfgang Söhne	
Zum Status von Precise Point Positioning (PPP)	109

Loukis Agrotis | Erik Schoenemann | Werner Enderle | Mark Caissy | Axel Ruelke The IGS Real Time Service	121
--	-----

Cord-Hinrich Jahn | Jens Riecken | Christian Trautvetter | Martin Freitag | Enrico Kurtenbach | Gisela Fabian | Hans-Georg Dick Quo vadis SAPOS®? – Zukünftige Entwicklungen des Positionierungs- dienstes der Landesvermessung	133
--	-----

Jürgen Alberding Trends der Dienst-basierten GNSS-Positionsbestimmung – Fokus: Private Anbieter	151
---	-----

Session 4: Einblicke in Praxis, Wissenschaft und Zukunftstrends

Michael Schulz | Jürgen Ruffer Was ist der Mehrwert von Multi-GNSS in der Praxis?	155
--	-----

Uwe Ehrhorn | Henning Anhalt | Rüdiger Dierks GNSS im Tagesgeschäft von Ingenieurbüros: Anwendungen im ÖbVI-Büro Ehrhorn	161
--	-----

Christian Eling | Lasse Klingbeil | Heiner Kuhlmann Von Low-Cost bis High-End: Anwendungspotenzial von OEM-GNSS-Boards	173
--	-----

Jens Wickert Fernerkundung der Erdoberfläche mit Navigationssatelliten: GNSS-Reflektometrie	191
---	-----

Vorwort

Globale Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) werden bei der Erfassung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten (PNT) in der Geodäsie und ihren Nachbardisziplinen seit vielen Jahren standardmäßig genutzt. Die dabei erzielbaren Genauigkeiten decken eine große Bandbreite ab, vom Meterbereich für einfache Navigation bis hin zum Submillimeterbereich für anspruchsvolle ingenieurgeodätische Aufgaben und die globale Geodäsie. Ein aktueller Fokus von GNSS-Anwendungen liegt zudem auf der Echtzeitfähigkeit und in der kombinierten Nutzung in Multisensorsystemen.

Diese Entwicklung ist u. a. darin begründet, dass einerseits mit GPS und GLONASS etablierte Satellitensysteme zur Verfügung stehen, die kontinuierlich modernisiert werden, und andererseits durch die im Aufbau befindlichen Galileo und Beidou hervorragende Perspektiven geboten werden. Weiterhin werden Auswertekonzepte und Dienstangebote stetig und innovativ weiterentwickelt.

Das aktuelle GNSS-Seminar will GNSS-Nutzer für die spannende Zukunft vorbereiten. Dazu wird ein aktueller GNSS-Überblick u. a. mit einem speziellen Fokus auf Galileo gegeben. Die Bestimmung von GNSS-basierten Gebrauchshöhen sowie die Beobachtung des Systems Erde durch GNSS prägen Geodäsie und Geowissenschaften; diesen Themen sind deshalb prominent platzierte Beiträge gewidmet. Ein besonderer Fokus des Seminars wird auf die Positionierungstechnik Precise Point Positioning (PPP) gelegt. Hierzu werden Grundlagen vermittelt sowie nationale und internationale Trends der Echtzeitpositionierung präsentiert. Weitere Beiträge thematisieren Sicherheits- (z. B. Jamming, Spoofing) und Zuverlässigkeitsfragen (z. B. Feldprüfverfahren, Multi-GNSS, Mehrwegeeffekte). Diese Aspekte sind mit der genutzten Hardware eng verknüpft; im Seminar werden deshalb low-cost-Empfänger, OEM-Boards und Antennen thematisiert. Praktische Einblicke in die GNSS-Nutzung in der Schifffahrt sowie im Tagesgeschäft eines Ingenieurbüros runden das Seminar ab.

Das GNSS-Seminar 2017 knüpft an frühere GPS/GNSS-Seminare des DVW an, die im ca. vierjährigen Rhythmus regelmäßig abgehalten werden, und findet – nachdem 2013 das letzte Seminar in Südwest-Deutschland (Karlsruhe) abgehalten wurde – im Nordosten Deutschlands statt: Es wird am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ durchgeführt. Der Leitung des GFZ gebührt großer Dank für die Unterstützung vor Ort.

Dem DVW Berlin-Brandenburg e. V. Landesverband danken wir für die Organisation der Abendveranstaltung und die Führung über den Telegrafenberg im Nachgang zum Seminar.

Vorwort,

Den Referenten sei für die aktive Mitgestaltung des Seminars und insbesondere für die fristgerechte Übermittlung der schriftlichen Tagungsbeiträge herzlich gedankt.

Prof. Dr. Harald Schuh (Helmholtz-Zentrum Potsdam –

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger (Universität Stuttgart)

Dr. Alexander Born (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR)

Dr.-Ing. Michael Mayer (Karlsruher Institut für Technologie KIT)



Harald Schuh



Volker Schwieger



Alexander Born



Michael Mayer

Session 1: Grundlagen

Globale Satellitennavigationssysteme – Status und Ausblick

Urs Hugentobler

1 Einführung

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) haben viele Bereiche der Wissenschaft und Gesellschaft maßgeblich beeinflusst. GPS hat die Navigation zu Land, See und in der Luft, die Vermessung und Zeithaltung revolutioniert. Auch für meteorologische Aufgaben und Überwachung des Weltraumwetters wird GNSS eingesetzt. Preiswerte GNSS-Chips werden heute in zahlreichen Geräten eingesetzt und haben den Massenmarkt erobert. Bereits heute sollen 4,5 Mia. Smartphones mit GNSS-Empfänger im Umlauf sein und haben unsere Art der Orientierung im Raum grundlegend verändert. Insgesamt sind heute rund 5 Mia. Geräte im Einsatz, davon eine knappe Million in der Vermessung (GSA 2015).

Bereits kurz nach Beginn des Raumfahrtzeitalters mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 wurde das amerikanische Transit und das russische Tsi-kada Navigationssystem entwickelt, welche auf dem Dopplerprinzip beruhten und beispielsweise zur Positionierung der Atomunterseebootflotten verwendet wurden, siehe [Abb. 1](#). Transit war als Navy Navigation Satellite System (NNSS) operationell und blieb bis 1996 im Einsatz. Das System wurde 1967 für zivile Anwendungen freigegeben und wurde zur präzisen Vermessung der Erde eingesetzt.

In den 1970er-Jahren wurde von der US Air Force die Entwicklung eines neuen Satellitennavigationssystems in Angriff genommen, dem Navigation System

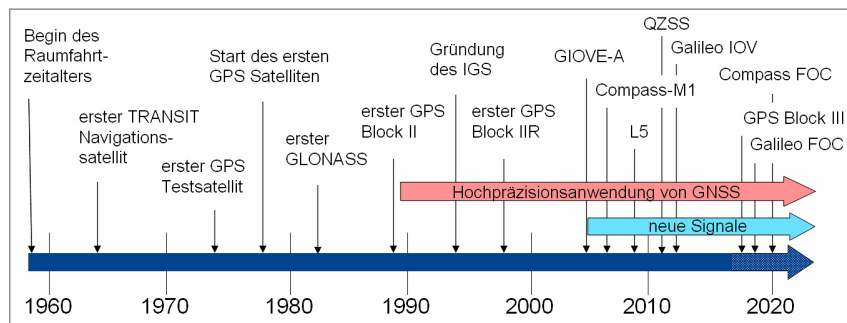


Abb. 1: Geschichte der Satellitennavigation

with Time and Ranging Global Positioning System (NAVSTAR-GPS). Der erste GPS-Satellit wurde 1978 in die Erdumlaufbahn gebracht und ab 1994 war das Navigationssystem voll einsatzfähig. Parallel dazu entwickelte die Sowjetunion ab den 1970er-Jahren das ähnliche globale Navigationssystem GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema).

Das amerikanische GPS war nach seiner Freigabe für zivile Anwendungen Mitte der 1980er-Jahre – ausgelöst durch den tragischen Abschuss eines koreanischen Jumbo Jets am 16. September 1983 über der Halbinsel Sachalin aufgrund eines Navigationsfehlers der Piloten – für 20 Jahre lang Synonym für globale Satellitennavigation. Ab Ende der 1980er-Jahre haben die ersten großen Vermessungskampagnen mit GPS stattgefunden und das Satellitensystem wurde für geodätische Hochpräzisionsanwendungen in der Geodynamik eingesetzt.

Mit dem Start des europäischen GIOVE-A Satelliten am 28. Dezember 2005, dem Aufbau des chinesischen Navigationssystems BeiDou, dem japanischen QZSS, dem indischen IRNSS sowie der Modernisierung von GPS und GLONASS hat sich die Navigationslandschaft wesentlich verändert. Mehr, neuere und bessere Signale und zusätzliche Frequenzen stehen seither zur Verfügung und Empfängersysteme für die kombinierte gemeinsame Nutzung aller Satellitennavigationssysteme werden entwickelt.

2 Stand und Entwicklung der globalen Navigationssysteme

Die folgenden Kapitel sind mit GPS und GLONASS aktuell voll ausgebauten sowie Galileo und BeiDou im Aufbau befindlichen Satellitensystemen gewidmet. Mit QZSS und IRNSS werden anschließend zwei regionale Systeme vorgestellt.

2.1 Das amerikanische GPS

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Transit-Projekt, der Entwicklung neuer Modulationstechniken und von raumfahrttauglichen Rubidium-Atomuhren wurde 1973 das Joint Program Office gegründet und die Entwicklung eines neuen globalen Satellitennavigationssystems in Angriff genommen. Timation IIIA, der erste Testsatellit mit der ersten Atomuhr und einem Sender mit Spreizspektrum-Technologie wurde 1974 in die Erdumlaufbahn gebracht. 1978 wurde der erste GPS-Block I Satellit in Umlauf gebracht. 1989 wurde der erste Block II Satellit und 1990 der erste Block IIA Satellit gestartet und 1994 wurde das globale Navigationssystem mit 24 Satelliten als voll einsatzfähig erklärt.

Seither wurde das Satellitensystem kontinuierlich weiterentwickelt und modernisiert. 1997 wurde der erste Block IIR Satellit gestartet mit verbesserten Rubidium-Atomuhren an Bord. Ab 2005 folgten die ersten Block IIR-M Satelliten,

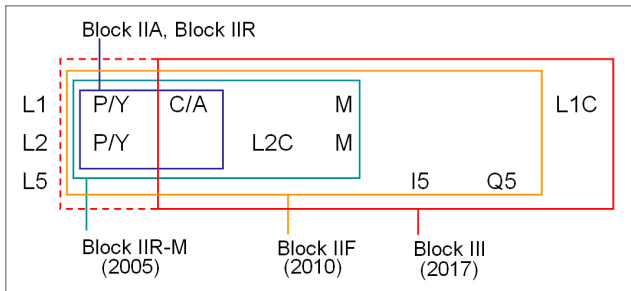


Abb. 2:
GPS-Modernisierung

welche einen zivilen Code auf der zweiten Frequenz (L2C) sowie einen neuen militärischen Code (M-Code) zur Verfügung stellten. 2010 wurde der erste Block IIF Satellit gestartet, der zusätzlich zu den zwei klassischen Frequenzen neue Signale auf einer dritten Frequenz L5 aussendet. Mit den ab 2017 geplanten Block III Satelliten soll zusätzlich ein neues ziviles Signal auf der ersten Frequenz bereitgestellt werden (L1C). Abb. 2 zeigt schematisch die Modernisierung der GPS-Signale. Ab 2020 ist im Gegensatz zu den oben genannten positiv zu wertenden GPS-Weiterentwicklungen die Verfügbarkeit des P-Codes nicht mehr garantiert.

Insgesamt wurden bis heute 70 GPS-Satelliten erfolgreich in Orbit gebracht. Abb. 3 illustriert die Belegung der sechs Bahnebenen Anfang Januar 2017 mit insgesamt 32 Satelliten. Es stehen also deutlich mehr als die nominelle Anzahl von 24 Satelliten zur Verfügung. Die Konstellation setzt sich gegenwärtig aus drei unterschiedlichen Satellitengenerationen zusammen. 20 Satelliten senden das neue L2C-Signal; 12 Satelliten senden zusätzlich Signale auf L5. Nutzer haben es also bereits bei GPS mit einem heterogenen Satellitensystem zu tun.

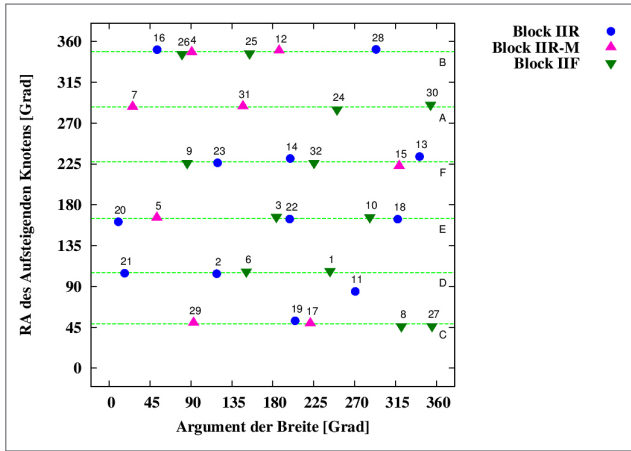


Abb. 3:
GPS-Bahnebenenbelegung
(Januar 2017);
RA: Rektaszension

Tab. 1: Charakteristika der GNSS-Konstellationen auf MEO¹-Bahnen

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou-2
Große Halbachse	26.600 km	25.500 km	29.600 km	27.900 km
Flughöhe	20.200 km	19.100 km	23.200 km	21.500 km
Umlaufperiode	11 h 58 m	11 h 16 m	14 h 04 m	12 h 53 m
Umlaufsanzahl/Tag(e)	2/1	17/8	17/10	13/7
Bahnneigung	55°	65°	56°	55°
Anzahl Bahnebenen	6	3	3	3
Zahl aktiver Satelliten (Januar 2017)	32	25	14	3

Das in den 1970er-Jahren entwickelte Konzept einer Satellitenkonstellation in mittleren Bahnhöhen mit Umlaufzeiten von einem halben Tag (Tab. 1), kohärenter Generierung aller Signale und Spreizspektrum-Technologie hat sich außerordentlich bewährt und wird auch von den neuen GNSS ohne große Änderungen angewendet. Das Konzept erlaubt es, die einem Einweg-Messsystem inhärente Aufgabe der Synchronisation der Uhren für jede Messepoche zu lösen.

2.2 Das russische GLONASS

Parallel zu GPS entwickelte die Sowjetunion ab den 1970er-Jahren das ähnliche globale Navigationssystem GLONASS. Die ersten drei Satelliten wurden 1982 in Orbit gebracht und das System wurde 1996 als voll einsatzfähig deklariert. Aufgrund der finanziellen Probleme nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion zerfiel das Navigationssystem, bis 1995 nur noch sieben Satelliten operationsfähig waren. Nach einem Beschluss der russischen Regierung 2001 wurde das Satellitensystem neu aufgebaut und besteht seit 2011 wieder aus einer vollständigen Konstellation von 24 Satelliten. Abb. 4 zeigt die gleichmäßige Verteilung von 25 GLONASS-Satelliten über die drei Bahnebenen; darunter befinden sich auch zwei neue GLONASS-K Satelliten.

Während die bis 2008 verfügbaren Satelliten der ursprünglichen Baureihe ein offenes Signal auf der ersten Frequenz (L1OF) sowie ein Hochpräzisionssignal für autorisierte Nutzer auf zwei Frequenzen bereitstellten (L1SF und L2SF), senden die ab 2001 in Orbit gebrachten GLONASS-M Satelliten ein zusätzliches offenes Signal auf der zweiten Frequenz aus (Abb. 5).

¹ MEO: Mean Earth Orbiter; Satelliten, die in einer Umlaufbahn von 10.000 km bis 30.000 km Höhe die Erde umkreisen.

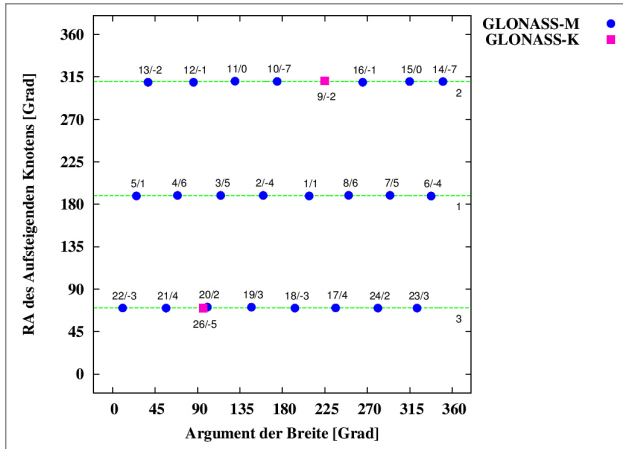


Abb. 4:
GLONASS-Bahnen-
ebenenbelegung
(Januar 2017)

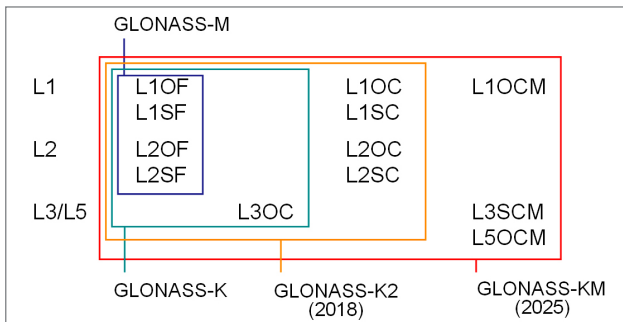


Abb. 5:
GLONASS-
Modernisierung

Die klassischen GLONASS-Signale beruhen auf dem FDMA (Frequency Division Multiple Access) Konzept, welches eine Unterscheidung der Satelliten über deren Frequenz erlaubt. Mit dem ersten Satelliten der neuesten Baureihe GLONASS-K, der im Februar 2011 in Orbit gebracht wurde, steht nun auch ein offenes CDMA (Code Division Multiple Access) auf einer dritten Frequenz zur Verfügung (L3OC). Auch GLONASS-M Satelliten, welche ab 2014 gestartet werden, senden dieses neue Signal aus, welches Satelliten – wie bei allen anderen Navigationssystemen (z. B. GPS) – nicht durch die Frequenz (FDMA) sondern durch unterschiedliche Codes (CDMA) identifiziert.

GLONASS-K2 Satelliten mit weiter verbesserten Uhren und zusätzlichen Signalen sollen ab 2018 die Konstellation ergänzen. Die Satelliten sollen zusätzliche offene und verschlüsselte CDMA-Signale auf den ersten beiden Frequenzen bereitstellen. Satelliten der GLONASS-KM Serie sind für nach 2025 in Planung und sollen modernisierte CDMA Signale auf den GPS-Frequenzen L1 und L5 bzw. den Galileo-Frequenzen E1, E5a und E5b verfügbar machen. GLONASS

wird damit mit dem amerikanischen und dem europäischen GNSS interoperable Signale aussenden, was deren gemeinsame Nutzung vereinfacht.

2.3 Das europäische Galileo

1999 hat der Rat der Europäischen Union den Aufbau eines unabhängigen europäischen Satellitennavigationssystems unter ziviler Kontrolle beschlossen. Dies sollte Europa zu mehr Unabhängigkeit bei einer wichtigen Schlüsseltechnologie verschaffen. Die erste Phase des Galileo-Programms wurde 2003 zwischen EU und ESA vereinbart. Ursprünglich war geplant, die Kosten des Systems durch eine *Public Private Partnership* zu finanzieren, wobei 2/3 der Kosten von privaten Konzessionären getragen worden wären, die das System mit Profit betrieben hätten. 2006 musste das Scheitern dieses Finanzierungskonzepts eingestanden werden. Im darauf folgenden Jahr haben die EU-Finanzminister beschlossen 3,4 Mia. Euro aus öffentlichen Mitteln für den Aufbau von Galileo zu verwenden, welche ursprünglich im EU-Budget für Landwirtschaft und Forschung vorgesehen waren. 2009 war der Aufbau des Systems um fünf Jahre im Verzug und die ursprünglich für Definition, Entwicklung, Validierung und Aufbau geschätzten Kosten von 3,33 Mia. Euro um 2,25 Mia. Euro überschritten. Heute werden die Gesamtkosten auf ca. 10 Mia. Euro geschätzt.

Am 28. Dezember 2005 wurde der erste Testsatellit GIOVE-A in Orbit gebracht und im April 2008 folgte GIOVE-B. Die beiden Satelliten wurden zum Testen der Technologie, zur Überprüfung des Gesamtsystems, zur Untersuchung der Weltraumbedingungen in der Flughöhe von 23.200 km sowie zur Sicherung der bei der International Telecommunication Union (ITU) reservierten Sendefrequenzen eingesetzt. Beide Satelliten sind seit Mitte 2012 außer Betrieb.

Im Oktober 2011 wurden schließlich die ersten beiden Satelliten der In-Orbit Validation (IOV) Phase gestartet. Im August 2014 wurden dann die ersten beiden Satelliten der Full Operational Capability (FOC) Phase in Orbit gebracht. Aufgrund eines Versagens der Drittstufe der russischen Trägerrakete haben sie allerdings die geplante Flughöhe nicht erreicht. Dank einer Reihe von Manövern konnte die mittlere Höhe von 26.200 km auf 28.000 km angehoben werden. Die Satelliten sind voll im Betrieb und können genutzt werden, obwohl sie auf unhealthy gesetzt sind. Die beiden Satelliten mit hochstabilen Atomuhren an Bord und auf Bahnen mit einer Exzentrizität von 0,156 sollen zur Verfeinerung der relativistischen Rotverschiebung genutzt werden (Delva et al. 2015).

Am 17. November 2016 wurden die bis jetzt vier letzten Satelliten erfolgreich gestartet. Sie befinden sich in der Kommissionierungsphase und sollen im Mai 2017 in Betrieb gehen. Damit sind heute insgesamt 18 Galileo-Satelliten im Orbit. Da einer der IOV-Satelliten aufgrund eines technischen Defekts nur noch auf einer Frequenz sendet, können gegenwärtig für geodätische Anwendungen

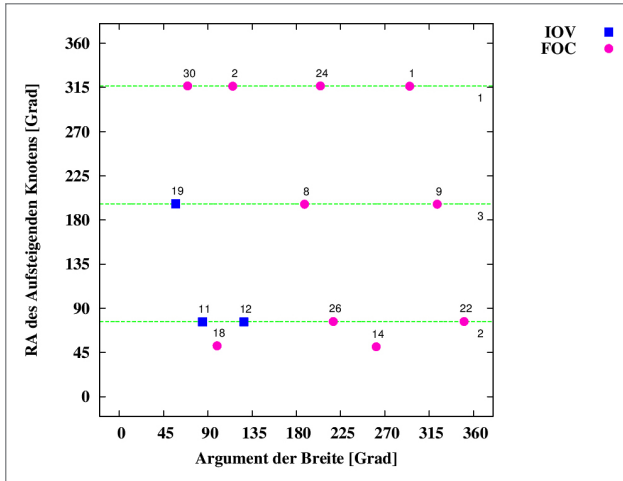


Abb. 6:
Galileo-Bahnebenenbelegung
(Januar 2017)

13 Satelliten genutzt werden, deren Verteilung über die drei Bahnebenen in Abb. 6 illustriert ist. Das gesamte Satellitensystem mit 24 Satelliten sowie sechs Reservesatelliten soll 2020 voll einsatzbereit sein.

Am 15. Dezember hat die in Prag installierte europäische GNSS Agentur (GSA) den Vertrag zum Betrieb des Satellitensystems für weitere zehn Jahre an die Münchner Firma Spaceopal vergeben, einem Konsortium aus dem DLR Gesellschaft für Raumfahrtanwendungen GfR mbH und der italienischen Telespazio S.p.A. mit Kontrollzentren in Oberpfaffenhofen und Fucino. Dies markiert den Übergang des Galileo-Systems von der Testphase in die Servicephase. Aktuell sind ein frei verfügbarer Dienst (Open Service, OS), der öffentlich regulierte Dienst (Public Regulated Service, PRS) und der Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue, SAR) nutzbar.

2.4 Das chinesische BeiDou

1993 hat die chinesische Regierung dem Satellitennavigationsprogramm zugestimmt, um Anforderungen zur nationalen Sicherheit zu erfüllen und die nationale technologische Entwicklung zu fördern. Die ersten beiden Satelliten des Experimentalsystems BeiDou-1 wurden 2000 in Orbit gebracht. Das Messprinzip beruhte auf Zweiweg-Laufzeitmessungen zwischen dem Nutzerterminal, den zwei geostationären Satelliten, drei Bodenstationen sowie einer zentralen Kontrollstation. In der Kontrollstation wurde die 2D-Position berechnet und über einen Satelliten zurück zum Nutzer gesendet. Der Nutzer benötigte neben einem Empfänger daher auch einen Sender und die Anzahl Nutzer, die gleichzeitig bedient werden konnten, war auf 150 beschränkt. Insgesamt wurden

vier BeiDou-1 Satelliten in Orbit gebracht. Der letzte wurde 2012 außer Betrieb genommen.

Ab 2007 wurden Satelliten des Nachfolgesystems BeiDou-2 in Orbit gebracht. Das System umfasst heute insgesamt 15 funktionstüchtige Satelliten, neben drei Satelliten in mittlerer Höhe können Signale von sechs geostationären Satelliten sowie sechs Satelliten auf geneigten geosynchronen Bahnen empfangen werden. Das System enthält also eine starke regionale Komponente. Für den asiatisch-pazifischen Raum wurde am 27. Dezember 2012 FOC deklariert. Ab 2015 wurden die ersten Satelliten der dritten Generation Beidou-3 gestartet. Mittlerweile sind zwei geosynchrone und drei geostationäre Satelliten dieser Generation im Orbit. Die meisten Empfänger können allerdings die Signale dieser Satelliten noch nicht tracken. FOC für globale Nutzer soll 2020 erreicht werden.

Die von BeiDou ausgesendeten Frequenzen überlappen mit den Galileo-Signalen E1, E5b und E6, sind aber nicht voll kompatibel. Voraussichtlich werden die von den BeiDou-3 Satelliten ausgesendeten Frequenzen so angepasst, dass sie mit E1, E6 und E5b zusammenfallen und interoperabel genutzt werden können.

2.5 Das japanische QZSS

Während die Bahnen aller anderen GNSS-Satelliten fast kreisförmig sind, werden für das 2002 von der japanischen Regierung beschlossene Konzept des regionalen Quasi Zenith Satellite System (QZSS) geosynchrone Bahnen mit einer Exzentrizität von 0,075 genutzt. Der am 11. September 2010 gestartete und bis jetzt einzige Satellit ändert damit seine Flughöhe auf der um 41 Grad geneigten Bahn zwischen 32.600 und 38.900 km. Bis 2018 sollen insgesamt vier Satelliten im Orbit sein, wovon sich drei auf elliptischen geosynchronen Bahnen sowie einer auf einer geostationären Bahn bewegt. Bis 2023 soll das System auf insgesamt sieben Satelliten ausgebaut werden.

Mit drei Satelliten auf den exzentrischen Bahnen befindet sich immer mindestens einer nahe dem Perigäum in der Nähe des Zenits über Japan zur Unterstützung der Navigation in den Straßenschluchten z. B. von Tokyo. Die von QZSS verwendeten sechs Signale sind voll kompatibel mit jenen von GPS: Es wird ein L1-C/A-Code, ein L2C- sowie bereits heute ein L1C-Signal ausgesendet. Ein Signal wird auf L5 ausgesendet sowie ein experimentelles Signal (LEX) kompatibel zu Galileos E6-Signal. Zudem wird ein weiteres Signal (L1-SAIF) durch eine zweite Navigationsantenne ausgesendet. Dies erlaubt als neue Anwendung die präzise Berechnung der Attitude² des Satelliten durch Differenzierung der Beobachtungen von mehreren Bodenstationen der beiden Satellitenantennen (Hauschild et al. 2012). Kenntnis der Attitude ist wichtig zur Berechnung des

2 Attitude: dt. Orientierung im Raum

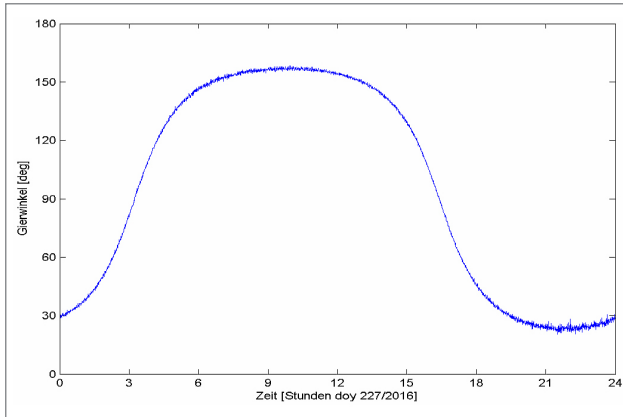


Abb. 7:
Gierbewegung
des ersten QZSS-
Satelliten aus den
Beobachtungen
der beiden Navi-
gationsantennen
des Satelliten
durch sieben
MGEX-Stationen

Strahlungsdruckes auf den Satelliten sowie zur Berechnung des Offsetvektors des Antennenphasenzentrums der Navigationsantenne zum Massenzentrum. [Abb. 7](#) zeigt die mit sieben Stationen rekonstruierte Gierbewegung³ des Satelliten über einen Tag.

2.6 Das indische IRNSS

Die indische Regierung hat 2006 den Aufbau des Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) beschlossen, um unabhängig von anderen Navigationssystemen zu werden. Alle Komponenten – von den Satelliten bis zu den Nutzerempfängern – werden in Indien hergestellt. Der erste Satellit des Systems wurde am 1. Juli 2013 mit einer indischen PSLV-Rakete vom südostindischen Raumfahrtzentrum Satish Dhawan Space Center in Sriharikota aus gestartet. Seit dem letzten Start am 28. April 2016 ist das regionale System mit sieben Satelliten komplett und wurde in NAVIC (Navigation Indian Constellation, auch Navigator in Sanskrit) umbenannt. Drei Satelliten befinden sich auf geostationären Bahnen und vier Satelliten auf geosynchronen Orbits mit 29 Grad Bahnneigung. Die Satelliten senden Signale auf der GPS-Frequenz L5 bzw. der Galileo-Frequenz E5a sowie im S-Band bei 2492,08 MHz (Wellenlänge: 12 cm) aus. Für geodätische Anwendungen außerhalb Indiens ist das System noch nicht nutzbar, da noch keine S-Band-Empfänger und Antennen verfügbar sind.

³ engl. yaw

3 Geodätische Multi-GNSS-Empfänger

Das vorhergehende [Kap. 2](#) fokussierte auf Satelliten der Navigationssysteme. Dieses Kapitel geht auf geodätische Multi-GNSS-Empfänger und auf internationale Entwicklungen zur Bereitstellung konsistenter Multi-GNSS-Produkte ein.

3.1 Das IGS Multi-GNSS-Pilotprojekt

Das Multi-GNSS-Experiment (MGEX) wurde 2012 vom IGS (International GNSS Service) gestartet, um alle verfügbaren Signale der neuen GNSS-Systeme

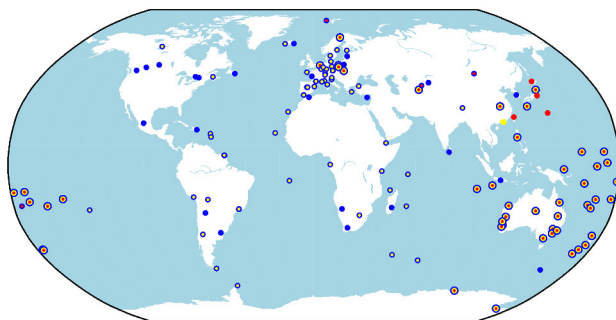


Abb. 8:
Aktive Multi-GNSS-Stationen im Multi-GNSS-Pilotprojekt (MGEX) des IGS im Januar 2017.
Blau: Galileo; gelb: BeiDou; rot: QZSS

zu messen und zu analysieren, aber auch um geodätische Multi-GNSS-Empfänger und -Antennen zu verstehen und Softwarepakete zur Datenanalyse für die neuen Satellitensysteme und Signale zu erweitern. Im Rahmen des Projektes werden Trackingdaten eines globalen Multi-GNSS-Stationsnetzes aufgezeichnet und der Allgemeinheit frei verfügbar gemacht. Sieben Analysezentren arbeiten an der Generierung konsistenter präziser Bahnen und Uhrenkorrekturen der neuen Satelliten als IGS-Produkte. Das MGEX-Trackingnetz umfasst mittlerweile 200 aktive Multi-GNSS-Stationen ([Abb. 8](#)). Im Januar 2017 liefern insgesamt 194 Empfänger Galileo-Signale, 142 Empfänger BeiDou-Signale und 92 Empfänger QZSS-Signale. 2016 wurde MGEX von einem Experiment in ein Pilotprojekt überführt.

3.2 Geodätische Empfänger in MGEX

[Tab. 2](#) führt die Multi-GNSS-Empfänger des MGEX-Netzes auf und listet die getrackten Satellitensysteme und Frequenzen. Die meisten Hersteller geodätischer Empfänger haben mittlerweile Geräte im Sortiment, die neben GPS und GLO-NASS mindestens ein weiteres GNSS tracken und viele davon sind in MGEX verfügbar.

Tab. 2: MGEX-Empfänger und bereitgestellte Systeme und Frequenzen
(G: GPS; R: GLONASS; E: Galileo; C: BeiDou; J: QZSS; I: IRNSS; S: SBAS⁴)

Empfänger	System Frequenz	G 1 2 5	R 1 2 3	E 1 5	C 1 2 3	J 1 2 5 X	I 5	S 1 5
JAVAD TRE 3 DELTA		x x x	x x .	x x	. . .	. . . .	.	. .
JAVAD TRE G3TH DELTA		x x x	x x x	x x	x x .	x x x x	.	x x
LEICA GR10		x x x	x x .	x x	x x .	x x x x	.	x .
LEICA GR25		x x x	x x .	x x	x x .	. . . .	.	x .
LEICA GR50		x x x	x x .	x x	x x .	x x x x	.	. .
LEICA GRX1200+GNSS		x x x	x x .	x x	. . .	. . . .	.	x .
NOV OEM6		x x x	x x .	x x	. . .	. . . .	.	x .
SEPT ASTERX3		x x x	x x .	. .	x x .	. . . .	.	. .
SEPT POLARX4TR		x x x	x x x	x x	x x .	x x x x	.	x x
SEPT POLARX4		x x x	x x x	x x	x x .	x x x x	.	x .
SEPT POLARX5		x x x	x x x	x x	x x x	x x x x	x	. .
SEPT POLARXS		x x x	x x .	x x	x x .	x x x x	.	. .
TRIMBLE NETR9		x x x	x x x	x x	x x x	x x x x	.	x x

Einer der Empfänger liefert bereits L5-Beobachtungen der IRNSS-Satelliten; mehrere Instrumente stellen Messungen der GLONASS L3 CDMA Signale zur Verfügung. Bei den gemessenen Signalen gibt es allerdings eine große Vielfalt, was aufgrund unterschiedlicher Signal-Biases eine Herausforderung bzgl. der konsistenten Kombination aller Messungen darstellt.

Abb. 9 zeigt exemplarisch die um 0 Uhr des 31. Dezembers 2016 am Himmel über der Permanentstation Wettzell sichtbaren GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou Satelliten sowie die entsprechenden Spuren für die folgenden 24 Stunden. Tab. 3 listet die entsprechende Anzahl an Satelliten in Abhängigkeit der einzelnen Systeme auf.

4 Ausblick

Bald werden wir über 100 GNSS-Satelliten zur Verfügung haben. Bereits heute stehen in unseren Breiten zwischen 20 und 30 Satelliten jeden Tag zur Verfügung.

⁴ Satellite-based Augmentation System

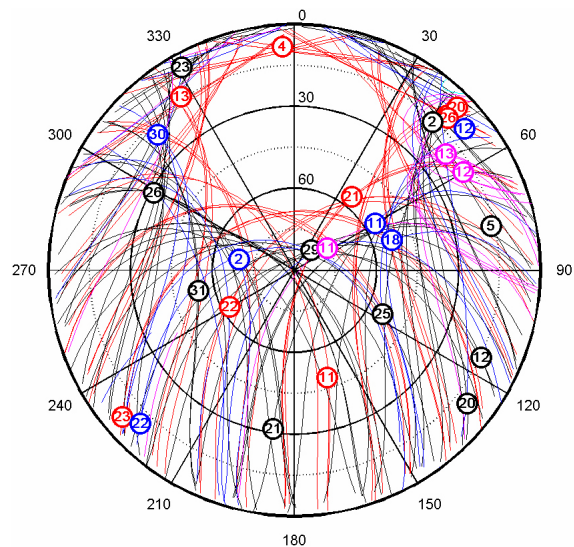


Abb. 9: Skyplot der in Wettzell am 31. Dezember 2016 beobachteten Satelliten. Schwarz: GPS; rot: GLONASS; blau: Galileo; pink: BeiDou

Tab. 3: Satellitenanzahl am 31. Dezember 2016 in Wettzell; 5° über Horizont

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Minimal	8	6	2	2
Maximal	13	10	6	5

Zudem wird eine Vielzahl neuer Signale auf mehr Frequenzen ausgesendet und geodätische Empfänger sind verfügbar, welche diese Signale aufzeichnen können. An der konsistenten Kombination, z. B. zum Lösen von Mehrdeutigkeiten über interoperable Systeme, wird gearbeitet.

Ebenfalls gearbeitet wird an der Entwicklung verbesserter Strahlungsdruckmodelle, da die seit über 20 Jahren genutzten empirischen GPS-Modelle für diese neuen Satelliten nicht ohne Weiteres verwendet werden können. So führt z. B. die Nutzung des klassischen Strahlungsdruckmodells, wel-

ches GPS-Bahnen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern erlaubt, für Galileo-Satelliten zu Bahnfehlern von bis zu 20 cm. Grund ist die unterschiedliche Form der Satelliten und der damit einhergehende stärker variable Querschnitt des Satellitenkörpers zur Sonne (Montenbruck et al. 2015).

Die GNSS-Satelliten werden mit immer stabileren Atomuhren ausgerüstet. Für geodätische Anwendungen wird deren Stabilität allerdings nicht genutzt. Die Satelliten- und Empfängeruhren werden epochenweise entweder explizit geschätzt oder implizit durch Bildung von Doppeldifferenzen bestimmt. In Zukunft könnte die epochenweise Elimination der Satellitenuhren nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Abb. 10 gibt ein Beispiel der Verbesserung der Bahnprädiktion für Galileo bei Nutzung der Stabilität der Wasserstoffmaser an Bord der Satelliten für die Bestimmung der Satellitenbahnen.

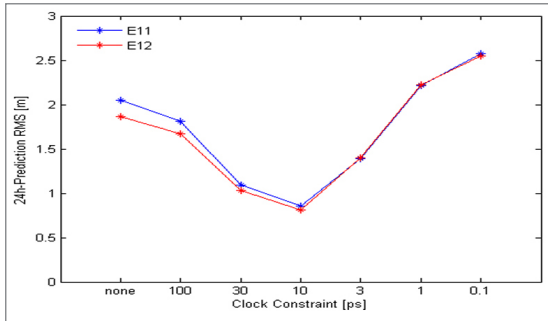


Abb. 10: Prädiktionsfehler der Bahnen von Galileo 101 und 102 über 24 Stunden beim Zwang der geschätzten Uhrenparameter auf ein lineares Modell

Sind die Satellitenuhren stabil genug, so dass sie modelliert werden können, kann die Anzahl zu schätzender Parameter stark reduziert sowie die starke Korrelation zwischen radialen Bahnfehlern und Satellitenuhrkorrekturen verringert werden. Für das der Abb. 10 zugrundeliegende Experiment wurden zur Bestimmung

der Bahnparameter aus den Beobachtungen eines Netzes mit 37 MGEX-Stationen die Uhrkorrekturen der ersten beiden IOV-Satelliten durch Zwangsbedingungen in ein lineares Uhrenmodell eingepasst. Zwangsbedingungen im Bereich von 10 ps führen zu einer Verbesserung der gerechneten Bahnen.

Am 27. November 2016 wurden, wie in Kap. 2.3 beschrieben, vier weitere Galileo-Satelliten gestartet, welche perfekt auf ihrer Bahn ausgesetzt wurden. Die nächste Generation der Galileo-Satelliten ist heute bereits in Planung. In Diskussion sind die Verwendung von Ionentriebwerken, die Nutzung von präzisen Zwischensatellitenbeobachtungen zur Distanzmessung und Uhrensynchronisation, der Einbau von Akzelerometern zur Messung von Strahlungsdruck und Manövern, noch stabilere Uhren. Die GNSS-Systeme werden sich auch in Zukunft ständig weiterentwickeln und neue Möglichkeiten auch für Präzisionsnutzer bieten. Die optimale kombinierte Nutzung der Systeme wird allerdings eine Herausforderung für Gerätehersteller und Nutzer bleiben.

Literatur

- Delva, P.; Hees, A.; Bertone, S.; Richard, E.; Wolf, P.: Test of the gravitational redshift with stable clocks in eccentric orbits: application to Galileo satellites 5 and 6. *Classical and Quantum Gravity*, 32. DOI: [10.1088/0264-9381/32/23/232003](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/23/232003), 2015.
- GSA 2015: GNSS Mass Market Report. Issue 4, European GNSS Agency. DOI: [10.2878/251572](https://doi.org/10.2878/251572). www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4_0.pdf.
- Hauschild, A.; Steigenberger, P.; Rodriguez-Solano, C.: QZS-1 Yaw Attitude Estimation Based on Measurements from the CONGO Network. *Navigation*, 59(3), 237–248. DOI: [10.1002/navi.18](https://doi.org/10.1002/navi.18), 2012.

Montenbruck, O.; Steigenberger, P.; Hugentobler, U.: Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites. *Journal of Geodesy*, 89(3), 283–297. DOI: [10.1007/s00190-014-0774-0](https://doi.org/10.1007/s00190-014-0774-0), 2015.

Montenbruck, O.; Steigenberger, P.; Khachikyan, R.; Weber, R.; Langley, R. B.; Mervart, L.; Hugentobler, U.: IGS-MGEX: Preparing the Ground for Multi-Constellation GNSS Science. 4th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, ESA, 2013.

Kontakt

Univ.-Prof. Dr. phil. nat. Urs Hugentobler
Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
urs.hugentobler@tum.de



Zur Zukunft der Bestimmung physikalischer Höhen

Gunter Liebsch | Joachim Schwabe | Martina Sacher | Uwe Schirmer

1 Einführung

Seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts werden Höhennetze der 1. Ordnung in Deutschland auf Grundlage des geometrischen Präzisionsnivellements realisiert. Auch heutzutage bildet dieses Verfahren die Grundlage für die Höhennetze in nahezu allen europäischen Ländern. Dabei hat sich an den grundlegenden Beobachtungsverfahren des geometrischen Nivellements nichts geändert, wohl aber haben sich sowohl Messtechnik (Sensorik der Instrumente, Software) als auch Auswertansätze (z. B. Berücksichtigung zeitlich variabler Effekte wie Ozeanauflastzeiten etc.) erheblich weiterentwickelt.

Der wesentliche Fortschritt des geometrischen Nivellements wurde durch die automatisierte, digitale Ablesung erreicht. In [Abb. 1](#) ist beispielhaft ein Ni-



Abb. 1: Modernes Nivellierinstrument neuester Generation mit elektronischer Libelle und kameragestützter Anzielung

vellierinstrument neuester Generation abgebildet. Durch die automatisierte Ablesung wird der Beobachtungsvorgang deutlich beschleunigt. Beobachtungsfehler, die von der Beobachtungsdauer abhängen wie z. B. die Einsinkeffekte von Latte und Instrument, werden hierdurch verringert. Beobachterbedingte Ablesefehler oder Fehler in der Datenübertragung entfallen durch den automatisierten Datenfluss. Der logistische Aufwand bei der hochpräzisen Höhenübertragung ist jedoch, trotz technischer

Möglichkeiten wie dem motorisierten Nivellement, nach wie vor hoch (Instrumentenaufstellung ca. alle 60 m, Bereitstellung der notwendigen Schwereinformation). Zudem erfordert das gegenüber früheren Messkampagnen immens gestiegene Verkehrsaufkommen zusätzliche Aufwendungen, um die Sicherheit der Messtrupps zu gewährleisten. Eine grundhafte Neuvermessung der Nivellementslinien bleibt daher ein zeitaufwändiges und kostenintensives Unterfangen,

dessen Notwendigkeit – nicht zuletzt angesichts der wachsenden Bedeutung der mittlerweile etablierten Verfahren zur satellitengestützten Positionsbestimmung – aus wirtschaftlichen Erwägungen hinterfragt wird.

So hat insbesondere die Bereitstellung von Korrekturdaten über Mobilfunk GNSS-Echtzeitanwendungen erst flächendeckend verfügbar gemacht. Im Zusammenspiel mit der Weiterentwicklung des Raumsegmentes sowie verbesserter Empfängertechnologie und Software führt dies letztendlich dazu, dass dreidimensionale GNSS-Koordinatenbestimmung immer präziser, zuverlässiger (Genauigkeit und Verfügbarkeit), schneller und damit wirtschaftlicher wird.

Nach wie vor werden aber für die meisten praktischen Anwendungen keine geometrischen, sondern physikalische Höhen, d. h. Höhen mit Bezug auf den Meeresspiegel bzw. das Erdschwerefeld, benötigt. Naheliegende Beispiele hierfür sind die Planung, der Bau und die Überwachung von Hochwasserschutzanlagen und sonstigen wasserwirtschaftlichen Ingenieursbauwerken, aber auch der Tunnelbau oder die Herstellung von Hochgeschwindigkeitstrassen für die Eisenbahn. Für die Transformation der mittels GNSS bestimmten ellipsoidischen Höhen in die in Deutschland gebräuchlichen Normalhöhen ist bekanntlich ein hochauflösendes Quasigeoidmodell notwendig (Abb. 2). Als Höhenbezugsfläche im integrierten geodätischen Raumbezug kann dieses Modell nicht für sich allein stehen, sondern muss an die entsprechenden Referenzrahmen und verschiedenen Systemdefinitionen der geometrischen Position (GNSS-Messung) und der physikalischen Höhe (Nivellement) angepasst werden. Zudem sind die geodätischen Messverfahren (GNSS, Nivellement, Schweremessungen) auf verschiedenen räumlichen Wellenlängen nicht frei von Fehlereinflüssen. Eine optimale Verknüpfung von geometrischen Positionen und physikalischen Höhen ist aus diesen Gründen mit einem gravimetrischen Quasigeoidmodell, d. h. einem Modell, das allein aus Schweremessungen berechnet wurde, nicht möglich. Hier-

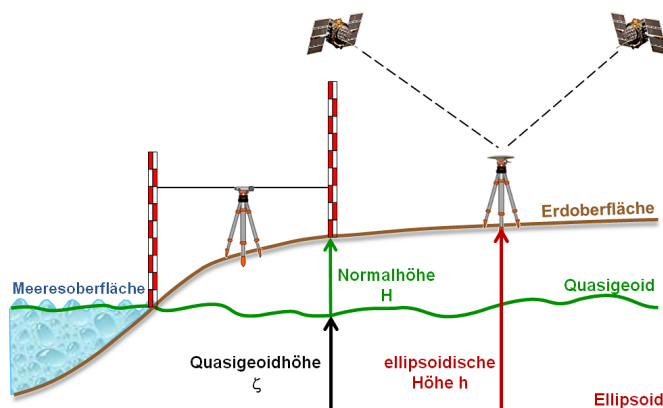


Abb. 2:
Zusammenhang zwischen geometrischem und physikalischem Höhenbezug

zu sind „Passpunkte“ notwendig, auf denen Informationen der verschiedenen geodätischen Messverfahren vorliegen. Diese Festpunkte werden in der deutschen Landesvermessung als Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) bezeichnet (AdV 2014). Sie ermöglichen eine unabhängige Fehlerabschätzung des gravimetrischen Quasigeoidmodells und gewährleisten eine optimale Anpassung des gravimetrischen Quasigeoidmodells an die jeweiligen Referenzrahmen der Landesvermessung. Die GGP sind somit eine wesentliche Grundlage für die Bereitstellung einer präzisen Höhenbezugsfläche zur Transformation ellipsoidischer in physikalische Höhen. Typische Beispiele für diese „angepassten“ Quasigeoidmodelle sind die verschiedenen Versionen des German Combined Quasigeoid.

Gerade für die Höhenbestimmung mittels GNSS-Messungen ist deshalb der Schritt zu einer integrierten bzw. gesamtheitlichen Betrachtungsweise des Raumbezugs unerlässlich. Die bisherige Trennung der Festpunktfelder hinsichtlich Lage, Höhe und Schwere ist nicht optimal und vor dem Hintergrund des heutzutage erreichbaren Genauigkeitsniveaus und der daraus ableitbaren Fragestellungen auch nicht ausreichend.

Diesem Anspruch hat auch die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) mit dem Projekt zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) Rechnung getragen. Die Planungen für das Projekt wurden im Jahr 2002 begonnen. Mit der offiziellen Einführung der Ergebnisse zum 1. Dezember 2016 und der Bereitstellung für die Anwender hat die AdV die Anforderungen an einen modernen integrierten geodätischen Raumbezug umgesetzt.

Die vorliegende Abhandlung soll einen Überblick über die Hintergründe zur Einführung des integrierten geodätischen Raumbezugs 2016 in Deutschland geben. Im zweiten Kapitel werden dazu zunächst einige wesentliche Aspekte des integrierten Raumbezuges 2016 in zusammengefasster Form dargestellt. In den folgenden Kapiteln wird dann speziell auf die Erneuerung des DHHN und die Auswirkungen auf das GCG2016 eingegangen. Den Abschluss bilden praxisrelevante Anmerkungen zu geometrischen Bezugsrahmen für GNSS-Beobachtungen sowie eine Zusammenfassung mit Ausblick.

2 Der neue Raumbezug 2016

Bereits zu Beginn der Planungen der DHHN-Erneuerung, wurde die Frage diskutiert, ob sich der Erhalt der Nivellementsnetze überhaupt noch lohnt, oder ob man sich für Einzelvermessungen mit Zentimetergenauigkeit nicht gleich gänzlich auf „GNSS-Nivellement“ verlassen könne. Länder wie die USA und Kanada haben sich in den vergangenen Jahren für diesen Weg entschieden und gründen ihren Höhenbezug auf ein Geoidmodell als Bezugsfläche. Jedoch handelt es sich

dabei um große Flächenländer, in denen bislang Dichte und Güte der Höhennetze in weiten Landesteilen nicht mit europäischen Maßstäben vergleichbar sind. Nivellements im kontinentalen Maßstab sind anfällig für systematische Fehler. So treten in den USA zwischen Ost- und Westküste bzw. entlang der Küsten Fehler von einem Meter und mehr auf. Die Realisierung eines homogenen Bezugsrahmens mittels eines einheitlichen Geoidmodells bedeutet vor diesem Hintergrund eine beträchtliche Genauigkeitssteigerung.

Im Vergleich dazu sind die Fehler des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN92) zwar klein, die Anforderungen an die Genauigkeit des Höhenbezuges in Deutschland sind aufgrund der wesentlich dichteren Infrastruktur allerdings auch deutlich höher. Das DHHN92 wurde nach der deutschen Wiedervereinigung aus den Messungen der bestehenden Netze – dem Deutschen Haupthöhennetz 1985 (DHHN85) und dem staatlichen Nivellementsnetz 1976 (SNN76) sowie einigen Verbindungsmessungen – berechnet. Der vergleichsweise lange Beobachtungszeitraum von 1974 bis 1992, das Alter der Nivellements von bis zu 30 Jahren und zunehmende Punktverluste waren grundlegende Schwächen des DHHN92. Die GNSS-Messungen wiesen demgegenüber eine wesentlich höhere Aktualität auf. Ellipsoidische und physikalische Höhen bezogen sich mithin nicht auf dieselbe Messepoche. Eine aus solchen nicht epochengleichen Messungen abgeleitete Höhenbezugsfläche konnte, insbesondere mit Blick auf geodynamische Effekte (anthropogene oder natürliche Hebungen bzw. Senkungen), nicht homogen und konsistent genug für zukünftige Genauigkeitsanforderungen sein. Untersuchungen zeigten, dass die verfügbaren regionalen gravimetrischen Geoidmodelle regional um bis zu ± 5 cm von den aus GNSS und Nivellement abgeleiteten Höhenanomalien abwichen.

Zu Beginn des DHHN-Projektes reichte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit *rein gravimetrischer* Geoidmodelle an den in Deutschland mit dem Präzisionsnivellement erreichten Standard noch nicht heran. So waren die modernen Satellitenschwerefeldmissionen, welche heute die Grundlage hochauflösender kombinierter globaler Schwerefeldmodelle bilden, gerade erst gestartet (GRACE) bzw. noch in Planung (GOCE). Auch Galileo befand sich noch in der Anfangsphase. Die verfügbaren flächenhaften Schweredaten waren lückenhaft und z. T. veraltet.

In der Folge wurde letztlich entschieden, sich nicht bereits zu diesem Zeitpunkt ausschließlich auf die neue Technologie zu verlassen, sondern (zunächst) eine Teilerneuerung des DHHN 1. Ordnung mit der Methode des Präzisionsnivellements durchzuführen (Feldmann-Westendorff et al. 2016). Eine wichtige Motivation für das Projekt war die gleichzeitige Durchführung der weiteren für den Raumbezug relevanten Beobachtungstechniken (GNSS- und Schweremessungen). Letztendlich wurde damit die gesamte geodätische Infrastruktur des amtlichen Raumbezuges auf eine moderne und aktuelle Grundlage gestellt. Die Konzeption des Projektes zur Erneuerung des DHHN ermöglicht einen unab-

hängigen Vergleich der beiden Techniken zur Höhenbestimmung sowie eine Betrachtung der Fehlercharakteristik. Die integrierte Betrachtungsweise und die Komplexität der Arbeiten sind darüber hinaus ein wichtiger Aspekt der Qualitätssicherung der Ergebnisse. Mit dieser Entscheidung bleibt das klassische Präzisionsnivelement auch weiterhin das primäre Messverfahren zur Bestimmung des Höhenbezugsrahmens 1. Ordnung in Deutschland. Gleichzeitig wurden aber auch wichtige Grundlagen für die Höhenbestimmung mittels GNSS und Geoidmodell durch die Nutzer und bei Anwendungen in Folgeordnungen des DHHN gelegt.

Bei der Auswertung der Messungen für den Raumbezug 2016 wurden die bewährten theoretischen Grundlagen und Standards sowie die Datumsdefinitionen der Netze (ETRS89, NAP) beibehalten, d. h. die grundsätzlichen *Systemdefinitionen*, die den Referenzrahmen des amtlichen Raumbezugs zugrunde liegen – ETRS89 bzw. Normalhöhen in Bezug auf den Pegel Amsterdam –, wurden *nicht geändert*. Die neuen konsistenteren Koordinaten, Höhen, Schwerewerte und Modelle sind vielmehr das Ergebnis der aktualisierten Messungen, der Koordination und der hohen Qualität der Messungsdurchführung – bis hin zu den Feldanweisungen – und einer verbesserten Methodik in der Auswertung. So wurden die Messungen zur Erneuerung des DHHN in den Jahren 2006 bis 2012 durchgeführt (vgl. Feldmann-Westendorff et al. 2016, Abb. 3), während die Feldmessungen der GNSS-Kampagne bundesweit und zeitgleich im Juni/Juli 2008 stattfanden.

Die grundlegenden Konzeptionen der Referenznetze wurden zuvor zum Beginn der 2000er-Jahre grundsätzlich überarbeitet und schließlich durch den Arbeitskreis Raumbezug der AdV (AK RB) in den „Richtlinien für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland“ (AdV 2006) manifestiert. Sie wurden seitdem kontinuierlich weiterentwickelt und präzisiert (zuletzt 2014). Für weitere Details zur Entstehungsgeschichte sei an dieser Stelle auf Heckmann et al. (2015) verwiesen.

Entsprechend der aktuellen Richtlinie (AdV 2014) besteht die bundeseinheitlich geodätische Infrastruktur aus

- dem Geodätischen Grundnetz, auf dessen geodätischen Grundnetzpunkten (GGP) sowohl GNSS-Messungen, Präzisionsnivelements als auch Schweremessungen durchgeführt werden,
- dem Deutschen Haupthöhennetz (DHHN) 1. Ordnung,
- dem Deutschen Hauptschwerenetz (DHSN) und dem Deutschen Schwergrundnetz (DSGN)
- dem GNSS-Referenzstationsnetz, bestehend aus den SAPOS-Stationen der Länder und den GREF-Stationen des BKG, in der jeweils zugehörigen Realisierung des geometrischen Referenzrahmens (ETRS89/DREF91) sowie
- dem German Combined Quasigeoid.

Das Quasigeoidmodell „German Combined Quasigeoid“ (GCG) als offizielle Höhenbezugsfläche der AdV stellt als passfähiges Transformationsmodell die Differenz zwischen DHHN und geometrischem Bezugsrahmen „in der Fläche“ bereit.

Diese oben beschriebene Strategie hat letztlich zum Erfolg geführt. Die neuen integrierten Festpunktfelder sind dabei nicht nur in sich genauer und homogener; sie harmonisieren auch deutlich besser miteinander als die bisherigen Netze, was die Vergleiche in [Kap. 4](#) belegen.

3 Das Deutsche Haupthöhennetz 2016

Im Zuge der DHHN-Erneuerung sind im Prinzip für alle o. g. Netze sämtliche Koordinaten neu bestimmt oder zumindest, wie im Falle der Schwerenetze, überprüft worden.

Die ursprünglich vereinbarte Teilerneuerung des Nivellementsnetzes wurde mit zunehmendem Projektfortschritt ständig erweitert. Aus der anfangs beabsichtigten Diagnosemessung des Nivellementsnetzes 1. Ordnung von ca. 60 % des Netzumfanges des DHHN92 entwickelte sich schließlich doch eine komplette Neumessung bzw. in Teilen sogar Erweiterung des DHHN (Feldmann-Westendorff et al. 2016). [Abb. 3](#) zeigt den ursprünglichen und den endgültigen Netzentwurf zum DHHN2016 im Vergleich, während [Abb. 4](#) die im DHHN2016 gegenüber dem DHHN92 neu bzw. nicht mehr enthaltenen Nivellementslinien visualisiert.

Die neuen Realisierungen sind dabei zwangsfrei auf die bisherigen Koordinaten gelagert worden. Dies bedeutet beispielsweise für das DHHN, dass das Niveau der Höhen mittels 72 deutschlandweit verteilter Datumspunkte vom DHHN92 übernommen wurde. Die Ausgleichung in Bezug auf diese Punkte erfolgte aber zwangsfrei mit der Bedingung, dass die Summe aller Höhenzuschläge Null war. Eine ausführliche Beschreibung sowie Beurteilung des Projekts zur Erneuerung des DHHN erfolgte durch Feldmann-Westendorff et al. (2016). An dieser Stelle seien nur zwei ausgewählte Statistiken genannt, welche die Konsistenz der neuen Realisierung indirekt bereits zum Ausdruck bringen. So betrug der mittlere Kilometerfehler (Standardabweichung pro Kilometer) aus der Ausgleichung 0,64 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Demgegenüber lag die Standardabweichung aus der Ausgleichung im DHHN92 bei 0,84 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ (Feldmann-Westendorff et al. 2016). Während beim DHHN92 der Schleifenwiderspruch, bezogen auf den Umring des gesamten Netzes, 138 mm betrug und beim DHHN85 das zulässige Maß sogar überschritten wurde, lag dieser Wert nun bei 13,3 mm ([Abb. 5](#)). Angesichts des Schleifenumfanges von 5.450 km wären 146 mm zulässig gewesen.

Die Genauigkeit des DHHN2016 nimmt damit auch im internationalen Vergleich einen Spitzenplatz ein. Die hohe innere Genauigkeit und Homogenität

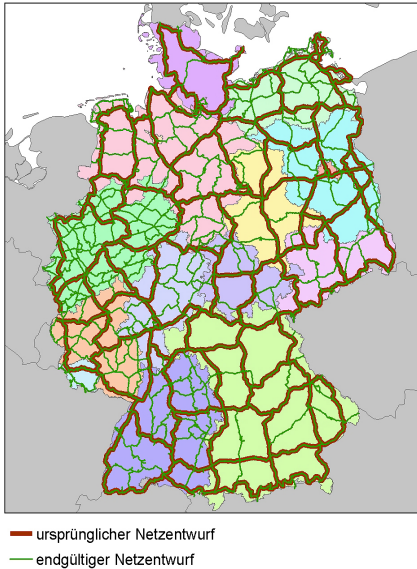


Abb. 3: Ursprünglicher und endgültiger Netzentwurf des DHHN2016

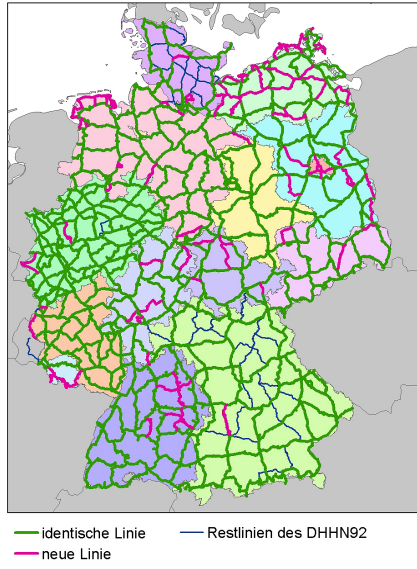


Abb. 4: DHHN2016 vs. DHHN92

ergibt sich aus der sorgfältigen Planung, Organisation, Logistik und Durchführung der Messungen gemäß der Feldanweisung.

Dies gilt entsprechend auch für die GNSS-Kampagne, welche in mindestens zwei Sessionen von je mindestens 24 Stunden auf den GGP durchgeführt wurde. Dank beispielsweise akribischer Vorbereitungen, Beobachter-Training, der Verwendung einheitlicher Hardware konnte hier eine Wiederholbarkeit von 1,9 mm (Standardabweichung) bzw. 12,8 mm (maximale Verbesserung) in der ellipsoidischen Höhe erreicht werden (Feldmann-Westendorff et al. 2016).

Erst diese Maßnahmen in Kombination mit der Epochengleichheit „sichern“ einen wirklich integrierten geodätischen Raumbezug.

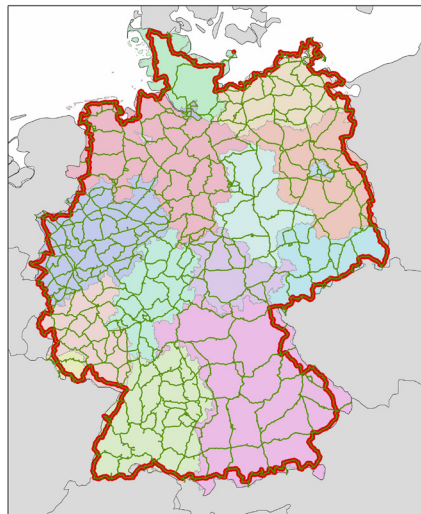


Abb. 5: Umringschleife des DHHN2016

Der neue GNSS-/Nivellementsdatensatz ist somit, im Zusammenspiel mit der neuen Realisierung des DREF91, bestens für Validierungszwecke bei der regionalen Quasigeoidmodellierung geeignet und erlaubt die Ableitung einer präzisen und konsistenten Höhenbezugsfläche.

4 Die neue Höhenbezugsfläche für Deutschland – das German Combined Quasigeoid 2016 (GCG2016)

Stellt man sich die Geoidmodellierung als ein Haus vor, so basiert ein hochaufgelöstes und genaues Quasigeoidmodell als Höhenbezugsfläche im Wesentlichen auf einem Fundament (Methode) und drei Säulen (Datengrundlagen), welche im Folgenden beleuchtet werden.

Da die methodisch-theoretischen Aspekte für den Nutzer weniger relevant sind und im Rahmen dieses Seminarbeitrags auch kaum in der notwendigen Tiefe und zugleich Kürze dargestellt werden könnten, beschränken wir uns im Folgenden auf die Betrachtung der verbesserten Datengrundlage.

Erwähnt werden soll an dieser Stelle lediglich, dass die Entwicklung der GCG-Modelle in langjähriger Zusammenarbeit an zwei Rechenstellen erfolgt, dem Institut für Erdmessung (IfE) Hannover und der Außenstelle Leipzig des BKG. An beiden Rechenstellen kommen unterschiedliche Auswerteverfahren bzw. Modellierungsansätze zur Anwendung, die jeweils kontinuierlich weiterentwickelt werden (Denker et al. 2009, Schwabe et al. 2016).

4.1 Datengrundlage

Terrestrische Schweredaten

Über die unmittelbaren Aktivitäten zur DHHN-Erneuerung hinaus haben Bund und Länder umfangreiche gemeinsame Anstrengungen zur Verbesserung der Schweredatenbasis für die Geoidmodellierung unternommen. So wurden die verfügbaren Datenbestände einem ausführlichen Datenscreening unterzogen. Mehrere Bundesländer führten daraufhin umfangreiche Schweremessungen durch (Abb. 6). Neben der Konsultation bei der Planung dieser Schweremessungen hat auch das BKG in Zusammenarbeit mit vielen weiteren Partnern eigene gravimetrische Vermessungen

- auf dem Bodensee (2012),
- auf der Ostsee (2013, 2015 und 2016) sowie
- vor der schleswig-holsteinischen Nordseeküste (2014 bis 2016)

durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten in Kooperation mit dem GeoForschungs-Zentrum Potsdam (GFZ) und wurden durch das Bundesamt für Seeschifffahrt

und Hydrographie (BSH), das Institut für Seenforschung (ISF) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) und die Wasser- und Schifffahrtsämter Bremerhaven und Wilhelmshaven logistisch umfangreich unterstützt. Alle diese Kampagnen hätten ohne eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit nicht realisiert werden können.

Bei der Geoidmodellierung werden zur Minimierung von Randeffekten auch Daten der Nachbarländer benötigt. Hier konnten im Austausch flächendeckende punktweise Daten im Bereich des holländischen Wattenmeers und der Tschechischen Republik erhalten werden (Abb. 6).

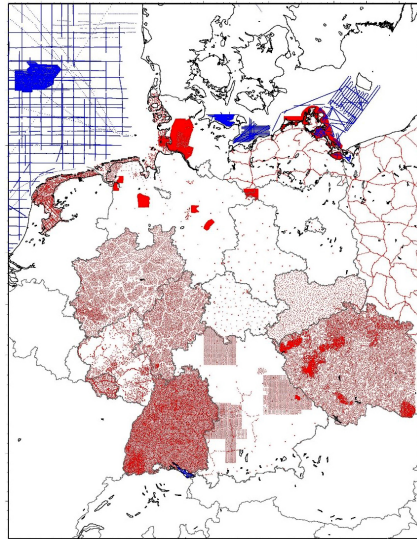


Abb. 6: Neue hinzugefügte Schweredaten in der BKG-Datenbasis 2016 (gegenüber 2011). Rot: Landdaten (punktweise bzw. gegittert); blau: Schiffsgravimetrie von verschiedener Qualität und Alter

Globale Schwerefeldmodelle

Einen wichtigen Beitrag zur verbesserten Geoidmodellierung leisten auch die gegenüber den 1990er-Jahren erheblich genaueren und höher aufgelösten globalen Schwerefeldmodelle in Form von Kugelfunktionskoeffizienten (*global geopotential models*, GGM). Im „Jahrzehnt der Satellitenmissionen“ hat sich durch CHAMP (2000–2010), GRACE (seit 2002) und GOCE (2009–2013) die Kenntnis des globalen Schwerefeldes auf Wellenlängen von ca. 500 bis 100 km grundlegend verbessert. Aus den reinen Satellitenmodellen (*satellite-only* GGM) werden in Kombination mit terrestrischen Datensätzen hochaufgelöste Modelle abgeleitet, deren nominelle Auflösung entspricht derzeit bis zu 9 km Halbwellenlänge auf der Erdoberfläche (z. B. EGM2008, Pavlis et al. 2012; EIGEN-6C4, Förste et al. 2015; GECO, Gilardoni et al. 2016). Eine Zusammenstellung historischer und aktuellster Schwerefeldmodelle, einen theoretischen Überblick sowie einen Online-Berechnungsservice mit Benutzungshinweisen zur korrekten Anwendung der Modelle bietet das International Center

for Global Gravity Field Models (ICGEM), welches am GFZ Potsdam angesiedelt ist.

Nun könnte man fragen, ob angesichts der Verfügbarkeit solcher Modelle die regionale Schwerefeldmessung und -modellierung noch notwendig sind. Zum einen wird die hohe Auflösung der kombinierten Modelle aber effektiv nur über solchen Regionen erreicht, in denen gerade durch die Landesvermessung bereits entsprechend genaue und homogene, kontrollierte und konsistente terrestrische Schweredaten verfügbar sind. Zum anderen reicht auch die maximale Auflösung der besten kombinierten GGM nicht aus, um höchste Genauigkeitsansprüche in der Landesvermessung zu erfüllen. So beträgt der Vernachlässigungsfehler der kurzwelligen Strukturen globaler Geoidmodelle über den deutschen Flachlandgebieten etwa 3 cm, er kann jedoch im Gebirge leicht einige Dezimeter erreichen. Schließlich sind globale Schwerefeldmodelle nicht ohne Weiteres kompatibel mit den nationalen Bezugsrahmen (Datum, Standards, Epoche usw.). Zudem erfordert ihre Synthese an Einzelpunkten der Erdoberfläche wiederum ellipsoide Höhen (aus einem DGM plus Quasigeoid) als Eingabegröße.

Die GGM sind somit ein wesentlicher Baustein eines regionalen Geoidmodells, können dieses aber auf absehbare Zeit nicht ablösen.

Digitale Geländemodelle

Der kurzwellige Anteil des Geoidsignals ist in hohem Maße mit der Topographie korreliert. Für die Geoidmodellierung ist es daher vorteilhaft, diese Signalanteile abzuspalten und sogenannte residuale Geländekorrekturen anhand von digitalen Geländemodellen (DGM) synthetisch zu berechnen, wobei die Effekte des residualen Reliefs (*residual terrain model*, RTM) in Bezug auf eine geglättete Topographie (Referenztopographie) betrachtet werden. Entsprechend ist dieser Ansatz gemeinhin als „RTM-Methode“ bekannt.

Zu diesem Zweck stehen aus der Fernerkundung immer neuere, aktuellere und genauere digitale Geländemodelle (DGM) zur Verfügung. So bietet das BKG für Deutschland das DGM25 (Bodenauflösung: 25 m) und das DGM10 (Bodenauflösung: 10 m) an. Dank der gestiegenen Rechnerkapazitäten können diese Produkte mittlerweile auch weitgehend ohne mathematische Vereinfachungen verarbeitet werden, wobei aufseiten des BKG für das GCG2016 die neueste Version des DGM25 zum Einsatz kam.

4.2 Ergebnisse und Vergleiche

Die in [Kap. 4.1](#) beschriebene Datengrundlage ist eine hervorragende Voraussetzung, um die Höhenbezugsfläche für Deutschland wesentlich zu verbessern. Aus allen zur Verfügung stehenden terrestrischen Schweredaten wurde beim BKG

mittels eines Punktmassenmodells ein gravimetrisches Quasigeoid BKG2016g berechnet. Zur Validierung der Qualität dieser gravimetrischen Quasigeoidlösung (und später zur Anpassung an das Niveau des DHHN2016) wurde der in [Kap. 3](#) beschriebene hochgenaue GNSS-/Nivellementsdatensatz verwendet.

Die Verbesserung der Genauigkeit der gravimetrischen Quasigeoidlösung wird durch Vergleiche mit jeweils unabhängig davon gemessenen GNSS-/Nivellementsdaten sichtbar. Für den Vergleich wurden folgende GNSS-/Nivellementsdatensätze verwendet:

- Älterer Datensatz – passfähig zu DHHN92, ETRS89/DREF91 (Realisierung 2002): 954 Punkte
- Neuer Datensatz – passfähig zu DHHN2016, ETRS89/DREF91 (Realisierung 2016): 470 Punkte

Das unterschiedlich definierte Nullniveau von GNSS und Nivellement erfordert für Vergleiche zuerst eine Anpassung des Mittelwertes ([Tab. 1](#)). Nach dieser 1-Parameter-Transformation ist dabei scheinbar nur eine geringe Verbesserung ($s = 25 \text{ mm} \rightarrow s = 20 \text{ mm}$) durch die neuen Daten bzw. Modelle zu verzeichnen, eine Reduzierung der regional korrelierten Restsystematiken wird dennoch sichtbar ([Abb. 7](#)). Deutlich zu erkennen ist eine eindeutige NW-SO-Verkippung der Differenzen. Zurzeit ist die Ursache der Verkippung ungeklärt und bleibt Gegenstand weiterer Untersuchungen. Diese Systematik kann in erster Näherung durch eine 3-Parameter-Transformation (schiefe Ebene) beschrieben werden. Nach dieser Transformation sind die Restabweichungen, die sich bei Verwendung der Daten und Modelle des neuen Raumbezugs ergeben, deutlich geringer. Die Standardabweichung sinkt von 22 mm auf unter 1 cm.

Die nach der Korrektur der gravimetrischen Lösung durch eine schiefe Ebene (3-P-Transformation) weiter bestehenden systematischen Differenzen ([Abb. 8](#)) werden durch eine hinreichend langwellige Korrekturfläche approximiert, die mittels Interpolation nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt wurde (Korrelationslänge: 70 km).

Die danach verbleibenden Restabweichungen an den GNSS-/Nivellements- bzw. GGP-Punkten betragen im Maximum $\pm 1 \text{ cm}$ ($s = 3 \text{ mm}$; [Abb. 9](#)). Im Ver-

Tab. 1: Vergleich gravimetrischer Quasigeoidmodelle mit GNSS-/Nivellementsdaten (Standardabweichungen s) nach Anpassung

GNSS-/Niv. Daten	Älterer	Neuer
Grav. Quasigeoidmodell	EGG08	BKG2016g
1-P-Transformation [mm]	25	20
3-P-Transformation [mm]	22	9

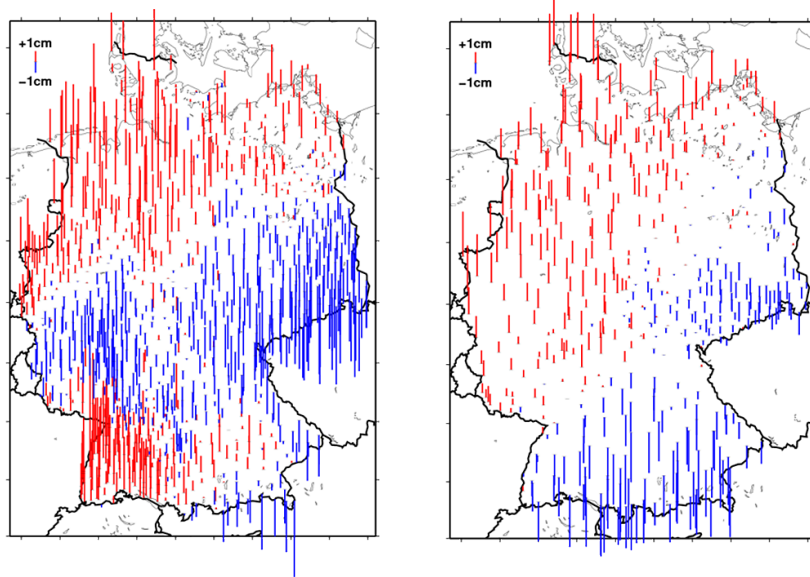


Abb. 7: Vergleich gravimetrischer Quasigeoidmodelle mit GNSS-/Nivellementsdaten. Links: EGG2008 vs. ältere GNSS-/Nivellementsdaten, $s = 25$ mm; rechts: BKG2016g vs. Neue GNSS-/Nivellementsdaten, $s = 20$ mm

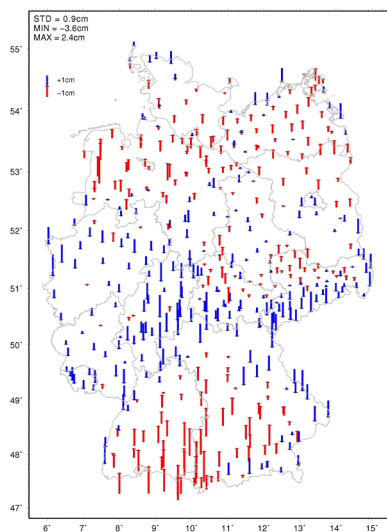


Abb. 8: Vergleich gravimetrischer Quasigeoidlösung und GNSS-/Nivellementsdaten nach 3-P-Transformation

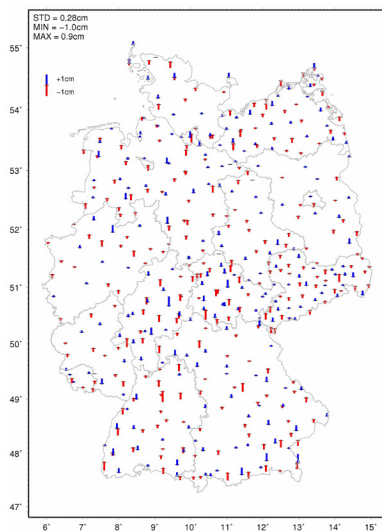


Abb. 9: Anpassung des GCG2016 an die GNSS-/Nivellementspunkte

gleich dazu betrugen die entsprechenden Werte für das GCG2011 ± 4 cm ($s = 7$ mm) bei ansonsten vergleichbarer Vorgehensweise (Korrelationslänge: 50 km).

Diese Kenngrößen bestätigen die hohe innere Präzision bzw. Nachbarschaftsgenauigkeit der einzelnen Beobachtungstechniken und belegen damit zugleich die erheblich höhere Homogenität und Konsistenz des neuen integrierten Raumbezuges 2016.

Das Anbringen der Korrekturfläche liefert die neue Höhenbezugsfläche (BKG-Lösung: BKG2016). Durch das IfE Hannover erfolgte auf der gleichen Datengrundlage, aber nach einem anderen Verfahren, die unabhängige Berechnung einer

zweiten Lösung. Ein Vergleich beider Lösungen zeigte im Landbereich eine Übereinstimmung überwiegend besser als 5 mm, nur in den Alpen wurden Abweichungen über 2 cm festgestellt. Im Meeresbereich (bei teilweise unterschiedlichen Daten) stimmen beide Modell i. d. R. besser als 5 cm überein (Abb. 10).

Die endgültige neue Höhenreferenzfläche, das GCG2016, resultiert aus einer Mittelung von BKG- und IfE-Lösung (Abb. 11).

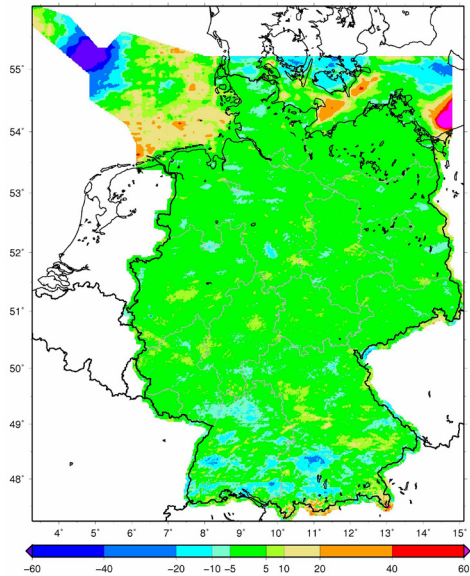


Abb. 10: Differenzen der Modelle des IfE und des BKG [mm]

4.3 Bereitstellung und Datenformate

Aufgrund der gestiegenen Genauigkeit des GCG2016 wird das Modell mit einer höheren räumlichen Auflösung (Gitterweite in Bogenminuten, bezogen auf Länge und Breite: $0,75 \times 0,5$ statt $1,5 \times 1,0$) bereitgestellt, wodurch sich insbesondere in gebirgigen Regionen (z. B. Alpen, Harz) bzw. Regionen mit hohem horizontalem Geoidgradienten (z. B. Oberrheingraben) der maximale Interpolationsfehler im Gitter verkleinert. Dieser wird dort vor allem durch den Vernachlässigungsfehler des ultrahochfrequenten geländeinduzierten Signalanteils dominiert. Durch Simulationsrechnungen konnten in Bezug auf die bisherige Gitterauflösung Abweichungen von bis zu 3 cm im ungünstigsten Fall (enge Kerbtäler in der Zugspitzregion, ungünstige zufällige Lage der Stützpunkte) nachgewiesen werden (Abb. 12).

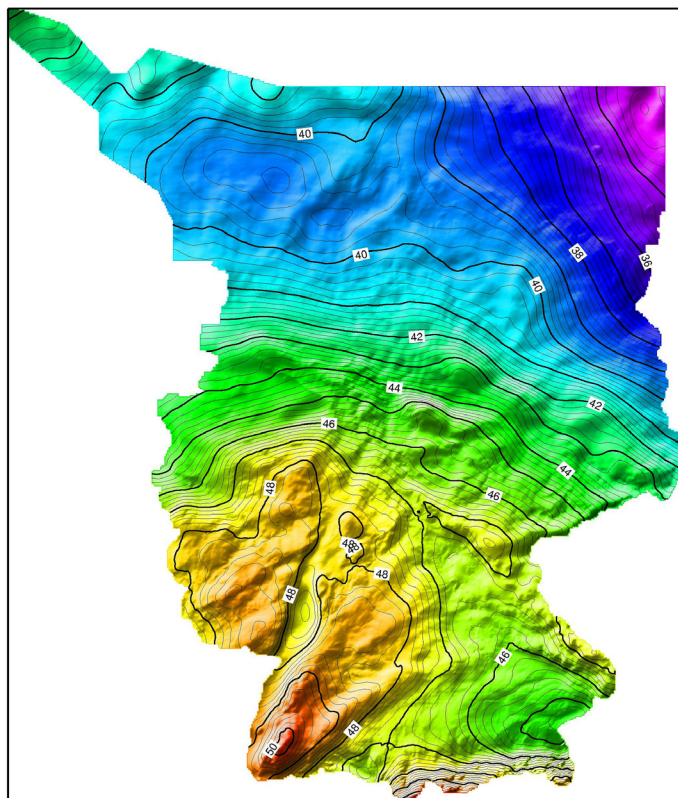


Abb. 11:
Die aktuelle
Höhenbezugs-
fläche der
AdV – das
GCG2016

Die formelle Genauigkeit des GCG2016 wurde wie folgt abgeschätzt:

- Flachland: 0,5–1,0 cm
- Gebirge: 1,0–2,0 cm
- Meeresbereich: 2,0–6,0 cm

Damit ermöglicht das GCG2016 den Einsatz der GNSS-gestützten Höhenbestimmung in einem breiten und weiter wachsenden Feld von Anwendungen.

Das GCG2016 wird in verschiedenen Formaten bereitgestellt. Das eigene Binärformat ist für die mitgelieferte Interpolationssoftware GEOID.EXE bestimmt. Als gängige hersteller- bzw. softwarespezifische Formate werden zudem unterstützt:

- Trimble .ggf Geomatics Office/Business Center, Feldempfänger
- Leica .gem Geo Office, Feldempfänger
- Carlson .gsf SurvCE-Software
- Topcon .gff diverse Software, Feldempfänger

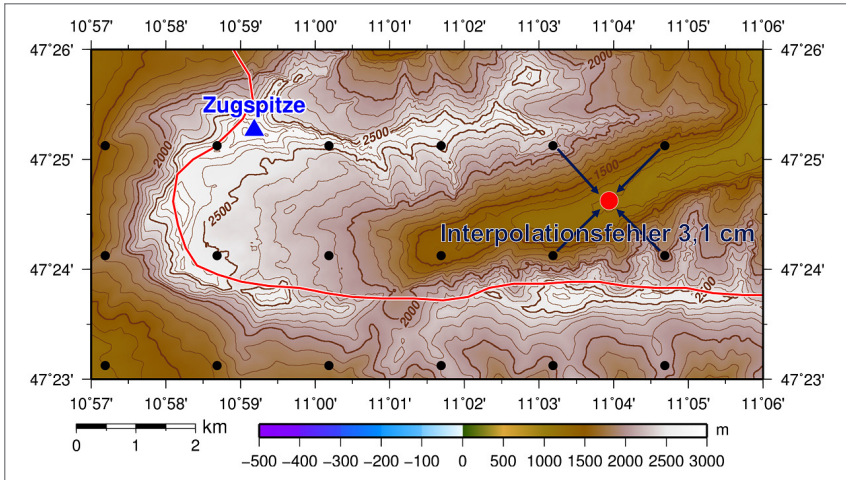


Abb. 12: Lokalisierung des maximalen Interpolationsfehlers aus Simulationsrechnungen zur notwendigen Gitterauflösung des Quasigeoidmodells

Zudem wird das Gitter auch im Textformat bereitgestellt, woraus bei Bedarf weitere Formate generiert werden können. Der Vertrieb erfolgt laut Beschluss der AdV über das Dienstleistungszentrum des BKG (www.geodatenzentrum.de); Ausschnitte werden in einigen Fällen aber auch durch die Bundesländer selbst abgegeben. Im Rahmen des SAPOS-Dienstes wird die ortsbezogene Quasigeoidhöhe zudem als Transformationsnachricht übertragen. Weiterhin kann das Modell für Einzelpunkte kostenfrei über die BKG-Webseite¹ abgefragt werden.

5 GNSS-gestützte Bestimmung physikalischer Höhen

Der Raumbezug 2016 mit dem GCG2016 ist ein wichtiger Schritt zur Erhöhung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit der physikalischen Höhenbestimmung mittels GNSS. Mit zunehmender Genauigkeit rückt die Konsistenz aller Beobachtungen zum Quasigeoidmodell stärker in den Fokus. Ein Aspekt dabei sind die mittels GNSS-Messungen bestimmten geometrischen globalen, europäischen und nationalen Bezugsrahmen (z. B. ITRFxxxx, ETRFxxxx, ETRS89/DREF91 Realisierung xxxx).

Die derzeitigen Transformationsvorschriften von den ITRFxxxx in die ETRFyyyy, die mit der Definition des ETRS89 etabliert wurden, sind aus Sicht des integrierten Raumbezuges für die Bestimmung von Höhen und Höhen-

1 <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gcomp.php?p=g>

änderungen nicht optimal. Sie reduziert nicht nur die Lagekoordinaten aufgrund der Bewegung der eurasischen Platte, sondern wirkt sich auch auf die ellipsoidischen Höhen und deren zeitliche Änderungen aus (systematische Höhenänderungen von mehreren Zentimetern in Europa; scheinbare Höhenänderungen von ca. 1 mm/a). Anhand der Ergebnisse des Raumbezuges 2016 ließ sich zeigen, dass die aktuellen Realisierungen des ITRF besser geeignet wären als die entsprechenden ETRF. Ursache hierfür ist die deutlich geringere Genauigkeit des ITRF89, das die Grundlage des ETRS89 bildete, im Vergleich zu den heutigen ITRF. Die Realisierungen des ETRS89 sind aufgrund des verwendeten Transformationsansatzes mithin nicht optimal für die Höhenbestimmung geeignet. Inkonsistenzen und Effekte wie diese müssen deshalb durch die Korrekturfäche zum gravimetrischen Quasigeoid implizit berücksichtigt werden. Das für die Nutzer bereitgestellte Quasigeoidmodell kann daher auch nur optimal für die Höhenbestimmung in einem spezifischen geometrischen Referenzrahmen sein. Im Fall des GCG sind das die jeweils aktuellen, durch die AdV bereitgestellten Bezugsrahmen für Deutschland. Das GCG2016 sollte deshalb auch nicht in Kombination mit älteren Bezugsrahmen der Landesvermessung oder anderen europäischen oder globalen Bezugsrahmen (ETRFxxxx bzw. ITRFxxxx) verwendet werden. Durch die scheinbaren Höhenänderungen der ETRS89-Realisierungen müssen darüber hinaus auch die Transformationsvorschriften für das SAPOS-Koordinatenmonitoring neu überdacht werden. Andernfalls bewirken diese scheinbaren Höhenänderungen mit zunehmendem zeitlichem Abstand zur GNSS-Messepoche (2008 für den neuen Raumbezug 2016) eine Verschlechterung in der Passfähigkeit zum Quasigeoidmodell. Derartige Effekte werden durch die Nutzer meist als Fehler des Quasigeoidmodells missinterpretiert, sie sind aber das Ergebnis von Inkonsistenzen in der Definition und Realisierung der Bezugsrahmen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse und Genauigkeitsbetrachtungen zum GCG2016 (vgl. [Kap. 4.2](#)) belegen nachdrücklich, dass die grundlegende Konzeption des einheitlichen integrierten Raumbezugs für Deutschland und dessen Strategien zur Umsetzung im Rahmen des Projektes zur Erneuerung des DHHN erfolgreich waren. Mit dem Raumbezug 2016 stellt die AdV erstmals aktuelle epochengleiche und konsistente Koordinaten und Modelle für alle Elemente des Raumbezuges bereit. Hiervon profitierte nicht nur das auf der Grundlage dieser Daten berechnete GCG2016; auch den Anwendern ermöglicht der Raumbezug 2016 die GNSS-gestützte Bestimmung physikalischer Höhen unter Nutzung von SAPOS und GCG2016 mit einer höheren Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Unabhängig da-

von haben die Ergebnisse des DHHN-Projektes eindrucksvoll aufgezeigt, dass eine hochgenaue Höhenübertragung mittels Präzisionsnivellement im Landesmaßstab möglich ist. Für die Bestimmung zeitlicher Höhenänderungen wird das geometrische Präzisionsnivellement aufgrund des nach wie vor erheblichen Aufwandes eher lokale oder kleinräumige Anwendungen finden. Hier haben GNSS-Applikationen und Fernerkundungsverfahren deutliche Vorteile.

Das Genauigkeitsniveau von GNSS-Anwendungen ist seit den 1990er-Jahren auch in der Höhenkomponente erheblich gestiegen. Dies wird u. a. an Zeitreihen

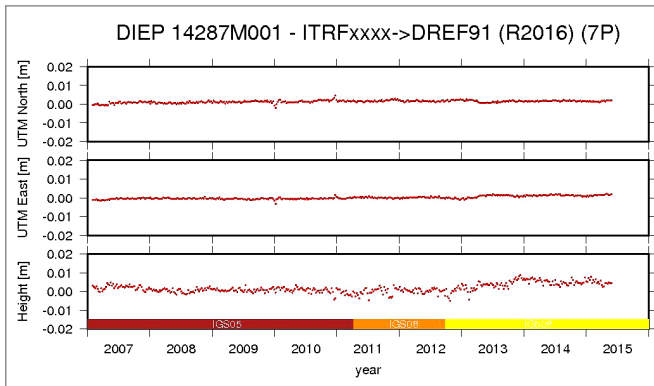


Abb. 13:
GNSS-Zeitreihe
der GREF-Station
Diepholz

von GNSS-Referenzstationen mit Standardabweichungen von wenigen Millimetern deutlich (Abb. 13). Diese Genauigkeit zeigt sich auch in den globalen und europäischen Referenzrahmen.

Im Bereich der Fernerkundung ist die Permanent Scatterer Interferometrie ein mittlerweile etabliertes und häufig genutztes Verfahren zur Erfassung von Veränderungen der Erdoberfläche. Insbesondere in urbanen Gebieten können Höhenänderungen mit einer im Vergleich zu GNSS und Nivellement hohen räumlichen Punktdichte bestimmt werden. Aus diesem Grund soll diese Methodik zukünftig auch für einen flächendeckenden Bodenbewegungsdienst in Deutschland genutzt werden (BGR 2017). Die durch das Copernicus Erdbeobachtungsprogramm der ESA kostenfrei bereitgestellten SAR-Bilder der Satelliten Sentinel-1a/b bilden hierfür eine ideale Datengrundlage (ESA 2017).

Jedes der genannten Verfahren hat spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich der zeitlichen- und räumlichen Auflösung sowie seines Bezuges zu den geodätischen Referenzrahmen. Eine aktuelle Herausforderung besteht in der optimalen Kombination der verschiedenen Messverfahren.

Die zuverlässige Bestimmung zeitlicher Veränderungen ist eine immer wichtiger werdende Aufgabenstellung. Ein konsistenter und aktueller geodätischer Raumbezug ist hierfür eine wesentliche Voraussetzung. Die regelmäßige Aktu-

alisierung des Raumbezuges, d. h. die Kontrolle und Erneuerung der Grundlagentetze wird auch zukünftig eine dauerhafte Aufgabe von hoher Tragweite sein. Andernfalls kann das nunmehr erreichte Genauigkeits- und Aktualitätsniveau nicht aufrechterhalten oder sogar weiter verbessert werden. Dementsprechend sollen die GNSS-Messungen an den GGP zur Überprüfung und Aktualisierung des amtlichen Raumbezuges in Deutschland in einem Intervall von maximal zwölf Jahren durchgeführt werden (AdV 2014).

Für Nutzer mit Genauigkeitsanforderungen im Subzentimeterbereich bedeutet dies, dass sie zukünftig in kürzeren Intervallen mit neuen Realisierungen des geometrischen Raumbezuges (ETRS89/DREF91) und mit entsprechend aktualisierten Koordinaten konfrontiert werden. In diesem Genauigkeitsniveau können die Koordinaten der Festpunktfelder nur über einen kürzeren Zeitraum hinweg als zeitlich konstant angesehen werden bzw. bedürfen ggf. einer zeitlichen Modellkomponente (z. B. linearer Trend im Falle gleichförmiger Hebungs- und Senkungsbewegungen). Hierbei müssen dynamische Effekte untersucht, quantifiziert und ggf. gesondert berücksichtigt werden. Konsequenterweise wäre die Einführung kinematischer Koordinaten, nicht nur beim geometrischen Raumbezug, sondern auch für das DHHN und das GCG denkbar. Der integrierte geodätische Raumbezug würde sich so perspektivisch im Sinne eines „vierdimensionalen“ bzw. „kinematischen Raumbezugs“ weiterentwickeln.

Eine solche Entwicklung wäre zweifelsohne eine enorme Herausforderung, nicht nur für die Betreiber des Raumbezugs selbst, sondern auch für die Wissenschaft und die Nutzer. Die korrekte Anwendung eines kinematischen Raumbezugs verlangt mehr geodätische Kompetenz auf der Nutzerseite. Das Bewusstsein, dass amtliche Koordinaten nicht per se unveränderlich sein können bzw. müssen, ist hierfür eine wichtige Voraussetzung.

Auch auf wissenschaftlicher Seite sind längst noch nicht alle Fragen geklärt. Dies zeigen nicht zuletzt aktuelle Diskussionen zur Etablierung eines einheitlichen Welthöhensystems. Bis heute werden die zugrunde liegenden geodätischen Standards nicht für alle Messverfahren des Raumbezugs (Geometrie, Schwere, Höhe) einheitlich gehandhabt. Ein Beispiel hierfür sind die Korrekturen des permanenten Anteils der Gezeiten der „festen“ Erde. Weitere Aspekte betreffen die Problematik des Antennennahfeldes auf GNSS-Referenzstationen und die hiermit verbundenen scheinbaren Koordinatenänderungen beim Wechsel von Antennen sowie das in [Kap. 5](#) erwähnte Verfahren zur Transformation zwischen den globalen und europäischen geometrischen Bezugsrahmen. Inkonsistenzen und Effekte wie diese müssen vor der Etablierung eines kinematischen Raumbezuges überdacht und behoben werden, damit deren Auswirkungen nicht als reale zeitliche Änderungen missinterpretiert werden.

Durch die weitgehende Entfernungsunabhängigkeit der GNSS-Ergebnisse innerhalb des Referenzstationsnetzes verlieren die ursprünglichen hierarchisch

aufgebauten Punktnetze ihre Bedeutung. Zukünftig wird es eher von Bedeutung sein, mit welcher Genauigkeitsklasse die Nutzer Koordinaten benötigen (Dezimeter-, Zentimeter-, Millimeterbereich) und welche Messverfahren bzw. welche Kombination von Messverfahren zur Bestimmung physikalischer Höhen und Höhenänderungen für die jeweilige Anwendung des Nutzers optimal geeignet sind. Eine unverzichtbare Grundlage für die Interoperabilität der verschiedenen Messverfahren ist ein präziser und konsistenter integrierter geodätischer – und bei Anwendungen im Millimeterbereich – kinematischer Raumbezug. Daran wird auch die direkte Messung von Potenzialunterschieden mittels optischer Uhren, deren Entwicklung noch nicht ganz abzusehen ist, nichts ändern. Mit dem Raumbezug 2016 hat die deutsche Landesvermessung eine ausgezeichnete Grundlage für diese Entwicklungen gelegt.

Literatur

- AdV (2006): Richtlinien für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. 26.01.2006
- AdV (2014): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. Stand: 25.04.2014, regelmäßig aktualisiert. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte/, letzter Zugriff 13.01.2017.
- BGR (2017): www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Fernerkundung/Projekte/laufend/Radar/BBD.html, letzter Zugriff Januar 2017.
- Denker, H.; Barriot, J.-P.; Barzaghi, R.; Fairhead, D.; Forsberg, R.; Ihde, J.; Kenyeres, A.; Marti, U.; Sarrailh, M.; Tziavos, I. N. (2009): The Development of the European Gravimetric Geoid Model EGG07. International Association of Geodesy Symposia 133, S. 177–185. DOI: [10.1007/978-3-540-85426-5_21](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5_21).
- ESA (2017): www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1, letzter Zugriff Januar 2017.
- Feldmann-Westendorff, U.; Liebsch, G.; Sacher, M.; Müller, J.; Jahn, C.-H.; Klein, W.; Liebig, A.; Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2016, 141. Jahrgang, S. 354–367. DOI: [10.12902/zfv-0140-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0140-2016).
- Förste, C.; Bruinsma, S. L.; Abrikosov, O.; Lemoine, J.-M.; Marty, J. C.; Flechtner, F.; Balmino, G.; Barthelmes, F.; Biancale, R. (2015): EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. DOI: [10.5880/icgem.2015.1](https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1).
- Gilardoni, M.; Reguzzoni, M.; Sampietro, D. (2016): GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica* 60 (2): S. 228–247. DOI: [10.1029/2003GL018025](https://doi.org/10.1029/2003GL018025).
- Heckmann, B.; Berg, G.; Heitman, S.; Jahn, C.-H.; Klauser, B.; Liebsch, G.; Liebscher, R. (2015): Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2015, 140. Jahrgang, S. 180–184. DOI: [10.12902/zfv-0069-2015](https://doi.org/10.12902/zfv-0069-2015).

Pavlis, N. K.; Holmes, S. A.; Kenyon, S. C.; Factor, J. K. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research 117: B04406. DOI: [10.1029/2011JB008916](https://doi.org/10.1029/2011JB008916).

Schwabe, J.; Liebsch, G.; Schirmer, U. (2016): Refined computation strategies for the new German Combined Quasigeoid 2016. Poster presentation OB08-21 at the First Joint Commission 2 and IGFS Meeting/International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016 (GGHS 2016), Thessaloniki, Griechenland, 19.–23. Sept. 2016.

Kontakt

Dr.-Ing. Gunter Liebsch | Dr.-Ing. Joachim Schwabe |
Dipl.-Ing. Martina Sacher | Dipl.-Math. Uwe Schirmer
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – Außenstelle Leipzig
Karl-Rothe-Straße 10–14, 04105 Leipzig
gunter.liebsch@bkg.bund.de



Gunter Liebsch



Joachim Schwabe



Martina Sacher



Uwe Schirmer

Der Beitrag von GNSS zum Monitoring des Systems Erde

H. Schuh | J. Wickert | G. Dick | M. Ge | M. Ramatschi |
X. Li | Z. Deng | F. Alshawaf | C. Arras | B. Männel

1 Einführung

Schon frühzeitig wurde erkannt, dass sich das in den 1980er-Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelte GPS nicht nur für Navigationsaufgaben verwenden lässt, sondern auch für geodätische Zwecke in Form hochgenauer Positionsbestimmung eingesetzt werden kann. Diese geodätischen Anwendungen wurden im Laufe der Zeit kontinuierlich in ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit verbessert. Hinzugekommen sind weitere Parametergruppen, die mit GPS bestimmt werden können, wie Troposphärenparameter und Ionosphärenmodelle. Die hochaktuellen Echtzeitanwendungen von GPS bieten zusätzliche Perspektiven, wenn man z. B. an das Monitoring von Erdbeben denkt. Bekanntermaßen können durch die Gesamtheit der GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) eine deutlich höhere Zahl von Satelliten beobachtet werden, was eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für die Erforschung des Erdsystems liefert. Im folgenden Artikel werden die Autoren hauptsächlich auf eigene Beispiele der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im GNSS-Bereich innerhalb der Sektion 1.1 „Geodätische Weltraumverfahren“ des Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) eingehen.

2 Das IGS Analysezentrum am GFZ

Der *International GNSS Service* (IGS) als Dienst der *International Association of Geodesy* (IAG) stellt für einen globalen Nutzerkreis GNSS-Daten und Produkte mit höchster Qualität bereit. Das GFZ beteiligt sich an diesem Dienst als Analysezentrum. Daneben werden etwa 30 weltweit verteilte Multi-GNSS-Referenzstationen betrieben. Im Rahmen operationeller Auswertungen werden präzise Stationskoordinaten, Satellitenbahnen, Satellitenuhrkorrekturen sowie Erdrotationsparameter bestimmt. Aktuell trägt das GFZ zu allen drei IGS-Produktlinien bei:

- *final* (Satellitenbahn 2 cm genau; Satellitenuhr 0,05 ns genau; nach 2 Wochen verfügbar),

- *rapid* (Satellitenbahn 3 cm genau; Satellitenuhr 0,1 ns genau; nach 24 Stunden verfügbar) und
- *ultra-rapid* (Satellitenbahn 5–10 cm genau; nach drei Stunden verfügbar).

Dabei werden tagtäglich die Daten der beiden globalen Satellitennavigationssysteme GPS und GLONASS für die Prozessierung genutzt, welche von bis zu 300 Stationen abgefragt werden. Die GFZ-intern entwickelte Analysesoftware in ihrer aktuellen Version EPOS.P8 wird dabei verwendet, um alle benötigten geodätischen Produkte zu erstellen (Fritsche et al. 2015). Im Rahmen der Multi-GNSS-Auswertung stellt das IGS-Analysezentrum am GFZ zudem im ultra-rapid, rapid und final Modus Satellitenpositionen und Satellitenuhrkorrekturen für GPS, GLO-NASS, Galileo, BeiDou und QZSS bereit (siehe

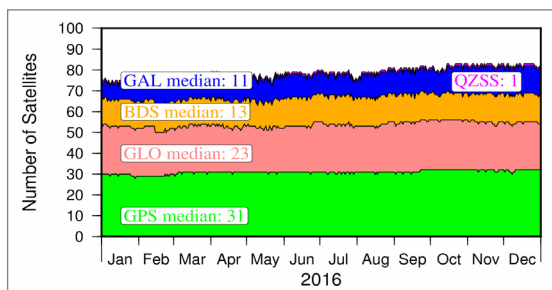


Abb. 1: Anzahl der täglich durch das Analysezentrum ausgewerteten GNSS-Satelliten

Abb. 1; Deng et al. 2016). Des Weiteren übernimmt das GFZ als „Operational Data Center“ Datenvorverarbeitungs- und Datenhaltungsaufgaben.

3 Globale GNSS-Datenprozessierung am GFZ

Als moderne geodätische Messtechnik spielt GNSS eine immer wichtigere Rolle in globalen und regionalen Monitoring-Systemen. Am GFZ werden GNSS-Daten für verschiedene Projekte mit unterschiedlichen zeitlichen Dimensionen verwendet. Um die Quelldaten und Ergebnisse zu verwalten und darzustellen, wurde ein System aus Datenbank und Webseite entwickelt. Zur Zeit enthält dieses System Daten und Ergebnisse von mehr als 2.500 globalen Stationen. Das System unterstützt zahlreiche internationale Projekte, darunter IPOC, GCO, GITEWS, IGS, PBO und TIGA.

3.1 IPOC (Integriertes Plattenrandobservatorium Chile)

IPOC ist ein europäisch-amerikanisches Netz von Einrichtungen (GFZ, IPGP, GEOMAR, CALTECH, mehrere chilenische und deutsche Universitäten), die ein dezentrales Instrumentensystem an Chiles konvergentem Plattenrand ent-

wickelt haben und betreiben, um Erdbeben, Deformationen, Magmatismus und Oberflächenprozesse zu observieren. Über ein Viertel der seismischen Energie weltweit wird am Plattenrand im Norden Chiles freigesetzt, an der sich die süd-amerikanische Platte über die Nazca-Platte schiebt. Der Plattenrand bietet die einmalige Möglichkeit, die Wechselwirkungen dieser Vorgänge aufgrund seiner Variabilität im Hinblick auf klimatische Bedingungen sowie die Unterschiede seiner Segmente im seismischen Zyklus, seiner hohen Prozessraten und ausgezeichneten Archive zu analysieren. Mit GPS und anderen instrumentellen Methoden beobachten und quantifizieren wir die Akkumulation von Deformation sowie damit in Verbindung stehende Prozesse mit bisher unerreichter Genauigkeit in genäherter Echtzeit.

3.2 TIGA-Reprozessierung

Die International GNSS Service (IGS) Tide Gauge Benchmark Monitoring Working Group (TIGA-WG) ist verantwortlich für die kontinuierliche Analyse von GNSS-Daten, welche von Stationen an oder in der Nähe von Pegelmessern (tide gauge) stammen. Hierbei sind insbesondere vertikale Veränderungen von Interesse. Die Resultate für Positionen und vertikale Geschwindigkeiten können in verschiedenen geodätischen und geophysikalischen Untersuchungen angewendet werden, wie z. B. in globalen und regionalen Studien zu Meeresspiegelschwankungen, aber auch zur Kalibrierung von Satellitenaltimetern und zur Vereinheitlichung von Höhensystemen. Das GFZ trägt zu diesem Dienst mit einem TIGA-Analysezentrum bei. Wir werten Daten für den Zeitraum von 1994 bis Ende 2015 von über 600 global verteilten GNSS-Stationen an oder in der Nähe von Pegeln aus.

3.3 MGEX Analysen

In der GFZ-Sektion 1.1 werden alle GNSS-Navigationssatelliten in NRT (near-real-time) und im Post-Processing ausgewertet. Zusätzlich zu den 31 GPS-Satelliten sind dies die Satellitennavigationssysteme GLONASS, Galileo, QZSS und BeiDou. Insgesamt werden damit nun rund 90 Satelliten in die Auswertung integriert und erstmalig werden so alle für die globale Navigation bestimmten Satellitenbahnen- und -uhrenparameter einheitlich der öffentlichen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt.

Verglichen mit den jeweiligen Einzelsystemen werden durch die Verbindung aller Systeme die Genauigkeit und die Datenverfügbarkeit erhöht. In schwierigen Messumgebungen (z. B. enge Stadtschluchten) wird häufig das Signal der Satelliten gestört. Durch die Verwendung mehrerer Satellitensysteme erhöht sich die Zahl der zur Verfügung stehenden Signale und Nutzer können sich die beste

Signalkombination „aussuchen“. Darüber hinaus vergrößert die Verbindung der verschiedenen Systeme die Zeiträume und die Gebiete, für die ausreichend Signale ohne Unterbrechung zur Navigation zur Verfügung stehen. Zugleich verbessert die erhöhte Anzahl an Signalen die räumliche Auflösung bei der Atmosphärensondierung mithilfe GNSS.

4 Globales Referenzstationsnetz

Das globale GPS-Bodennetz wurde vom GFZ eingerichtet, um internationale geodynamische Dienste und eigene Großprojekte zu unterstützen. Die erste Station wurde im Jahre 1994 in Kitab (Usbekistan) in Betrieb genommen und bis heute fungiert diese als IGS-„Core-Station“. In den darauf folgenden Jahren wurden weitere Permanentstationen in Zentralasien, Südamerika und Südostasien eingerichtet. Gegenwärtig besteht das globale GPS-Bodennetz des GFZ aus 59 kontinuierlich arbeitenden Stationen (Abb. 2) und unterstützt damit zahlreiche wissenschaftliche Vorhaben.

Um die hohen Anforderungen für die Datenverfügbarkeit zu erfüllen, wurde eine einheitliche Hardware-Architektur implementiert. Standardmäßig besteht jede Bodenstation aus GNSS-Empfänger, meteorologischem Sensor, Datenerfassungssystem (Linux Embedded System), Power Management, Interfaces für die Datenübertragung und Fernwartung der Subsysteme und dazugehörigen Software-Komponenten. Diese Software-Komponenten wurden in der Sektion entwickelt und werden ständig erweitert, um den Anforderungen neuer Hardware zu genügen.

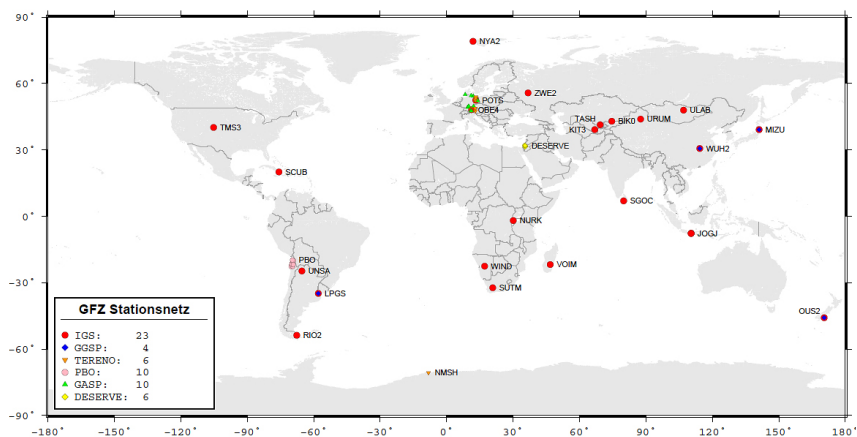


Abb. 2: Permanentes Stationsnetz des GFZ

Neben den permanenten Stationen werden für spezielle Projektschwerpunkte (z. B. Bodenfeuchte- und Schneehöhenbestimmung mittels GNSS) Kampagnen durchgeführt. Dabei kommen optimierte Hardwarekomponenten zum Einsatz, die für den Betrieb mit Solarzellen bzw. Brennstoffzellen geeignet sind.

5 Hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung und Multi-GNSS-Überwachung von Naturgefahren in Echtzeit

Heutzutage gibt es zwei Hauptstrategien, um in Echtzeit hochgenaue Positionierungsdienste bereitzustellen, dies sind einmal die kinematische Netzwerkpositionsbestimmung (network real-time kinematic positioning, NRTK) und zum anderen die globale präzise Einzelpunktbestimmung (precise point positioning, PPP). Anstelle eines regionalen Netzwerks wird dabei ein globales Referenznetz-

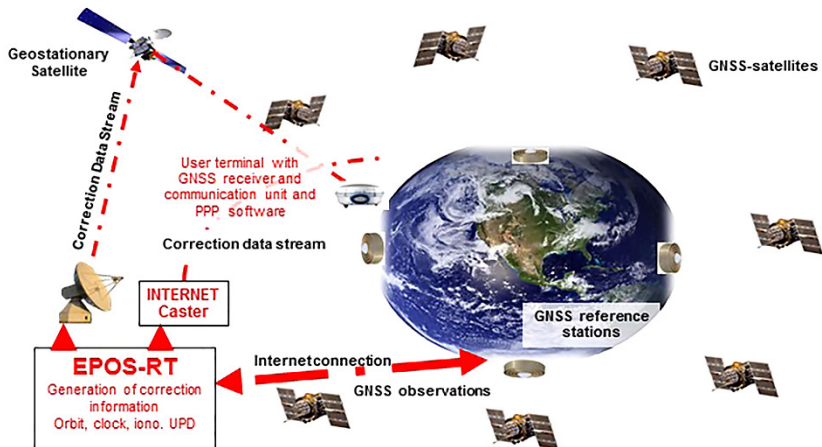


Abb. 3: Hardware-Komponenten für die Echtzeit-Positionsbestimmung

werk von etwa 100 Stationen verwendet, wobei die Daten zu einem Rechenzentrum gestreamt werden, um präzise Orbits und Uhren als wesentliche Produkte des Positionierungsdienstes sowie unkalibrierte Phasenverzögerungen (uncalibrated phase delay, UPD) und ionosphärische Korrekturmodelle in Echtzeit als zusätzliche Informationen bereitzustellen. Die Echtzeit-Produkte werden über Internet oder Satellitenkommunikation an die Nutzer übermittelt, so dass deren Einzelempfänger Positionen in Zentimetergenauigkeit bestimmen können (Abb. 3).

Das Standard-PPP wird durch eine ganzzahlige Mehrdeutigkeitsauflösung erweitert, um eine kürzere Konvergenzzeit und eine höhere Positionsgenauigkeit

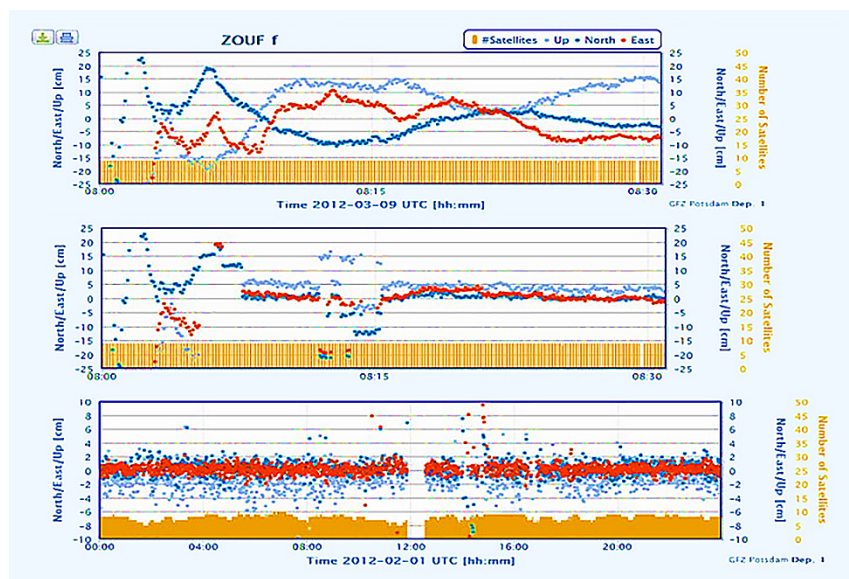


Abb. 4: Zeitreihen der Positionsdiﬀerenz bezogen auf ITRF08. Oben: Standard-PPP mit Positionen genauer als 10 cm nach der Konvergenz. Mitte: Standard-PPP erweitert durch ganzzahlige Mehrdeutigkeitsauflösung mit um einige Zentimeter genaueren Positionen, sobald die Ambiguitäten aufgelöst sind. Unten: PPP mit Troposphärenverzögerungskorrekturen kann sofort Genauigkeiten im 2-cm-Bereich erzielen.

zu erhalten (Ge et al. 2008). Der Service könnte durch Beobachtungen aus einem dichten Regionalnetz weiter verbessert werden (Li et al. 2010), wobei lokale Troposphärenverzögerungskorrekturen für die sofortige Mehrdeutigkeitsauflösung an einer Nutzerstation erzeugt werden. Es wird weitgehend angenommen, dass PPP mit regionaler Augmentierung der vielversprechendste Service-Ansatz für die präzise Echtzeit-Positionierung der Zukunft ist.

Die am GFZ entwickelte EPOS-RT-Software wird für den IGS-Echtzeit-Service sowie GFZ-bezogene geowissenschaftliche Anwendungen wie das Tsunami-Frühwarnsystem eingesetzt (Ge et al. 2012, Li et al. 2015). Abb. 4 zeigt ein typisches Ergebnis von drei Positionierungsansätzen aus dem Online-Betrieb.

Zerstörerische Erdbeben der jüngsten Vergangenheit, wie die Beben von Sumatra in Indonesien (Mw 9,2) im Jahr 2004, von Wenchuan, China (Mw 7,9) im Jahr 2008, von Maule, Chile (Mw 8,8) im Jahr 2010 oder von Tohoku, Japan (Mw 9,0) im Jahr 2011 zeigen immer wieder deutlich die dringende Notwendigkeit einer Erdbebenüberwachung und -frühwarnung. Such- und Rettungsmaßnahmen müssen umgehend erfolgen, vor allem innerhalb der ersten „goldenen 48 Stunden“. Schnelle Herd- und Bruchinversionen sind bei großen Erdbeben

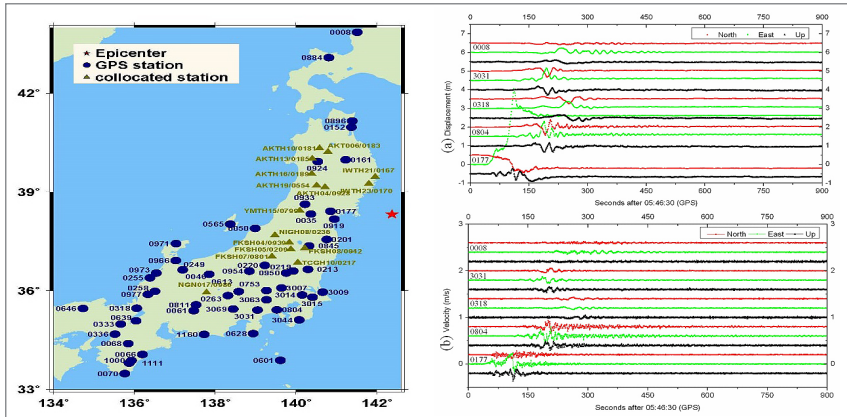


Abb. 5: Links: Lage des Epizentrums des Tohoku-Oki-Erdbebens (roter Stern) und Verteilung von ausgewählten GNSS-Stationen mit hoher zeitlicher Verfügbarkeit und Strong-Motion-Stationen. Die blauen Kreise stellen ausschließlich mit GNSS ausgerüstete Stationen dar, während die grünen Dreiecke für Stationen stehen, bei denen GNSS-Stationen mit Strong-Motion-Seismometern kolloziert sind. Rechts: PPP-Verschiebungen (oben) und Geschwindigkeitswellenformen (unten) an den GPS-Stationen 0008, 3031, 0318, 0804 und 0177 während des Tohoku-Oki-Erdbebens am 11. März 2011. Die Nord-, Ost- und Höhen-Komponente sind jeweils durch rote, grüne und schwarze Linien dargestellt.

entscheidend für die seismische und Tsunami-bezogene Gefährdungsmin-
derung (Abb. 5). Erdbebeninduzierte Verschiebungen in Lage und Höhe als
Schlüsselinformationen für derartige Inversionen werden in Echtzeit benötigt.

6 GNSS für das Monitoring der Atmosphäre und klimatologische Untersuchungen

Zuverlässige Aussagen über mögliche Klimaveränderungen sowie die weitere
Verbesserung operationeller numerischer Wettervorhersagen sind nur auf der
Basis von Daten und Modellen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
möglich. Der Einsatz verschiedener Fernerkundungssysteme hat seit den letzten
Jahrzehnten nicht nur zu einer Verbesserung der operationellen Wettervorher-
sage geführt, sondern auch unser Verständnis über das globale Klimasystem er-
heblich erweitert. Trotzdem gibt es immer noch Lücken im Wissen über wichti-
ge Detailprozesse des Wetter- und Klimageschehens. Sie sind vorwiegend auf die
nicht ausreichend vorhandenen oder zu ungenauen Messungen der relevanten
atmosphärischen Parameter zurückzuführen. So ist beispielsweise die Kenntnis
der globalen Wasserdampfverteilung noch unzureichend, obwohl Wasserdampf

das wichtigste natürliche Treibhausgas in der Atmosphäre ist. Bestehende Defizite können durch den Einsatz der GNSS-Technologie teilweise geschlossen werden.

Seit Beginn der 1990er-Jahre wird GPS zur Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes genutzt (Bevis et al. 1992). Der Wasserdampf, der hauptsächlich in den unteren 3 bis 5 km der Troposphäre verteilt ist, kann mit einer einzelnen Bodenstation nur in einem Radius von 7 bis 15 km gemessen werden. Der nur kleine Radius macht den Aufbau dichter Netze erforderlich. Das Produkt ist der vertikal integrierte Wasserdampf (integrated water vapour, IWV) oberhalb der Station; zusätzlich können horizontale Gradienten oder der integrierte Wasserdampf entlang des Weges zum Satelliten (slant delays) abgeleitet werden. Damit können die Beobachtungen dichter GNSS-Bodennetze nach einer geeigneten Prozessierung dazu genutzt werden, um die Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (Abb. 6) für meteorologische Anwendungen bereitzustellen.

GNSS-basierte Methoden zur Wasserdampfbestimmung werden am GFZ seit über 15 Jahren operationell angewandt und für die Verbesserung von regionalen und globalen Wettervorhersagen genutzt (Gendt et al. 2004, Poli et al. 2007, Guerova et al. 2016). Beispielsweise werden am GFZ die GNSS-Daten des globalen IGS-Netzes sowie des Deutschen SAPOS-Netzes im Rahmen des E-GVAP-Projektes (The EUMETNET GNSS Water Vapour Programme) in nahezu Echtzeit prozessiert. Die troposphärischen Produkte (Wasserdampf- und slant-delay-Daten) von insgesamt mehr als 500 Stationen werden den europäischen Wetterdiensten operationell zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich können die GNSS-Daten für klimatologische Untersuchungen des Langzeitverhaltens des globalen Wasserdampfes genutzt und wichtige Informationen zur Charakterisierung des globalen Klimawandels gewonnen werden (Haas et al. 2003). Die im Vergleich zu anderen Fernerkundungsmethoden

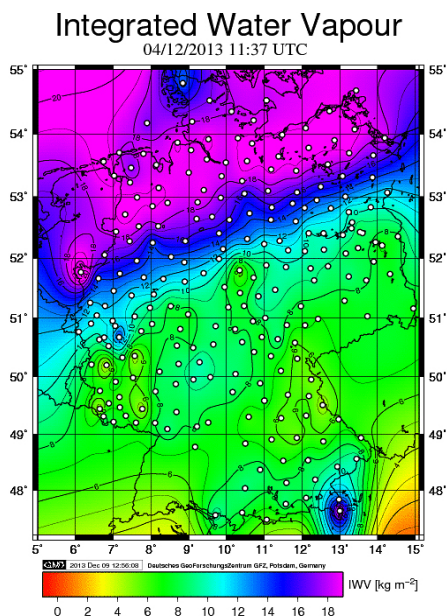


Abb. 6: Beispiel der Wasserdampfverteilung über Deutschland aus GNSS-Daten während des Orkans „Xaver“ im Dezember 2013

relativ neuen GNSS-Verfahren sind dabei mittlerweile als eine der Standardmessmethoden anerkannt. Beispielsweise werden am GFZ die GNSS-Daten des GRUAN-Netzes (GCOS Reference Upper Air Network, www.gruan.org) der WMO im Rahmen des GCOS (Globale Climate Observing Systems) analysiert. GNSS-Empfänger sind hier fester Bestandteil der Messausrüstung von gegenwärtig 16 global verteilten GRUAN-Observatorien.

Ein Beispiel für aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen stellt die Nutzung von konsistent reprozessierten GNSS-Daten des in [Kap. 3.2](#) erwähnten weltwei-

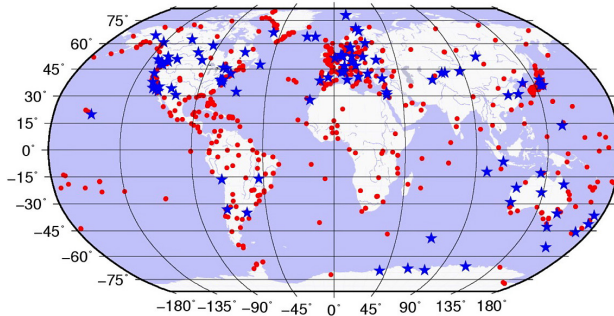


Abb. 7: Geografische Lage aller TIGA-Stationen, deren Daten reprozessiert wurden (rote Punkte). Die blauen Sterne markieren 101 Stationen mit Datensätzen, die länger als 15 Jahre sind und für Untersuchungen des Langzeitverhaltens des Wasserdampfes genutzt wurden (aus Ning et al. 2016).

ten TIGA-Messnetzes zur Analyse des Langzeitverhaltens des IWV an diesen Stationen dar. TIGA-Daten werden hauptsächlich zur Überwachung der vertikalen Referenz von Pegeldaten genutzt. Sehr viele dieser Stationen verfügen über Datenreihen von über 15 Jahren ([Abb. 7](#)). Eine

Schlüsselaufgabe bei der Langzeitanalyse ist die Homogenisierung der GNSS-Datensätze. Dazu werden Messungen der anderen geodätischen Weltraumverfahren VLBI und DORIS sowie auch globale meteorologische Reanalysen (ERA-Interim) genutzt. Neben der erfolgreichen Entwicklung von Methoden zur Homogenisierung konnten auch Inkonsistenzen in den ERA-Interim-Daten aufgedeckt werden (Ning et al. 2016).

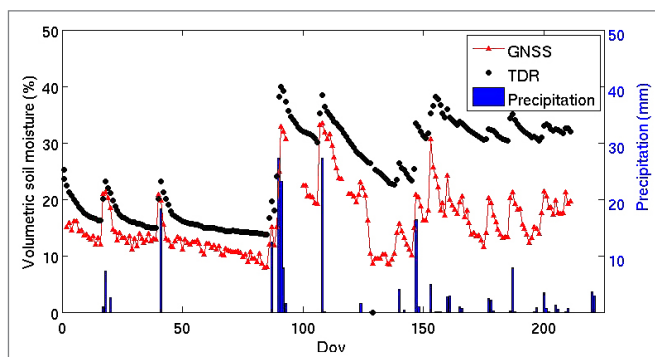
7 GNSS-Reflektometrie

In den letzten Jahren hat die GNSS-Reflektometriemethode (GNSS-R) mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Diese innovative Anwendung von Navigationsatelliten geht über die klassischen geodätischen Verfahren hinaus und zielt auf die Fernerkundung geophysikalischer Eigenschaften von Wasser-, Land-, und Eisoberflächen sowie potenziell auch von Atmosphären- und Ionosphärenparametern ab (Stosius et al. 2011). Mit verschiedenen boden- und fluggestützten

Experimenten konnte bereits das hohe Potenzial dieser neuen Beobachtungstechnik für die Erdbeobachtung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen demonstriert werden (Abb. 8; Semmling et al. 2016). In jüngster Zeit wurden auch erste satellitengestützte GNSS-R-Experimente erfolgreich umgesetzt (Tech DemoSat-1, CYGNSS). Es ist jedoch noch ein erheblicher Forschungsaufwand notwendig, um das hohe Potenzial dieser Technik auszuschöpfen und operationelle Anwendungen zu ermöglichen.

Die Bedeutung der GNSS-R-Erdbeobachtungstechniken wird in den nächsten Jahren weiter wachsen. Basis dafür sind Entwicklung

und Ausbau der neuen GNSS und die sich kontinuierlich vergrößernde GNSS-Empfängerinfrastruktur (Bodennetze, Flugplattformen und LEO-Satelliten mit GNSS-Empfängern; Wickert et al. 2015).



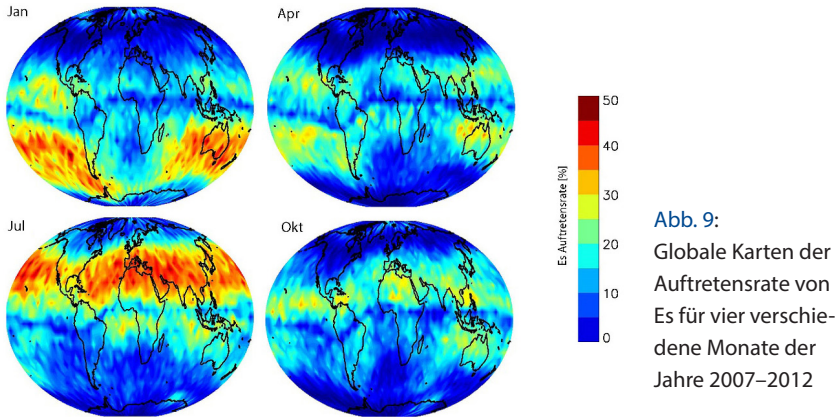
Siehe Vey et al. 2015

Abb. 8: Variation der Bodenfeuchte in Sutherland, Südafrika, abgeleitet aus GNSS-Daten (rot) und klassischen Bodenfeuchtesensoren (schwarz; TDR: time-domain reflectometry). Blaue Linien markieren Niederschlagsereignisse.

8 Beobachtung Sporadischer E-Schichten in der Ionosphäre

Sporadische E-Schichten (Es) sind dünne Strukturen erhöhter Elektronendichte, die in der E-Schicht der Ionosphäre in etwa 90 bis 120 km Höhe auftreten. Durch ihr scheinbar unregelmäßiges Erscheinen, erhielten sie nach ihrer Entdeckung mit bodengestützten Ionosondenmessungen zu Beginn des letzten Jahrhunderts das Attribut sporadisch. Heute weiß man, dass es sich hierbei um ein regelmäßig auftretendes Phänomen handelt, welches durch das Zusammenspiel von Metallionen, Wind in der oberen Erdatmosphäre und Erdmagnetfeld entsteht.

Sporadische E-Schichten können eine sehr hohe Konzentration von Elektronen aufweisen. Daher besitzen sie das Potenzial, die globalen Kommunikations- und Navigationssignale zu kompromittieren. Die Störung der GNSS-Signale kann im Gegenzug aber verwendet werden, um die sporadischen E-Schichten und ihre Eigenschaften auf globaler Skala zu untersuchen. So konnte in den letz-



ten Jahren basierend auf Radiookkultationsmessungen gezeigt werden, dass die sporadischen E-Schichten bevorzugt in mittleren Breiten entstehen (Arras et al. 2008, Arras et al. 2012). Die höchsten Auftretenswahrscheinlichkeiten mit bis zu 50 % wurden in den Nachmittagsstunden im Sommer beobachtet. In polaren Regionen und in der Nähe des Äquators treten die Es nur selten auf (Abb. 9).

Literatur

- Arras, C.; Wickert, J.; Jacobi, C.; Heise, S.; Beyerle, G.; Schmidt, T.: A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L14 809. DOI: [10.1029/2008GL034158](https://doi.org/10.1029/2008GL034158), 2008.
- Arras, C.; Wickert, J.; Jacobi, C.; Heise, S.; Beyerle, G.; Schmidt, T.: Global Sporadic E Layer Characteristics Obtained from GPS Radio Occultation Measurements, Climate and Weather of the Sun-Earth-System (CAWSES). Springer Atmospheric Sciences. DOI: [10.1007/978-94-007-4348-9_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4348-9_5), 2013.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T.; Rocken, C.; Anthes, R.; Ware, R. H.: GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 97, No. D14, 15787–15801, 1992.
- Deng, Z.; Fritsche, M.; Nischan, T.; Bradke, M.: Multi-GNSS Ultra Rapid Orbit-, Clock- & EOP-Product Series. GFZ Data Services. DOI: [10.5880/GFZ.1.1.2016.003](https://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.003), 2016.
- Fritsche, M.; Deng, Z.; Ge, M.; Nischan, T.; Uhlemann, M.; Beeskow, G.; Brandt, A.; Bradke, M.; Ramatschi, M.: GFZ Analysis Center Technical Report 2014. In: Jean, Y.; Dach, R. (Hrsg.): International GNSS Service (IGS) Technical Report 2014. Pasadena, IGS Central Bureau, 52–61, 2015.
- Ge, M.; Douša, J.; Li, X.; Ramatschi, M.; Nischan, T.; Wickert, J.: A Novel Real-time Precise Positioning Service System: Global Precise Point Positioning With Regional Augmentation. *Journal of Global Positioning Systems*, 11(1), 2–10, 2012.
- Ge, M.; Gendt, G.; Rothacher, M.; Shi, C.; Liu, J.: Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 389–399. DOI: [10.1007/s00190-007-0187-4](https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4), 2008.

- Gendt, G.; Dick, G.; Reigber, C.; Tomassini, M.; Liu, M.; Ramatschi, M.: Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany. *J. Met. Soc. Japan*, 82(1B), 361–370, 2004.
- Guerova, G.; Jones, J.; Douša, J.; Dick, G.; de Haan, S.; Pottiaux, E.; Bock, O.; Pacione, R.; Elgered, G.; Vedel, H.; Bender, M.: Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5385–5406. DOI: [10.5194/amt-9-5385-2016](https://doi.org/10.5194/amt-9-5385-2016), 2016.
- Haas, R.; Elgered, G.; Gradinarsky, L.; Johansson, J.M.: Assessing long term trends in the atmospheric water vapor content by combining data from VLBI, GPS, radiosondes and microwave radiometry. In: *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, edited by W. Schwegmann and V. Thorandt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt/Leipzig, 279–288, 2003.
- Li, X., Ge, M.; Dai, X.; Ren, X.; Fritsche, M.; Wickert, J.; Schuh, H.: Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6). DOI: [10.1007/s00190-015-0802-8](https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8), 2015.
- Li, X.; Zhang, X.; Ge, M.: Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 85(3), 151–158. DOI: [10.1007/s00190-010-0424-0](https://doi.org/10.1007/s00190-010-0424-0), 2010.
- Ning, T.; Wickert, J.; Deng, Z.; Heise, S.; Dick, G.; Vey, S.; Schöne, T.: Homogenized Time Series of the Atmospheric Water Vapor Content Obtained from the GNSS Reprocessed Data. *Journal of Climate*. DOI: [10.1175/JCLI-D-15-0158.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0158.1), 2016.
- Poli, P.; Moll, P.; Rabier, F.; Desroziers, G.; Chapnik, B.; Berre, L.; Healy, S.B.; Andersson, E.; Guelai, F.-Z. E.: Forecast impact studies of zenith total delay data from European near real-time GPS stations in Météo France 4DVAR. *J. Geo. Phys. Res.*, 112, D06114, 2007.
- Semmling, M.; Leister, V.; Saynisch, J.; Zus, F.; Heise, S.; Wickert, J.: A Phase-Altimetric Simulator: Studying the Sensitivity of Earth-Reflected GNSS Signals to Ocean Topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54, 11, 6791–6802. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2591065](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2591065), 2016.
- Stosius, R.; Beyerle, G.; Hoechner, A.; Wickert, J.; Lauterjung, J.: The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with GLONASS and Galileo on GNSS-Reflectometry tsunami detection from space. *Advances in Space Research*, 47, 5, 843–853, 2011.
- Vey, S.; Güntner, A.; Wickert, J.; Blume, T.; Ramatschi, M.: Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. *GPS Solutions*, 20, 4, 641–654. DOI: [10.1007/s10291-015-0474-0](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0474-0), 2016.
- Wickert, J.; Semmling, M.; Beckheinz, J.; Beyerle, G.; Vey, S.; Schuh, H.: Innovative Satellitengeodäsie am GFZ – Fernerkundung mit reflektierten GNSS-Signalen. *av. n*, 121 (214) 10, 347–352, 2015.

Kontakt

Prof. Dr. Harald Schuh | J. Wickert | G. Dick | M. Ge | M. Ramatschi |
X. Li | Z. Deng | F. Alshawaf | C. Arras | B. Männel
Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg A 17, 14473 Potsdam
schuh@gfz-potsdam.de



Session 2: Anwendungsaspekte

Zum Status einer DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren

Klaus Fritzensmeier | Uwe Ehrhorn | Barbara Görres |
Rolf Hollmann | Michael Mayer | Florian Pollinger

1 Motivation

Die internationale Normenreihe ISO 17123 „Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments“ gewinnt in der Ingenieurgeodäsie immer stärker an Bedeutung. Das Befolgen dieser Normen zur Verifikation des eingesetzten Instrumentariums sorgt beim Anwender für instrumentelle Sicherheit und in vielen Fällen auch für Rechtssicherheit. Allerdings ist mit dem Teil 8 „GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)“ nur ein ISO-Dokument verfügbar, dass sich mit GNSS-Prüfverfahren zu einem speziellen Typus beschäftigt. Nach Diskussionen im zuständigen ISO-Gremium ISO TC172 SC6 „Geodetic and surveying instruments“ und im zuständigen DIN Arbeitsausschuss 04 „Geodätische Instrumente und Geräte“ (AA04) des Fachbereiches 03 „Geodäsie und Geoinformation“ (FB03) als Teil des Normenausschusses 005 (NA005) wurde eine Arbeitsgruppe „GNSS-Feldprüfverfahren“ des AA04 gegründet, um ausgehend von der 17123-8 ggf. eine erweiterte DIN-Norm für GNSS-Feldprüfverfahren zu erarbeiten, die wiederum auf internationaler Ebene aufgenommen werden könnte. Eine dabei durchgeführte Prüfung der 17123-8 zeigte sehr schnell auf, dass eine reine Übernahme als sogenannte DIN ISO Norm, wie dies bei anderen Normen der 17123 Reihe gerade betrieben wird, aus den folgenden wesentlichen Gründen nicht empfohlen werden konnte:

- Die Entstehung der ISO 17123-8 reicht zurück in die Zeit, als das klassische RTK-Messverfahren als geodätischer Standard genutzt wurde. Demzufolge fokussiert diese ISO-Norm ausschließlich auf diese Messverfahrenstechnik.
- Hierzu zählt auch die Beschränkung auf klassische Base-Rover-Betrachtungen, die sich u. a. auch auf die in den Jahren 2000 bis 2010 vorrangig realisierten Instrumenten-Morphologien durch Trennung von Antenne und Empfänger stützen.
- Moderne Korrekturdatendienste, die z. B. durch verschiedenartige Referenzpunktfelder oder Satellitensysteme realisiert werden und zu einem großen Teil dem fachnahen Nutzer nur noch eingeschränkt als solche bewusst werden, bleiben in dieser ISO-Norm unberücksichtigt.

- Der heute immer stärkeren Verbreitung von sogenannten GIS-GNSS-Instrumenten wird nicht in ausreichendem Maße Rechnung getragen.
- Auch mit dem Fokus auf die zentrale Frage, für welche Nutzergruppen eine Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren interessant und hilfreich sein kann, ist schnell zu erkennen, dass die bestehende ISO 17123-8 sehr stark auf geodätische Anwender fokussiert, während die stetig wachsenden Gruppen fachnaher Verwendungen GNSS-gestützter Messtechniken nicht integriert sind.

Die Summe dieser wesentlichen Faktoren hat im AA04 daher zu dem Entschluss geführt, eine Übersetzung der ISO 17123-8 zunächst auszusetzen und stattdessen die Erstellung einer eigenen DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren zu prüfen und zu entwickeln. Diese Aufgabe wurde der o. g. Arbeitsgruppe des AA04 übertragen. Sie wird von K. Fritzensmeier (Leica Geosystems GmbH Vertrieb) koordiniert. Aktuell sind insbesondere U. Ehrhorn (ehrhorn Vermessung, Achim), B. Görres (Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Euskirchen), R. Hollmann (Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Würzburg), M. Mayer (Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe) und F. Pollinger (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig) aktiv.

2 Umfeld der Norm

Das Umfeld der zu entwickelnden DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren lässt sich etwas vereinfacht durch die folgenden Dokumente bzw. aktuellen Situationen beschreiben:

- Verfügbarkeit der o. g. ISO 17123-8 „GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)“,
- Verfügbarkeit des DVW-Merkblattes 1-2011 „Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen“,
- Bestrebungen der Bundesländer zur Novellierung ihrer jeweiligen Erlasse zur Prüfung von TPS- und GNSS-Instrumenten zum Einsatz im öffentlichen Vermessungswesen. Erste Neufassungen liegen bereits z. B. aus Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Hessen vor:
 - Hessen: Richtlinie „Prüfung der im öffentlichen Vermessungswesen verwendeten Messgeräte (Richtlinie Messgeräteprüfung)“,
 - NRW: „Neue Prüfverfahren für Tachymeter und GNSS-Empfänger im amtlichen Vermessungswesen (Prüffelderlass)“,
 - Niedersachsen: „Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErläss)“.
- Verfügbarkeit bzw. weiterhin Gültigkeit diverser länderspezifischer Richtlinien und Erlasse, deren Novellierung bereits läuft bzw. in Planung ist.

3 Zielsetzung

In den in [Kap. 2](#) genannten Regelungsdokumenten werden jeweils nur Teilbereiche der geplanten DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren behandelt. Die in den einzelnen Bundesländern bisher praktizierten Regelungen zur Prüfung von GNSS-Instrumenten im öffentlichen Vermessungswesen zeigen ein uneinheitliches Bild. Ein zentrales Ziel der neuen DIN-Norm soll daher in der Vereinheitlichung eines Prüfverfahrens liegen, dass im Idealfall vorrangig auch bei neuen länderspezifischen Regelungen zur Anwendung kommen kann. Als weitere Ziele der DIN-Norm wurden identifiziert:

- Rechtssicherheit beim Einsatz von GNSS-Messverfahrenstechniken,
- Weitgehende Berücksichtigung technologischer Weiterentwicklungen sowohl in der Instrumenten-Morphologie als auch in den Datenströmen,
- Weitgehende Unabhängigkeit von der Genauigkeitsklasse des zu prüfenden Instrumentariums,
- Betrachtung des zu prüfenden Equipments als Gesamtsystem, bestehend aus Instrumentenkomponenten, Zubehör, Betriebssoftware und Applikationen,
- Qualitative und Quantitative Mehrstufigkeit des Prüfverfahrens, um unterschiedlichen Anforderungsprofilen gerecht werden zu können,
- Einbeziehung der Sachkompetenz des Anwenders.

Diesen Zielen stehen herausfordernde Rahmenbedingungen gegenüber, deren wichtigste sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Ein GNSS-Instrument ist kein Messgerät im engeren Sinn, dass z. B. wie Nivelliere oder Totalstationen unabhängig von anderer Infrastruktur aus sich selbst heraus und ohne Sollvorgaben geprüft werden kann. Vielmehr handelt es sich bei den GNSS-Instrumenten strenggenommen um Teilkomponenten eines Gesamtsystems. Weitere Systemkomponenten sind Navigationssatelliten, Datenübertragungstechniken und -ströme, Datenaufbereitungsverfahren inkl. der zur Positionsbestimmung eingesetzten Algorithmen und zusätzliche weitere technische Baugruppen, wie z. B. die Korrekturdienstleister mit dem zugehörigen Instrumentarium und der Vernetzungssoftware.
- GNSS-Instrumente werden zunehmend als Black-Box-Systeme wahrgenommen bzw. sind als solche herstellerseitig so konstruiert, dass keine bzw. nur geringe Einflussnahme auf wichtige Instrumentenparameter genommen werden kann.
- Gleichzeitig handelt es sich bei GNSS-Instrumenten um Rechnersysteme im engeren Sinn, deren fehlerfreies Arbeiten durch eine Vielzahl möglicher „Stellschrauben/Parametereinstellungen“ bestimmt wird.

- Andererseits liegt den satellitengeodätischen Messtechniken grundsätzlich ein Schätzalgorithmus zugrunde, dessen Ergebnis von einer sehr großen Anzahl möglicher Einflussfaktoren abhängig ist.
- Die Qualität der Beobachtungen und der erreichbaren Unsicherheiten hängt sehr stark von den konkreten Bedingungen vor Ort ab. Abschattung und Mehrwegeeffekte sind z. B. nur schwer durch Referenzmessungen an anderen Orten vorhersagbar.
- Eine stringente und mathematisch einfache Betrachtung einer Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren auf die erreichbare Messgenauigkeit ist im Gegensatz zu anderen geodätischen Instrumenten und Messprinzipien zur Zeit nicht möglich.

Das Zusammenbringen der gesteckten Ziele mit den für GNSS-Instrumente geltenden Rahmenbedingungen stellt die eigentliche Herausforderung für die Ausführung der hier angestrebten DIN-Norm dar.

4 Begriffsbildung und Definitionen

Im Vorfeld der Betrachtungen zum eigentlichen Prüfverfahren ist die Frage zu klären, was genau geprüft werden kann. Die Annäherung an die Beantwortung dieser Frage zeigt schnell auf, dass sich GNSS-Instrumente im Wesentlichen durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Nach Inbetriebnahme und einem automatisierten Initialisierungsprozess wird eine dreidimensionale Koordinate, ausgedrückt in einer voreingestellten Koordinatendarstellung, angezeigt.
- In vielen, aber nicht allen Fällen werden zusätzliche qualitative Kenngrößen (z. B. Genauigkeitsangaben) angezeigt, die eine mehr oder minder zuverlässige Bewertung erlauben sollen.
- Messungsrohdaten oder die Koordinatenangabe beeinflussende Parameter und/oder Einflussgrößen sind nicht oder nur für den sachkundigen Nutzer abrufbar. Dies gilt insbesondere auch für die von Korrekturdienstleistern übermittelten Daten.

Mit Blick auf die DIN-Norm bleibt somit festzuhalten, dass gemäß der DIN ISO 17123-1 ...

- ... in der Anzeige des GNSS-Instrumentes i. d. R. eine dreidimensionale Koordinate als „Größenwert“ und damit als Messwert visualisiert wird,
- ... der Messwert je nach Instrumentenausführung teilweise mit und teilweise ohne Standardabweichung (oder ein vergleichbares Qualitätsmaß) angezeigt wird,

- ... die angezeigte dreidimensionale Koordinate somit das einzige normungsfähige Messergebnis ist.

Eine hieraus resultierende nähere Betrachtung der Koordinate als zentrales Messergebnis belegt deutlich ein Versagen von vielfach verwendeten Unterscheidungs- und Klassifizierungskriterien, wie:

- absolute (z. B. aus absoluten GNSS-Verfahrenstechniken abgeleitete) Koordinaten,
- relative Koordinaten, berechnet z. B.
 - im Basislinien- oder Netzmodus,
 - unter Nutzung geodätischer (N)RTK-Techniken oder
 - ohne Verwendung von Trägerphaseninformationen (z. B. code-basiertes DGNSS),
- Gebrauchskoordinaten als Qualitätskriterium z. B. im regionalen Koordinatenrahmen,
- Arbeitskoordinatensystem als Umschreibung desjenigen Koordinatenrahmens, in dem die Koordinaten erhoben werden.

Alle in der Anzeige dargestellten Messwerte haben ein „absolut“ wirkendes Erscheinungsbild, das nicht nur durch den nicht sachkundigen Anwender als „absolute“ Koordinate ohne Kenntnis des möglichen Referenzbezuges wahrgenommen wird.

Distanziert betrachtet ist eine solche Differenzierung zwischen diesen Koordinatenbezügen aber dann auch kein Gegenstand der Normung, wenn eine einzige und zentrale Forderung im Sinne der Feldprüfung des Prüflings erfüllt ist. Und diese zentrale Forderung besteht darin, dass die zur Anzeige gebrachten dreidimensionalen Koordinaten im Sinne des Messwertes mit einem Sollwert zum Abgleich zu bringen sind.

Diese Forderung schließt auch ein, dass der Abgleich zugleich und immer in dem Koordinatenrahmen zu erfolgen hat, der auch Gegenstand der aus der Feldprüfung abzuleitenden Qualitätsaussage sein soll. Vereinfacht gesprochen hat somit die GNSS-Feldprüfung im Arbeitsgebiet des Projektes stattzufinden, zu dessen Qualitätssicherung die GNSS-Feldprüfung erfolgen soll und nicht nur am Heimatort des Prüflings.

In erster Annäherung konzentriert sich die GNSS-Feldprüfung der DIN-Norm demzufolge auf einen Vergleich von Soll- zu Istwerten, dessen Qualität und Aussagekraft noch näher zu spezifizieren ist.

5 Abgrenzungen des Prüfverfahrens

Als Voraussetzung für den favorisierten Soll-Ist-Vergleich sind verschiedene Abgrenzungen vorzunehmen und insbesondere Einflussfaktoren vorauszusetzen, zu definieren oder auch auszuschließen. Nur unter Berücksichtigung dieser Abgrenzung von nicht zu normierenden Einflussgrößen kann die gewünschte qualifizierte Feldprüfung erzielt werden. Für die DIN-Norm werden die folgenden Abgrenzungen vorgenommen bzw. als Klassifizierungskriterium unterschieden und bewertet.

5.1 Instrumentensystem-bedingte Abgrenzung

Die geplante DIN-Norm sieht eine summarische Prüfung des gesamten Systems „GNSS“ von der Messung bis zu Koordinatendarstellung mit allen verwendeten Komponenten – bestehend aus dem GNSS-Instrument selbst, Zubehörteilen, Betriebs- und Applikations-Softwareeinstellungen sowie Datenströmen inkl. zusätzlicher Korrektur- oder Transformationsparameter – vor. Eine Prüfung einzelner Komponenten ist nicht Gegenstand der DIN-Norm; beispielsweise werden die ggf. getrennten Komponenten GNSS-Antenne und GNSS-Sensor nicht getrennt geprüft. Ebenso wird die individuelle Prüfung des Zubehörs (z. B. Stativ, Skala, Libellen) als obligatorische Sorgfaltspflicht gewertet, wenngleich Teile des Zubehörs automatisch in das Ergebnis des Prüfverfahrens eingebunden sind. Es ist also nicht das Ziel der DIN-Norm, explizite Ursachen für Abweichungen dezidiert festzustellen, sondern nur die Arbeitsfähigkeit zu überprüfen.

5.2 Qualitative Abgrenzung durch Genauigkeitsklassen

Die DIN-Norm soll für ein möglichst breites Spektrum von Instrumenten, die einer GNSS-Feldprüfung unterzogen werden sollen, einsetzbar und verwendbar sein. Für einen qualifizierten Vergleich ist demzufolge in Anlehnung an die DIN ISO 17123-1 die Messunsicherheit der zu vergleichenden Koordinaten zu klassifizieren. Nach den bisherigen Betrachtungen haben sich die in [Tab. 1](#) gelisteten Messunsicherheitsklassifizierungen als geeignet gezeigt.

5.3 Qualitative Abgrenzung durch Mehrstufigkeit der Prüfverfahren

Die DIN-Norm umfasst ein mehrstufiges Prüfverfahren, dass sowohl den Notwendigkeiten regelmäßiger Kontrollen (Alltagstauglichkeit) als auch den verschiedenen Anforderungen der verschiedenen Genauigkeitsklassen Rechnung trägt. Diese Mehrstufigkeit der Prüfverfahren folgt dem Aufbau der Feldprüfverfahren der ISO 17123 Normenreihe ([Tab. 2](#)).

Tab. 1: Klassifikation der Messunsicherheiten

Klasse	U_{Lage} in mm	$U_{\text{Höhe}}$ in mm	Anforderung ergibt sich aus Anwendung in ...
A	≤ 2	≤ 4	sehr kritischen Überwachungen, z. B. Stabilitätsüberwachungen von Bauwerken, Rutschungshängen
B	[2; 20]	[4; 40]	typischen Genauigkeitsüberwachungen, u. a. in der Ingenieur- und Liegenschaftsvermessung
C	[20; 200]	[40; 200]	bautechnischen Vermessungen (Spatenmaß oder Leitungsdokumentation)
D	≥ 200	≥ 200	„GIS“-Anwendungen

Das Prüfverfahren der Stufe 1 beinhaltet einen einfachen Koordinatenvergleich ohne die Berechnung qualitativer Bewertungskennzahlen. Das Prüfverfahren der Stufe 2 stellt eine Messungsprozedur bereit, die unter Einbeziehung mehrerer Messpunkte und einer vorgegebenen Messungsabfolge sowohl den Koordinatenvergleich als auch dessen qualitative Bewertung erlaubt und dokumentiert.

Eine erweiterte Stufe 3 könnte die Aussagen der Prüfungsstufe 2 mit Konzentration auf ausgewählte Komponenten des Prüflings vertiefen und Hinweise für notwendige konkrete Schritte zur Verbesserung des Messergebnisses liefern. Für Anwendungen der Genauigkeitsklasse A sind aufwendigere Tests mit einer höheren Aussagekraft und Sensitivität gegenüber einzelnen Störeinflüssen notwendig. Bei diesen Komponenten kann es sich z. B. um die individuelle Kalibrierung der GNSS-Antenne handeln.

Tab. 2: Aufbau von Feldprüfverfahren nach ISO 17123

Stufe	Beschreibung	Genauigkeitsklasse			
		A	B	C	D
1	Einfacher Koordinatenvergleich	x	x	x	x
2	Qualifizierter Koordinatenvergleich	x	x	x	
3	Erweiterter qualifizierter Vergleich mit Konzentration auf ausgewählte Systemteile (z. B. Überprüfung von Antennenkalibrierwerten mittels geeignetem Prüffeld)	x			

5.4 Qualitative Abgrenzung durch das Prüfungskriterium

Gestützt auf die zentrale Forderung aus [Kap. 4](#) besteht das Prüfungskriterium darin, dass die zur Anzeige gebrachten Koordinaten im Sinne des Messwertes mit einem Sollwert zum Abgleich zu bringen sind. Aufgrund der Vielfältigkeit der möglichen Koordinatendarstellung und -bezeichnung wird für die DIN-Norm die folgende Abgrenzung gewählt:

- Als Prüfungskriterium sind primär dreidimensionale Koordinaten zugelassen. Für deren Prüfung werden die folgenden Darstellungsformen empfohlen:
 - Dreidimensionale kartesische Koordinaten (X, Y, Z)
 - Dreidimensionale ellipsoidische Koordinaten (B, L, h oder Northing, Easting, Up)
 - Abgebildete und ggf. transformierte Koordinaten (z. B. UTM, h)
 - Metrische lokale Koordinaten (z. B. R, H, h)
 - Weitere dreidimensionale Darstellungsformen sind dann erlaubt, wenn der Sollwert auch in dieser identischen Darstellungsform gegeben ist.
- Als Prüfungskriterium sind ausgeschlossen:
 - Ebene Strecken und ebene Winkel
 - Kinematische Messwerte

5.5 Qualitative Abgrenzung in der Berücksichtigung der Einflussfaktoren

Aus GNSS-Messverfahren ermittelte Koordinaten sind von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Für diese Einflussfaktoren gelten aus Sicht der DIN-Norm folgende Eigenschaften:

- Der überwiegende Teil dieser Einflussfakten ist für den Anwender nicht trivial bzw. nicht unmittelbar erfassbar (z. B. Laufzeitverzögerungen in Tropo- und Ionosphäre, Mehrwegeeffekte).
- Die Wirksamkeit der Einflussfaktoren ist u. a. von der Wahl des Messverfahrens abhängig.
- Die Größenordnung der Einflussfaktoren ist für das gewählte GNSS-Instrument bzw. -verfahren unterschiedlich wichtig.

Aus diesen Gründen ist ein allgemein gültiges und somit klassisch standardisierbares Verfahren zur metrologisch stringenten Berücksichtigung aller Einflussfaktoren auf das GNSS-Feldprüfverfahren durch die DIN-Norm nicht möglich. Die Wirksamkeit der Einflussfaktoren ist daher als Teil des Koordinatenberechnungsprozesses zu sehen und somit undifferenziert im Sinne der DIN-Norm in dem Koordinatenvergleich als Prüfkriterium enthalten. Die Wirksamkeit eines Teils der Einflussfaktoren kann aber durch die Wahl und Abfolge des Prüfver-

fahrens maßgeblich bestimmt werden. Aus diesem Grund weist die DIN-Norm eine in ausgewählten Teilen definierte Prüfungsumgebung (vgl. [Kap. 6.1](#)) aus. Im Sinne der ISO-17123-Normenreihe werden zur qualitativen Bewertung des Prüfungsergebnisses darüber hinaus die maximalen Unsicherheiten, die durch ausgewählte wesentliche Einflussfaktoren entstehen können, benannt.

6 Prüfverfahren

Wie in [Kap. 5.3](#) ausgeführt, verfolgt die DIN-Norm ein dreistufiges Prüfverfahren, so dass die Feldprüfungen mit zunehmendem Detailierungsgrad vorgenommen werden können.

- Stufe 1: Einfacher Koordinatenvergleich als schnelle Plausibilitätskontrolle („Simplified Procedure“)
- Stufe 2: Qualifizierter Koordinatenvergleich („Full Procedure“), der in zwei Varianten vorgenommen werden kann:
 - Überprüfung der Spezifikationen des GNSS-Instrumentariums,
 - Überprüfung der Qualität eines ausgewählten Messverfahrens.
- Stufe 3: Erweiterte qualifizierte Prüfung ausgewählter GNSS-Systemteile („Extended Procedure“).

Da der Detailierungsgrad der Prüfungsstufe 3 einerseits sehr anspruchsvoll ist, andererseits aber nur für eine kleine Nutzergruppe von Bedeutung ist, wird die Aufnahme dieser Prüfungsstufe für die aktuell in der Bearbeitung befindliche DIN-Norm zurückgestellt.

6.1 Prüfungsumgebung

Für die Prüfungsumgebung sind einheitlich für alle Prüfungsstufen die folgenden Kriterien einzuhalten:

- Dauerhaft stabil gegründeter Messpunkt
- Ausführung als Bodenpunkt oder Messungspfeler
- Horizontfreiheit oberhalb 10°
- Kenntnis der Sollkoordinaten in dem zu prüfenden Koordinatenrahmen
- Kenntnis der Sollkoordinaten mit einer Messunsicherheit, die um mindestens den Faktor 5 besser ist als das zu prüfende GNSS-Instrument.

Bei einem Messpunkt kann es sich sowohl um einen Referenzpunkt handeln, der von Servicestellen betrieben wird und dessen Koordinaten zum Zeitpunkt der Prüfung mit hinreichend genauer Qualität bekannt sind, als auch um einen nutzeigenen Punkt. In dem letzteren Fall ist die hinreichend genaue Qualität der

Sollkoordinaten durch ein geeignetes Verfahren zu bestimmen. Dieses Verfahren ist jedoch nicht Gegenstand dieser DIN-Norm. Die Anzahl der Messpunkte ist einerseits abhängig von der Stufe des Prüfverfahrens (siehe [Kap. 6.2 ff.](#)); andererseits aber auch von der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit z. B. bei der Fehlersuche bei negativen Ergebnissen der Prüfverfahren.

6.2 Prüfverfahren der Stufe 1

Das Ziel dieser Prüfungsstufe ist es, dem Nutzer die Sicherheit zu geben, dass das GNSS-Instrument nicht offensichtlich außerhalb der gewünschten Unsicherheitstoleranzen liegt. Dazu wird ein Soll-Ist-Vergleich unter Messungsbedingungen, also dem vorgesehenen Messverfahren, der üblicherweise verwendeten Messungsdauer und dem verwendeten Messungsequipment inkl. Zubehör auf einem Referenzpunkt durchgeführt.

Nach dem gegenwärtigen Stand der Diskussionen wird für das Prüfverfahren der Stufe 1 die folgende Prüfungsanordnung empfohlen:

- Verwendung nur eines Messungspunktes (Raumfestpunkt)
- Kontrolle auf Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Betriebsparameter des GNSS-Instrumentes (z. B. GDOP-Wert)
- Initialisierung und erste Koordinatenmessung auf dem Messpunkt mit beliebiger horizontaler Ausrichtung des Antennenkörpers des GNSS-Instrumentes
- Horizontale Drehung des Antennenkörpers um 180°
- Neuinitialisierung und zweite Koordinatenmessung
- Horizontale Drehung des Antennenkörpers um 180°
- Neuinitialisierung und dritte Koordinatenmessung
- Die einwandfreie Funktionalität des Prüflings ist dann gegeben, wenn für jede Koordinatenachse die aus dem Messwert zum Sollwert errechnete Differenz einen definierten Grenzwert nicht übersteigt.
- Ein Maß für die Messunsicherheit wird nicht errechnet.
- Bei Überschreiten des Grenzwertes ist die Prüfung mit geänderter Satellitengeometrie (z. B. nach ca. 90 Minuten oder unter Verwendung anderer Satelliten) zu wiederholen.
- Sollte bei dieser Zweitprüfung der Grenzwert weiterhin nicht eingehalten sein, sollte das GNSS-Equipment bzgl. der Wirksamkeit typischer Einflussfaktoren untersucht werden.
- Sollte auch diese Untersuchung zu keiner Korrektur des Prüfungsergebnisses führen, kann ein Defekt des GNSS-Equipments nicht mehr ausgeschlossen werden.

6.3 Prüfverfahren der Stufe 2

Das Prüfverfahren der Stufe 2 unterscheidet nach dem gegenwärtigen Stand der Diskussionen zwei Varianten:

- Variante 1 dient der qualifizierten Überprüfung der Spezifikationen des GNSS-Instrumentes.
- Variante 2 erweitert die qualifizierte Überprüfung auf ein ausgewähltes Messverfahren.

Die aktuell favorisierte Messungsanordnung der Variante 1 folgt dabei den Empfehlungen der amtlichen Vermessungsverwaltung, wie sie z. B. wie folgt definiert sind:

- Messung auf mindestens zwei Messpunkten (Raumfestpunkten)
- Abfolge von mindestens drei unabhängigen Messungen
- Der zeitliche Abstand von zwei aufeinander folgenden Messungen auf einem Messpunkt soll eine geänderte Satellitengeometrie sicherstellen und kann beispielsweise nach 45 Minuten erfolgen.
- Die horizontale Ausrichtung der Antenne soll analog dem in Stufe 1 definierten Wechsel erfolgen.
- Aus den so ermittelten Messwerten werden durch Gegenüberstellung zu den Sollwerten Abweichungen inkl. ihrer Messunsicherheiten nach einem noch zu definierenden Berechnungsmuster ermittelt.
- Bei Überschreiten zulässiger Grenzwerte dieser Abweichungen gelten wiederum dieselben weiteren Entscheidungswege wie unter Stufe 1.

Die Variante 2 beinhaltet eine Erweiterung der Variante 1 durch mindestens ein weiteres, simultan eingesetztes GNSS-Instrument. Diese simultane GNSS-Feldprüfung mehrerer Instrumente erlaubt ergänzend zu der Prüfung in Variante 1 auch die Prüfung und Qualität der Messpunkt-Nachbarschaft. Die Messpunkt-Nachbarschaft kann dabei sowohl raumnah durch ausschließliche Verwendung der Punkte der Prüfungsumgebung als auch raumfern unter Einbeziehung eines entfernt liegenden Mess- oder Referenzpunktes ermittelt werden.

Die Variante 2 verfolgt auch das Ziel, Anforderungen aus GNSS-Anwendungen im hoheitlichen Vermessungswesen mit in die DIN-Norm abzubilden. Die für diese Variante vorzunehmende Messungsanordnung orientiert sich daher auch an den aus diesem Anwendungsbereich stammenden Empfehlungen:

- Simultane Messung von zwei GNSS-Instrumenten auf mindestens zwei Messpunkten;
- Abfolge von mindestens drei unabhängigen Messungen
- Jede Messung darf eine Messungsdauer von 15 Minuten nicht unterschreiten.

- Der zeitliche Abstand von zwei aufeinander folgenden Messungen auf einem Messpunkt soll eine geänderte Satellitengeometrie sicherstellen und kann beispielsweise nach 45 Minuten erfolgen.
- Alle Antennen sind horizontal nach Norden auszurichten.
- Aus den so ermittelten Messwerten werden dreidimensionale Koordinatendifferenzen der benachbarten Messpunkte inkl. zugehöriger Messunsicherheiten abgeleitet.
- Bei Überschreiten zulässiger Grenzwerte dieser Abweichungen gelten wiederum die gleichen weiteren Entscheidungswege wie unter Stufe 1.

7 Weiteres Vorgehen

Für die geplante DIN-Norm zu GNSS-Feldverfahren ist das weitere Vorgehen aktuell wie folgt geplant:

- Die für die DIN-Norm schon vorgenommenen inhaltlichen Abgrenzungen sind noch auf Vollständigkeit und Umsetzbarkeit zu prüfen.
- Die den Prüfungsstufen zugrundeliegenden Messungsanordnungen sind methodisch und grafisch auszuarbeiten.
- Die für die Prüfungsstufen und Varianten heranzuziehenden Grenzwerte, deren Berechnungsansätze sowie die zugehörigen Messunsicherheiten sind aus der Fachliteratur bereits verfügbar und sind für die DIN-Norm aufzubereiten.

Ein erster vollständiger Entwurf der DIN-Norm soll spätestens in der zweiten Jahreshälfte 2017 dem AA04 zur weiteren Diskussion vorgelegt werden.

Literatur

DVW-Merkblatt 1-2011: Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen.

Hessische Richtlinie: Prüfung der im öffentlichen Vermessungswesen verwendeten Messgeräte (Richtlinie Messgeräteprüfung).

ISO 17123-1 (2014): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 1: Theory.

ISO 17123-8 (2012): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK).

LiegVermErlass Niedersachsen: Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen.

Prüffelderlass NRW: Neue Prüfverfahren für Tachymeter und GNSS-Empfänger im amtlichen Vermessungswesen.

Kontakt

Dr.-Ing. Klaus Fritzensmeier
Manager Kunden Support und Service
Leica Geosystems GmbH Vertrieb
Triebstraße 14, 80993 München
klaus.fritzensmeier@leica-geosystems.com

Dipl.-Ing. Uwe Ehrhorn
ehrhorn vermessung
Georgstraße 15, 28832 Achim
u.ehrhorn@ehrhorn.de
www.ehrhorn.de

Dr.-Ing. Barbara Görres, ORR'in
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Dez V (1) Navigation/Geodäsie
Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen
barbaragoerres@bundeswehr.org

Prof. Dr. Rolf Hollmann
Hochschule für angewandte Wissenschaften
Würzburg Schweinfurt
Studienbereich Geo
Röntgenring 8, 97084 Würzburg
rolf.hollmann@fhws.de

Dr.-Ing. Michael Mayer
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
michael.mayer@kit.edu

Dr. Florian Pollinger
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), AG 5.42
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
florian.pollinger@ptb.de
www.ptb.de



Klaus Fritzensmeier



Uwe Ehrhorn



Barbara Görres



Rolf Hollmann



Michael Mayer



Florian Pollinger

Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung

Barbara Görres

1 Einführung

Die Notwendigkeit der Kalibrierung der GNSS-Empfangsantenne als Voraussetzung zur genauen oder gar hochgenauen Positionsbestimmung ist seit dem Ende der 1990er-Jahre zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Dachte man jedoch zunächst, die Frage sei mit der Bestimmung der Parameter der Antenne beantwortet, weiß man heute um die Wechselbeziehung dieser Parameter mit den Umgebungsbedingungen der Antenne.

Die Kalibrierung mit Hilfe eines Messroboters im Feld oder im Labor, wo heute bereits eine Kalibrierung des gesamten GNSS-Signalspektrums als Voraussetzung für Multi-GNSS-Anwendungen möglich ist, ist als Standardverfahren etabliert. Jedoch können selbst hier Effekte aus dem unmittelbaren Nahfeld der Antenne von den eigentlichen Antennenparametern bisher nur unbefriedigend isoliert werden. Bei der Übertragung auf die Situation an den Beobachtungspunkten kommen stationsabhängige Einflüsse aus dem Fernfeld der Antenne hinzu und verursachen ebenfalls Einflüsse wie Mehrwege- und Abschattungseffekte, deren Interaktion heute Gegenstand der Forschung ist.

So ist das Antennenproblem zwar immer wieder als gelöst betrachtet worden, während gleichzeitig neue Aspekte auftauchten, die die Antenne als Positionierungssensor betreffen und aktuelle Entwicklungen in der Antennentechnologie auslösen. Dies sind auf der einen Seite zunehmende Gefahren wie das Jamming und auf der anderen Seite die Analyse spezieller Eigenschaften des Signals wie Polarisation und Signalstärke in der Reflektometrie. [Abb. 1](#) fasst die Einflussfaktoren und Charakteristika von GNSS-Empfangsantennen zusammen.

2 GNSS-Empfangsantennen

Im Folgenden wird das Modell für GNSS-Empfangsantennen beschrieben. Darauf aufbauend werden Verfahren zur Kalibrierung des Antennenmodells aufgegriffen und die Anwendung dieser Korrekturwerte in der Praxis beschrieben. Abschließend erfolgen Hinweise zur Nutzung von Multi-GNSS-Antennen.

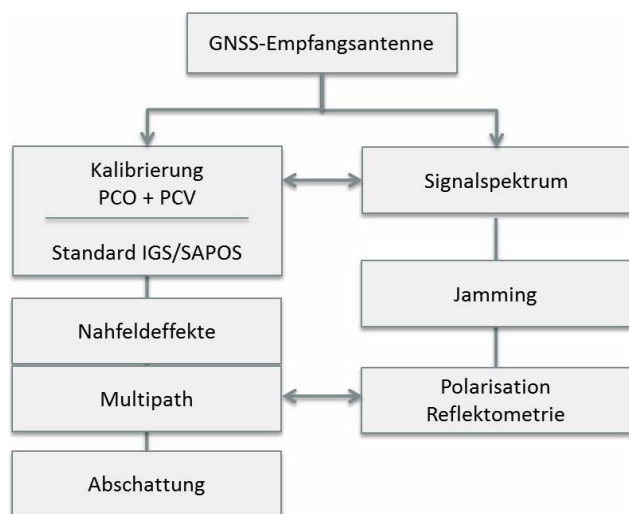


Abb. 1:
Einflussfaktoren
und Charakteristika
von GNSS-Emp-
fangsantennen

2.1 Das Antennenmodell

Die GNSS-Antenne ist der wichtigste Sensor einer jeden GNSS-Messung. Die zentrale Aufgabe der Antennenkalibrierung ist die Bestimmung des i. d. R. unzugänglichen Bezugspunktes der Trägerphasenmessung an der Antenne (PZ = mittleres Phasenzentrum), der somit den Bezugspunkt eines jeden Koordinatenergebnisses darstellt (Abb. 2). Im Idealfall würde es sich bei diesem sogenannten elektrischen Phasenzentrum um einen unveränderlichen Punkt innerhalb oder außerhalb der Antenne handeln. Tatsächlich variiert der Bezugspunkt der Messung aber mit der Einstrahlrichtung des Satellitensignals (Abb. 3). Ursächlich für diese Abhängigkeit sind elektromagnetische und geometrische Eigenschaften der Antennenbauteile und des jeweiligen Zubehörs im Nahfeld der Antenne, die zu einer Verformung des elektrischen Feldes und somit zu einer Verbiegung der im Idealfall sphärischen Phasenfront führen. Bei der Darstellung wird nach Elevations- und Azimutabhängigkeit unterschieden; wobei letztere im Regelfall mindestens eine Größenordnung kleiner ausfällt als die Elevationsabhängigkeit.

An der Antenne festgelegt werden kann jedoch nur ein mechanischer Referenzpunkt (ARP = Antenna Reference Point), auf den alle äußeren Zentrier-elemente, insbesondere die Antennenhöhe, bezogen werden. Er ist durch Konvention des International GNSS Service (IGS) im Schnittpunkt von vertikaler Symmetrieachse der Antenne mit ihrer Auflagefläche definiert.

Resultat der Antennenkalibrierung sind Korrekturwerte an die Distanzmessung zwischen Satelliten- und Empfangsantenne. Aus rein praktischen Erwä-

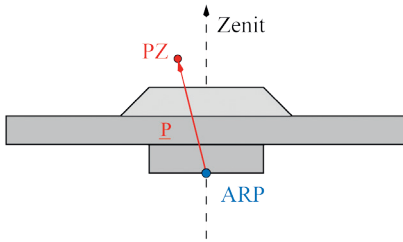


Abb. 2: Bezugspunkte einer GNSS-Antenne

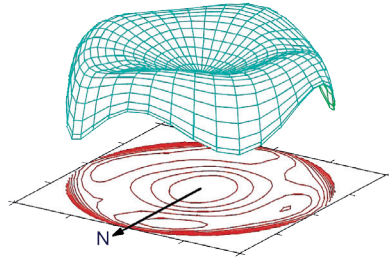


Abb. 3: Elevations- und azimutabhängige PCVs

gungen unterscheidet man in einen Vektor für den konstanten Anteil (PCO = phase center offset) als Mittelwert eines ausgleichenden Kugelsegments über ein definiertes Himmelssegment zuzüglich der richtungsabhängigen Korrekturwerte (PCV = phase center variations), die nach Elevations- und Azimutabhängigkeit tabelliert werden. PCO und PCV sind frequenzabhängig und damit auch für unterschiedliche GNSS verschieden.

2.2 Verfahren zur Antennenkalibrierung

Grundsätzlich werden **Feldverfahren** zur relativen oder absoluten Bestimmung von Antennenparametern sowie **Laborverfahren** zur absoluten Bestimmung unterschieden. Die relativen Feldverfahren haben heute an Bedeutung verloren. Im Jahr 2006 wurde vom IGS der relative Kalibrierstandard durch den absoluten ersetzt, wodurch auch die Akzeptanz absoluter Kalibrierverfahren erhöht wurde.

Allen Verfahren zur Bestimmung der absoluten Antennenparameter ist gemein, dass der Prüfling relativ zur Sendeantenne gedreht und/oder gekippt wird, um eine komplette und homogene Überdeckung der oberen Hemisphäre zu erreichen. Zwei unabhängige Methoden sind hierzu heute verfügbar.

Etabliert ist zum einen das Verfahren der absoluten Kalibrierung mit Hilfe eines **Messroboters**, das in einer Zusammenarbeit der Leibniz Universität Hannover mit der Firma Geo++ entwickelt wurde (Wübbena et al. 1997, vgl. Abb. 6). Ein Industrieroboter wird nach einem optimierten Messprogramm so gesteuert, dass die Hemisphäre der Antenne durch Drehung um das genäherte Phasenzentrum des Prüflings und Kippung von den als quasi-feste Signalquellen genutzten Satelliten in möglichst kurzer Zeit vollständig und homogen abgedeckt abgetastet wird. Die Messanordnung ermöglicht außerdem eine Trennung der beiden stationsabhängigen Einflüsse Antennenparameter (insb. PCV) und Mehrwegeeffekte (MP = Multipath), wobei letztere sowohl eliminiert als auch bestimmt werden können (vgl. Kap. 3.2). Alle Antennenparameter werden absolut erhalten, ohne dass Informationen über eine Referenzantenne einfließen.

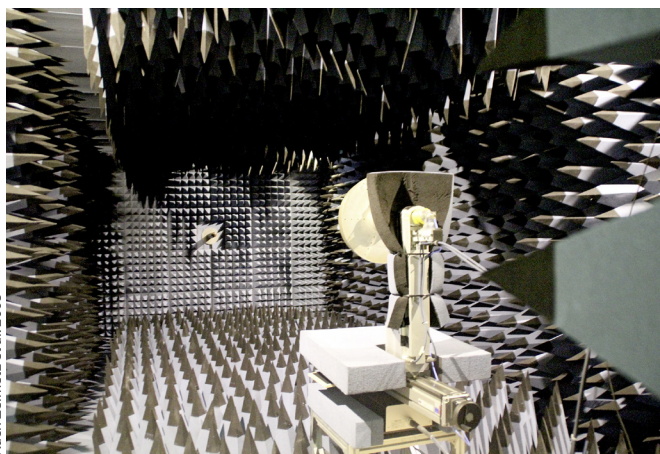


Abb. 4:
Die Bonner
Antennen-
messkammer

Die richtungsabhängigen PCVs werden durch Modellierung von Kugelflächenfunktionen gewonnen.

Im **Antennenlabor** erhält man absolute Kalibrierwerte durch Drehung der Antenne vor einem fest montierten Sender, der die GNSS-Nominalfrequenz sendet. Die Bonner Antennenmesskammer zur Laborkalibrierung wird seit 2009 in einer Kooperation zwischen dem Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und der Bezirksregierung Köln, GEObasis.nrw (ehemals Landesvermessungsamt NRW) betrieben ([Abb. 4](#)). Sie ist vollständig mit Dämmmaterialien ausgekleidet, die die Mikrowellen des GNSS-Spektrums absorbieren. Die zu kalibrierende Antenne wird in wählbaren Schrittweiten von Elevations- und Azimutrichtungen vor dem Sender nach einem voll automatisierten Messprogramm gedreht. Im Network Analyser wird sowohl das Sendesignal erzeugt, als auch anschließend die Phase des ausgehenden mit dem gemessenen Signal verglichen (Görres et al. 2006, Zeimetz et al. 2008). Eine Referenzantenne ist nicht erforderlich. Ein kompletter Durchlauf, der in einem Raster von 5°-Schritten in Elevation und Azimut sämtliche GNSS-Frequenzen abdeckt (vgl. [Kap. 2.4](#)), dauert etwa 1,5 Stunden.

Das hohe Potenzial für Detailuntersuchungen systematischer Effekte resultiert aus dem geringen Rauschniveau der Labormessung und der Tatsache, dass die Phasen im Gegensatz zu allen Feldverfahren direkt abgegriffen werden. Eine Approximation durch eine Funktion (z. B. Kugelflächenfunktion) ist nicht erforderlich. Die absoluten Parameter der werden direkt erhalten.

In den Jahren 2010 bis 2012 wurden erneut in verschiedenen Ringversuchen identische Antennen an unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen kalibriert, um das Genauigkeitsniveau durch Vergleich der Ergebnisse zu quantifizieren und zu

validieren (Bilich et al. 2012, Aerts et al. 2013). Beide o. g. Verfahren können als unabhängig voneinander angesehen werden. Die Kalibrierergebnisse stimmen für L1 besser als 1 mm überein und bis zu 2 bis 3 mm für L2. Sie liegen also im selben Genauigkeitsniveau wie bei den bisherigen Vergleichen (Görres 2010). Die Ursache der Differenzen zwischen den Ergebnissen der Kalibriereinrichtungen liegt vor allem im jeweiligen Antennen-Nahfeld. In der Kammer kommen beispielsweise Rest-Mehrwegeeffekte (z. B. Rest-Reflexionen im Absorberraum an den Hallenwänden oder der Dreheinrichtung) in Frage, die trotz aufwändiger Dämmung vorhanden sind. Bisher sind die Ergebnisse der deutschen Roboterkalibrierungen und des Bonner Labors von der IGS AWG (Antenna Working Group) zertifiziert.

2.3 Verwendung von Antennenkorrekturen in der Praxis

Die Verwendung der Antennenkalibrierergebnisse ist Voraussetzung für jede genaue oder hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung und geschieht heute standardmäßig. Einzig im Falle der Messung mit Antennen identischen Typs und identischer Ausrichtung auf kurzen Basislinien kann i. d. R. aufgrund der Eliminierung gleicher Einflüsse durch die Differenzbildung auf die Antennenkalibrierung verzichtet werden.

2.3.1 Antennenkorrekturen nach internationalem IGS-Standard

Der IGS definierte erstmals im Jahr 1996 ein für seinen Geltungsbereich verbindliches Antennenmodell. Dieser anfangs auf relative Angaben begrenzte Standard wurde im Jahr 2006 durch den absoluten Standard abgelöst. Die aktuell gültige Tabelle (igs08_www.atx, www = GPS week) ist zusammen mit einer Liste der IGS-Namenskonvention (rcvr_ant.tab) und Skizzen der Antennen (antenna.gra), die neben dem ARP, auf den sich die Antennenhöhe beziehen muss, auch die wichtigsten Abmessungen der Antennen enthält, auf den Webseiten des IGS erhältlich (www.igs.org). Sie enthält sowohl Kalibrierwerte für die Sendeantennen aller verfügbaren GNSS-Satelliten als auch für inzwischen fast 300 unterschiedliche Typen von Empfangsantennen bzw. speziellen Antennen-Radom-Kombinationen (Schmid 2016a). Für neu hinzukommende Kalibrierwerte sind derzeit nur Roboterkalibrierungen zulässig, die mindestens GPS- und GLONASS-Frequenzen umfassen.

Im IGS-Netz werden auch weiterhin ausschließlich Typkalibrierungen verwendet, da eine Verbesserung durch die Nutzung der individuellen Werte aus Sicht der IGS Antenne Working Group (AWG) bisher nicht nachgewiesen werden konnte – auch nicht im Zusammenhang mit Sprüngen in den Koordinaten bei Antennenwechseln (IGS-AWG-486).

Die hinzukommenden Frequenzen der GNSS Galileo und BeiDou sowie GPS-L5 sind noch nicht enthalten, da noch Vorbehalte hinsichtlich der Nutzung der Werte der Laborkalibrierung bestehen (Schmid 2016b).

2.3.2 Verwendung von Antennenkorrekturen im SAPOS-Umfeld

Die Antennen des Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS oder anderer Referenznetzbetreiber sind in aller Regel absolut und individuell kalibriert. Nutzer müssen lediglich die korrekte Bezeichnung ihrer Rover-Antenne nach der Namenskonvention des IGS eingeben, so dass bei der Auswertung auf die Typpmittel zurückgegriffen werden kann. Hilfestellungen geben hierbei die Provider.

2.4 Multi-GNSS-Antennen

Antennen, die für den Empfang aller GNSS vorgesehen sind, sind sog. Multi-GNSS-Antennen. Eine Empfangsbereitschaft im kompletten Bereich des heute erweiterten GNSS-Spektrums ist hierfür Voraussetzung und wird anhand einer Durchlasscharakteristik angegeben. Da im Labor zur Kalibrierung der Antennen im Gegensatz zu Feldverfahren kein operables GNSS benötigt wird, kann in der Bonner Antennenmesskammer schon heute das gesamte Spektrum bestehender und zukünftiger Frequenzen aus der GPS- und GLONASS-Modernisierung sowie der gesamte Frequenzbereich von Galileo und BeiDou vollständig analysiert werden. Zwischen 1,15 GHz und 1,65 GHz werden PCV-Werte für etwa 200 Frequenzen pro Antennenausrichtung aufgenommen.

2.4.1 Durchlasscharakteristik der GIBSBw-Referenzantenne Euskirchen

Das Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr unterhält am Standort Euskirchen das GNSS-Informations- und Beobachtungssystem der Bundeswehr, dessen zentrale Aufgabe es ist, den Betriebszustand aller GNSS permanent zu überwachen und GNSS-Nutzer der Bundeswehr zu informieren bzw. ggf. zu warnen. Die Hauptantenne der Referenzstation befindet sich auf dem Dach des Gebäudes und ist eine Antenne des Typs AOA DORNE MARGLIN T (IGS-Bezeichnung AOAD/M_T) mit der Seriennummer 212 und seit Mitte der 1990er-Jahre im Einsatz. Sie wurde bereits im Jahr 1994 in den Experimenten der Universität Bonn zur Relativkalibrierung von GPS-Antennen eingesetzt und als Referenzantenne definiert (Breuer et al. 1995). In den frühen Jahren des IGS Netzwerks waren die meisten Stationen mit diesem Antennentyp ausgerüstet, heute sind es noch etwa 50 Antennen (ca. 10 %) (Riddell et al. 2016). Im Sommer 2016 wurde die Euskirchener Antenne in der Bonner Antennenmesskammer

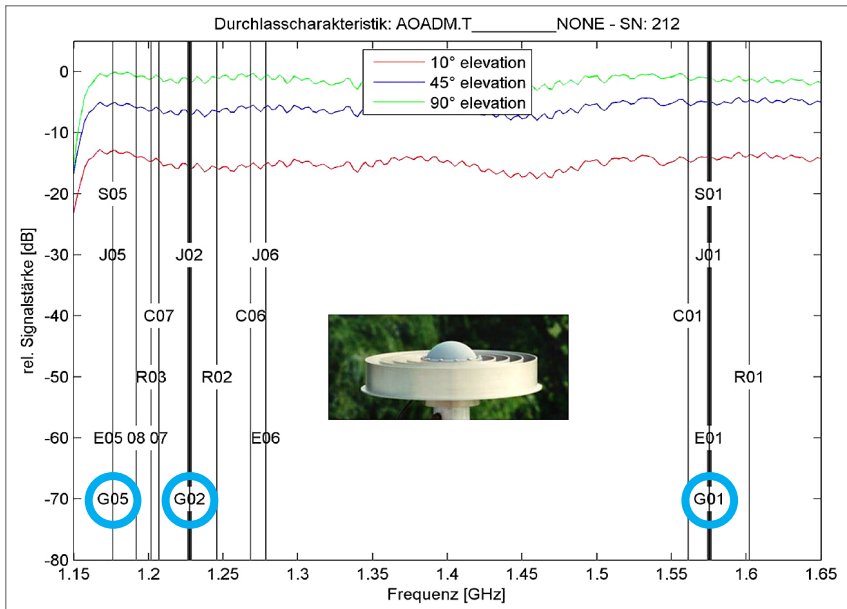


Abb. 5: Durchlasscharakteristik der AOA DORNE MARGLINT Nr. 212, Frequenzen: GPS: G01, G02, G05 (blau umrandet), GLONASS: R, Galileo: E, BeiDou: C, J: QZSS, S: SBAS

kalibriert. Wie Abb. 5 zeigt, führte die Messung zu dem überraschenden Ergebnis, dass die Antenne im Gegensatz zu bisher untersuchten modernen Antennen offensichtlich nicht mit einem Filter ausgestattet ist, so dass der Empfang des gesamten GNSS-Frequenzbandes möglich ist. Dieses Phänomen konnte durch Kalibrierung einer zweiten Antenne desselben Typs bestätigt werden.

3 Stationsabhängige Effekte

Stationsabhängige Effekte gehören heute zu den größten verbleibenden Einflussgrößen bei der GNSS-Positionsbestimmung. Zunächst war der Begriff praktisch gleichbedeutend mit sog. Mehrwegeeffekten, die durch Reflexionen und anschließenden Überlagerungserscheinungen des Satellitensignals mit Gegenständen in der Antennenumgebung verursacht werden. Durch die sich stetig ändernde Satellitengeometrie nimmt der Mehrwegeeffekt ein sich periodisch änderndes Erscheinungsbild an. Hier gilt allgemein, dass sich die Periodendauer verlängert, je näher sich der Reflektor an der Antenne befindet (Willst 2006).

Vorteil dieser Periodizität ist, dass sich der Mehrwegeeinfluss auf die Koordinatenberechnung bei genügend langer Beobachtungszeit herausmitteln kann.

Problematisch wird die Situation jedoch bei sehr nahen Reflektoren und somit sehr langperiodischen Einflüssen oder bei sehr kurzen Messzeiten, wenn die Gefahr besteht, dass sich der Mehrwegeeinfluss trotz des Mittelungseffektes über die gesamte Beobachtungszeit nicht deutlich genug ändert, so dass ein signifikanter systematischer Fehler in der Koordinatenlösung resultiert. Liegt der Reflektor sehr nahe an der Antenne, spricht man von sog. Nahfeldeffekten, die begrifflich heute vom Fernfeld-Multipath unterschieden werden. Der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld ist fließend; eine Grenze zwischen beiden wird heute bei ca. 50 cm gesehen. Man trennt somit das direkte Zubehör der Antenne wie Radom, Grundplatte, Kabel, Adaptierung und Stativ- oder Pfeilerkopf von den Gegenständen und Oberflächen in der weiter entfernten Umgebung.

Ursprünglich wurde angenommen, mit einer optimierten Antennenkalibrierung alle Antennenparameter unabhängig erfassen zu können. Inzwischen wurde aber erkannt, dass sie nur unzulänglich von weiteren stationsabhängigen Effekten, insbesondere von den Mehrwegeeffekten MP des Fern- und Nahfeldes, getrennt werden können, da sämtliche Materialien im Umfeld der Antenne das Empfangsverhalten beeinflussen:

$$dS = PCV + MP_{\text{Nahfeld}} + MP_{\text{Fernfeld}}$$

Die stationsabhängigen Effekte überlagern sich im Positionsraum und sind mit weiteren Effekten im Ausgleichungsmodell korreliert. In einer typischen Auswertung mit Ansatz der ionosphärenfreien Linearkombination und Schätzung von Troposphärenparametern können sich so im ungünstigen Fall Fehler in der Höhenkomponente bis zu wenigen Zentimetern summieren.

3.1 Antennen-Nahfeld

Das direkt an der Antenne befindliche Antennenzubehör verursacht Reflexion und Beugung von Satellitensignalen und führt – solange es selbst unverändert bleibt – zu unveränderlichen Nahfeldeffekten. Somit sind die Ergebnisse der Antennenkalibrierung streng genommen nur in der unveränderten Kalibrierumgebung gültig. Nahfeldeffekte ändern sich immer dann, wenn zwischen Kalibrierung und eigentlicher Messung Zubehör oder Montierung modifiziert werden und beeinflussen das Koordinatenergebnis. Dies wird typischerweise bei Antennenwechseln auf Referenzstationen beobachtbar, wenn es trotz aufwändig kalibrierter Antennen zu Koordinatensprüngen bis zu mehreren Zentimetern in der Höhe kommt (Wanninger et al. 2006).

Neben den Versuchen, die Abschirmung der Antenne selbst und insbesondere während der Kalibrierprozedur zu optimieren, bietet die sog. Nahfeldkalibrierung einen praktikablen, aber auch sehr aufwändigen Lösungsansatz. Vor



Schmitz et al. 2008

Abb. 6: Nahfeldkalibrierung für die GNSS-Kampagne DHHN 2008

der GNSS-Kampagne DHHN2006-2011 (Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes) wurde, um den o. g. Einflüssen durch veränderte Nahfeldeffekte vorzubeugen, ein standardisierter Antennenaufbau definiert (Feldmann-Westendorff et al. 2016). Die Antennen wurden zusammen mit dem Unterbau bestehend aus Dreifuß und Stativkopf auf dem Roboter kalibriert (**Abb. 6**). Bei einem solchen Ansatz der Kalibrierung von Antennen zusammen mit ihrem Nahfeld ist allein die Belastbarkeit des Roboters mit zusätzlichem Gewicht begrenzend.

Neuere Untersuchungen zeigen, wie Minimierung von Nahfeldeinflüssen durch Verwendung von Antennen identischen Typs und einheitlicher Montierung erreicht werden kann (Zimmermann et al. 2016).

Im internationalen Standard wird dem Nahfeldeinfluss bisher dadurch Rechnung getragen, dass für den Fall der Verwendung von Grundplatten oder Radomen als Antennenzubehör gesonderte Kalibrierdatensätze angegeben werden. GNSS-Nutzer können über die korrekte Antennenbezeichnung während der Auswertung, die eventuelles Zubehör wie Grundplatte oder Radom einschließt, den Nahfeldeffekten begegnen, wobei darauf geachtet werden sollte, weitere Objekte aus dem Nahfeld der Antenne zu entfernen

Ergänzend zu den o. g. Einflüssen sind witterungsbedingte Effekte (z. B. der Belag von Schnee oder Eis auf der Antenne, **Abb. 7**) jedoch kaum quantifizierbar. Nahfeldkalibrierungen stoßen also immer dann an ihre Grenzen, wenn die Beschaffenheit des Nahfeldes unwägbare bzw. wegen zeitlicher oder räumlicher Veränderungen nicht einwandfrei zu definieren ist.



Abb. 7: Eisbedeckte Antenne

3.2 Mehrwegeeffekte

Gegenstände im Fernfeld der Antenne verursachen kurzperiodische Mehrwegeeffekte und sind naturgemäß an den Beobachtungsstationen andere als an der Kalibrierörtlichkeit. Bei genügend langer Beobachtungsdauer kann jedoch – wie oben ausgeführt – von einem Mittelungseffekt ausgegangen werden, der die Auswirkung bzgl. der geschätzten Koordinaten nahezu eliminiert. Etabliert sind

zur Verminderung der Einflüsse zudem Maßnahmen an der Antennen selbst wie Grundplatten, Choke Rings oder absorbierende Materialien sowie Techniken zur Signalfilterung.

Zur Bestimmung von Mehrwegeeinflüssen wurde darüber hinaus eine Vielzahl von Konzepten zur in-situ Stationskalibrierung entwickelt. Oft genannt ist beispielsweise die „siderische“ Filterung auf der Basis sich täglich wiederholender Bahngeometrie bei GPS und entsprechender Wiederholung der Mehrwegeeinflüsse unter ansonsten gleichen Umgebungsbedingungen. Die lange Beobachtungsdauer von mehreren Tagen sowie die Tatsache, dass sich bei GLONASS und Galileo die Konstellation erst nach mehreren Sterntagen wiederholt, führten zur Entwicklung der sogenannten Echtzeitkalibrierung mit Hilfe des Roboters (Böder et al. 2001).

Im SAPOS-Qualitätsmanagement wird ein sogenannter Multipath-Index als Indikator für die Eignung einer Referenzstation bestimmt, der mittels undifferenzierter Residuen berechnet wird (Wanninger und May 2000).

Die Methode der sogenannten statistischen Mehrwegeanalyse wurde im Jahre 2006 in Deutschland erstmalig vorgestellt (Granström et al. 2006). Die post-fit-

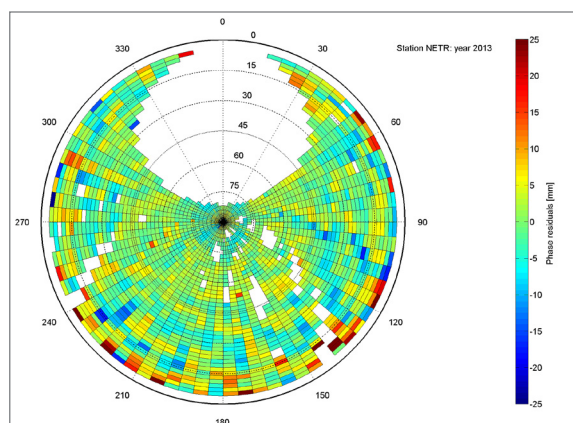


Abb. 8: Statistische Mehrwegeanalyse einer GIBSBW-Antenne

Residuen der Precise Point Positioning-Auswertung (PPP) langzeitiger Messreihen werden auf Systematiken untersucht. Sie enthalten neben den stationsabhängigen zunächst alle nicht-modellierten Einflüsse. Bei genügend langer Beobachtungsdauer tritt für alle zeitlich veränderlichen Einflüsse ein Mittelungseffekt ein. Stationsabhängige Fehler

aber werden als Systematiken in den Residuen sichtbar und betragen typischerweise mehrere Millimeter. Werden die Residuen nach einkommender Richtung (Elevation, Azimut) sortiert und dann gemittelt, kann man stationsindividuelle Strukturen durch Mehrwegeeinflüsse aus der lokalen Umgebung identifizieren. Sie enthalten neben den Resteffekten aller systematischen Einflüsse im Wesentlichen konstante Mehrwegeeinflüsse des Nah- und Fernfelds. Um die GIBSBW-Antennenanlage auf das Vorhandensein etwaiger Mehrwegeeffekte durch eine Neubaumaßnahme zu untersuchen, wurde dieses Konzept angewandt und ein

Beobachtungszeitraum von jeweils sechs Monaten vor Beginn bzw. nach dem Ende der Bautätigkeit ausgewertet (Abb. 8).

Aufwändig sind Ansätze, die die Stationsumgebung erfassen und modellieren. Vielversprechend sind die modernen Modulationstechniken wie sie für die Galileo-Signale verwendet werden, die Vorteile bei der Unterdrückung von Mehrwegeeffekte bieten sollen.

Letztlich kann jedoch festgestellt werden, dass trotz einer Vielzahl bekannter oder neu entwickelter Konzepte, die zur Bestimmung oder Verringerung der Mehrwegeeffekte entwickelt wurden, noch keine universelle Lösung zur Verminderung oder Eliminierung angegeben werden kann, so dass die Auswahl von Punkten in möglichst ungestörter Umgebung in der Praxis nach wie vor die zuverlässigste Vorgehensweise sein dürfte.

3.3 Abschattung

Der direkte Effekt einer Abschattung, die durch Bäume oder Fahrzeuge, aber auch in Gebirgs- oder Straßenschluchten auftritt, ist die unmittelbare Ausblendung von Satellitensignalen durch Hindernisse und damit eine Verschlechterung der geometrischen Bedingungen. Der Effekt der Abschattungen selbst ist von den begleitenden Mehrwegeeffekten nur schwer zu trennen. Gefährlich sind mit Abschattung einhergehende Mehrwegeeffekte durch Reflexion des Satellitensignals (z. B. an gegenüber dem abschattenden Objekt liegenden Reflektoren). In ungünstigen geometrischen Situationen ist es möglich, dass keine direkten – sondern nur reflektierte – Signale empfangen und verarbeitet werden, was zu erheblichen Verfälschungen der resultierenden Position führen kann.

In Abb. 9 ist für eine typische Innenstadtlage (5- bis 6-stöckige Gebäude) mit Abschattungen in nord- und südlicher Richtung dargestellt. Die Messörtlichkeit, die Codebasiert eingemessen werden sollte, liegt an der Nordseite der süd-

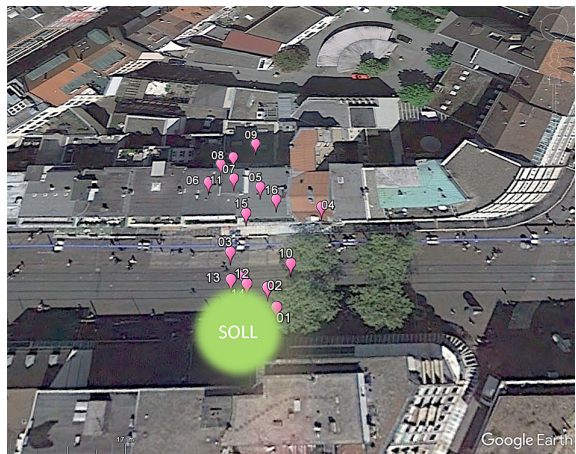


Abb. 9: Systematisch verfälschte Koordinatenschätzung für eine typische Innenstadtlage mit Abschattungen und Mehrwegeeffekten

lichen Straßenschlucht, wodurch keine direkten Signale aus südlicher Richtung empfangen werden können. Lediglich die an der nördlichen Gebäudeseite reflektierten Signale der südlichen Satelliten werden empfangen. Hierdurch entstehen stark verrauschte, systematisch verfälschte Koordinatenschätzungen.

3.4 Jamming

Unter Jamming versteht man im GNSS-Bereich die mutwillige Störung des GNSS-Empfangs. Es wird meist in einem Atemzug mit dem sog. spoofing genannt, worunter die Manipulation des GNSS-Signals verstanden wird, wodurch dem Nutzer eine falsche oder fehlerhafte Position vorgetäuscht wird. Durch die relativ geringe Sendeleistung der Satelliten genügen kleine Störsender, um den Empfang der GNSS-Signale vollständig zu verhindern und zu einer großen Gefahr für sicherheitskritische Anwendungen zu werden.

Weder die Nutzung von mehreren GNSS noch weiterer GNSS-Signale kann die Wirkung des Jammings zuverlässig verhindern. Neben Maßnahmen wie der Verwendung weiterer Sensorik und der Überwachung der Umgebung auf Jamming-Ereignisse bzw. zur Ortung der Sender, gibt es eine ganze Reihe von technischen Entwicklungen. Aus dem Bereich der Antennentechnik bieten Mehrelementantennen (CRPA = Controlled Reception Pattern Antenna) eine vielversprechende Möglichkeit, indem die Richtung des Störers detektiert und sodann eine ausgeprägte Richtcharakteristik erzeugt wird, die gleichzeitig durch einen Nullempfang in Richtung des Störsenders dessen Empfang ausblendet. Weiterführende Details zu Jamming und Spoofing sind Konovaltsev et al. (2017) zu entnehmen.

3.5 Reflektometrie

In der GNSS-Reflektometrie werden reflektierte Signale und ihre Eigenschaften wie Polarisation oder die Signalstärke analysiert, um Rückschlüsse auf die reflektierende Fläche zu erhalten. Eingesetzt wird das Verfahren beispielsweise zur Bestimmung von Schneehöhen, als Pegel oder auch zur Erfassung von Bodenfeuchte oder von Vegetation (vgl. Wickert 2017).

4 Zusammenfassung und Schluss

Die Beantwortung der Fragestellungen, die im Zusammenhang mit Eigenschaften der GNSS-Empfangsantennen auftauchen, stellt auch heute noch eine Herausforderung dar. Während die Verfahren zur Antennenkalibrierung selbst als gelöst betrachtet werden können, ist die Isolierung der Antennenparameter

von stationsabhängigen Mehrwegeeffekten des Nah- und Fernfeldes und ihre Interaktion in Abschattungssituationen heute Gegenstand der Forschung. Durch empirische Untersuchungen gelang die Entwicklung einer Vielzahl von Methoden zur Erfassung der Wechselbeziehungen und Isolierung der Einzeleffekte.

Neuentwicklungen spezieller Antennen und Antennenarrays betreffen auch die Begegnung der Gefahren des Jammings oder der Nutzung besonderer Eigenschaften des Satellitensignals wie der Polarisation oder seiner Signalstärke in der Reflektometrie, um Erkenntnisse über die Antennenumgebung zu gewinnen.

Vor allem im Kontext der stationsabhängigen Effekte gibt es noch immer ungelöste Fragestellungen, die dazu führen, dass der Gesamtkomplex der Mehrwegeausbreitungen heute den begrenzenden Faktor für die GNSS-Genauigkeit darstellt und das Gewährleisten von mm-Genauigkeit – insbesondere bei anspruchsvollen Örtlichkeiten – eine Herausforderung bleibt.

Literatur

- Aerts, W.; Baire, Q.; Bilich, A.; Bruyninx, C.; Legrand, J.: On the Error Sources in Absolute Individual Antenna Calibrations. Presentation at European Geosciences Union, General Assembly 2013, 7.–12. April 2013, Wien, Österreich.
- Bilich, A.; Schmitz, M.; Görres, B.; Zeimet, P.; Mader, G.; Wübbena, G.: Three-Method Absolute Antenna Calibration Comparison. IGS Workshop 2012, University of Warmia and Mazury (UWM), 23.–27. Juli 2012, Polen.
- Böder, V.; Menge, F.; Seeber, G.; Wübbena, G.; Schmitz, M.: How to Deal With Station Dependent Errors-New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. Proc of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS, Salt Lake City, Utah, Sep 11–14, 2001.
- Breuer, B.; Campbell, J.; Görres, B.; Hawig, J.; Wohlleben, R.: Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. SPN, 49–59, 1995.
- Feldmann-Westendorff, U.; Liebsch, G.; Sacher, M.; Müller, J.; Jahn, C.-H.; Klein, W.; Liebig, A.; Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5/2016, 141. Jahrgang, S. 354–367. DOI: [10.12902/zfv-0140-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0140-2016).
- Görres, B.: Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst? In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2010, 135. Jahrgang, S. 256–267.
- Görres, B.; Campbell, J.; Becker, M.; Siemes, M.: Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. GPS Sol 10(2): 136–145. DOI: [10.1007/s10291-005-0015-3](https://doi.org/10.1007/s10291-005-0015-3), 2006.
- Granström, C.; Johansson, J.; Görres, B.: Untersuchung stationsabhängiger Effekte an GNSS Permanent-stationen und Statistische Stationskalibrierung. Vortragsfolien. In: Görres, B.; Kuhlmann, H.: 6. GPS-Antennenworkshop, Bonn, 21.9.2006.
- IGS-AWG-486: Mail No 486, IGS Antenna Working Group.

- Konovaltsev, A.; Cuntz, M.; Hornbostel, A.: Bedrohung von GNSS durch Jamming und Spoofing. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Mayer, M.: Persönliche Kommunikation, 2017.
- Riddell, A.; Moore, M.; Schmid, R.; Schmitz, M.: Insights into the IGS master antenna. IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 2016-02-09.
- Schmid, R.: Antenna Working Group Technical Report 2015. In: Jean Y.; Dach, R. (Hrsg.): International GNSS Service Technical Report 2015, 141–145. DOI: [10.7892/boris.80307](https://doi.org/10.7892/boris.80307), 2016a.
- Schmid, R.: Splinter Meeting of the IGS Antenna Working Group. IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 2016-02-09, 2016b.
- Schmitz, M.; Propp, M.: Definitionen zur Antennenkalibrierung LEIAT504GG+SFD NONE und TRM29659.00+SFD NONE für die GNSS-Kampagne im DHHN 2006–2011. Internes Papier, 7.3.2008.
- Wanninger, L.; May, M.: Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. Proc. ION GPS 2000, Salt Lake City UT, 132–144.
- Wanninger, L.; Rost, C.; Hartlieb, G.; Köhr, M.: Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2006, 131. Jahrgang, S. 171–175.
- Wickert, J.: Fernerkundung der Erdoberfläche mit Navigationssatelliten: GNSS-Reflektometrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Wildt, S.: Mehrwegeausbreitung bei GNSS-gestützter Positionsbestimmung. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2006.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Menge, F.; Seeber, G.; Völksen, C.: A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. NAVIGATION: Journal of The Institut of Navigation, Vol. 44, No. 2, 1997.
- Zeimetz, P.; Kuhlmann, H.: On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. FIG Working Week, Stockholm/Schweden, 14.–19. Juni 2008.
- Zimmermann, F.; Eling, C.; Kuhlmann, H.: Investigations on the influence of antenna near-field effects and satellite obstructions on the uncertainty of GNSS-based distance measurements. J. Appl. Geodesy, 10 (1), 53–60.

Kontakt

Dr.-Ing. Barbara Görres
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen
barbaragoerres@bundeswehr.org



Bedrohung von GNSS durch Jamming und Spoofing

Andriy Konovaltsev | Manuel Cuntz | Achim Hornbostel

1 Einführung

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) sind heutzutage die erste Wahl für viele Anwendungen in Wirtschaft, Massenmarkt sowie für hoheitliche Aufgaben, wenn es um eine genaue, allgegenwärtige und kontinuierliche Ortung und Navigation geht. Die ersten beiden in den 1970er- und 1980er-Jahren primär für die militärische Nutzung entwickelten GNSS GPS der USA und GLONASS der Russischen Föderation sind in den letzten 20 bis 25 Jahren in zahlreichen Verkehrs- und Infrastrukturbereichen der wirtschaftlich entwickelten Länder zu finden. Dazu zählen zum Beispiel mobile Telekommunikation, Boden- und Flugverkehr, maritimer Transport, Landwirtschaft, Bankgeschäfte, Geodäsie und Landvermessung, Energieversorgungsnetze und viele andere Anwendungsbereiche. Dank der globalen Verfügbarkeit der Systeme, der fortschreitenden Verbesserung der Navigationsempfänger und einer einfachen und kosteffizienten Nutzbarkeit der Positionierungs- und Zeit-Dienste wächst die Anzahl von GNSS-Anwendungen ständig weiter.

Momentan ist GPS das meistgenutzte GNSS weltweit. Aber auch viele andere Nationen haben die strategische Bedeutung von GNSS erkannt und entwickeln weitere GNSS-Konstellationen. So leistet Europa mit dem laufenden Aufbau von EGNOS und Galileo einen entscheidenden Beitrag zur globalen Bereitstellung von GNSS-Diensten. Das chinesische Beidou wird noch eine weitere globale GNSS-Konstellation anbieten. Die bestehenden Systeme GPS und GLONASS werden modernisiert und stellen neue verbesserte zivile Signale zur Verfügung. Laut dem 2015 von der Europäischen Agentur GSA veröffentlichten GNSS Marketing Report hängt ca. 6 % des Bruttoinlandsprodukts der EU-Länder von GNSS mit steigender Tendenz ab (GSA 2015).

Gleichzeitig können Navigationsempfänger durch die niedrige Empfangsleistung der Satellitensignale jedoch leicht gestört werden. Die einfachste Art der Störung von GNSS wird als Jamming bezeichnet. Dieses wird heutzutage als eine potenzielle Bedrohung oft ignoriert, da Störungen durch fremde Signale relativ selten auftreten oder häufig nicht als solche erkannt werden. Die Störanfälligkeit von GNSS ist besonders problematisch in sicherheitskritischen Anwendungen.

Eine weitere Gefahr bei der Nutzung von zivilen GNSS-Signalen ist die Täuschung des Navigationsempfängers durch aufwendigere Störsignale, die authentische GNSS-Signale nachbilden und dadurch dem Empfänger eine falsche Positions- und Zeit-Lösung aufzwingen. Diese Art der Störung wird auch als Spoofing bezeichnet.

In den folgenden zwei Kapiteln wird die aktuelle Lage in Bezug auf die Bedrohungen von GNSS durch Jamming und Spoofing mit Hilfe offen zugänglicher Literatur und vorhanden Informationen analysiert.

2 Arten von Jamming und deren Auswirkung

Grundsätzlich wird bei elektromagnetischen Störsignalen von unbeabsichtigten und beabsichtigten Quellen gesprochen. Unbeabsichtigte Störungen für GNSS-Signale müssen aufgrund der niedrigen Empfangsleistungen praktisch überall erwartet werden. Viele Geräte des täglichen Lebens emittieren elektromagnetische Wellen direkt oder als Oberwellen und Intermodulationsprodukte in den GNSS-Bändern. Die störende Signalkomponente entsteht häufig als Oberwelle interner Oszillatoren für Taktung digitaler Komponenten oder zur Erzeugung von Trägerfrequenzen zur HF-Übertragung von Daten. Andere Art der unbeabsichtigten Störung entsteht durch die gemeinsame Nutzung der Frequenzbänder von GNSS zusammen mit den anderen Systemen. Zum Beispiel liegen die unteren GNSS-Bänder Galileo E5 und GPS L5 im aeronautischen Band (ARNS), welches ebenfalls durch aeronautische Navigationssysteme, die DME-Entfernungsmessausstattung (engl. Distance Measurement Equipment) und die TACAN taktische Flugnavigation (engl. Tactical Air Navigation), belegt sind (RTCA Inc. 2004). Eine niedrige Empfangsleistung von GNSS-Signalen hat auch zur Konsequenz, dass nicht nur Inband-Störungen, sondern auch starke Signale aus den benachbarten Frequenzbändern zu Empfangsproblemen führen können. Ein gutes Beispiel dafür ist der Fall des System zur breitbandigen terrestrischen Kommunikation im L-Band im Bereich 1.525 bis 1.559 MHz, das von der amerikanischen Firma LightSquared entwickelt war und dessen Einführung in den USA wegen der Gefahr der großflächigen GNSS-Störung geblockt wurde (Schneider 2012).

Beabsichtigte GNSS-Störer versuchen in aller Regel die Schwachstellen der GNSS-Signale und Empfänger gezielt auszunutzen. Im englischen Sprachgebrauch wird das gezielte Stören als Jamming bezeichnet. Die häufigsten Störerarten im GNSS-Kontext sind:

- Sinusförmige Signale (engl. Continuous Wave) auf oder nahe der Trägerfrequenz der GNSS-Signale zeigen eine hohe Störwirkung, wenn sie sich mit den

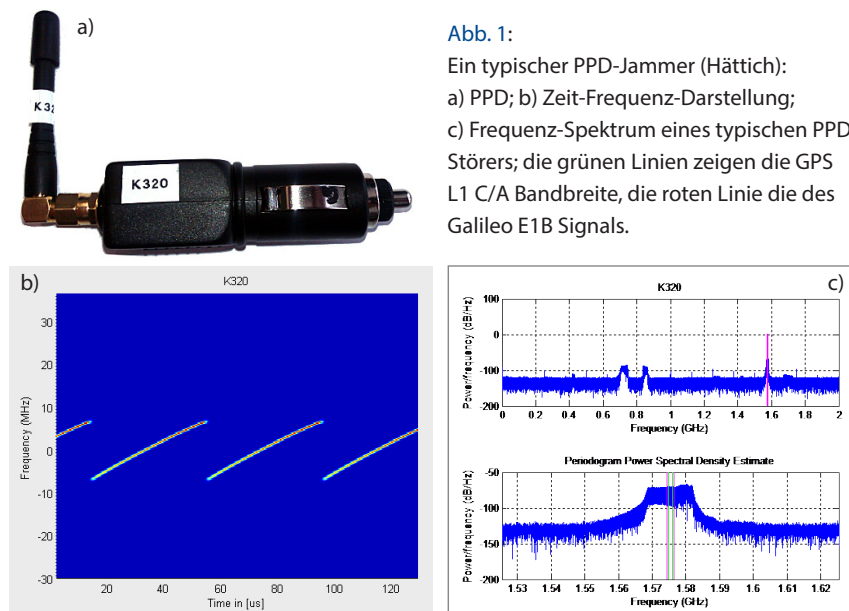
Spektrallinien der CDMA-Spreading Codes überlagern. Diese Störer sind in der Herstellung einfach und kostengünstig zu realisieren. Unter ungünstigen Umständen kommt es vor, dass die Korrelationsregelschleife des Empfängers auf das Störsignal einrastet. In diesem Fall sind die Laufzeitmessungen und somit auch die Positionslösung fehlerhaft.

- An die GNSS-Signale spektral angepasste Signale, wie z. B. BPSK (engl. Binary Phase-Shift Keying) und BOC (engl. Binary Offset Carrier) Modulationen sind in der Herstellung deutlich aufwendiger. Durch die spektrale Anpassung ist eine Filterung der Störsignale im Frequenz- und Zeitbereich nicht möglich. Zudem können auch die Störsignale durch den geringeren Kreuzkorrelationsabstand zu den authentischen GNSS-Signalen ebenfalls die Nachführung der Korrelationsregelschleifen stören und sogar übernehmen.
- Chirp, sinusförmige Signale mit sich zeitlich ändernder Frequenz. Personal Privacy Devices (PPDs), wie sie zum Beispiel von der amerikanischen Luftfahrtaufsichtsbehörde berichtet wurden (Grabowski 2012), zählen zu dieser Gruppe.
- Gepulste Störsignale mit variierenden Pulslängen und -Abständen. Durch die hohen erzielbaren Leistungspulse kann die Verstärkungskette im Frontend in Sättigung getrieben werden. Die Verstärker weisen nach einem solchen Puls eine so genannte Totzeit auf, in der sie sich regenerieren. Wird bei Mehrfrequenzempfänger der erste rauscharme Verstärker (engl. Low Noise Amplifier) saturiert, ist während dieser Totzeit kein GNSS-Empfang möglich. Außerdem kann die automatische Verstärkerregelung der analogen Frontends dazu gebracht werden, die Empfangsleistung nach unten zu korrigieren. Hierdurch ist in den Ruhephasen des Störers die Leistung der Nutzsignale für die A/D-Wandlung zu klein.
- Noise, Störung in Form Gaußförmigen Rauschens, beschreibt die Gruppe von Störsignalen deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion im Frequenz- und Zeitbereich der Normalverteilung entspricht. Diese Art der Störung hebt den Rauschpegel des Empfängers an. Das C/N_0 der authentischen Nutzsignale verringert sich entsprechend der empfangenen Rausch-Störleistung. Eine Übernahme der Regelschleifen ist nicht möglich. Auch die spektrale Effizienz dieser Störung ist gegenüber den spektral angepassten Störsignalen geringer. Da der Aufwand zur Erreichung des gleichen Störeffekts gegenüber CW und gesweepen Störungen deutlich größer ist, wird daher diese Art der Störung wahrscheinlich meist nur im Zusammenhang mit gezielten Täuschangriffen als Rauschkulisse genutzt.

Die spektrale Effizienz einer Störungsart kann mit Hilfe von sogenannten Spectral Separation Coefficient (SSC) charakterisiert werden (Ward 2005). Wobei die spektralen Eigenschaften des GNSS-Signals berücksichtigt und der Senkung des

effektiven Signal-zu-Rausch Verhältnisses in den Regelschleifen des Empfängers berechnet werden.

Die einfachste Art der Störung ist ein CW-Signal. Am häufigsten wird jedoch über die Störung von GNSS durch gesweepte Signale von PPDs berichtet. Abb. 1 zeigt ein Bild eines typischen PPD-Geräts zum Betrieb an einer 12V-Buchse eines Automobils (Abb. 1a), den zeitlichen Verlauf (Abb. 1b) sowie auch das Frequenzspektrum seines Signals (Abb. 1c). Die Gefahr der Störung durch PPD-Geräte wurde erstmals nach einem Vorfall am Flughafen von Newark in



den USA thematisiert. Am zweitgrößten Flughafen im Ballungsraum New York wurde ein experimentelles bodengebundenes Ergänzungssystem (engl. Ground-based Augmentation System – GBAS) regelmäßig von auf der nahegelegenen Autobahn fahrenden Fahrzeugen mit PPDs gestört (Grabowski 2012). Spätere Untersuchungen (Mitch 2011) haben gezeigt – ein PPD Gerät kann Navigationsempfänger im Umkreis von einigen hundert Metern so stark stören, dass die Zuverlässigkeit der Empfänger unter die für sicherheitsrelevante Anwendungen geforderten Werte fällt. Die häufige Präsenz von PPD Jammern wurde in vielen weiteren Fällen gemeldet (Gibbons 2013, FBI Cyber Division 2015), darunter auch auf deutschen Autobahnen (Stanisak 2016).

Die berichteten Messergebnisse über die Störsituation in den GNSS-Bändern weisen darauf hin, dass neben den PPD Signalen auch weitere Arten von GNSS-

Störungen präsent sind (Stanisak 2016, Butsch 1999, Steingass 2008, de Wilde 2015). In Tab. 1 sind Werte für die Häufigkeit der Präsenz von den nicht-GNSS-Signalen in den Galileo Bändern dargestellt. Diese Werte sind das Ergebnis der Auswertung der Messdaten, die vom DLR im Rahmen einer Messkampagne im Jahr 2006 entlang der Eisenbahnstrecke München-Hamburg und im Hamburger Hafen aufgezeichnet wurden.

Tab. 1: Störsituation in Galileo Bändern

Band	Anteil der Messdaten mit Präsenz von nicht-GNSS-Signalen
L1	24 %
E6	39 %
E5a	99 %
E5b	56 %

Steingass 2008

3 Spoofing als potenzielle Bedrohung

Das Vortäuschen künstlich erzeugter Satellitensignale zur Irreführung von GNSS-Empfängern wird allgemein als Spoofing bezeichnet. Hierbei wird keine Aussage darüber getroffen, wie die Täuschung bewerkstelligt wird. Der einfachste Fall einer solchen Täuschung ist das Empfangen und erneute Abstrahlen von authentischen GNSS-Signalen durch so genannte Repeater. Diese Geräte werden häufig in kommerziellen Bereichen verwendet, wie etwa zum Test von Navigationsgeräten in Verkaufsräumen oder für Testzwecke im Bereich der Flugzeugwartung eingesetzt werden. Die gezielte Verwendung solcher Repeater zum Zweck der Vortäuschung einer verfälschten Position wird im militärischen Bereich als Meaconing bezeichnet.

Die Gefahr von Spoofing/Meaconing wurde bis vor kurzem nur mit militärischen Anwendungen von GNSS in Verbindung gebracht. Es wird aber zunehmend mehr darüber diskutiert, dass illegale GNSS-Täuschsender auch gegen zivile Anwendungen eingesetzt werden können. Diese Gefahr wurde mit Hilfe von Tests besonders deutlich gemacht, die durch das US Department of Homeland Security im Juni 2012 organisiert wurden (Kerns 2014). Im Laufe dieser Tests konnte ein nicht-militärisches UAV während des Fluges gestört und in eine falsche Richtung gelenkt werden. Das gleiche Entwicklungsteam hat auch im Jahr 2014 eine erfolgreiche Spoofing-Attacke zur Übernahme der Kontrolle über den GPS Empfänger einer Luxusyacht und somit über den Kurs der Yacht demonstriert (UThews 2013).

Aus der GNSS-Praxis gibt es nur vereinzelt Hinweise auf die Nutzung von Spoofing/Meaconing. So wurde 2011 darüber berichtet, dass das iranische Militär erfolgreich eine amerikanische Militärdrohne getäuscht und zur Landung gezwungen hat (CBS News 2011). Wegen der Natur des Vorfalls, kann hier über

die wirkliche Ursache der Landung des UAVs auf dem iranischen Territorium nur spekuliert werden. In einem weiteren Fall wurde im Sommer 2016 über die seltsame Fehlfunktion von den GNSS-Empfängern in Mobiltelefonen auf dem Roten Platz in Moskau berichtet (Süddeutsche Zeitung 2016). Die Empfänger haben dabei anstatt der wirklichen Position die Koordinaten von einem der Moskauer Flughäfen ausgegeben. Hier wird ein Meaconing vermutet, das bei besonderen Ereignissen eingesetzt wird, um die automatische Steuerung zum Beispiel von Drohnen unbrauchbar zu machen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die elektromagnetische Störung von GNSS-Navigationsempfängern durch Jamming und/oder Spoofing stellt ein ernsthaftes Bedrohungsszenario dar, insbesondere in sicherheitskritischen Anwendungen. Mit der steigenden Abhängigkeit der Wirtschaft und des alltäglichen Lebens von der Satellitennavigation werden die Bedrohungen durch Jamming und Spoofing zunehmend wahrgenommen. Dies führt dazu, dass Maßnahmen auf der GNSS-Systemebene integriert wurden oder sich gerade im Prozess der Implementierung befinden, wie zum Beispiel die Nutzung von störrobusteren breitbandigen Navigationssignalen, Einführung der Authentifizierung der Navigationsnachricht (engl. Navigation Message Authentication) und ein besserer Schutz der Bodeninfrastruktur. Auch auf der Nutzerseite tut sich viel. Dank der steigenden Leistungsfähigkeit der digitalen Signalverarbeitungshardware werden fortgeschrittene Detektions- und Unterdrückungsverfahren auch in günstigen Navigationsempfängern denkbar. Der interessierte Leser findet hier mehr Informationen (Gao 2016, Ioannides 2016, Borio 2016, Psiaki 2016). Die erwähnten Gegenmaßnahmen reduzieren das Risiko einer kritischen Störung und deren schadhafte Wirkung. Durch das Gegenseitige Aufrüsten von Störsignalerzeugung und Störsignalunterdrückung wird stets ein Restrisiko bestehen bleiben.

Literatur

- Borio, D.; Doviš, F.; Kuusniemi, H.; Lo Presti, L.: Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. Proc. IEEE, vol. 104, no. 6, pp. 1233–1245, 2016.
- Butsch, F.: GPS and GLONASS Radio Interference in Germany. ION GPS 1997, Kansas City, MO, USA, 1999, pp. 1427–1436.
- CBS News: U.S. official: Iran does have our drone. 8-Dec-2011. [Online]. www.cbsnews.com/news/us-official-iran-does-have-our-drone.
- de Wilde, Wim; et al.: Advanced Interference Detection and Mitigation in Septentrio's Receivers. ION GNSS+ 2015, 17-Sept-2015.

- FBI Cyber Division: Cargo Thieves use GPS Jammers to Mask GPS Trackers, Private Industry Notification of 2-Oct-2015. [Online]. <http://info.publicintelligence.net/FBI-CargoThievesGPS.pdf>.
- Gao, G. X.; Sgammini, M.; Lu, M.; Kubo, N.: Protecting GNSS Receivers From Jamming and Interference. *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 6, pp. 1327–1338, 2016.
- Gibbons, G.: FCC Fines Operator of GPS Jammer That Affected Newark Airport GBAS. *Inside GNSS*, August 30, 2013. [Online]. www.insidegnss.com/node/3676.
- Grabowski, J. C.: Personal Privacy Jammers: Locating Jersey PPDs Jamming GBAS Safety-of-Life Signals. *GPS World*, no. April, p. 24, 2012.
- GSA: GNSS Market Report 2015: Exciting Times for European GNSS, 2015. [Online]. www.gsa.europa.eu/news/gnss-market-report-2015-exciting-times-european-gnss.
- Hättich, C.: Jammer Measurement Summary. Interner technischer Bericht, DLR, 2012, 13 Seiten.
- Ioannides, R. T.; Pany, T.; Gibbons, G.: Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status, and Potential Mitigation Techniques. *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 6, 2016.
- Kerns, A. J.; Shepard, D. P.; Bhatti, J. A.; Humphreys, T. E.: Unmanned Aircraft Capture and Control via GPS Spoofing. *Journal of Field Robotics*, 31(4): 617–636, 2014.
- Mitch, R.; et al.: Signal Characteristics of Civil GPS Jammers. In: *Proceedings of ION GNSS 2011*, 2011, p. 13.
- Psiaki, M. L.; Humphreys, T. E.: GNSS Spoofing and Detection. *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 6, 2016.
- RTCA, Inc.: Assessment of radio frequency interference relevant to the GNSS L5/E5a frequency band (RTCA/DO-292). RTCA, Inc., SC-159, 2004.
- Schneider, D.: LightSquared's GPS-Interference Controversy Comes to a Boil. *IEEE Spectrum*, February 2012, pp. 13–14.
- Stanisak, M.; von Hünenbein, K.; Bestmann, U.; Lange, W.: Measured GNSS Jamming Events at German Motorways. In: *POSNV 2016*, 2016.
- Steingass, A.; Weber, C.; Jost, T.: Interference Measurements in a Rail Environment. In: *NAVITEC 2008*, 2008.
- Süddeutsche Zeitung: Rund um den Kreml spielt das GPS verrückt. 31-Oct-2016. [Online]. www.sueddeutsche.de/digital/moskau-lost-in-navigation-1.3228389.
- UTNews: Spoofing a Superyacht at Sea, 30-July-2013. [Online]. <http://news.utexas.edu/2013/07/30/spoofing-a-superyacht-at-sea>.
- Ward, P. W.; Betz, J. W.; Hegarty, C. J.: Interference, Multipath, and Scintillation. In: Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J. (Eds.): *Understanding GPS: principles and applications*, 2nd Ed. Norwood, MA: Artech House, 2005, p. 726.

Kontakt

Dr.-Ing. Andriy Konovaltsev
Dipl.-Ing. Manuel Cuntz
Dr.-Ing. Achim Hornbostel
Institut für Kommunikation und Navigation
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Münchner Straße 20
82234 Weßling-Oberpfaffenhofen
andriy.konovaltsev@dlr.de



A. Konovaltsev



M. Cuntz



A. Hornbostel

GNSS-Anwendungen in der Schifffahrt

Michael Hoppe

1 Einleitung

Die Satellitennavigation besitzt eine immer wichtiger werdende Rolle im Bereich der Navigation der Schifffahrt. Dies gilt für maritime Anwendungen an der Küste genauso wie auch für neue Telematikanwendungen im Bereich der Binnenwasserstraßen. Die genaue Kenntnis der eigenen Position zu jedem Zeitpunkt ist Voraussetzung für eine sichere und effiziente Schiffsführung. Hierbei ist eine immer größer werdende Abhängigkeit von elektronisch ermittelten Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitdaten an Bord von Schiffen festzustellen. Fast ausschließlich auf Satellitennavigation basierende Funknavigations-Empfänger ermitteln die Position, Geschwindigkeit, Zeit und Kurs (PNT-Daten) eines Schiffes. Positionsempfänger können nur Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitdaten bereitstellen (PVT-Daten). Die Anforderungen in der Schifffahrt be-

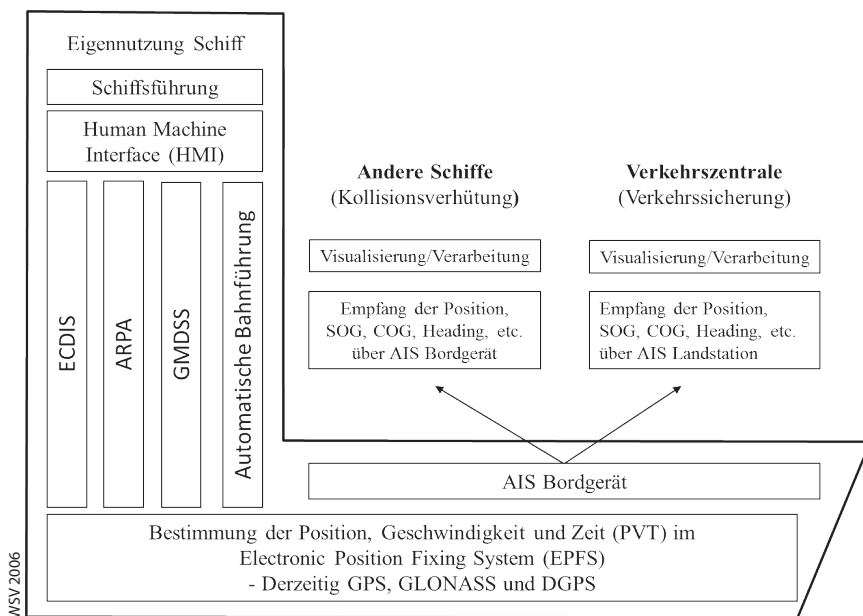


Abb. 1: Verwendung der Position an Bord sowie in der Beziehung Schiff/Schiff und Schiff/Land

inhalten jedoch auch Navigationsdaten wie z. B. die Schiffsvorausrichtung (Heading). Diese Daten werden dann allgemein als PNT-Daten bezeichnet. Diese Informationen werden sowohl für die eigene Navigation verwendet, als auch an eine Vielzahl anderer Bordsysteme wie Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) und automatische Bahnführungssysteme weitergeleitet). Darüber hinaus werden die an Bord ermittelten Navigationsdaten auch mittels Automatic Identification System (AIS) an die umgebende Schifffahrt und landseitigen Verkehrserfassungssysteme ausgesendet (siehe Abb. 1). Die Anforderungen an die Genauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität der ermittelten Position steigen mit der Größe des Schiffes in Relation zum Fahrwasser, mit dem Tiefgang des Schiffes, insbesondere in tide-abhängigen Fahrwassern, sowie mit der Geschwindigkeit des Schiffes. Dieser Beitrag beschreibt die wesentlichen Anforderungen an die Bereitstellung der PNT-Daten für die unterschiedlichen Anwendungen in der Schifffahrt. Im Weiteren erfolgen eine kurze Darstellung der aktuell verwendeten Systeme und Dienste sowie ein Ausblick auf zukünftige Anwendungen und die daraus resultierenden Anforderungen an die Funknavigationstechnik in der Schifffahrt.

2 GNSS und DGNSS in der maritimen Schifffahrt

Gegenwärtig basiert die Positionsbestimmung zumeist auf dem amerikanischen Global Positioning System (GPS). Dieses System ermöglicht die Nutzung von bis zu 32 global verteilten Satelliten, welche zivil verfügbare Signale auf der L1-Frequenz (1575,42 MHz) abstrahlen. Nach der Abschaltung der künstlichen Verschlechterung der GPS-Signale im Jahr 2000 kann GPS derzeit mit einer horizontalen Genauigkeit von etwa 10 bis 15 m genutzt werden (DoD 2008). Auch Russland betreibt ein eigenes Satellitennavigationssystem mit dem Namen GLO-NASS, welches derzeit jedoch nur wenig in der Schifffahrt genutzt wird. Da GPS und GLONASS die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und insbesondere an die Integrität derzeit nicht erfüllen, werden für die Schifffahrt weitere Unterstützungssysteme wie z. B. Differential-GPS (DGPS) verwendet. Als landgestütztes Navigationssystem betreiben im maritimen Bereich einige wenige Länder das Funknavigationssystem Loran-C. Dieses System wird derzeit jedoch nur noch selten für die Navigation in der allgemeinen Seeschifffahrt verwendet. Grund hierfür sind schlechtere absolute Positionsgenauigkeiten, eingeschränkte geografische Verfügbarkeit und die Tatsache, dass moderne Empfänger erst seit kurzer Zeit verfügbar sind. Die Verwendung eines von GNSS unabhängigen terrestrischen Funknavigationssystems wird international jedoch intensiv diskutiert. Grund hierfür ist die relativ einfache Störbarkeit der empfindlichen GNSS-Signale.

2.1 Systeme, Dienste und Sensoren im maritimen Bereich

Bedingt durch die zunehmende Abhängigkeit von einer elektronisch ermittelten Position an Bord der Schiffe (siehe Abb. 1) steigt der Bedarf an eine „sichere Position“. Zur Gewährleistung einer sicheren Position hat die International Maritime Organisation (IMO) operationelle Anforderungen für die Bordseite und für die Systembetreiber von Funknavigationssystemen festgelegt (IMO 2001).

Eine *sichere Position* wird erreicht durch:

- Erfüllung der operationellen Nutzeranforderungen der IMO A.915(22) an die Bordseite hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität.
- Verwendung von Funknavigationssystemen, welche von der IMO als Bestandteil eines World-Wide Radionavigation System (WWRNS) anerkannt worden sind.
- Verwendung von international standardisierten Funkübertragungsverfahren.

Funknavigationssysteme, die als eine Komponente des WWRNS anerkannt werden, müssen die Anforderungen der IMO erfüllen (IMO 2011). Die derzeitigen und zukünftigen Systeme, welche als Komponente eines WWRNS im maritimen Bereich zur Ermittlung einer sicheren Position verwendet werden könnten, sind in Abb. 2 dargestellt. Ebenfalls enthält die Darstellung eine Übersicht über

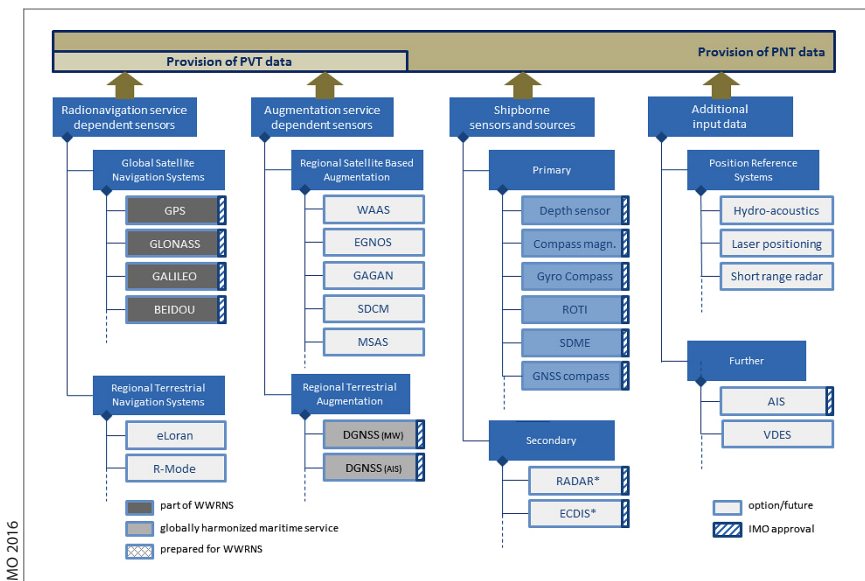


Abb. 2: Systeme, Dienste und Sensoren in der Schifffahrt

die in der maritimen Schifffahrt verwendeten Sensoren, die einen Beitrag zur Bestimmung von PNT-Daten liefern können. Mittlerweile sind die Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS, Galileo und Beidou als Komponenten eines WWRNS anerkannt. In der Praxis findet man derzeit jedoch fast nur GPS oder kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger an Bord von Schiffen. Bei den landgestützten Augmentierungssystemen zur Übertragung von GNSS-Korrekturdaten und Integritätsinformationen ist das DGNSS über Mittelwelle (MW) der zurzeit anerkannte maritime Standard. Ebenfalls existieren auch für die DGNSS-Korrekturdatenübertragung über AIS entsprechende maritime Standards. Beide Systeme erfüllen somit grundsätzlich die Anforderungen, um zukünftig als Komponente des WWRNS anerkannt werden zu können. Die Betreiber von EGNOS arbeiten derzeit an einer Anerkennung als WWRNS sowie an den erforderlichen maritimen Leistungsstandards um eine zukünftige Verwendung von EGNOS-Empfängern an Bord von Schiffen zu ermöglichen.

Funknavigationssysteme ermöglichen eine direkte und unabhängige Positionsbestimmung. Neben den satellitengestützten Navigationssystemen existieren terrestrische, d.h. landgestützte Positionierungssysteme; diese werden derzeit in der Schifffahrt als mögliche Ersatzsysteme betrachtet. Als Unterstützungssysteme bezeichnet man Funknavigationssysteme, die durch Zusatzinformationen eine Verbesserung der Positionsgenauigkeit ermöglichen, damit die operationellen Anforderungen erfüllt werden können. Eine eigenständige Positionsermittlung ist mit Unterstützungssystemen nicht möglich. Die in Abb. 2 vorgenommene Unterscheidung in satellitengestützte und landseitige Funknavigationssysteme ist sinnvoll, da die jeweiligen Funknavigationssysteme teilweise komplementäre Parameter aufweisen. Weiterhin enthält die Darstellung eines zurzeit noch diskutierten Vorschlags (R-Mode), bei dem entweder auf Mittelwelle (MW) und/oder über AIS ein zur Positionierung verwendetes „Ranging-Signal“ abgestrahlt werden soll. Hierdurch soll eine von der satellitengestützten Navigation unabhängige Positionsbestimmung ermöglicht werden.

2.2 Maritime Anwendungen

Neben der Navigation auf See, im Küstenbereich, im Revier, im Ansteuerungsbereich und im Hafen, bildet die Positionsbestimmung auch die Voraussetzung für Anwendungen, die auf eine zuverlässige, integere und genaue Angabe von Position, Geschwindigkeit und Zeit angewiesen sind. Dazu zählen insbesondere

Sicherheitsrelevante Anwendungen:

- Automatic Identification System (AIS)
- Electronic Chart Display and Information System (ECDIS)
- Automatische Bahnregelungssysteme

- Automatic Radar Plotting Aids (ARPA)
- Such- und Rettungssysteme wie Global Maritime Distress Safety System (GMDSS) unter Verwendung von Emergency Position Indicating Radio Beacon (EPRIB)

Sonstige Anwendungen:

- Hydrographie: Erstellung und Aktualisierung von Seekarten
- Vermessung: Erhaltung von Häfen und Fahrwassern
- Tracking und Tracing: Ortung von Containern und Großgeräten im Hafen; Zuordnung von Ladung und Stellplatz; Auffindung verlorener Ladung
- Fischerei: Einhaltung der Fischereigrenzen, Fangplätzen, etc.
- Tonnenlegen und Bauwerkspeilung

2.3 Maritime Anforderungen

Die International Maritime Organisation (IMO) definiert operationelle Anforderungen an die Betreiber von Funknavigationssystemen. Um den Status eines von der IMO anerkannten weltweiten Funknavigationssystems (WWRNS) zu erhalten, muss das Navigationssystem die operationellen Anforderungen der IMO gemäß IMO Resolution A.1046(27) erfüllen (IMO 2011). In dieser Resolution klassifiziert die IMO drei Typen von Seegebieten, die sich mit Hinblick auf die operationellen Anforderungen unterscheiden (siehe [Tab. 1](#)).

Darüber hinaus formuliert die IMO in ihrer Resolution A.915(22) minimale operationelle Anforderungen an die *Bordseite* mit Hinblick auf die allgemeine Navigation (siehe [Tab. 2](#)).

Verschiedene Gremien im maritimen Bereich arbeiten derzeit an einer Harmonisierung der Anforderungen auf Betreiber- und Nutzerseite. Ebenfalls not-

Tab. 1: Operationelle Anforderungen gemäß (IMO 2011) für den Maritimen Bereich

Seegebiet	Absolute horizontale Genauigkeit	Signal Verfügbarkeit	Kontinuität	Integrität Alarmierungszeit	Intervall
Küste/Hafen mit viel Verkehr/hohem Risiko	≤ 10 m (95 %)	> 99,8 % (2 Jahre)	≥ 99,97 % (15 Min.)	10 s	10 s
Küste/Hafen mit wenig Verkehr/niedrigem Risiko	≤ 10 m (95 %)	> 99,5 % (2 Jahre)	≥ 99,85 % (15 Min.)	10 s	10 s
Offene See	≤ 100 m (95 %)	> 99,8 % (30 Tage)	k. A.	10 s	10 s

Tab. 2: Minimale operationelle Nutzeranforderungen an die Bordseite mit Hinblick auf die allgemeine Navigation (IMO 2001)

Navigation Phase	System level parameters				Service level parameters			Intervall
	Genauigkeit horizontal	Integrität			Verfügbarkeit (à 30 Tage)	Kontinuität (15 Min.)	Abdeckung	
		Alarmierungsgrenze	Alarmierungszeit	Integritätsrisiko (à 3 Std.)				
Offene See	10 m	25,0 m	10 s	10–5	99,8 %	k. A.	Global	1 s
Küstenbereich	10 m	25,0 m	10 s	10–5	99,8 %	k. A.	Global	1 s
Hafenzufahrt und eingeschränkte Seegebiete	10 m	25,0 m	10 s	10–5	99,8 %	99,97 %	Regional	1 s
Hafen	1 m	2,5 m	10 s	10–5	99,8 %	99,97 %	Lokal	1 s
Binnenwasserstraßen	10 m	25,0 m	10 s	10–5	99,8 %	99,97 %	Regional	1 s

wendig wäre eine Ausweitung auf weitere wichtige Navigationskenngrößen wie Heading, SOG, COG, etc. mit dem Ziel einer harmonisierten Anforderungsliste aller PNT-Daten. Die derzeitige Erarbeitung von „Guidelines for shipborne Position, Navigation and Timing (data processing) Unit“, durch die IMO, beabsichtigt die Bereitstellung von „Resilient PNT data“ nach einem modularen und skalierbaren Ansatz (IMO 2016). Hierbei werden unterschiedliche Anwendungsklassen definiert, die von einer einfachen Bereitstellung von PVT-Daten (z. B. ein GPS-Empfänger) bis hin zur vollen Bereitstellung von PNT-Daten reichen, welche die Bewegung der Schiffshülle vollständig beschreiben. Desweiteren werden bei diesem Ansatz die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit und Integrität in definierten „Performance level“ beschrieben.

2.4 Maritime Ersatzsysteme (R-Mode)

Die zunehmende Abhängigkeit von der Satellitennavigation wirft immer wieder die Frage auf, ob für sicherheitsrelevante navigatorische Anwendungen ein Ersatz-Funknavigationssystem erforderlich ist. Wie bereits beschrieben, basiert gegenwärtig die Positionsbestimmung zumeist auf Satellitennavigationssyste-

men wie dem amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS. Zukünftig werden weitere Satellitennavigationssysteme nutzbar sein (Galileo und Beidou), welche die Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten weiter erhöhen wird. Alle Satellitensysteme (GNSS) verwenden dabei ähnliche Signalstrukturen, Sendefrequenzen und Leistungen. Die Anfälligkeit und Störbarkeit von GNSS wurde ausführlich im Volpe Report analysiert und bewertet (Volpe 2001). Als Ergebnis wurde empfohlen, dass für sicherheitskritische Anwendungen ein Ersatzsystem vorgehalten werden sollte. Ebenfalls hat die IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities) in ihrer Empfehlung R-129 auf das Problem der GNSS-Anfälligkeit hingewiesen und empfiehlt die Verwendung von terrestrischen Ersatzsystemen für sicherheitskritische Anwendungen (IALA 2007). Auch die Weltschifffahrtsbehörde IMO erarbeitet gegenwärtig eine umfassende Strategie für die e-Navigation. Die IMO hatte ebenfalls die Notwendigkeit eines GNSS-unabhängigen, terrestrischen Funknavigationsverfahrens anerkannt (IMO 2007). In einem Eingangspapier zum IALA e-Navigation Committee hat die WSV vorgeschlagen, die bereits global vorhandenen Verfahren der MW-DGNSS-Korrekturwertaussendung und das AIS jeweils um eine so genannte Ranging-Mode-Komponente (R-Mode), basierend auf präzisen GNSS unabhängigen Zeitsignalen, zu ergänzen (Oltmann und Hoppe 2008). Diese Systemidee wird international unterstützt und eine entsprechende Weiterentwicklung der Systemidee befürwortet. Um eine möglichst große Akzeptanz auch im internationalen Rahmen für diesen Systemvorschlag zu erhalten, wurde die Entwicklung des R-Mode für MW-DGPS und AIS im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes ACCSEAS (Accessibility for Shipping, Efficiency, Advantages and Sustainability) durchgeführt. Eines der wesentlichen Arbeitspakete seitens der WSV war hierbei die Durchführung einer Machbarkeitsstudie zum R-Mode, in der wesentliche Grundlagen für die Entwicklung und Erprobung des R-Modes unter Verwendung von Aussendungen über MW-DGPS und AIS entwickelt wurden. Desweiteren konnte ein erstes Verfahren, auf der Basis von MW-R-Mode-Aussendungen, in einem Testpiloten erfolgreich validiert werden. Die Studie wurde in drei Teilbereiche aufgeteilt, um jeweils die Möglichkeiten der Aussendungen über MW und AIS sowie deren Kombination getrennt zu untersuchen.

2.4.1 R-Mode via MW-DGNSS

Die in der Studie empfohlene Lösung für Aussendungen über die MW ist eine Variante, welche das existierende MSK-Signal mit CW-Signalen überlagert. Die TOA-Performance (TOA = Time of Arrival) wird über Trägerphasenmessungen der CW-Signale erreicht, deren Mehrdeutigkeiten z. B. über die Aussendung bekannter Meldungen bestimmt werden können. Die Streckenmessgenauigkeit

wird ebenfalls von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die in der Studie untersucht wurden (Johnson und Swaszek, Part II 2014). Zu den Einflussgrößen zählen die Stabilität der Synchronisation, die Interferenz durch das von der Ionosphäre reflektierte Signal (Raumwelle), Unterschiede in der Bodenwellenausbreitung, Interferenzen von anderen DGNSS-Stationen auf derselben Sendefrequenz und die Geometrie der sendenden MW-DGNSS-Stationen. In der durchgeführten Analyse zur erreichbaren Positionsgenauigkeit wurde angenommen, dass eine Zeitstabilität im Bereich von einer Nanosekunde (ns) und eine

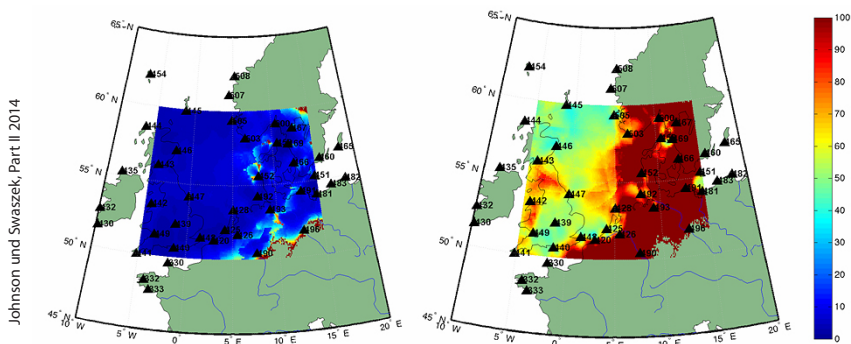


Abb. 3: Prädierte R-Mode-Positionierungsgenauigkeit in der Nordsee tagsüber (links) und nachts (rechts) in Meter (Skala 0–100 m)

Zeitsynchronisation von 50 bis 100 ns zu einer gemeinsamen Zeitreferenz wie UTC erzielbar sind. Die Raumwelle hat einen großen Einfluss auf die Positionierungsgenauigkeit, so dass separate Ergebnisse für den Tag und die Nacht ausgewiesen wurden (Abb. 3). Zusammenfassend kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass R-Mode-Aussendungen über MW-DGNSS ein großes Potenzial für ein zukünftiges terrestrisches und GNSS-unabhängiges Navigationssystem aufweisen. Die Studie enthält ebenfalls Hinweise für die Realisierung einer Testumgebung zur Durchführung von realen Messungen. Hierfür wurden Konzeptvorschläge für die Entwicklung von sende- und empfangsseitigen R-Mode-Komponenten erarbeitet. Erste praktische Messungen zu einfachen Entfernungsmessungen konnten die theoretischen Annahmen und Berechnungen validieren.

2.4.2 R-Mode via AIS

Im Rahmen der in ACCSEAS durchgeführten Machbarkeitsstudie wurde ebenfalls die Nutzung von Aussendungen mittels AIS im VHF-Seefunkband (156,025–162,025 MHz) untersucht. Hierbei wird bei AIS bereits ein synchronisiertes Zeitschlitzverfahren (TDMA) verwendet. In der Studie wurden mehrere

Methoden zur Verwendung von AIS untersucht (Johnson und Swaszek, Part IV 2014). Als geeignetste Methode wurde eine Verwendung des bestehenden AIS-Standards mit dezidierten Nachrichteninhalten bewertet. Sie basiert darauf, dass ein AIS-Empfänger sowohl die Zeiten der Bitübergänge als auch die Trägerphase aller verfügbaren AIS-Basisstationssignale ermitteln. Hierbei ist die Aussendung von bekannten Dateninhalten (z. B. vom Typ 4 oder 8) notwendig. Diese können zeitlich und inhaltlich vorhergesagt werden, wodurch störende Signalzufälligkeiten minimiert werden können. Insbesondere die Aussendung von Nach-

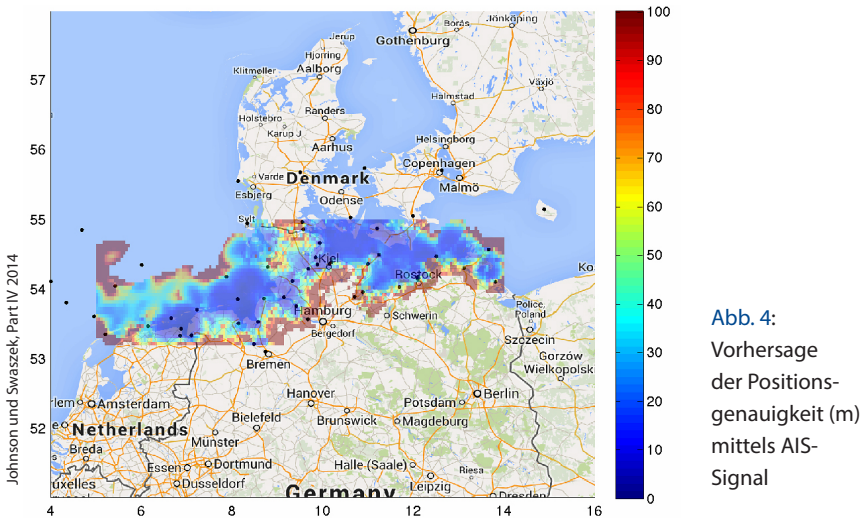


Abb. 4:
Vorhersage
der Positions-
genauigkeit (m)
mittels AIS-
Signal

richten des Typs 8 (binäre Datenaussendung) ermöglicht längere und häufigere Übertragungen mit fester Struktur. Bei der Nutzung als Kommunikationskanal muss ein AIS-R-Mode-Empfänger in der Lage sein, das Sendesignal mit hoher Genauigkeit zu demodulieren. Abb. 4 zeigt die erreichbare Positionsgenauigkeit bei Verwendung von Messungen der AIS-Bitübergänge. Hierbei wurden nur AIS-Basisstationen mit einer Signalstärke > -117 dBm und einer Maximaldistanz von 75 km zwischen Sender und Empfänger genutzt. Desweiteren wurde eine Übertragung von Typ 8 Meldungen mit insgesamt 1.280 Bit zu Grunde gelegt. Zusammenfassend kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass die Verwendung des vorhandenen und standardisierten AIS-Signals mit der Methode der Messung von Bitübergängen gute Genauigkeiten im küstennahen Bereich bereitstellen kann. Somit können R-Mode-Aussendungen via AIS ebenfalls einen wichtigen Beitrag für die Bereitstellung eines zukünftigen terrestrischen und GNSS-unabhängigem Navigationssystems leisten. Praktische Messungen zu dieser Methode konnten bisher noch nicht durchgeführt werden.

2.4.3 Kombination verschiedener R-Mode-Aussendungen

In diesem Teil wurde die Kombination von MW-DGNSS, AIS als auch die Verwendung von eLoran untersucht. Wesentliches Ziel dieses Ansatzes ist die Verbesserung der Positionslösungen durch die Kombination von R-Mode-Signalen. Dieses Prinzip wird auch als SoOP (Signals of Opportunity) bezeichnet. Im Hinblick auf dieses Ziel wird das Konzept eines „All-in-View“-Empfängers beschrieben, welcher die Signale von zwei oder mehr R-Mode-Quellen kombiniert. Eine

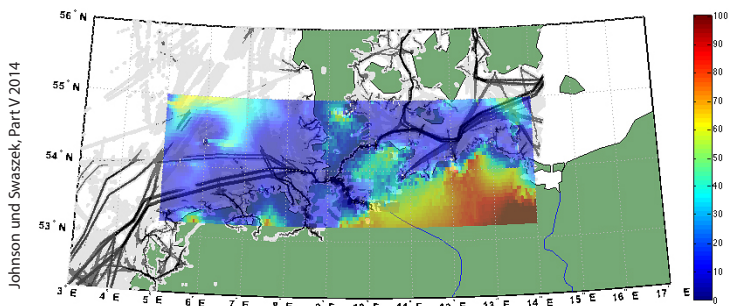


Abb. 5: R-Mode-Genauigkeit über der Schifffahrts-Verkehrsdichte. Schifffahrtsdichte in Graustufen (je dunkler desto mehr Verkehr)

weitere wichtige Betrachtung ergibt sich, wenn auch die Schiffsverkehrsdichte mit einbezogen wird. Die Leistungsfähigkeit eines zukünftigen GNSS-Backup-Dienstes ist in solchen Regionen am kritischsten, in denen eine hohe Verkehrsdichte besteht. Abb. 5 zeigt zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts die vorhergesagte Genauigkeit unter Verwendung der R-Mode-Systeme MW-DGNSS, AIS sowie einer eLoran-Station auf Sylt. Aufgrund der großen Anzahl an AIS- und MW-DGNSS-Stationen in Bereichen mit hoher Verkehrsdichte kann eine Bereitstellung des R-Mode mit hoher Genauigkeit in diesen Gebieten erreicht werden.

3 GNSS und DGNSS in der Binnenschifffahrt

In den letzten Jahren ist ein zunehmendes Interesse an einer effektiveren Nutzung der Binnenwasserstraßen festzustellen. Dieses resultiert in einer Vielzahl neuer Entwicklungen und Systemen rund um die Wasserstraßen. Systeme in diesem Zusammenhang werden allgemein unter dem Schlagwort RIS (River Information Services) geführt. Eine grundlegende Verbesserung der technischen Ausrüstung in der Binnenschifffahrt ergab sich durch die Entwicklung, Standardisierung und Einführung der elektronischen Flusskarte „Inland ECDIS“.

Weiterhin hat die Entwicklung von AIS sich als ein nützliches Werkzeug zum Austausch von navigatorischen Daten zwischen verschiedenen Schiffen bzw. zwischen Schiffen und Verkehrszentralen erwiesen. Eine bedeutende Grundlage zur Anwendung solcher neuen telematischen Systeme ist die Nutzung von GNSS und entsprechender Differentialsysteme (DGNSS), welche die notwendige Genauigkeit und Integrität für die Telematiksysteme zur Verfügung stellen (Hoppe 2006). Neben den bereits etablierten telematischen Anwendungen, wie es die Inland-ECDIS im Navigationsmodus bzw. die Aussendung der eigenen Schiffsposition über AIS darstellen, werden in verschiedenen europäischen Projekten weitere zukünftige Anwendungen in sicherheitsnavigatorischen Bereichen erprobt und untersucht (z. B. Forschungsprojekt LAESSI). Solche Anwendungen sind z. B. Kollisionsverhütungssysteme, automatische Bahnführungssysteme, Brückenanfahrwarnsysteme und Anlegeassistenten. Eine zuverlässige, sichere und präzise Positionsbestimmung sowie die Möglichkeit die eigene Schiffsvorausrichtung (Heading) bestimmen zu können ist für die gegenwärtigen und zukünftigen telematischen Anwendungen von großer Bedeutung.

3.1 Ausrüstungs- und Anforderungssituation in der Binnenschifffahrt

Gegenwärtig sind nur unzureichende Anforderungen hinsichtlich der Positionierung und Orientierung als verbindliche Anforderungen festgelegt worden. Bezüglich der Parameter Position und Schiffsvorausrichtung (Heading) existieren in den relevanten Standards gegenwärtig folgende Informationen:

- Der „*Inland-ECDIS Standard*“ definiert für Navigationssysteme im Binnenbereich, die im Navigationsmodus betrieben werden, folgende Anforderungen hinsichtlich der Positionsgenauigkeit (CCNR 2003):
 - Der mittlere Positionswert darf unter Berücksichtigung aller systematischen Fehler nicht mehr als 5 m vom wirklichen Wert abweichen.
 - Die Standardabweichung σ darf nicht größer sein als 5 m, basierend nur auf zufälligen Fehlern.
 - Das System muss fähig sein, Abweichungen von mehr als 3σ innerhalb von 30 Sekunden zu ermitteln.
- Hinsichtlich der Schiffsvorausrichtung (Heading) beinhaltet der Inland-ECDIS-Standard folgende Anforderungen:
 - Der mittlere Heading-Winkel darf unter Berücksichtigung aller systematischen Fehler nicht um mehr als 1° vom RADAR-Heading-Wert abweichen. Der Offset zwischen der Schiffs-Heading-Richtung und dem RADAR-Heading soll weniger als 1° betragen.
 - Die Standardabweichung σ muss kleiner als 2° betragen und basiert nur auf zufälligen Fehlern.

- Der „Vessel Tracking and Tracing Standard for Inland Navigation“, definiert darüber hinaus folgende Anforderungen (CCNR 2006):
 - < 1 m z. B. für die Fahrt in Schleusen- und Brückenbereichen
 - < 10 m z. B. für die Navigation (short time ahead)
 - < 100 m für die die Navigation (medium time ahead)

Die o. g. Anforderungen bezüglich der Parameter Positionsgenauigkeit und Heading beinhalten mit Ausnahme der Fußnote im VTT-Standard nur unzureichende Aussagen bezüglich weiterer sicherheitsrelevanter Kenngrößen wie Integrität, Verfügbarkeit oder Kontinuität. Die in den Standards enthaltenen Genauigkeits- und Integritätsanforderungen können gegenwärtig nur mit Hilfe von landgestützten Augmentierungssystemen (z. B. DGPS) erreicht werden. Im Binnenbereich wird, wie auch an der Küste, das MW-DGNSS-System nach IALA Standard verwendet. Dieses Korrekturdatensystem basiert auf der Aussendung von Code-Korrekturdaten für GPS und GLONASS und kann Genauigkeiten im Submeterbereich bereitstellen. Für die zukünftigen Anwendungen, wie z. B. die im erwähnten Forschungsprojekt LAESSI (Leit- und Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inlandwasserstrassen) entwickelten Fahrerassistenzsysteme, werden Genauigkeiten im Bereich von < 1dm (3D) benötigt (Sandler et al. 2016). Für diese zukünftigen Anwendungen werden im Projekt phasenbasierte Korrekturdaten mit Integritätsinformation entwickelt, die über eine im Aufbau befindliche AIS-Landinfrastruktur der Schifffahrt bereitgestellt werden sollen.

4 Das IALA DGNSS-System

Es wurde bereits erwähnt, dass viele Schifffahrtsverwaltungen DGPS-Referenzstationen entlang der Küsten errichtet haben, um die Sicherheit und Effizienz der Seeschifffahrt zu erhöhen. Weltweit sind mittlerweile ungefähr 350 DGPS-Stationen im Betrieb. Die Korrekturdaten dieses DGPS-Dienstes werden im Mittelwellenbereich (283,5–325 kHz) ausgestrahlt. Der DGNSS-Dienst der WSV basiert auf einem weltweit standardisierten Verfahren, welches IALA erarbeitet wurde (IALA 2015). Der Dienst wird international auch als „IALA-DGNSS“ oder „MF-Radiobeacon“ bezeichnet. Die Referenzstationen der WSV stellen der Schifffahrt für sicherheitsrelevante Navigationsanwendungen einen zuverlässigen Korrekturdatendienst mit hoher Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität über Mittelwellensender zur Verfügung (Radiobeacon). Zur Abdeckung der Küste dienen drei Stationen mit einer Reichweite von ca. 250 km. Der Binnenbereich wird insgesamt von vier weiteren DGPS-Stationen versorgt, die eine Abdeckung der Binnenwasserstraßen gewährleisten. Die Genauigkeit des Dienstes

liegt typisch bei $< 1\text{--}3$ m. Die Integritätsfunktion warnt die Nutzer vor fehlerhaften Informationen der Satellitennavigationssysteme mit einer Alarmierungszeit von weniger als zehn Sekunden.

Literatur

- CCNR: Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation. Edition 1.02, 16.10.2003, Section 4.
- CCNR: Vessel Tracking and Tracing Standard for Inland Navigation. Edition 1.0, 31.5.2006.
- Department of Defense: Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 4th Edition, September 2008.
- Hoppe, M.: Differential Global Navigation Satellite System for telematic applications on inland waterways. PIANC Conference, Estoril, Mai 2006.
- IALA: Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of GNSS Services in the Frequency band 283.5-325 kHz. 2015.
- IALA: Recommendation R-129 on GNSS Vulnerability and Mitigation Measures. Edition 1, Dec. 2004.
- IMO Resolution A.1046(27): WORLD-WIDE Radionavigation System. Adopted on 30 November 2011.
- IMO Resolution A.915(22): Revised maritime policy and requirements for a future Global Navigation Satellite System (GNSS). Adopted on 29 November 2001.
- IMO: Draft Guidelines for shipborne Position, Navigation and Timing (data processing) Unit. Input to NCRS 4.2, November 2016.
- IMO: Report NAV53, §13.24. 2007.
- Johnson, G. W.; Swaszek P.F.: Part II Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions. March 2014.
- Johnson, G. W.; Swaszek, P.F.: Part IV Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions. August 2014.
- Johnson, G. W.; Swaszek, P.F.: Part V Feasibility Study of R-Mode combining MF DGNSS, AIS, and eLoran Transmissions. September 2014.
- Oltmann, J.-H.; Hoppe, M.: Contribution to the IALA World Wide Radio Navigation plan (IALA-WWRNP)/Recapitalization of MF DGNSS Systems, ENAV4-7.10A, ENAV4-7.10B. Shanghai, 2008.
- Sandler, M.; Heßelbarth, A.; Ziebold, R.; Uhlemann, M.; Alberding, J.; Bröschel, M.; Hoppe, M.: Setting up driver assistance functions for inland vessels based on high precision and integrity checked positioning information. DGON ISIS/MTE, Hamburg, August 2016.
- Volpe, J.A.: National Transportation Systems Centre, Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure Relying on the GPS. Final Report, 2001.
- WSV: Allgemein fachliche Querschnittsdokumente der Verkehrstechnik. Dienstübergreifende fachliche Aspekte der Funknav., Doc.-Nr. 0559, 2006.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Michael Hoppe
 Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken
 Am Berg 3, 56070 Koblenz
michael.hoppe@wsv.bund.de



Session 3:

Auswertetechnik und Dienste

Zum Status von Precise Point Positioning (PPP)

Wolfgang Söhne

1 Einleitung

Die Einzelpunktbestimmung, also die Positionierung ohne (direkte) Verwendung von Beobachtungsdaten weiterer Stationen, ist die ureigene Anwendung der Globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS). Jedes Navigationssystem funktioniert nach diesem Grundprinzip. Diese Form des auch als „Single Point Positioning“ (SPP) bezeichneten Verfahrens unterscheidet sich von dem in diesem Aufsatz näher beleuchteten „Precise Point Positioning“ (PPP) im Wesentlichen durch das Genauigkeitsniveau, welches beim letztgenannten durch die Verwendung unterschiedlicher Arten von Korrekturen angehoben wird.

Zweifellos bedarf das Wort „präzise“ in PPP einer genaueren Durchleuchtung, da es sich um einen unscharfen Begriff handelt. Er ist genauso einem Fortschritt oder einer Weiterentwicklung unterworfen wie z. B. die in der GNSS-Gemeinde verwendeten Begriffe „near real-time“ – aus heutiger Sicht eher ein „fast post-processing“ – oder „rapid products“ – deren Beschleunigung durch die Vorsilbe „ultra-“ versinnbildlicht wird.

Bei PPP kann grundsätzlich zwischen der Anwendung im Post-Processing und in Echtzeit unterschieden werden. Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Methoden besteht darin, dass in Echtzeit die Beobachtungen nur epochenweise („epoch-by-epoch“), also eine nach der anderen, ausgewertet werden können. Diese Technik lässt sich im Post-Processing zwar ebenfalls anwenden, aber die Auswertung aller Beobachtungen in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate lässt höhere Genauigkeiten erwarten. So verfügt beispielsweise auch die wissenschaftliche Berner GNSS-Auswertesoftware über die Möglichkeit einer PPP-Auswertung (Dach et al. 2007, Dach et al. 2015).

Die Genauigkeit, also der Grad des Wortes „präzise“, ist in einer groben Näherung abhängig von der Anzahl der Korrekturparameter und deren Genauigkeit. Darüber hinaus spielt wie bei anderen Prozessierungsmethoden auch die Beobachtungsdauer oder exakter die Auswertedauer eine Rolle.

In diesem Aufsatz werden zunächst wichtige PPP-Grundlagen beleuchtet. Ebenso werden Unterschiede zum wesentlich bekannteren Verfahren der relativen Positionierung aufgegriffen. Die verschiedenen Möglichkeiten, an Korrekturparameter zu gelangen, werden erläutert. Speziell werden die Bemühungen im Special Committee (SC) 104 „DGNSS“ der „Radio Technical Commission for Maritime Services“ (RTCM) diskutiert.

In der geodätischen Anwendung wird regelmäßig davon ausgegangen, hochwertiges Equipment (z. B. Zweifrequenzempfänger, Choke Ring-Antennen) zu verwenden. In letzter Zeit gehen einige Entwicklungen und Untersuchungen jedoch dahin, präzise Positionierung auch mit GNSS-Empfängern zu erzielen, die üblicherweise nicht dafür entwickelt wurden (z. B. Einfrequenzempfänger, Massenmarktempfänger, Mobiltelefone). Entscheidend ist dabei selbstverständlich die Verwendung von bzw. der Zugriff auf Phasenmessungen. Hierzu gibt es einige Tests, bei denen Autoren Zugriff auf Phasenmessungen erhalten haben. Die Firma Google hatte Mitte 2016 angekündigt, dass zukünftig GNSS-Rohdaten aus Android-Mobilgeräten auslesbar sein werden.

2 Precise Point Positioning (PPP)

2.1 Grundlagen des PPP

Von Einzelpunktbestimmung im klassischen Sinne spricht man, wenn der Anwender nur die Beobachtungen einer einzigen Station verwendet. Dem gegenüber steht die differentielle Auswertung, die darüber hinaus auch die Beobachtungsdaten einer weiteren Station verwendet, die als Referenzstation fungiert. Diese Auswertetechnik wurde anfangs als „differential GPS“ (DGPS) und später konsequenterweise als „differential GNSS“ (DGNSS) bezeichnet. Das „Single Point Positioning“ (SPP) verwendet zur Positionsbestimmung die von den Satelliten in ihren Ephemeriden-Messages abgestrahlten Informationen wie Bahn- und Uhrenparameter sowie relativ einfache Modelle für die tropo- und ionosphärischen Korrekturen. Massenmarktgeräte mit ihren einfachen Antennen navigieren oder positionieren auf diese Weise mit einigen 10 m Genauigkeit; Geräte mit hochwertigeren Antennen werden sicherlich einige Meter Genauigkeit erreichen. In Abgrenzung zu SPP spricht man von „Precise Point Positioning“ (PPP) dann, wenn verbesserte – und möglicherweise auch zusätzliche – Korrekturen verwendet werden. Der wesentliche Genauigkeitsgewinn wird durch die Verwendung von präzisen Satellitenbahn- und -uhreninformationen erreicht.

Als eine der grundlegenden Referenzen für PPP wird häufig Zumberge et al. (1997) angeführt. Darin beschreiben die Autoren, die am Jet Propulsion Laboratory (JPL) arbeiten, die wesentlichen Merkmale der Anwendung von PPP. Das in dem Aufsatz erwähnte Programm GIPSY-OASIS basiert auf dem PPP-Ansatz und wird seit mittlerweile 25 Jahren u. a. für die Erstellung der Produkte des JPL für den Internationalen GNSS-Dienst (IGS) eingesetzt (Zumberge et al. 1994).

Die eingangs beschriebene einfache Unterscheidung zwischen PPP und DGNSS wurde mittlerweile diversifiziert. So wurde im differentiellen Bereich zum einen unter DGNSS die Verwendung von Code-Beobachtungen verstanden

und für die differentielle Positionierung mit Phasenbeobachtungen der Begriff „Real-Time Kinematic“ (RTK) verwendet. Er beinhaltet den Begriff Echtzeit, wird jedoch inzwischen auch für die zeitlich verzögerte Auswertung – auch auf langen Basislinien (z. B. einige 100 km) – benutzt. Zudem wurden Techniken entwickelt, die nicht nur eine, sondern mehrere Referenzstationen verwenden und daraus Korrekturparameter oder virtuelle Beobachtungen im Beobachtungsraum ableiten (Söhne 2013). Der hierbei i. d. R. genutzte Fachterminus „Network RTK“ (NRTK) trägt dem Rechnung (Wanninger 2006).

Wie eingangs erwähnt, lässt sich PPP auch im Post-Processing gut anwenden. Es werden unmittelbar keine Referenzstation oder -stationen benötigt. Vielmehr werden externe Parameter hoher Genauigkeit verwendet, die in die Auswertung als fehlerfrei eingeführt werden: präzise Satellitenbahnen und -uhren, differentielle Code-Biases, ggf. Ocean Loading Parameter, Antennenphasenkorrekturen u. a. m. Wanninger et al. (2009) beschreiben das Grundprinzip in komprimierter Form. Die benötigten Parameter liegen weitestgehend in standardisierten oder akzeptierten Formaten vor und können z. B. vom IGS kostenfrei bezogen werden. Das Verfahren eignet sich offenbar auch recht gut für den automatisierten Betrieb. Giese et al. (2011) untersuchten vier Online-PPP-Auswertemaschinen. Die Bedienfreundlichkeit war bei allen Diensten gegeben, Genauigkeitsabfälle zwischen den Tools waren nur in wenigen Fällen erkennbar. Auch Uygur et al. (2016) testeten dieselben vier Online-PPP-Dienste und fanden im Vergleich der Koordinaten mit denen einer Netzlösung Abweichungen im mm-Bereich sowie keine signifikanten Unterschiede zwischen den Berechnungstools. Heßelbarth et al. (2013) geben eine Übersicht über Online-Berechnungsdienste.

Bei PPP hat dank der flächendeckenden Verfügbarkeit geeigneter Beobachtungsdaten der Einsatz im Echtzeitbereich stark zugenommen. Auch wenn der Anwender nur die Daten einer einzelnen Station benötigt, so wird auch für das PPP-Verfahren ein Netz von Bodenreferenzstationen benötigt, aus denen die Korrekturparameter abgeleitet werden müssen. Für die Bestimmung der Satellitenbahn- und -uhrenparameter beispielsweise wird ein Netz global verteilter Stationen benötigt. Für die Ableitung weiterer Parameter (z. B. Troposphärenparameter) wird ein entsprechend dichteres Netz regional verteilter Stationen benötigt.

2.2 State Space Representation

Wie u. a. in Söhne (2013) skizziert wurde, lassen sich Korrekturen im Beobachtungsraum (Observation Space Representation – OSR) oder im Zustandsraum (State Space Representation – SSR) beschreiben. Während für (N)RTK die Korrekturen im Beobachtungsraum gegeben werden, werden für PPP Korrekturen im Zustandsraum benötigt. Im RTCM SC104 wurde deshalb eine Arbeitsgruppe

SSR ins Leben gerufen, die die Standardisierung der Korrekturparameter im Zustandsraum vorantreiben soll. Es gilt dabei die Einzelelemente des Fehlerhaushaltes zu modellieren und in einem standardisierten Korrekturdatenformat in RTCM v3 auszusenden. Hierzu wurde ein stufenweises Vorgehen vereinbart. In SSR Stufe 1 werden Satellitenbahn-, -uhrenfehler und Signallaufzeitverzögerungen (Code Biases) modelliert. Diese Stufe ist weitgehend abgeschlossen, auch für über GPS und GLONASS hinausgehende Konstellationen wie Galileo, BeiDou und QZSS. In der Stufe 2 sollen Signallaufzeitverzögerungen (Phase Biases) und ionosphärische Korrekturen (in Zenitrichtung) berücksichtigt werden. Diese Stufe ist in Bearbeitung und wird in RTCM SC104 intensiv diskutiert. Mit Stufe 3, die sich mit troposphärischen Korrekturen und ionosphärischen Korrekturen (in Richtung der Satelliten) beschäftigen soll, ist noch nicht begonnen worden. Als mögliche Stufe 4 ist die Komprimierung der Parameter angedacht. Eine effektive Komprimierung ist ein Schlüssel zur Verwendung der Korrekturen, wenn für die Übertragung nur eine geringe Bandbreite zur Verfügung steht.

2.3 PPP in Echtzeit

Je nach PPP-Anwendungsszenario sind verschiedene Echtzeit-Dienste zu unterscheiden. Im Folgenden werden ausgewählte kommerzielle und kostenfreie Angebote aufgegriffen.

2.3.1 Kommerzielle Dienste

Es gibt eine ganze Reihe von Firmen, die Angebote und Lösungen zum PPP in Echtzeit anbieten. Zwei wesentliche Merkmale sind, dass es sich häufig um Komplettlösungen handelt und diese Lösungen auf proprietären Formaten beruhen.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige Lösungen beschrieben.

Fugro, ein niederländisches Unternehmen, das im Bereich Geotechnik aktiv ist und das „Vermessung“ als eine der drei Sparten des Unternehmens angibt, betreibt seit Jahren globale Positionierungsdienste, die ursprünglich dem maritimen Sektor entstammen. Es werden mehrere Dienste unterschiedlicher Genauigkeitsklassen sowohl im differentiellen Modus als auch im PPP-Modus angeboten (de Jong et al. 2012). Das globale Netz von Bodenreferenzstationen besteht aus ca. 40 Stationen (Liu et al. 2016). OmniSTAR¹, einst als eigenständiges Element ausgesondert, um sich speziell den landgestützten Anwendungen zu widmen, ist vor einigen Jahren von der Firma Trimble übernommen worden.

1 www.omnistar.com

John Deere, einer der größten Hersteller von Landmaschinen, betreibt bereits seit 2003 einen eigenen PPP-Dienst namens StarFire (neueste Version: SF3). Die Maschinen sind mit eigenen Empfängern ausgerüstet. Für den Dienst betreibt StarFire ein globales und homogenes Netz von ca. 60 Bodenreferenzstationen, die ebenfalls mit eigenen Empfängern ausgerüstet sind (Dai et al. 2016). Zur Übertragung der Korrekturparameter werden sieben sogenannte StarFire-Satelliten verwendet. Als Alter der Korrektur werden vier bis fünf Sekunden angegeben.

TERRASTAR ist ein Angebot der Firma Veripos². Es existieren bzw. existierten verschiedene Dienste wie TERRASTAR-D (PPP mit GPS und GLO-NASS auf L1 und L2) und TERRASTAR-M (wie -D, jedoch nur auf L1) sowie TERRASTAR-C als hochgenauer (cm)-Dienst. Seit April 2016 wird der neue Dienst TERRASTAR-L als Ergänzung zu -C angeboten, der auf die Nutzer zugeschnitten ist, die dm-Genauigkeit erzielen wollen. Auch Veripos verfügt über ein globales Netz von ca. 75 Bodenreferenzstationen (Toor 2012). Als Verzögerung werden wenige Sekunden angegeben und als Alter der Korrekturen maximal zehn Sekunden. Die Dienste können z. B. für PPP mit der NovAtel CORRECT-Lösung verwendet werden. Es findet aber auch eine Zusammenarbeit mit Leica Geosystems statt, da alle genannten Unternehmen zur Unternehmensgruppe Hexagon gehören. Satelliten, die zur Ausstrahlung der Korrekturparameter verwendet werden, sind z. B. Inmarsat-Satelliten.

Die Firma Trimble als Hersteller von GNSS-Ausrüstungen bietet seinen Nutzern ebenfalls eine ganze Reihe von Produkten zur Auswertung von GNSS-Beobachtungen an. Speziell auf PPP ist das Produkt RTX zugeschnitten. Trimble betreibt ein umfangreiches Netz von ca. 100 bis 110 Bodenreferenzstationen (Weinbach et al. 2016). Es wird eine regionale Verdichtung für einige Regionen (z. B. Nordamerika, Europa) angeboten. Auch hier findet die Übertragung der Korrekturparameter über geostationäre Satelliten oder über das Internet statt.

2.3.2 Kostenfreie Dienste

Der IGS ist ein loser Zusammenschluss mehrerer hundert Gruppen und Organisationen. Seit mehr als 20 Jahren werden auf „best effort“-Basis Beobachtungs- und Navigationsdaten bereitgestellt, prozessiert und die Ergebnisse veröffentlicht. Ziel des IGS ist es, Ergebnisse höchster Genauigkeit zu produzieren. Ein wesentliches Merkmal ist die Diversität; es beteiligen sich zahlreiche Gruppen und Organisationen mit unterschiedlichem Equipment und unterschiedlicher Auswertemethodik (z. B. Software). Die endgültigen und offiziellen IGS-Produkte entstammen dann der Kombination der Einzellösungen.

2 www.terrastar.net, www.veripos.com

Im letzten Jahrzehnt wurden die Datei-basierten Produkte des IGS durch Entwicklungen im Bereich Echtzeit ergänzt. Im Jahre 2007 wurde dazu ein Pilotprojekt gestartet, das, wie im IGS üblich, die Arbeitslast – Stationen, Daten- und Produktzentren, Auswertezentren, Kombination, Analyse, etc. – auf viele Institutionen verteilte³. Seit 2012 ist das Projekt in einen offiziellen IGS Real-Time Service (IGS RTS) umgewandelt worden⁴. Details und Analysen zu den Echtzeitprodukten des IGS RTS finden sich bei Schönemann et al. (2017).

Aubault-Roudier et al. (2016) demonstrierten zum ersten Mal die Abstrahlung eines IGS RTS-Signals über einen geostationären Satelliten. In Zusammenarbeit mit dem luxemburgischen Betreiber der Satelliten konnte der Kanal E5b auf einem geostationären EGNOS-Satelliten für die Abstrahlung von Korrekturdaten verwendet werden. Konkret wurde der Korrekturdatenstrom CLK91 verwendet, den die französische Raumfahrtagentur CNES zum IGS RTS beiträgt (Laurichesse 2016). Dieser Datenstrom enthält u. a. GPS- und GLONASS-Bahn- und -uhrenkorrekturen sowie Code Biases aus SSR Stufe 1, aber darüber hinaus auch GPS Phase Biases sowie Ionosphärenparameter. Mit diesen Informationen ist auf Rover-Seite, mit der entsprechenden Software, Ambiguitätenfixierung möglich. Dieser Korrekturdatenstrom ist wie zahlreiche andere Datenströme (z. B. anderer Institutionen) vom Produktbroadcaster zu beziehen, den das BKG für den IGS betreibt⁵ (Abb. 1). Ein Schlüssel für die Verbreitung von Korrekturdaten über Satellit ist die Bandbreite. Die zur Verfügung stehende Bandbreite ist sehr gering und damit sollte auch die übertragene Datenrate so gering wie möglich sein. Aubault-Roudier et al. (2016) verwendeten eine neue, am CNES entwickelte, effektive Kompressionsmethode. Als ein Ergebnis ihrer Studie wurden für die Verzögerung bzw. das Alter der Korrekturen 23 Sekunden erreicht. Choy et al. (2015) führten ein vergleichbares Experiment durch, bei dem GPS-Bahn- und -uhrenkorrekturen über das L6-Signal des japanischen QZSS-Satelliten abgestrahlt wurden.

2.3.3 PPP-Programme

Es gibt zahlreiche Echtzeit-PPP-Programme, deren Ergebnisse in den vergangenen Jahren publiziert wurden. Es ist davon auszugehen, dass jeder Anbieter von Korrekturdaten, der mithin ein Server- oder Provider-Programm anwendet, ebenfalls über ein Client-Programm verfügt – sei es als integriertes Modul oder als eigenständiges Programm. Für PPP ist der Gesichtspunkt der Konsistenz wichtig, d. h., dass auf der Client-Seite dieselben Modelle verwendet werden

³ www.rtigs.net

⁴ www.igs.org/rtts

⁵ products.igs-ip.net

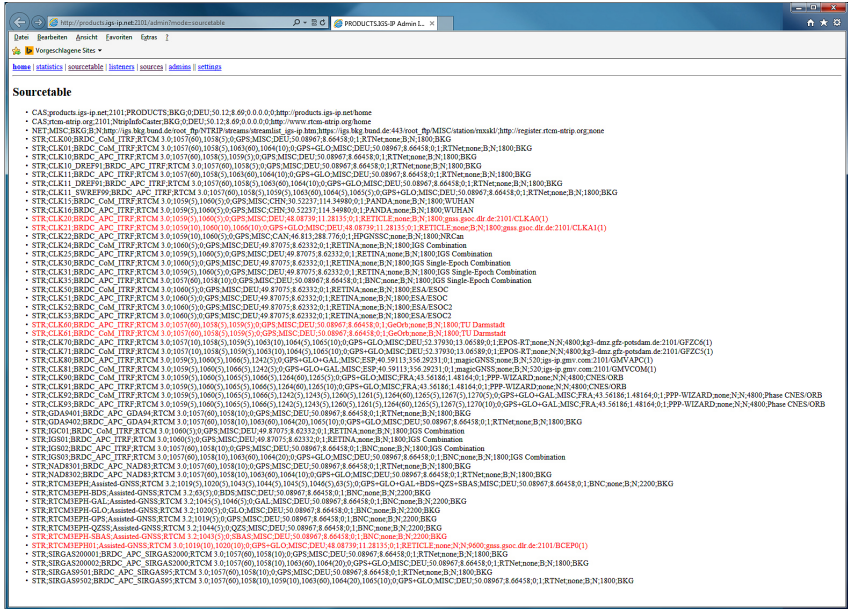


Abb. 1: Screenshot des BKG Professional Ntrip Casters – hier: Produktcaster des IGS RTS

wie auf der Server-Seite (Wübbena 2012). Zu den vielgenutzten und sogar mit Quelltext verfügbaren separaten Auswerteprogrammen auf der Nutzer-Seite gehören der „BKG Ntrip Client“ (BNC) und die „Real-Time Kinematic Library“ (RTKLIB).

Die vom BKG in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern Tschechische Technische Universität Prag und Firma Alberding GmbH entwickelte Software BNC ([Abb. 2](#)) verfügt neben dem zentralen Element der Datensynchronisation und -bereitstellung über ein PPP-Modul (Weber et al. 2016). Das Programm wird ständig an die verfügbaren und standardisierten Beobachtungstypen und Korrekturparameter angepasst. Neben der Echtzeitauswertung verfügt BNC, in der aktuellen Version 2.12, auch über die Möglichkeit, Beobachtungen und Korrekturparameter als RINEX-Dateien aufzuzeichnen. Auf diese Weise können die Daten unter Echtzeitbedingungen beliebig oft reprozessiert werden⁶.

Das Programm RTKLIB verfügt sowohl über ein Post-Processing- (RTK-POST) als auch über ein Echtzeitmodul (RTKNAVI). Es sind die über GPS und GLONASS hinausgehenden Konstellationen BeiDou, Galileo sowie QZSS und SBAS implementiert. RTKNAVI ist in der Lage, die Korrekturdatenströme des IGS RTS zu verarbeiten (Takasu 2010). In RTKLIB ist die Möglichkeit des Ambi-

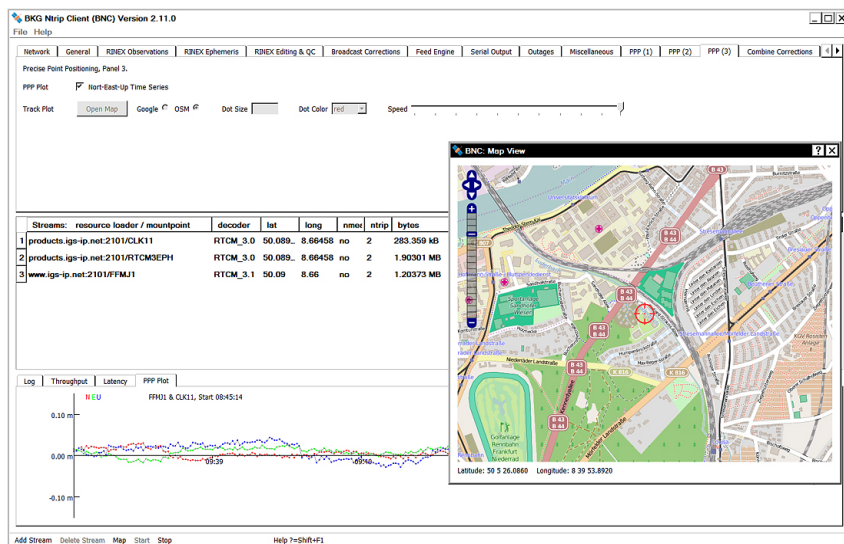


Abb. 2: Screenshot des BKG Ntrip Client (BNC)

guity Fixing implementiert (Takasu 2012). Bereits seit Anfang 2015 ist eine neue Version 2.4.3 angekündigt⁷. Bislang sind jedoch keine weiteren Informationen über den Stand der Auslieferung bekannt. Allerdings steht eine Beta-Version der Version 2.4.3 zum Download bereit.

Der PPP Wizard ist ein PPP-Client-Programm von CNES. Mit den entsprechenden Korrekturdatenströmen, insbesondere den Phase Biases, ist eine Ambiguitätenfixierung auf ganzzahlige Werte möglich (Laurichesse 2012). Der Quellcode des Programms ist auf Anfrage zu Ausbildungs- und Forschungszwecken verfügbar⁸.

Die spanische Firma GMV bietet die Programme magicPPP und magicGNSS an⁹. Es werden verschiedene Dienste für registrierte Nutzer offeriert, darunter ein Post-Processing Dienst, bei dem standardisierte RINEX-Dateien oder proprietäre binäre Daten hochgeladen werden können. Daneben ist ein Echtzeitdienst im Aufbau, bei dem von GMV generierte Korrekturparameter genutzt werden können. GMV beteiligt sich mit magicGNSS als Server-Programm am IGS RTS. magicGNSS ist auch in einer smarten Version für Android-Betriebssystem verfügbar (Calle et al. 2015).

7 www.rtklib.com

8 www.ppp-wizard.net

9 magicgnss.gmv.com

3 Ein neuer Konkurrent? RTK mit low-cost-Empfängern

Der sogenannte Massenmarkt wird sich erfahrungsgemäß nicht mit Positionierungs- oder Navigationsgenauigkeit von einigen Metern zufriedengeben, wenn höhere Genauigkeiten am Markt verfügbar sind. Humphreys (2016) und Murrian et al. (2016) berichten über Untersuchungen mit Smartphones, die sie in Zusammenarbeit mit einem koreanischen Hersteller durchführen konnten, der ihnen Zugriff auf Trägerphasenmessungen ermöglichte. Ein Augenmerk ihrer Arbeit lag auf der erforderlichen Dichte von Referenzstationen. Sie ermittelten eine Dichte von etwa 20 km Stationsabstand für das permanente GNSS-Netz.

2016 wurde von der Firma u-blox ein neuer Empfänger angekündigt, der GNSS-Positionierung im cm-Bereich ermöglichen soll (Mongrédien et al. 2016). Durch einen günstigen Preis – man sprach seinerzeit von einigen oder sogar wenigen hundert US-Dollar – wäre dieser L1-Empfänger für den Massenmarkt attraktiv.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verfahren der präzisen Einzelpunktpositionierung hat sich dank der kommerziellen Anbieter und großer Nachfrage einiger Anwendergruppen erheblich weiterentwickelt. Die Genauigkeitsanforderungen dieser Nutzer (z. B. Landwirtschaft) sind ebenfalls gestiegen.

Die größte Zielgruppe wird in Zukunft durch sogenannten Massenmarktnutzer gegeben sein. Bei entsprechend vorhandenen Angeboten wird sich bei diesen Nutzern eine Nachfrage nach höherer Genauigkeit einstellen. In jüngerer Zeit befinden sich RTK-Lösungen für diese Nutzer in der Entwicklung. Es ist anzunehmen, dass das Equipment (z. B. Empfänger, Antennen) entsprechend der Nachfrage verbessert werden wird. Der Zugriff auf die Rohdaten dieser Geräte wird zum Standard werden und neue Anwendungen erschließen.

Inwieweit sich PPP unter diesen rasant veränderlichen und hochinnovativen Bedingungen behaupten kann, wird die (nahe) Zukunft zeigen. Die kommerziellen Anwendungen haben insbesondere in der Landwirtschaft einen großen Markt gefunden. Offene PPP-Lösungen z. B. durch RTCM-Standardisierung haben dann eine Zukunft, wenn die Nachfrage an Hersteller und Provider durch die potenziellen Nutzer vorhanden ist. Die offenen Lösungen sind wesentlich von den Fortschritten in der Standardisierung abhängig. Sollte beispielsweise die SSR-Standardisierung in RTCM wie vorgesehen bis zur letzten Stufe umgesetzt werden, könnten mit den offenen Produkten hohe Genauigkeiten und deutlich verkürzte Konvergenzzeiten erzielt werden, wodurch diese Produkte auch geodätisch interessant werden würden.

Literatur

- Agrotis, L.; Schönemann, E.; Enderle, W.; Caissy, M.; Rülke, A. (2017): The IGS Real Time Service. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Aubault-Roudier, M.; Laurichesse, D.; Al Bitar, H.; Raimondi, M.; Lesage, P.; Sfeir, A.; Klein, M.; Sihrener, M.; Ramponi, N. (2016): Demonstration: E5b Signal Containing Value-Added Information Broadcast in Real Time via the SES ASTRA 5B GEO Satellite. Vortrag ION GNSS+ 2016, 14.09.2016, Portland, USA.
- Calle, D.; Navarro, P.F.; Rodríguez, D.; Rodríguez, I.; Rosa, R.; Tobías, G. (2015): MagicPPP in your Pocket: a Smart, Portable and Efficient Multi-GNSS High-accuracy Solution. 5th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 27.–29.10.2015, Braunschweig.
- Choy, S.; Harima, K.; Li, Y.; Kogure, S. (2015): GPS Precise Point Positioning with the Japanese Quasi-Zenith Satellite System LEX Augmentation Corrections. *Journal of Navigation* 68(4): S. 1–15. DOI: [10.1017/S0373346314000915](https://doi.org/10.1017/S0373346314000915).
- Dach, R.; Hugentobler, U.; Fridez, P.; Meindl, M. (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute University of Bern, 2007.
- Dach, R.; Lutz, S.; Walser, P.; Fridez, P. (2015): Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute University of Bern, 2015.
- Dai, L.; Chen, Y.; Lie, A.; Zeitzew, M.; Zhang, Y. (2016): StarFire™ SF3: Worldwide Centimeter-Accurate Real Time GNSS Positioning. ION GNSS+ 2016.
- de Jong, K.; Liu, X. (2012): Fugro's Precise (point) Positioning Services. PPP-RTK & Open Standards Symposium, 12.–13.3.2012, Frankfurt am Main.
- Giese, M.; Kaczkowski, J.; Lange, A.; Stieget, C.; Wiegatz, J.; Zakrzewski, P.; Wanning, L. (2011): Berechnungsdienste für Precise Point Positioning (PPP). *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 3/2011, S. 89–94.
- Heßelbarth, A.; Wanning, L. (2013): GNSS-Berechnungsdienste. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70/2013, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013, S. 93–112.
- Humphreys, T. (2016): Precise Positioning for the Mass Market. Keynote IGS-Workshop 2016, Sydney, Australien.
- Laurichesse, D. (2012): Phase biases estimation for integer ambiguity resolution. PPP-RTK & Open Standards Symposium, 12.–13.3.2012, Frankfurt am Main.
- Laurichesse, D. (2016): Fast PPP convergence using multi-constellations and triple-frequency ambiguity resolution. Poster IGS-Workshop 2016, Sydney, Australien.
- Liu, X.; Stone, M.; Memarzadeh, Y.; Goode, M.; Tegedor, J.; Lapucha, D.; Strandli, R. (2016): Integer Ambiguity Resolution Enabled RTK and PPP Solutions Using GPS and GLONASS Observations. ION GNSS+ 2016.
- Mongrédien, C.; Hide, C.; Fairhurst, P.; Ammann, D. (2016): Centimeter Positioning for UAVs and Mass-Market Applications. *GPS World* 27(10): S. 24–33, 2016.
- Murrian, M.J.; Gonzalez, C.W.; Humphreys, T.E.; Pesyna, K.M.; Shepard, D.P.; Kerns, A.J. (2016): Low-cost precise positioning for automated vehicles. *GPS World* 27(9): S. 32–39, 2016.

- Söhne, W. (2013): GNSS-Echtzeitkorrekturverfahren im Beobachtungs- und im Zustandsraum. In: DVW e.V. (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70/2013, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013, S. 83–92.
- Takasu, T. (2010): Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock. IGS-Workshop, 28.6.–2.7.2010, Newcastle, Großbritannien.
- Takasu, T. (2012): PPP Ambiguity Resolution Implementation in RTKLIB v 2.4.2. PPP-RTK & Open Standards Symposium, 12.–13.3.2012, Frankfurt am Main.
- Toor, P. (2012): Providing GNSS Augmentation Data: A Commercial Service Provider's Perspective. PPP-RTK & Open Standards Symposium, 12.–13.3.2012, Frankfurt am Main.
- Uygun, S. O.; Aydin, C.; Demir, D. O.; Cetin, S.; Dogan, U. (2016): Accuracy Assessment for PPP by Comparing Various Online PPP Service Solution with Bernese 5.2 Network Solution. Poster EGU-Generalversammlung 18.–22.04.2016, Wien.
- Wanninger, L. (2006): Präzise Positionierung in Netzen von GNSS-Referenzstationen. Festschrift 125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 263, 2006, S. 313–320.
- Wanninger, L.; Heßelbarth, A. (2009): GNSS Precise Point Positioning und seine Anwendung in der Hydrographie. In: DVW e.V. (Hrsg.): Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt. DVW-Schriftenreihe, Band 58/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Weber, G.; Mervart, L.; Stürze, A.; Rülke, A.; Stöcker, D. (2016): BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 49, 2016, ISBN 978-3-86482-083-0.
- Weinbach, U.; Brandl, M.; Chen, X.; Drescher, R.; Glocker, M.; Landau, H.; Pastor, F.; Reussner, N.; Thomas, K. (2016): Triple Frequency PPP with Trimble CenterPoint RTX. ION GNSS+ 2016.
- Wübbena, G. (2012): RTCM State Space Representation (SSR) Overall Concepts Towards PPP-RTK. PPP-RTK & Open Standards Symposium, 12.–13.3.2012, Frankfurt am Main.
- Zumberge, J. F.; Heflin, M. B.; Jefferson, D. C.; Watkins, M. M.; Webb, F. H. (1994): Jet Propulsion Laboratory IGS Analysis Center 1994 Annual Report. In: IGS 1994 Annual Report, S. 185–196.
- Zumberge, J. F.; Heflin, M. B.; Jefferson, D. C.; Watkins, M. M.; Webb, F. H. (1997): Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research 102(B3): S. 5005–5017, March 10, 1997.

Kontakt

Dr.-Ing. Wolfgang Söhne
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main
wolfgang.soehne@bkg.bund.de



The IGS Real Time Service

Loukis Agrotis | Erik Schönemann | Werner Enderle | Mark Caissy | Axel Rülke

1 Introduction

In April 2013, the International GNSS Service (IGS) has formally launched the IGS Real Time Service (RTS). This consists of GNSS data and products that are streamed from IGS data centres and are openly available to subscribed users with latencies of a few seconds.

The RTS is a collaborative effort from a large number of participating organisations and is provided on a “best efforts” basis, without any guarantees on performance, availability or user support. However, the service has been designed with a number of redundancies to maximise availability and minimise outages.

The IGS is an operational scientific service of the International Association of Geodesy and one of several services contributing to the Global Geodetic Observing System (GGOS). Data and products generated by the RTS contribute to the natural hazards theme within GGOS. Other applications for the service include GNSS constellation performance monitoring, weather forecasting and space weather monitoring.

This article is intended to inform about the IGS-RTS. The following topics will be discussed:

- a brief history of the evolution of the service,
- the IGS real-time infrastructure components of the RTS,
- user access to the data and products,
- the monitoring aspects of the service and typical results.

2 Historical Background

The development of the RTS has followed the traditional stages of development for a new IGS service. First, a working group was formed with responsibility for all real-time (RT) activities. In the second stage, the Real-Time Working Group initiated a pilot project and, on successful completion of the project, it recommended to the IGS Governing Board its readiness to launch an operational service.

The IGS Real-Time Working Group (RTWG) was established in 2001 with the goal to design and implement real-time infrastructure and processes for the delivery of real-time data to analysis centres, and the dissemination of real-time products to users. The working group's direction was set at the IGS workshop

held in Ottawa in the spring of 2002, titled “Towards Real Time”. At that time, the design for a prototype real-time service was adopted.

In June 2007, the IGS announced a Call for Participation in the IGS Real-Time Pilot Project with a three-year target to accomplish the following goals:

- manage and maintain a global IGS real-time GNSS tracking network,
- enhance and improve selected IGS products,
- generate new real-time products,
- investigate standards and formats for real-time data collection, data dissemination and delivery of derived products,
- monitor the integrity of IGS predicted orbits and the GNSS status,
- distribute observations and derived products to real-time users, and support Network DGPS/RTK operations,
- encourage cooperation among real-time activities, particularly in IGS densification areas.

In 2009 the pilot project was extended to March 2011, and in August 2011 the working group declared that the pilot project had reached the additional goal of Initial Operational Capability (IOC) and that it would be recommending to the IGS Governing Board the launch of an official Real-Time Service. The RTS was announced as operational in April 2013 with the release of a web site (www.igs.org/rtb) containing links for user registration and extensive information on how to access the service.

3 RTS Infrastructure

3.1 Formats and Standards

Stemming from the recognition that RT services rely on the development of open standards and data formats, the IGS community has teamed up with the Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM), who are responsible for developing standards for differential GNSS applications. Over the course of the last eight years, this forum, which brings together GNSS service providers, users and receiver manufacturers, has made significant progress in:

- developing new multi-GNSS standards for RT high precision observations and for broadcast ephemeris dissemination,
- agreeing to standards for RT orbit and clock correction messages for GPS and GLONASS in state space representation (SSR) format (orbit and clock corrections),
- aligning the IGS RINEX format for batch data and ephemeris messages with the RTCM Real Time formats, aided by the formation of a joint IGS/RTCM

RINEX working group with overall responsibility for the RINEX format development.

Significant challenges still remain, particularly in the area of SSR correction format development to cover the remaining constellations and to provide a mechanism for disseminating phase biases and corrections needed for PPP integer ambiguity resolution.

The RTS products are all provided using the RTCM standard. Observation streams use both the older RTCM 3.1 (RTCM 10403.1) formats for GPS and GLONASS and the newer RTCM 3.2 (RTCM 10403.2) standard that defines multi-signal and multi-constellation messages. Product streams for GPS and GLONASS use the SSR RTCM format which is defined in RTCM 3.2. The SSR formats for the other constellations have not yet been finalised, but some Analysis Centres are providing products based on a draft version of the standard. Dissemination is via Network Transport of RTCM by Internet Protocol (NTRIP). The NTRIP protocol has been developed by the German Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG) and is defined in RTCM standard 10410.1.

3.2 Network Infrastructure

The RTS network comprises a number of globally distributed real-time stations which transmit their observations to data centres operating NTRIP casters. IGS casters that allow user access are operated by the IGS Central Bureau at JPL, by BKG in Germany and by the NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS). Some stations send their data directly to the IGS casters but the majority transmit to regional casters operated by their host agency. In this case the IGS casters access the regional casters in order to relay the station data.

Fig. 1 illustrates the distribution of real-time tracking stations in the IGS network. The network is currently made up of over 200 GNSS receivers maintained by a wide variety of local and regional operators. They deliver one Hertz observations to real-time data centres with typical latencies of three seconds or less, along with ephemeris data that are refreshed every ten seconds.

The operational network is using RTCM 3.1 messages and provides GPS or GPS+GLONASS observations. A parallel network, formerly part of the IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), allows experimentation with data from all available GNSS constellations (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, QZSS and SBAS) using RTCM 3.2 messages. In this network, the majority of the streams are received in receiver proprietary binary formats at BKG and converted to RTCM for dissemination. Multi-GNSS streams are not used in the operational service unless they are provided in RTCM format directly from the station receiver.



Fig. 1: GNSS tracking stations in the IGS real-time network

Global coverage is essential for the success of the RTS, and the presence of redundant stations in geographical regions enhances the reliability of data available from these regions. This goal has been a challenge in some areas of the globe, for example the South Pacific or large parts of Asia.

IGS station operators are required to adhere to a minimum set of standards and are encouraged to adopt best practices for real-time operations. Examples of best practices are:

- Real-Time data should be transmitted to a minimum of two separate real-time data centres.
- Stations that contribute to the realisation of the IGS reference frame should be operated in real-time in order to guarantee a reliable alignment of the real-time products to a stable reference frame.

3.3 Analysis infrastructure

The analysis infrastructure includes a number of individual Analysis Centres (AC) which process the RT observations and compute epoch-wise orbit and clock products. These are formatted using RTCM SSR encoding software and transmitted to the NTRIP casters at the IGS data centres. Orbit products are available either with respect to the satellite centre of mass (CoM) or the antenna phase centre (APC). The clock products are transmitted with an update interval of five seconds. The AC streams and NTRIP mountpoint designations are listed in [Tab. 1](#).

Tab. 1: RTS analysis centre products

Centre	Description	NTRIP Mountpoint
BKG	GPS and GPS+GLONASS orbits and clocks using IGU orbits (CoM/APC)	CLK00/10 CLK01/11
CNES	GPS+GLONASS orbits and clocks based on IGU orbits (CoM/APC)	CLK90/91
	GPS+GLONASS+GAL+BEI orbits and clocks (CoM/APC)	CLK92/93
DLR	GPS orbits and clocks based on IGU orbits (CoM/APC) GPS+GLONASS orbits and clocks	CLKC0/A0 CLKC1/A1
ESOC	GPS orbits and clocks using NRT ¹ batch orbits every hour which are based on IGS batch hourly files (CoM/APC)	CLK50/51
	GPS orbits and clocks using NRT batch orbits every hour which are based on RINEX files generated from the RT streams (CoM/APC)	CLK52/53
GFZ	GPS orbits and clocks and IGU orbits (CoM/APC)	CLK70/71
GMV	GPS+GLONASS orbits and clocks based on NRT orbit solution (CoM/APC)	CLK81/80
NRCan	GPS orbits and clocks using NRT batch orbits every hour (APC)	CLK22
WUHAN	GPS orbits and clocks based on IGU orbits (CoM/APC)	CLK15/16

The coordination of the Analysis Centre activities is the responsibility of the Real Time Analysis Centre Coordinator (RTACC). This role has been fulfilled by ESOC since the start of the Pilot Project in 2008. The RTACC is responsible for monitoring the individual AC streams and for generating and assessing the quality of combined real-time orbit and clock products.

Tab. 2 shows combined product streams available within the RTS. Both a single epoch combination product developed by ESOC and a Kalman Filter combined product, developed collaboratively by BKG and Czech Technical University (CTU), are available. A GPS+GLONASS Kalman Filter combined product has also been developed at BKG and CTU.

1 Near Real-Time

Tab. 2: RTS combination products

Centre	Description	NTRIP Mountpoint
ESOC	RT GPS epoch combination from NRCan, BKG, CNES, DLR, ESOC, GMV and GFZ streams	IGS01 (APC) IGC01 (CoM)
BKG	RT GPS Kalman-generated combination from NRCan, BKG, CNES, DLR, ESOC, GMV, GFZ and WUHAN streams	IGS02 (APC) IGC02 (CoM)
BKG	RT GPS+GLONASS Kalman-generated combination from BKG, CNES, DLR and GMV streams	IGS03 (APC)

The solution epochs in the single-epoch combination (IGS01/IGC01) product are completely independent of each other, which has the advantage that the full accuracy is available as soon as product generation starts. The combination process removes a common offset from all satellite clocks at each epoch, computed by processing pairs of Analysis Centre solutions, in order to align the clocks in each contributing solution. The aligned clocks are then screened for outliers and combined by calculating a weighted average clock value for each satellite. The orbit states are combined by using the average value from all contributions.

The Kalman Filter solution (IGS02/IGC02) requires a few minutes convergence time to reach full accuracy. Once converged, the accuracy is maintained unless there is a reason to restart the software. A mechanism is in place to avoid publishing results during the convergence period. The orbit information is extracted from one of the incoming ultra-rapid solutions. In the Kalman Filter approach satellite clocks estimated by individual AC are used as pseudo observations within the adjustment process. Each observation is modelled as a linear function of three estimated parameters: AC specific offset, satellite specific offset common to all AC, and the actual satellite clock correction which represents the result of the combination. These three parameter types differ in their statistical properties. The satellite clock offsets are assumed to be static parameters while AC specific and satellite specific offsets are stochastic parameters with appropriate white noise. The solution is regularized by a set of minimal constraints. A recursive algorithm is used to detect orbit outliers. The greatest difference between AC specific and mean satellite positions is computed. If this is greater than a threshold, then corrections of the affiliated AC are ignored for the affected epoch.

To improve the robustness of the RTS products, combination solutions are performed on more than one host. The redundancy concept for the IGS01/IGC01 streams is shown in [Fig. 2](#). The two combination solution servers are

located in different geographical locations and are processing AC solution streams from two separate NTRIP casters. Each solution is then uploaded to both casters using the same mount-point designation. The caster design is such that it accepts the first of the two streams and rejects the second stream. If the first stream is interrupted then the caster seamlessly switches to the other stream.

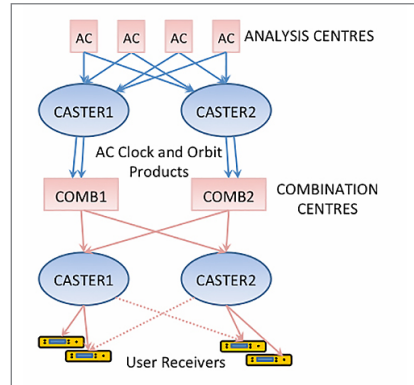


Fig. 2: Combination stream generation

3.4 User Access and Software

Information on user access and software is provided on the RTS website at www.igs.org/rt/access. Users can register separately at one or more of the three agencies operating the IGS RT data centres, must accept the terms of service and complete the online subscriber registration. After a brief processing period, users will be contacted with login and further information for connecting to the RTS streams.

It should be noted that all streams are not hosted at each caster. To find a particular stream, the user is advised to check the information on the hosting agency web pages, e.g.:

BKG: https://igs.bkg.bund.de/root_ftp/NTRIP/streams/streamlist_igs-ip.htm (data)

BKG: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits> (products)

CDDIS: cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/Data_caster_streams.html (data and products)

IGS CB: igs.org/network?network=rt (data)

There are two open source software packages that can perform various functions using RTCM streams, the BKG NTRIP Client (BNC) and RTKLIB. BNC has extensive functions for RTCM stream decoding and encoding and for performing Precise Point Positioning (PPP). The PPP function requires an SSR product stream, a receiver observation stream and an ephemeris stream. The RTS provides a dedicated ephemeris stream with messages for all constellations with the designation RTCM3EPH. In addition there are single-constellation ephemeris streams.

4 RTS Performance Monitoring

4.1 Orbit and Clock Performance

The GPS individual AC and combination solutions are monitored by making daily comparisons of the decoded orbit and clock products against the IGS rapid solution. Results from the comparisons are published in daily reports that are emailed to the AC representatives with graphical summaries published on the RTS web site (www.igs.org/rt/monitor) and on the Pilot Project web site (www.rtigs.net/products.php).

The clock results for the individual AC since November 2010 are shown in Fig. 3 while Fig. 4 shows the performance of the IGC01 combination. Fig. 3 shows that there are significant daily variations in the statistics of the individual RTAC² solutions. These are usually due to a problem in a single satellite, which distorts the daily statistics. Fig. 4 shows that these distortions are effectively removed by the combination outlier detection logic. The IGC01 clock standard

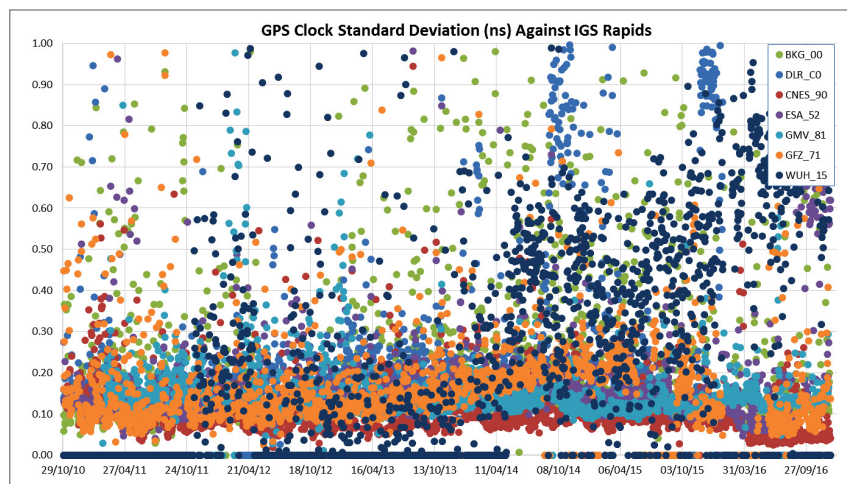


Fig. 3: RT AC clock standard deviation against IGS rapid product

deviation is normally at the 0.1 to 0.15 ns level. The best individual RTAC solution is normally better, but suffers from occasional outlier problems that the combination is designed to remove.

Fig. 5 shows the orbit comparison results of the IGC01 combination. The plot is of the daily 1-D RMS difference between the RT combination solution and

2 RTAC: Real-Time Analysis Centre

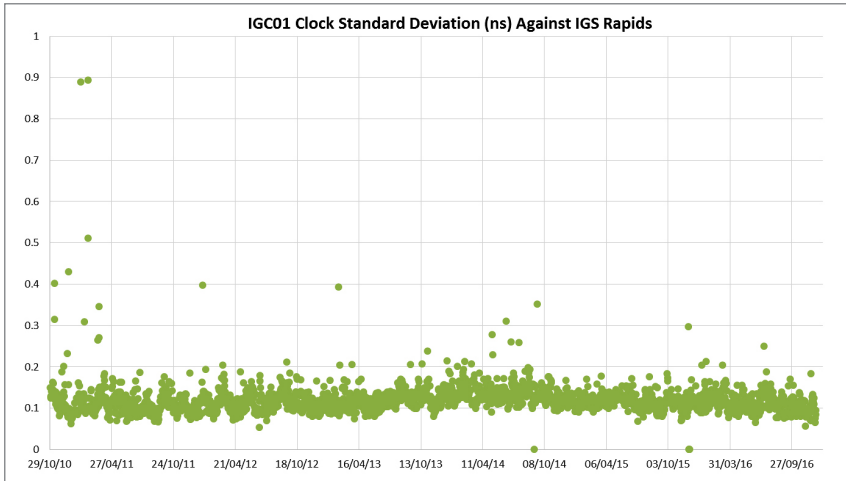


Fig. 4: RT combination clock standard deviation against IGS rapid product

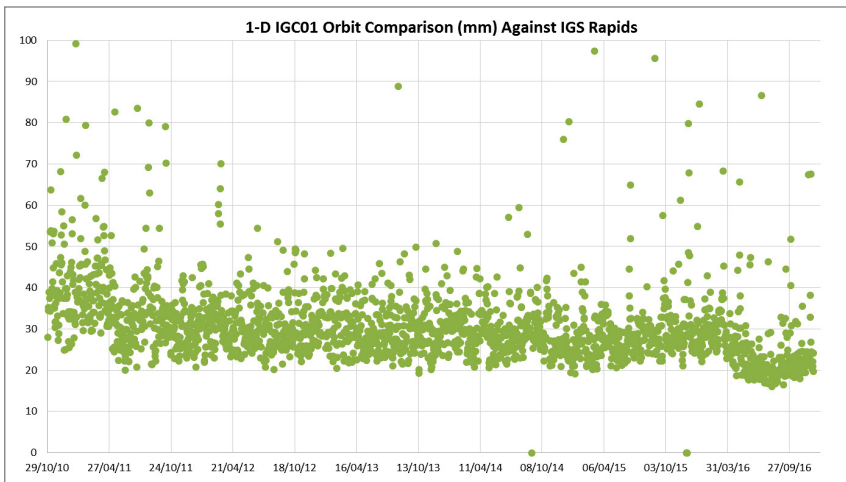


Fig. 5: RT combination orbit 1D RMS comparison against IGS rapid product

the IGS rapid product. Typical results since the second quarter of 2016 are at the 20 mm level.

4.2 PPP Monitoring

Continuous PPP performance results for all streams are available at <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/ppp> and are displayed on a 24-hour sliding window. They are

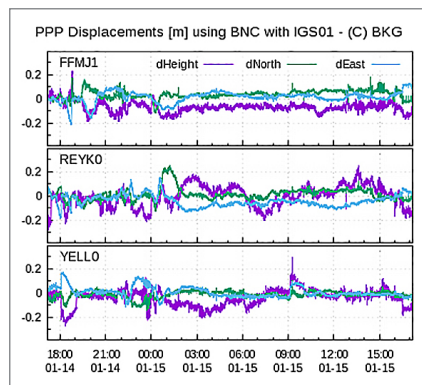


Fig. 6: PPP performance of IGS01 combination stream

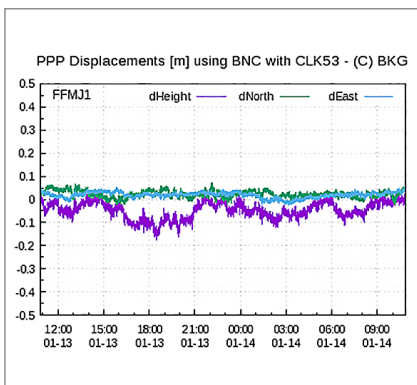


Fig. 7: PPP performance of AC solution stream

derived from the BNC PPP client, running in kinematic PPP mode and using observations from a number of receivers whose positions are precisely known. The chart in Fig. 6 shows the PPP monitoring of the IGS01 combination from three sites, while Fig. 7 shows the PPP monitoring of an individual AC solution (CLK53).

5 Conclusions

The IGS Real-Time GNSS Service has been operating since April 2013. However, it has to be clarified that this service is an open service that is offered to the public on a best efforts basis and without any guarantee on availability, quality, level of service or accuracy.

Through the use of international standards, a built-in level of redundancy and combined-products design, the IGS Real-Time GNSS Service is able to support high quality sub-decimetres (2-drms) real-time positioning on a global scale.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the important contributions of the more than thirty agencies that participate in the IGS Real-Time Service. In particular the station operators, data and analysis centres who we rely on to deliver, day in and day out, high quality data products, and without whom the service would not be possible.

References

- Agrotis, L.; Caissy, M.; Weber, G.; Ge, M.; MacLeod, K.; Hernandez-Pajares, M. (2012): IGS Real Time Infrastructure: From Pilot Project to Operational Service. PPP-RTK and Open Standards Symposium, Frankfurt, March 2012.
- Caissy, M.; Agrotis, L.; Weber, G.; Hernandez-Pajares, M.; Hugentobler, H. (2012): The International GNSS Real-Time Service. GPS World, June 2012.
- Enderle, W.; Agrotis, L.; Zandbergen, R.; van Kints, M.; Martin, J. (2013): Real-Time GNSS Activities at ESA. GPS World, November 2013.
- Hammond, W.C.; Brooks, B.A.; Bürgmann, R.; Heaton, T.; Jackson, M.; Lowry, A.R.; Anandakrishnan, S. (2011): Scientific value of real-time Global Positioning System data. Eos 92(15): 125–132.
- Weber, G.; Dettmering, D.; Gebhard, H.; Kalafus R. (2005): Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications. ION GNSS 2005.
- Weber, G.; Mervart, L. (2010): Real-time Combination of GNSS Orbit and Clock Correction Streams Using a Kalman Filter Approach. ION GNSS 2010.

Kontakt

Dr. Loukis Agrotis
Symban@ESA/ESOC
ESA/ESOC
Robert-Bosch-Straße 5, 64293 Darmstadt
loukis.agrotis@esa.int

Dr. Erik Schönemann | Prof. Dr. Werner Enderle
ESA/ESOC
erik.schoenemann@esa.int | werner.enderle@esa.int

Mark Caissy
Natural Resources Canada
mark.caissy@canada.ca

Dr. Axel Rülke
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
axel.ruelke@bkg.bund.de

Quo vadis SAPOS®? – Zukünftige Entwicklungen des Positionierungsdienstes der Landesvermessung

Cord-Hinrich Jahn | Jens Riecken | Christian Trautvetter | Martin Freitag |
Enrico Kurtenbach | Gisela Fabian | Hans-Georg Dick

1 Einleitung

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS® wurde Mitte der 1990er-Jahre konzipiert und vor etwa 15 Jahren bundesweit in die Praxis eingeführt. SAPOS® wurde als Infrastrukturmaßnahme des Staates durch die Bundesländer und als Substitut der herkömmlichen (Lage-)Festpunktfelder eingerichtet (Draken 2005). Ein wichtiger Nutzer dieses staatlichen Positionierungsdienstes ist das Liegenschaftskataster, das mit dem Dienst SAPOS®-HEPS¹ nach AdV (2015) eine Lagegenauigkeit von 1 bis 2 cm erreicht. Neben zahlreichen Veröffentlichungen zum Thema SAPOS® sind allgemeine Grundsätze für Positionierungsdienste und eine übersichtliche Beschreibung der SAPOS®-Dienste bei Heckmann und Jahn (2015) zu finden.

Die Autorin und die Autoren dieses Beitrags sind sowohl in ihren Verwaltungen, als auch in der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) ausnahmslos für die Entwicklung und den Betrieb von SAPOS® zuständig. Sie sind in der AdV mit der Leitung des Arbeitskreises Raumbezug (J. Riecken als amtierender Leiter; C.-H. Jahn als ehemaliger Leiter), mit der Leitung von Projektgruppen des Arbeitskreises Raumbezug (C. Trautvetter: Global Navigation Satellite Systems; M. Freitag: Precise Point Positioning (PPP); E. Kurtenbach: SAPOS®-Qualitätsmanagement; G. Fabian: SAPOS®-Koordinatenmonitoring) und mit der Leitung der Statistik führenden Stelle „Koordinatenmonitoring“ (H.-G. Dick) betraut. Somit ist der Arbeitskreis Raumbezug für die strategische Weiterentwicklung des Dienstes SAPOS® als ständige Aufgabe verantwortlich.

Die Nutzung globaler Satellitensysteme erfordert heute die grundsätzliche Harmonisierung nationaler Referenzsysteme. Dieses ist in Europa und Deutschland mit der Einführung von ETRS89 gelungen. SAPOS® stellt dabei neben den eigentlichen GNSS-Produkten auch Transformationen bereit, die das Binde-

1 Hochpräziser Echtzeit Positionierungsservice

glied zwischen Messtechnik und amtlichem Raumbezug bilden und innerhalb des Dienstes für einen automatisierten Übergang vom Messkoordinatensystem ITRF2008 in das amtliche System ETRS89/DREF91 (Realisierung 2016, AdV 2016) sorgen.

Neben den genannten Beziehungen zwischen den Bezugssystemen prägen weitere Komponenten den firmenunabhängigen SAPOS®-Dienst:

- Vorhaltung eines flächendeckenden Netzes von GNSS-Referenzstationen,
- fachliche und kommunikationstechnische Vernetzung der Rohdaten,
- Verwendung internationaler Standards (z.B. RINEX, RTCM, NMEA, NTRIP),
- Bereitstellung einheitlicher Produkte für multifunktionale Anwendungen über die Länder und die Zentrale Stelle SAPOS® (ZSS), mit unterschiedlichen Übertragungsmedien,
- bundeseinheitliche Gebührenstruktur und
- ein umfassendes SAPOS®-Qualitätsmanagement.

Die sich ständig weiter entwickelnden Komponenten des SAPOS®-Dienstes sind in der SAPOS®-Produktspezifikation Version 7.0 (AdV 2015) zusammengefasst. Diese wird regelmäßig durch die AdV (Arbeitskreis Raumbezug) weiterentwickelt.

2 Die GNSS-bezogene Entwicklung von SAPOS®

Beim Aufbau von SAPOS® wurden anfangs ausschließlich GPS-Signale genutzt. Dieses System bildet bis heute verlässlich die solide Grundlage für SAPOS®. Im Zeitraum von 2008 bis 2011 erreichte das GLONASS-System den Vollausbau und konnte in immer mehr geodätischen Empfängern implementiert werden. Auch SAPOS® wurde in diesen Jahren erweitert, um die GLONASS-Signale nutzen zu können. Diese Maßnahme hat für die Nutzer von SAPOS® vielfältige Vorteile mit sich gebracht. Die Positionslösungen wurden mit den sog. 2G²-Geräten schneller, verlässlicher und unter schwierigeren Bedingungen möglich.

Aktuell wird an einer noch größeren Erweiterung von SAPOS® gearbeitet (Abb. 1). Künftig sollen auch Signale von Galileo und BeiDou genutzt werden. Durch diese Erweiterung sind zahlreiche positive Effekte zu erwarten, insbesondere bezüglich der Verlässlichkeit, Robustheit und der Initialisierungszeiten.

Während die globalen Systeme in Deutschland hohen Nutzwert haben, ist dieser bei den regionalen Systemen nur in ihren Zielgebieten gegeben. Sie sollen deshalb in SAPOS® vorerst nicht verwendet werden. Das gilt auch für die Daten

2 2G: GPS+GLONASS

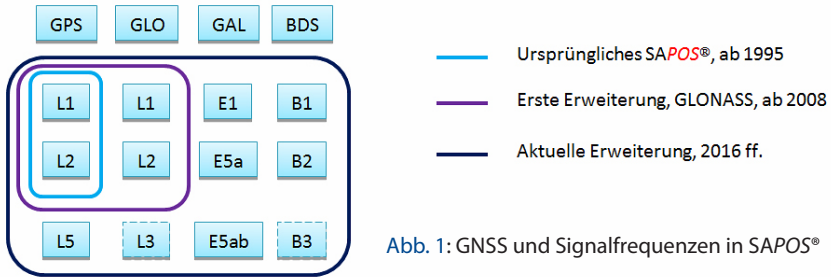


Abb. 1: GNSS und Signalfrequenzen in SAPOS®

von SBAS³-Systemen (z. B. WAAS, EGNOS), die noch keinen signifikanten geodätischen Nutzen entfalten können.

Neben der Erweiterung von zwei auf vier Satellitensysteme steht auch der Übergang von der Zweifrequenzverarbeitung zum Dreifrequenzbetrieb an. Die dritten Frequenzen der GNSS liefern z. B. höhere Signalqualität und ermöglichen im Auswertekontext das Bilden einer größeren Anzahl von Linearkombinationen.

3 Aktueller Stand der Umsetzung und weitere Schritte

SAPOS® realisiert langfristig und nachhaltig auf dem aktuellen Stand der Technik den amtlichen Raumbezug. Die zusätzliche Einbindung der neuen GNSS Galileo und BeiDou zu einem möglichst frühen Zeitpunkt ist daher notwendig.

Für die Erweiterung von SAPOS® auf vier GNSS sind bedeutende Investitionen erforderlich. An den über 270 SAPOS®-Stationen (Abb. 2) müssen Antennen und Empfänger erneuert werden. Diese Maßnahme wird schon seit einigen Jahren vorangetrieben. Immerhin sind bereits heute (Januar 2017) etwa 77 % der SAPOS®-Stationen für den Empfang von Galileo gerüstet (Abb. 3).

Die Daten dieser Stationen werden in erster Linie für das Generieren von Echtzeitkorrekturdaten genutzt. Sie werden im Rahmen des HEPS-Dienstes den RTK-Nutzern zur Verfügung gestellt. Die zur Erzeugung dieser Daten genutzten Software-Programme werden durch die Hersteller für den 4G⁴-Betrieb erweitert. Gleichzeitig kommen neue RTK-Rover auf den Markt, die alle vier Systeme zur Positionslösung verwenden können. Für die SAPOS®-Betreiber sind Lizenzerwerb, Installation, Testbetrieb, Optimierungen und der Übergang in den Regelbetrieb weitere wichtige Schritte. Laut dem gemeinsam im Arbeitskreis Raumbezug abgestimmten Stufenplan sind sie überwiegend im Jahr 2017 abzuschließen.

3 SBAS: Satellite-based Augmentation System

4 4G: GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou

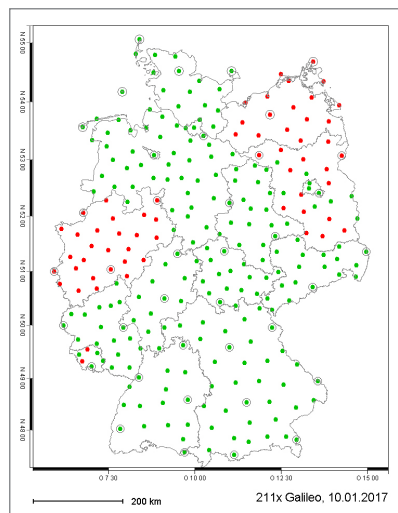


Abb. 2: SAPOS®-Stationen mit Galileo-fähigen Antennen und Empfängern (grün). Stationen der SSR-PPP-Testvernetzung sind besonders gekennzeichnet.

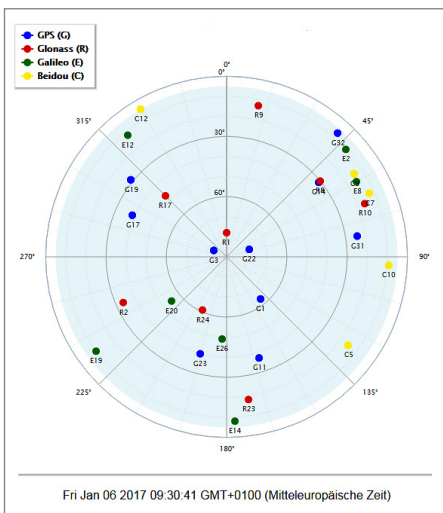


Abb. 3: Skyplot einer Multi-GNSS-Referenzstation (4G) in Deutschland

Eine entscheidende Rolle spielen dabei Datenformate. SAPOS® ist der öffentliche und gemeinsame Korrekturdatendienst für GNSS-Messinstrumente aller Hersteller in Deutschland. Durch seine Firmenunabhängigkeit muss besonderer Wert auf Kompatibilität gelegt werden. Es wird auch weiterhin ausschließlich auf die Verwendung der weltweit verbreiteten, offenen und firmenunabhängigen Standards RTCM und RINEX gesetzt. Die für SAPOS® dahingehend intern gewählten Festlegungen konkretisieren diese Standards, um deren einheitliche Anwendung zu fördern. Die Festlegungen wurden getroffen, nachdem die neuesten technischen Realisierungen verschiedener Anbieter ermittelt und vergleichend gegenübergestellt wurden. Des Weiteren wurde ein Entwurf der Festlegungen im Rahmen einer Umfrage zwischen den SAPOS®-Betreibern und den GNSS-Geräte- und -Softwareherstellern abgestimmt.

Die Standardisierung von Multi-GNSS-Daten in RTCM ist mit der Version 3.2 aus dem Jahr 2013 für Einzelstationsdaten und VRS-Daten abgeschlossen. Hier kommen speziell die neu definierten Message-Typen für Multisystemmessage (MSM) zum Einsatz (Abb. 4). Die Definition der Vernetzungsrepräsentationen MAC und FKP im Multi-GNSS-Betrieb ist noch in Arbeit.

Die bisher in SAPOS® an die Nutzer ausgesendeten Datentypen wie RTCM 3.1 behalten weiterhin ihre Gültigkeit, solange sie ausreichend genutzt und nachgefragt werden. Das wird durch jährliche Nutzungsstatistiken untersucht.

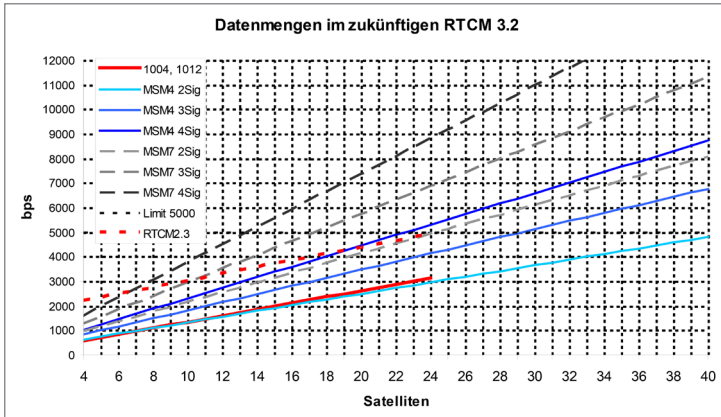


Abb. 4:
Daten-
raten im
Multi-
GNSS-
Betrieb

Im EPS-Dienst kommt RTCM 2 als Datenformat zum Einsatz. Hier ist auf Seiten der Endgeräte noch keine Entwicklung zu RTCM 3 erkennbar. Es bleibt deshalb vorerst offen, inwieweit diese Geräteklasse zukünftig mit Korrekturdaten versorgt werden kann, die zusätzlich Galileo-Daten enthalten. Derzeit ist keine Erweiterung des EPS-Dienstes auf vier GNSS vorgesehen.

Im GPPS-Dienst werden Daten für Post-Processing-Anwendungen bereitgestellt. Die RINEX-Version 2.11 ist hierbei der aktuelle SAPOS®-Standard. Sie ist weltweit verbreitet und allgemein akzeptiert. Alle gängigen Auswertprogramme verfügen über eine entsprechende Schnittstelle. Deshalb bleibt die Datenabgabe im GPPS-Dienst über RINEX 2.11 auch auf längere Sicht unverzichtbar. Die RINEX-Version 2.11 sieht auch die Möglichkeit vor, Galileo-Daten zu speichern.

Speziell für Multi-GNSS-Beobachtungen wurde die Version 3 des RINEX-Formats entwickelt. Sie ist nicht mit der Version 2.x kompatibel. In der jüngsten Version 3.03 vom Juli 2015 wurde der Standard weiter präzisiert. Seine Verbreitung in Auswertprogrammen ist noch gering. Die ganze Vielfalt aller Beobachtungstypen der verschiedenen GNSS kann in RINEX 3 gespeichert werden. Einige in RINEX 2 mehrdeutige Bezeichnungen wurden in Version 3 deutlicher spezifiziert und deklariert. Jedoch stellt die Auswahl eines optimalen Satzes an Beobachtungstypen noch eine Herausforderung dar.

4 Integration neuer Positionierungstechniken in SAPOS®

Derzeit basieren alle Dienste des amtlichen Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS® auf dem bewährten Verfahren der differentiellen GNSS-Positionierung. Dabei werden die verschiedenen GNSS-Fehler durch Differenzbildung zwischen den Beobachtungen des Rovers und der Referenzstation(en) reduziert bzw. eli-

minierte. Man spricht deshalb auch von der Modellierung im Beobachtungsraum (OSR: Observation Space Representation), da die Fehlerkorrekturen implizit in den Beobachtungen der Referenzstation(en) enthalten sind.

In den letzten Jahren hat unter der Bezeichnung PPP (Precise Point Positioning) eine neue Positionierungstechnik Einzug in die geodätische GNSS-Echtzeitpositionierung gehalten. Dieses Verfahren basiert im Gegensatz zur differentiellen Positionierung auf einer Einzelpunktbestimmung des Rovers (Weber et al. 2013). Die verschiedenen GNSS-Fehler (im Wesentlichen: Satellitenbahn-, -uhrfehler, Code- und Phasen-Biases der Satellitensignale sowie ionosphärische und troposphärische Refraktionseinflüsse) müssen in diesem Fall explizit modelliert und dem Rover als Korrekturen zur Verfügung gestellt werden. Man spricht deshalb von der Modellierung im Zustandsraum (SSR: State Space Representation) und von SSR-Korrekturen (Wübbena et al. 2005).

Bereits heute existieren einige kommerzielle, globale Echtzeit-PPP-Dienste. Diese globalen Dienste beinhalten keine hochauflösenden atmosphärischen Korrekturmodelle, wodurch beim PPP des Rovers längere Konvergenzzeiten benötigt werden. Des Weiteren kann durch den Einsatz ionosphärenfreier Linearkombinationen und wegen der Korrelation zwischen den geschätzten Parametern (Troposphäre, Empfängeruhr, Rover-Koordinaten und Mehrdeutigkeiten) noch nicht das RTK-Genauigkeitsniveau erreicht werden.

Durch die Verwendung hochauflösender atmosphärischer Korrekturen (Ionosphäre, Troposphäre), die aus einem regionalen SAPOS®-Referenzstationsnetz abgeleitet werden können, lassen sich die Konvergenzzeiten zukünftig auf <1 Minute verkürzen und das RTK-Genauigkeitsniveau erreichen.

Ein wesentlicher Vorteil zukünftiger SSR-basierter Positionierungsdienste ist deren Broadcast-Fähigkeit bei gleichzeitig geringer Datenübertragungsrate. Während bei OSR alle Beobachtungen der Referenzstation(en) in hoher zeitlicher Auflösung übertragen werden müssen, kann bei SSR den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Fehlereinflüsse im Zustandsraum z. B. durch unterschiedliche Update-Raten der einzelnen Zustandsparameter Rechnung getragen werden. Dadurch lässt sich die Datenübertragungsrate bei SSR gegenüber OSR reduzieren. Dies wird sich vor allem bei Verfügbarkeit der zukünftigen neuen GNSS-Signale bemerkbar machen.

Bei Netz-RTK-Diensten (z. B. SAPOS®-HEPS) ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen der SAPOS®-Zentrale und dem Nutzer im Feld erforderlich, da für den Nutzer erst dann Referenzdaten erzeugt werden können, wenn die Nutzerposition in der Vernetzungssoftware bekannt ist (Verfahren: Virtuelle Referenzstation). Das Master-Auxiliary-Concept (MAC) ist zwar grundsätzlich auch Broadcast-fähig, aber für die Abdeckung größerer Gebiete fallen dabei sehr hohe Datenübertragungsraten an. SSR-Korrekturen dagegen können zukünftig unidirektional für ganz Deutschland als Broadcast-Daten voraussichtlich mit

einer Rate < 2.400 bps ausgesendet werden, wodurch sich neben dem Mobilfunk auch andere Kommunikationsmedien (z. B. Digital Radio DAB+) erschließen lassen. Einschränkungen bei der Verfügbarkeit des Mobilfunks oder bei der Echtzeitübertragung über mobile Datennetze könnten dadurch zukünftig kompensiert werden. Neue, robuste und echtzeitfähige Kommunikationsverfahren erhöhen die Verfügbarkeit der Dienste für den Nutzer im Feld. Damit sind SSR-basierte Dienste prädestiniert für die zukünftige Integration in SAPOS®.

Mit SSR-basierter PPP-Technik lassen sich zudem größere Entfernungen zu den Referenzstationen überbrücken, wodurch die Technik auch sehr gut für Offshore-Vermessungen geeignet ist. Dabei entstehen zwar längere initiale Konvergenzzeiten, die aber beim kontinuierlichen Einsatz in einem Peilschiff auf See keinen gravierenden Nachteil darstellen. Praktische Untersuchungen wurden bereits 2014 und 2015 in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie der Firma Geo++ GmbH mit einer auf SAPOS®- und weiteren Referenzstationen basierten SSR-Post-Vernetzung durchgeführt. Höhengengenauigkeiten im Offshore-Bereich von besser als 10 cm wurden dabei erreicht (Abb. 5).

Für kinematische Anwendungen (z. B. Peilschiffe der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) eignet sich SSR-basierte PPP-Technik besonders, weil die Entfernung zu einer physikalischen oder virtuellen Referenzstation im Gegensatz zu RTK keine Rolle spielt. Bei Netz-RTK mittels virtueller

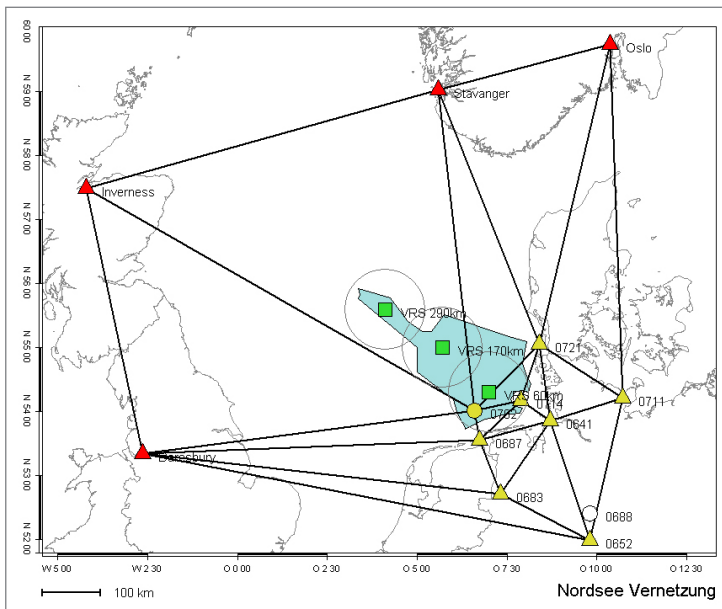


Abb. 5:
SSR-
basierte
Vernet-
zung im
Bereich
der Nord-
see in den
Jahren
2014 und
2015

Referenzstationen (VRS) kommt es bei kinematischen Anwendungen nach einigen Kilometern zur Neuberechnung der VRS und damit zu einer kurzzeitigen Unterbrechung und Neu-Initialisierung des Rovers.

Schließlich wird bei SSR im Vergleich zu OSR die Abhängigkeit von einzelnen Referenzstationen und deren stationsabhängigen Fehlern (z. B. Multipath) reduziert.

Wesentliche Voraussetzung für einen herstellerunabhängigen SSR-Dienst ist ein offener Standard als Schnittstelle zwischen Dienstbetreiber und Nutzer. Aktuelle globale PPP-Dienste erfüllen diese Voraussetzung nicht, da proprietäre, nicht-veröffentlichte Firmenformate verwendet werden. Im Normengremium RTCM SC104⁵ wird in der „State Space Working Group“ an einem offenen Standard für SSR gearbeitet. Derzeit wird eine Standardisierung in vier Stufen angestrebt (Tab. 1). Im Vergleich zu den bisherigen RTCM3-Messages für RTK und Netz-RTK ist das gesamte SSR-Konzept allerdings deutlich komplexer. Deshalb stehen aktuell die Kriterien für Interoperabilitätstests im Fokus der Diskussion im Normengremium. Die AdV hat beschlossen, SSR-Interoperabilitätstests aktiv zu unterstützen und deshalb in Kooperation mit der Geo++ GmbH eine deutschlandweite RTCM-SSR-Testumgebung realisiert. Basierend auf der technisch hochentwickelten amtlichen SAPOS®-Infrastruktur (Abb. 2) und unter Verwendung der GNSMART-Vernetzungssoftware⁶ stehen seit 2016 verschiedene deutschlandweite RTCM-SSR-Datenströme für Interoperabilitätstests zur Verfügung.

5 Das SAPOS®-Qualitätsmanagement

SAPOS® stellt Nutzern amtliche Positionierungsdaten bundesweit nach einheitlichen Grundsätzen bereit. Die Länder – als Betreiber von SAPOS® – gewährleisten die in der SAPOS®-Produktdefinition zugesicherte Produktqualität durch umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen; insbesondere sind dies: regelmäßige Erneuerung von Hard- und Software, Koordinatenmonitoring, Online-Monitoring im SAPOS®-HEPS, Datensicherung, redundante Auslegung der Verfahrenskomponenten, Notfall- und Ausfallkonzepte sowie weitere Maßnahmen.

Nach einer Pilotierungsphase 2007 bis 2008 wurde die dauerhafte Erhebung, Führung und interne Bereitstellung der Betriebszustandsinformationen 2009 von der AdV beschlossen. Damit ist sichergestellt, dass die SAPOS®-Betreiber diese hinsichtlich ihrer Bedeutung und Aussagefähigkeit wichtigen Daten als

5 RTCM SC104: Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104

6 GNSMART: Software der Fa. Geo++ GmbH: „GNSS State Monitoring and Representation Technique“

Tab. 1: RTCM-SSR-Stufenplan

Stufe	Inhalt	Bemerkungen
1	Korrekturen für Broadcast-Satellitenbahnen, -uhren sowie Code-Biases ⁷ der Satellitensignale	Seit 2011 standardisiert für GPS und GLONASS; dm-Genauigkeiten mit PPP-Float-Lösung ⁸ nach langer Konvergenzzeit (ca. 30 Minuten)
2	Phasen-Biases ⁹ der Satellitensignale und VTEC-Ionosphärenmodell ¹⁰	Die Korrektur der Phasen-Biases ermöglicht PPP mit Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung (PPP-AR ¹¹). Das VTEC-Ionosphärenmodell ermöglicht Einfrequenz-Anwendungen (low-cost-Empfänger).
3	STEC-Ionosphärenkorrekturen ¹² und „Gridded“ Troposphäre ¹³	RTK-Genauigkeitsniveau und Konvergenzzeiten <1 Minute
4	Komprimierung	Komprimierung der Messages der Stufen 1–3

einheitliches Qualitätssicherungsinstrument einsetzen und bereitstellen. In einem regelmäßigen Reporting werden derzeit die folgenden Betriebszustandsinformationen (als SAPOS®-Statistiken benannt) von den Ländern erhoben (Rubach et al. 2015) und den Betreibern in einem jährlichen Qualitätsbericht zur Verfügung gestellt.

Die „Statistik 1 – Multipath“ spiegelt die Qualität der SAPOS®-Referenzstationen wider. Die Ausbreitungsbedingungen werden bundesweit nach gleichen Kriterien erfasst, ausgewertet und länderübergreifend kennzahlenbasiert bereitgestellt.

Mit der „Statistik 2 – Koordinatenmonitoring“ steht den SAPOS®-Betreibern und der Zentralen Stelle SAPOS® eine nach einheitlichen Kriterien aufgebaute Information zur Verfügung. Sie sind damit in der Lage die Stationskoordinaten

7 Code-Biases: Instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten mit Auswirkung auf den Code

8 PPP-Float: Precise Point Positioning mit reellwertigen Trägerphasenmehrdeutigkeiten

9 Phasen-Biases: Instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten mit Auswirkung auf die Phase

10 VTEC: Vertical Total Electron Content, Vertikaler integrierter Elektronengehalt in einem Single- oder Multiple-Layer-Modell der Ionosphäre

11 PPP-AR: Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution; dt. PPP mit Phasenmehrdeutigkeitslösung

12 STEC: Slant Total Electron Content, Integrierter Elektronengehalt in Signalrichtung „Empfänger-Satellit“

13 „Gridded“ Troposphäre: Troposphärische Laufzeitverzögerungen repräsentiert durch ein Gitter über dem Dienstgebiet

der länderübergreifenden Vernetzungen zu beurteilen, jederzeit und dauerhaft die nach amtlichen Standards erzeugte Georeferenzierung verlässlich vorzuhalten und bundesweit gegenüber externen Kunden zu dokumentieren.

Neben dieser Überwachung grundsätzlicher Stationseigenschaften wird auch die Verfügbarkeit der aufgezeichneten Daten dokumentiert. Die RINEX-Daten der Referenzstationen werden dauerhaft archiviert und jährlich in der „Statistik 3 – RINEX-Datenvollständigkeit“ dokumentiert.

Daneben lässt sich in der „Statistik 4 – Verfügbarkeit der Echtzeitdatenströme an der ZSS“ eine wesentliche Kenngröße des Echtzeitdienstes ablesen. Es zeigt sich, dass die Anzahl längerfristiger Ausfälle von Referenzstationen einzelner Bundesländer erheblich gesunken ist. Dies bestätigt die in den Ländern ergriffenen Redundanzmaßnahmen.

Die Qualität und Leistungsfähigkeit des SAPOS®-Kerndienstes HEPS wird anhand zweier Statistiken dokumentiert, die unter der Bezeichnung „Statistik 4 – HEPS-Qualität“ geführt werden. Dies sind (i) die relative Anzahl der Messungen mit erreichtem Lösungsstatus 4 (fixed) zur Gesamtzahl der Datenabrufe und (ii) die durchschnittlichen TTFA (Time to fix ambiguities, Zeit bis zur Mehrdeutigkeitslösung). Ermittelt werden beide Kennzahlen aus dem NMEA-Datenstrom der Rover, die an die Länderzentralen gesendet und dort verarbeitet werden.

Für beide Kennzahlen wird auch ein Mittelwert aller Bundesländer berechnet. Die Statistik zeigt, dass im Durchschnitt eine RTK-Messung mit SAPOS®-HEPS in deutlich weniger als einer Minute zur gewünschten zentimetergenauen Koordinate führt. Dabei kann eine stetige Reduktion der durchschnittlichen TTFA festgestellt werden (Abb. 6). Gleichzeitig stieg der Anteil der Messungen mit dem erreichten Lösungsstatus 4 (fixed) auf zuletzt fast 90 Prozent. Dies ist zu-

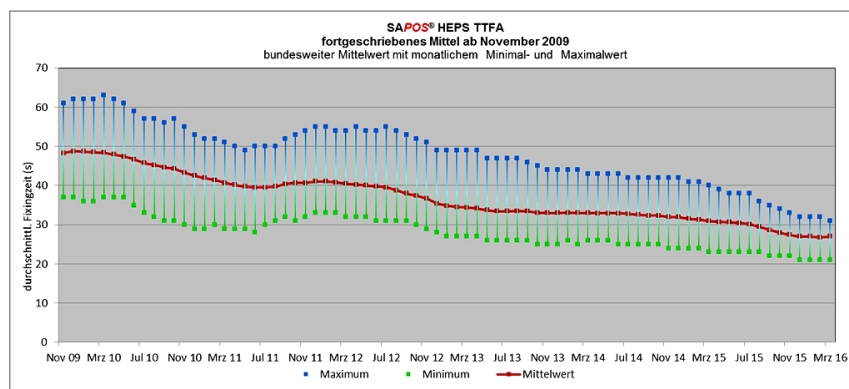


Abb. 6: Durchschnittliche TTFA des SAPOS®-HEPS als fortgeschriebenes Mittel seit November 2009

Lagegenauigkeit (cm)	Stunde des Tages (UTC)																								Tagesmittel
Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
01.11.2016	0,80	0,72	0,78	0,87	0,74	0,81	0,85	0,66	0,71	0,88	0,75	0,84	0,77	0,73	0,86	0,82	0,79	0,81	1,11	0,88	0,95	0,91	0,92	0,99	0,83
02.11.2016	0,97	0,89	0,92	1,08	0,77	0,85	0,99	0,79	0,85	1,03	0,88	0,85	0,92	0,86	0,96	0,90	0,75	0,74	0,90	0,69	0,83	0,81	0,74	0,81	0,87
03.11.2016	0,82	0,74	0,76	0,79	0,58	0,74	0,72	0,66	0,89	1,04	0,72	0,84	0,76	0,75	0,73	0,66	0,65	0,66	0,69	0,66	0,77	0,67	0,73	0,76	0,74
04.11.2016	0,75	0,66	0,66	0,80	0,62	0,69	0,74	0,79	0,88	0,77	0,77	0,80	0,72	0,71	0,81	0,76	0,67	0,69	0,91	0,61	0,87	0,73	0,77	0,82	0,75
05.11.2016	0,78	0,73	0,83	0,90	0,65	0,79	0,73	0,71	0,89	0,81	0,64	0,79	0,67	0,67	0,78	0,83	0,69	0,70	0,75	0,67	0,78	0,75	0,68	0,80	0,75
06.11.2016	0,75	0,62	0,74	0,80	0,58	0,72	0,73	0,66	0,71	0,71	0,71	0,78	0,72	0,62	0,73	0,69	0,63	0,75	0,78	0,63	0,79	0,68	0,65	0,67	0,70
07.11.2016	0,73	0,65	0,73	0,71	0,63	0,82	0,66	0,64	0,81	0,64	0,72	0,79	0,65	0,64	0,67	0,64	0,67	0,70	0,69	0,64	0,77	0,56	0,71	0,61	0,69
08.11.2016	0,69	0,58	0,74	0,79	0,58	0,70	0,73	0,65	0,72	0,56	0,63	0,66	0,57	0,63	0,73	0,71	0,64	0,75	0,74	0,61	0,73	0,62	0,67	0,65	0,67
09.11.2016	0,73	0,68	0,81	0,75	0,73	0,79	0,65	0,63	0,89	0,79	0,67	0,79	0,67	0,69	0,81	0,74	0,65	0,73	0,71	0,74	0,75	0,69	0,68	0,74	0,73
10.11.2016	0,75	0,70	0,92	0,78	0,67	0,84	0,69	0,79	0,90	0,78	0,78	0,74	0,71	0,73	0,86	0,76	0,64	0,83	0,75	0,63	0,81	0,71	0,63	0,75	0,76
11.11.2016	0,74	0,69	0,78	0,75	0,66	0,74	0,63	0,69	0,87	0,64	0,66	0,73	0,66	0,68	0,76	0,69	0,65	0,72	0,66	0,73	0,78	0,71	0,72	0,79	0,71
12.11.2016	0,69	0,67	0,76	0,71	0,63	0,68	0,58	0,66	0,76	0,88	0,87	0,79	0,67	0,72	0,72	0,67	0,57	0,74	0,62	0,61	0,73	0,67	0,71	0,82	0,71
13.11.2016	0,68	0,66	0,88	0,76	0,75	0,76	0,64	0,80	0,97	0,77	0,74	0,73	0,75	0,74	0,70	0,62	0,61	0,68	0,70	0,68	0,63	0,68	0,69	0,66	0,72
14.11.2016	0,63	0,66	0,79	0,65	0,54	0,68	0,58	0,70	0,91	0,84	0,79	0,76	0,65	0,68	0,77	0,65	0,70	0,90	0,69	0,70	0,83	0,71	0,76	0,73	0,72
15.11.2016	0,71	0,78	0,84	0,70	0,73	0,78	0,71	0,94	1,02	0,86	0,85	0,89	0,78	0,91	1,08	1,05	0,97	1,08	0,85	1,00	1,01	0,86	0,89	0,85	0,88
16.11.2016	0,85	0,73	0,81	0,78	0,77	0,80	0,70	0,82	0,87	0,95	0,93	0,86	0,85	0,93	0,97	0,86	0,81	1,00	0,86	1,08	0,99	0,93	1,01	1,05	0,88
17.11.2016	0,99	0,99	1,25	0,91	0,92	0,96	0,76	0,90	0,99	0,92	0,96	0,87	0,87	0,96	1,04	0,89	0,83	0,84	0,78	0,87	0,89	0,94	1,06	1,10	0,94
18.11.2016	0,94	1,10	1,18	0,93	0,98	0,95	0,84	0,96	1,06	0,93	0,90	0,88	0,85	1,00	0,97	0,84	0,85	0,99	0,79	0,90	0,99	0,85	0,92	0,97	0,94
19.11.2016	0,82	0,97	0,99	0,76	0,84	0,75	0,65	0,91	0,89	0,74	0,89	0,78	0,72	0,84	0,81	0,81	0,87	0,78	0,74	0,82	0,67	0,79	0,79	0,81	0,81
20.11.2016	0,74	0,91	0,95	0,79	0,84	0,73	0,68	0,84	0,86	0,99	0,99	1,05	1,05	1,12	0,96	0,93	0,99	1,04	0,76	0,87	0,83	0,79	0,90	0,87	0,89
21.11.2016	0,72	0,82	0,87	0,68	0,79	0,64	0,68	0,97	0,99	0,81	0,82	0,71	0,72	0,75	0,70	0,70	0,77	0,81	0,70	0,73	0,68	0,71	0,72	0,74	0,76
22.11.2016	0,68	0,84	0,88	0,68	0,79	0,72	0,67	0,81	0,79	0,82	0,86	0,70	0,63	0,77	0,70	0,63	0,79	0,74	0,61	0,82	0,75	0,64	0,73	0,68	0,74
23.11.2016	0,64	0,85	0,73	0,67	0,80	0,73	0,72	1,00	0,81	0,81	1,04	0,78	0,84	0,95	0,87	0,86	1,04	1,14	1,17	1,00	0,83	0,93	0,82	0,79	0,88
24.11.2016	0,72	0,82	0,80	0,78	0,88	0,78	0,73	0,80	0,72	0,83	0,77	0,76	0,67	0,84	0,71	0,70	0,86	0,77	0,66	0,81	0,70	0,80	0,78	0,78	0,77
25.11.2016	0,78	0,92	0,88	0,73	0,87	0,71	0,79	0,89	0,78	0,84	0,91	0,75	0,72	0,83	0,85	0,76	1,13	1,16	1,34	1,18	0,93	0,94	0,82	0,77	0,89
26.11.2016	0,78	1,08	0,90	0,85	1,00	0,86	0,84	0,78	0,79	0,79	0,83	0,73	0,85	0,91	0,88	0,78	0,97	0,84	0,72	1,05	0,90	0,86	0,84	0,92	0,86
27.11.2016	0,84	0,94	0,88	0,81	1,06	0,75	0,79	0,85	0,71	0,70	0,72	0,70	0,73	0,84	0,75	0,74	0,79	0,65	0,79	0,81	0,75	0,87	0,77	0,82	0,79
28.11.2016	0,65	0,81	0,76	0,66	0,73	0,65	0,65	0,71	0,65	0,68	0,65	0,70	0,69	0,77	0,69	0,63	0,83	0,75	0,72	0,80	0,71	0,76	0,75	0,71	0,71
29.11.2016	0,77	0,95	0,76	0,76	0,75	0,59	0,62	0,73	0,69	0,81	0,74	0,70	0,73	0,70	0,63	0,61	0,69	0,69	0,68	0,65	0,62	0,69	0,69	0,68	0,70
30.11.2016	0,71	0,83	0,68	0,61	0,73	0,60	0,69	0,71	0,77	0,75	0,73	0,79	0,77	0,87	0,71	0,77	0,90	0,70	0,76	0,88	0,80	0,91	0,91	0,90	0,76
Stundenmittel	0,76	0,80	0,84	0,77	0,75	0,75	0,71	0,78	0,84	0,81	0,80	0,79	0,75	0,79	0,81	0,76	0,78	0,83	0,79	0,78	0,80	0,77	0,78	0,80	0,79

Abb. 7: Statistik 7 – HEPS-Genauigkeit anhand der RTK-Monitorstationen für November 2016

rückzuführen auf deutlich verbesserte Algorithmen der zentralen Vernetzungskomponenten der Betreiber und der im Feld eingesetzten modernen Rovern.

Die 2016 neu eingeführte „Statistik 7 – HEPS-Genauigkeit“ aggregiert Daten der Monitorstationen der SAPOS®-Betreiber durch den kontinuierlichen Vergleich hochgenauer Positionen dieser Rover mit deren Sollkoordinaten. Abb. 7 zeigt die stündlichen Standardabweichungen dieser Vergleiche nach Lage und Höhe getrennt (i.d.R. mindestens zehn Messungen pro Stunde) über einen Monat. Gut erkennbar sind die Abhängigkeiten der HEPS-Genauigkeiten von der Tageszeit. Die Bewertung des jeweiligen Monatsmittels zeigt, ob die in der Produktdefinition angegebenen HEPS-Genauigkeitswerte (Lage: 1–2 cm; Höhe: 2–3 cm) im bundesweiten Mittel eingehalten werden konnten.

Abschließend sei erwähnt, dass auch die Nutzerzahlen und das Nutzerverhalten in der „Statistik 5 – HEPS-Nutzerresonanz“ dokumentiert und den Ländern zugänglich gemacht werden. Die Ergebnisse der SAPOS®-Qualitätsanalysen werden für die Betreiber in einem jährlichen internen Qualitätsbericht aufbereitet. In regelmäßigen Abständen wird hieraus auch extern berichtet.

In der weiteren kontinuierlichen Entwicklung des SAPOS®-Qualitätsmanagement und zum Erreichen einer größeren Transparenz wird neben allgemeinen Verbesserungen über eine Bereitstellung der SAPOS®-Statistiken an einen breiteren Nutzerkreis diskutiert werden müssen. Hierin kann ein Alleinstellungsmerkmal des amtlichen Positionierungsdienstes SAPOS® gegenüber anderen kommerziellen Diensten liegen.

6 Das SAPOS®-Koordinatenmonitoring

Als Teil des bundeseinheitlichen Festpunktfeldes (AdV 2014) hat das Referenzstationsnetz der Landesvermessung (RSN) im Wesentlichen zwei Aufgaben:

- Die amtliche Realisierung des Bezugssystems ETRS89 in Deutschland in Ergänzung zum Geodätischen Grundnetz und
- die Schaffung der Grundlage für die Bereitstellung der Produkte von SAPOS®.

Für eine genaue und nachhaltige Erfüllung beider Aufgaben sind Maßnahmen im Rahmen einer zuverlässigen Qualitätssicherung erforderlich. Dafür hat die AdV bereits frühzeitig ein Koordinatenmonitoring eingerichtet. Das zentrale Interesse gilt der Wahrung der Konsistenz der Referenzstationskoordinaten über Ländergrenzen hinweg, denn nur dadurch kann die hohe Qualität der SAPOS®-Produkte bundeseinheitlich definiert und zugesichert werden. Als wesentliche Merkmale und Elemente wurden dabei umgesetzt:

- Konzept der drei Monitoring-Stufen in Form von
 - Online-Koordinatenmonitoring im Rahmen des permanenten Vernetzungsbetriebs,
 - täglichem und hochpräzisem Koordinatenmonitoring im Post-Processing,
 - Kombination der Tageslösungen zu Wochenlösungen mit präzisen Bahn-
daten.
- Einrichtung des überregionalen Bezugsrahmens DREF-Online¹⁴ zur Verankerung des bundesdeutschen Netzwerks in den internationalen Verbund von Permanentstationen,
- Festlegung eines definierten Übergangs vom Berechnungssystem (ITRS¹⁵) in die amtliche Realisierung des ETRS89 (DREF91¹⁶) mithilfe von zeitabhängigen Transformationsparametern,
- Abstimmung und Festlegung von Berechnungsstrategien und -werkzeugen,
- Einführung der Statistik Koordinatenmonitoring und der Online-Darstellung ihrer Kennzahlen mit Hilfe einer zentralen Webapplikation.

Die Verfahren und Programme des Koordinatenmonitoring müssen eine genaue und zuverlässige Aussage über die Art, Geschwindigkeit und Dimension der Koordinatenänderung erlauben. Dazu wurden in mehreren Tests die verwendeten Rechenprogramme mit ihren jeweiligen wissenschaftlich fundierten Strategien auf Präzision und Vergleichbarkeit überprüft und zur Verwendung freigegeben.

14 Zusammengesetztes Netz aus GREF-Stationen und ausgewählten SAPOS®-Referenzstationen

15 International Terrestrial Reference System

16 Die amtliche Realisierung des ETRS89 in Deutschland

Aktuell erfolgt eine weitere Validierung der Softwarepakete Bernese GNSS Software¹⁷, Geo++¹⁸GNNET-POST¹⁸ und Wasoft/Netz bzw. WaPNet¹⁹.

Das DREF-Online-Netz ist eine Kooperation der Länder als Betreiber der SAPOS®-Referenzstationen mit dem BKG als Betreiber der GREF²⁰-Referenzstationen. Die qualitativ besten Stationen aus beiden Netzen bilden einen Rahmen für alle im Zusammenhang mit dem SAPOS®-Betrieb stehenden GNSS-Prozessierungen. Dabei werden wöchentliche, für das Bundesgebiet optimal angepasste Realisierungen des ITRS berechnet und bereitgestellt, d. h. die DREF-Online-Stationen dienen als Anschlusspunkte für die Monitoring-Rechenstellen der Länder. Im ersten Schritt einer GNSS-Prozessierung entstehen also Koordinaten im globalen ITRF, um die erforderliche Konsistenz mit den präzisen Satellitenorbits zu wahren. Beim zweiten Schritt erfolgt der Übergang in die amtliche Realisierung ETRS89/DREF91 (AdV-Zweischritttransformation):

ITRFJJJJ (Epoche JJJJ.JJ) → Zeitabhängige Helmert-Parameter nach Altamimi-Boucher → ETRF2000 (europäische Realisierung des ETRS89) → Helmert-Parameter der AdV → ETRS89/DREF91

Während kurzfristige Veränderungen der Position nur mit dem Online-Koordinatenmonitoring in begrenzter Genauigkeit detektierbar sind, können durch die Berechnung und anschließende Analyse der Ergebnisse im Post-Processing Positionsänderungen innerhalb von 48 Stunden nach dem Eintritt des Änderungsereignisses zuverlässig und präzise erkannt und qualitativ eingeschätzt werden. Werden zusätzlich die Geodätischen Grundnetzpunkte als Sicherungsinstanz messtechnisch einbezogen, lässt sich die Ursache der Veränderungen mit ausreichender Sicherheit innerhalb von zehn Tagen nach dem Änderungsereignis feststellen.

Die resultierenden Ergebnisse des Koordinatenmonitoring werden von allen Bundesländern und vom BKG an die statistikführende Stelle, dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, vierteljährlich übermittelt. Dort werden diese Ergebnisse in einer Datenbank gesammelt, grafisch aufbereitet und in einer Webapplikation bereitgestellt.

Das Diagramm in Abb. 8 einer SAPOS®-Referenzstation zeigt mehrere typische Phänomene von Koordinatenzeitreihen:

- Saisonale Effekte (Jahresgang),
- Antennenwechsel,

¹⁷ www.bernese.unibe.ch

¹⁸ www.geopp.de/de/gnnnet-post

¹⁹ www.wasoft.de/index.html

²⁰ Integriertes geodätisches Referenznetz Deutschlands

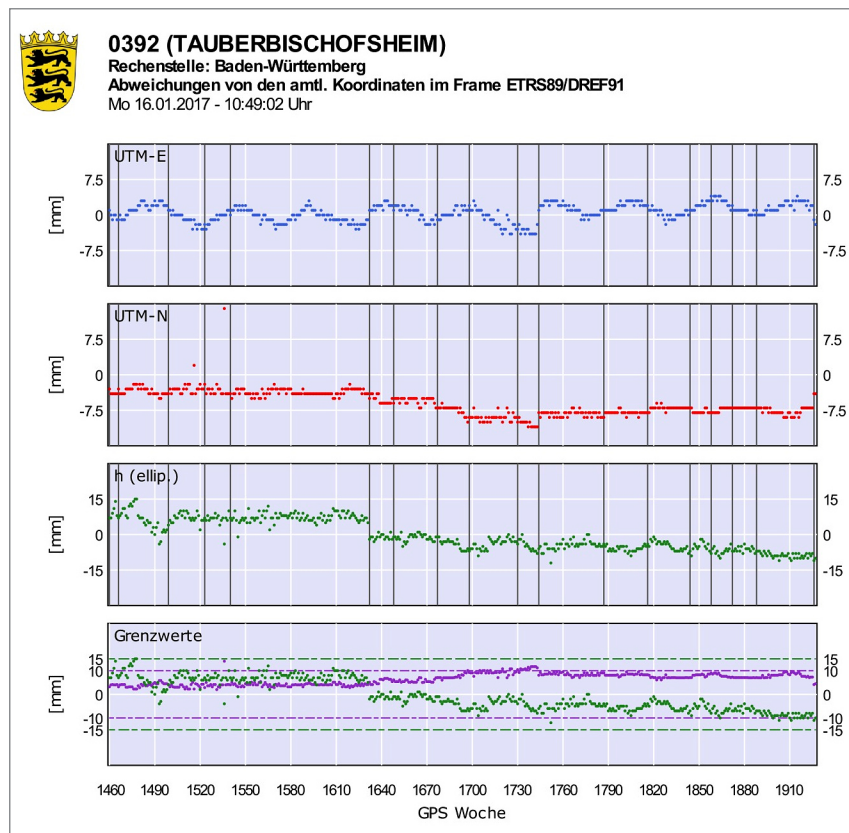


Abb. 8: Zeitreehendiagramm der Statistik AdV-Koordinatenmonitoring

- Datumsübergänge und
- Fehler im übergeordneten Bezugsrahmen.

Nimmt man Phänomene wie große Residuen (ausgelöst durch Sensorstörungen), lokale wie regionale Bodenbewegungen, konstruktive Schwächen der Vermarkungen oder unterschiedliche Lagerungsstrategien hinzu, sind die Hauptprobleme bei der satellitengeodätischen Koordinatenbestimmung im Zusammenhang mit dem Betrieb von Referenzstationen komplettiert. In der Folge erschweren die vielen Sprünge in den Zeitreihen eine sinnvolle weitergehende Analyse erheblich. Deswegen sind scheinbare von tatsächlichen Bewegungen kaum noch zu unterscheiden und eine zuverlässige Überwachung ist beeinträchtigt.

Der Einfluss auf die Koordinatenlösungen durch Fehlerquellen wie Gebäubebewegung (Jahresgang), Antennenwechsel sowie Sensorstörung kann durch

Maßnahmen der einzelnen Stationsbetreiber minimiert werden. Weitere Fehlerquellen sind nur durch abgestimmte neue Analyse- und Auswerteverfahren reduzierbar. Zur Entwicklung solcher Verfahren erarbeitet der Arbeitskreis Raumbezug gegenwärtig auf der Basis folgender Arbeitsschwerpunkte neue Kriterien, wie

- Analyse des länderübergreifenden SAPOS®-Koordinatenmonitorings einschließlich der Schätzung von Stationsgeschwindigkeiten,
- Vorschläge zur Verbesserung und zur weiteren Vereinheitlichung bei der Prozessierung und der Datumsgebung,
- Vorschläge zur Reduzierung der Auswirkungen aufgrund von Änderungen im globalen Referenzrahmen und
- Festlegung und Fortschreibung einer Liste von Datumspunkten in DREF-Online für die Datumsübergänge nach ITRF und ETRS89/DREF91.

Erste Zwischenergebnisse zeigen u. a., dass

- Sprünge in den Zeitreihen bei ITRF-Wechseln sich durch die Verwendung variabler Transformationsparameter bei der Berechnung der Wochenlösungen durch die Bundesländer komplett vermeiden lassen,
- die Zahl ruhiger und stabilerer Zeitreihen durch die zunehmende Inbetriebnahme von Pfeilerstationen wächst und
- der konsequente Einsatz einer zwangsfreien Lagerung beim Koordinatenmonitoring die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Rechenstellen deutlich verbessern wird.

Neben den qualitätssichernden Aufgaben im Kontext Koordinatenmonitoring können nach der Umsetzung aller Verbesserungsmaßnahmen auch geodynamische Fragestellungen ambitioniert bearbeitet werden. Eine dieser Fragestellungen ist aktuell der Ansatz, die Geschwindigkeiten der Referenzstationspunkte zur Einpassung radarinterferometrischer Daten in den amtlichen geodätischen Raumbezug zu verwenden. Die Voraussetzung dafür ist ein strikt nach bundesweit einheitlichen Regeln funktionierendes Koordinatenmonitoring.

7 Schlussbemerkungen

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS® ist ein standardbasierter multifunktionaler Echtzeit- und Post-Processing-Dienst. Zur Weiterentwicklung der implementierten Standards vertritt die Zentrale Stelle SAPOS®, mit Sitz in Hannover, die AdV im internationalen Standardisierungsgremium RTCM. Diese Mitarbeit ist vor dem Hintergrund der sich global verändernden system- und fachtechnischen Voraussetzungen (z. B. wach-

sende Anzahl von GNSS-Komponenten, neue Kommunikationswege, Übergang von RTK zu SSR) von entscheidender Bedeutung für SAPOS®. Die Fortschreibung der SAPOS®-Produktdefinition ist dabei inbegriffen.

Mit der Weiterentwicklung technischer Möglichkeiten wird sich im Bereich des Kunden- und Nutzersegments von SAPOS® ein weiterer Zuwachs ergeben. Neben den Hauptkunden, dem Liegenschaftskataster und der „klassischen Vermessung“, sind andere Vertriebsfelder direkt oder indirekt im Fokus von SAPOS® (z. B. Anbieter eigener Positionierungsdienste, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Forschungseinrichtungen, Landwirtschaft). Technische Entwicklungen müssen sich deswegen eng am Kunden- und Nutzerbedarf orientieren und bedeuten dabei nicht selten erhebliche Innovationen.

Mit der Einführung der Ergebnisse des Projektes zur Erneuerung des DHHN (Feldmann-Westendorff 2016, AdV 2016) und der Richtlinie über den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug (AdV 2014, Heckmann et al. 2015) wurde der Grundstein für eine zukunftsweisende Betrachtung des Raumbezugs gelegt (Jahn 2015) und neue verbesserte Koordinaten der SAPOS®-Stationen eingeführt. Mit diesem „Raumbezug 2016“ erfolgte eine Verknüpfung des Nivellementsnetzes mit dem Geodätischen Grundnetz und den SAPOS®-Referenzstationen, woraus sich interessante neue fachliche Ideen entwickeln lassen (z. B. im Rahmen GNSS-basierter Höhenbestimmungen).

In Kombination mit anderen Messverfahren (z. B. Radarinterferometrie) können neue Produkte geschaffen und weitere Zielgruppen mit aktuellen Informationen aus dem Raumbezug versorgt werden. So lassen sich relative Höhenänderungen in der Kombination radarinterferometrischer Messungen mit Geschwindigkeitsinformationen aus dem Koordinatenmonitoring der SAPOS®-Referenzstationen ableiten, einem Projekt, an dem der Arbeitskreis Raumbezug in Zusammenarbeit mit Dritten derzeit arbeitet.

Neben vielen technischen Neuerungen, die in dieser Veröffentlichung benannt sind, wird die kurzfristige Integration aller GNSS-Systeme in den SAPOS®-Dienst von großer Wichtigkeit. Das gilt besonders für das Galileo-System (Riecken und Ruf 2013).

Darüber hinaus können auch organisatorische und politische Entscheidungen von größerer Relevanz sein. So hat das Thema „Open Data“ in Verbindung mit einer geldleistungsfreien Bereitstellung von SAPOS®-Produkten in einigen Bundesländern zu einer neuen Betrachtung und zu einer Uneinheitlichkeit bezüglich der AdV-Gebühren geführt.

Literatur

- AdV 2014: Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. www.adv-online.de, 2014.
- AdV 2015: SAPOS®-Produktdefinition Version 7, Stand 10. Juni 2015. www.adv-online.de/AdV-Produkte/SAPOS/Veroeffentlichungen-SAPOS, letzter Zugriff Januar 2017.
- AdV 2016: Beschluss 128/4 des Plenums der AdV „Einführung der Ergebnisse des Projektes Erneuerung des DHHN“ (Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland, Raumbezug 2016).
- Draken, W. (2005): Funktion und Nutzung des SAPOS-Deutschland-Netzes. Flächenmanagement und Bodenordnung 67(1): S. 21–32.
- Feldmann-Westendorff, U.; Liebsch, G.; Sacher, M.; Müller, J.; Jahn, C.-H.; Klein, W.; Liebig, A.; Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5/2016, 141. Jahrgang, S. 354–367. DOI: [10.12902/zfv-0140-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0140-2016).
- Heckmann, B.; Berg, G.; Heitman, S.; Jahn, C.-H.; Klauser, B.; Liebsch, G.; Liebscher, R. (2015): Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2015, 140. Jahrgang, S. 180–184. DOI: [10.12902/zfv-0069-2015](https://doi.org/10.12902/zfv-0069-2015).
- Heckmann, B.; Jahn, C.-H. (2015): Geodätischer Raumbezug. In: Kummer, K.; Kötter, T.; Eichhorn, A. (Hrsg.): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen, Wichmann-Verlag, S. 255–323.
- Jahn, C.-H. (2015): Aktuelle Entwicklungen im geodätischen Raumbezug Deutschlands. Flächenmanagement und Bodenordnung, 5/2015, S. 201–208.
- Riecken, J.; Ruf, B. (2013): Die Integration von GLONASS in SAPOS® – Eine Blaupause für Galileo! In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2013, 138. Jahrgang, S. 385–390.
- Rubach, J.; Brünner, A.; Dick, H.-G.; Feldmann-Westendorff, U.; Kurtenbach, E.; Wagenführ, P. (2015): Das SAPOS®-Qualitätsmanagement der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. www.adv-online.de/AdV-Produkte/SAPOS/Veroeffentlichungen-SAPOS, letzter Zugriff 1/2017.
- Weber, R.; Hinterberger, F.; Huber, K. (2013): Precise Point Positioning (PPP) – Berechnungsmodelle, Einsatzbereiche, Grenzen. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70/2013, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013, S. 63–82.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Bagge, A. (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, 13.–16. September 2005, Long Beach, California. Abstract: www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6467.

Kontakt

Cord-Hinrich Jahn

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

Landesvermessung Geobasisinformation

Podbielskistraße 331, 30659 Hannover

cord-hinrich.jahn@lgl.niedersachsen.de

Jens Riecken

Bezirksregierung Köln, Geobasis.NRW

Muffendorfer Straße 19–21, 53177 Bonn

jens.riecken@bezreg-koeln.nrw.de

Christian Trautvetter

Landesamt für Vermessung und Geoinformation, Dezernat 30 – Raumbezug

Hohenwindenstraße 13a, 99086 Erfurt

christian.trautvetter@tlvermgeo.thueringen.de

Martin Freitag

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

Alexandrastraße 4, 80538 München

martin.freitag@ldbv.bayern.de

Enrico Kurtenbach

Bezirksregierung Köln, Geobasis.NRW

Muffendorfer Straße 19–21, 53177 Bonn

enrico.kurtenbach@bezreg-koeln.nrw.de

Gisela Fabian

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen

Abteilung III – Geoinformation –, Geodätische Referenzsysteme,

Ingenieurvermessung

Fehrbelliner Platz 1, 10707 Berlin

gisela.fabian@sensw.berlin.de

Hans-Georg Dick

Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung

Baden-Württemberg (LGL), Referat Geodätischer Raumbezug

Kriegsstraße 103, 76135 Karlsruhe

hans-georg.dick@lgl.bwl.de



C.-H. Jahn



J. Riecken



M. Freitag



E. Kurtenbach



G. Fabian



H.-G. Dick

Trends der Dienst-basierten GNSS-Positionsbestimmung – Fokus: Private Anbieter

Jürgen Alberding

1 Zusammenfassung

Bereits Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde das Potential von GNSS zur Bereitstellung des Raumbezugs durch permanent operierende GNSS-Referenzstationen in der Landesvermessung erkannt. Die Idee des „festpunkt-freien Festpunktfeldes“ (Augath 1990) wurde von Landesvermessungsämtern flächendeckend durch den Satellitenpositionierungsdienst SAPOS realisiert. Durch die Einführung der RTK-Technologie (Trimble 1992) hat die präzise satellitengestützte Positionierung auch bei dynamischen Anwendungen in Nachbarbranchen wie der Agrarwirtschaft („Precision Farming“) und der Bauwirtschaft (Maschinensteuerung) Einzug gehalten. Weitere Beispiele für RTK-Anwendungen sind präzise Navigationsanwendungen auf Binnengewässern und in Häfen, die präzise Navigation unbemannter Plattformen (z.B. UAV) sowie neue Herausforderungen beim autonomen Fahren.

Prinzipiell könnte der überwiegende Teil der genannten Anwendungen den SAPOS-Positionierungsdienst nutzen. Die Entwicklung der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass unterschiedliche Anbieter parallel zu SAPOS eigene GNSS-Dienste aufbauen und betreiben. Neben Behörden mit sicherheitsrelevanten Aufgaben (z. B. Schifffahrt, Flughäfen), welche höhere Integritätsstufen und den Zugang zum Dienst erfordern, entwickeln sich immer mehr private Firmen zu GNSS-Dienstbetreibern.

In diesem Beitrag werden die Entwicklung, die Hintergründe und die Trends der Dienst-basierten GNSS-Positionsbestimmung mit dem Fokus auf private Anbieter diskutiert.

Literatur

Augath, W. (1990) : Über die Anwendung satellitengestützter Verfahren in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung (VuKV). Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, S. 138 ff.

Kontakt

Jürgen Alberding
Alberding GmbH
Schmiedestraße 2, 15745 Wildau
www.alberding.eu

Session 4:

Einblicke in Praxis, Wissenschaft und Zukunftstrends

Was ist der Mehrwert von Multi-GNSS in der Praxis?

Michael Schulz | Jürgen Rüffer

1 Einführung

Aktuell sind mit GPS und GLONASS zwei voll operationelle Globale Satelliten-navigationsysteme (GNSS) verfügbar und zwei weitere sind in der Implementierungsphase. Die neuen Systeme Galileo und BeiDou senden bereits nutzbare Signale aus, und sowohl GPS als auch GLONASS werden aktuell modernisiert, was mehr Signale, bessere Genauigkeit und bessere Interoperabilität ermöglichen kann.

Aktuelle high-end GNSS-Empfänger sind in der Lage, nahezu alle verfügbaren Multi-GNSS-Signale zu empfangen. Bei der Verarbeitung der Signale und der Berechnung von präzisen Positionen sind jedoch unterschiedliche Herangehensweisen der jeweiligen Hersteller erkennbar.

Dieser Beitrag versucht aus Erfahrungen der ALLSAT GmbH mit dem aktuellen Stand der GNSS-Technik Empfehlungen für die optimale Konfiguration der Messtechnik abzuleiten. Hierbei wird auch auf neue Möglichkeiten der GNSS-Messungen, sowohl im Post-Processing als auch in Echtzeit eingegangen. Mit der Nutzung von modernen GNSS-Empfängern besteht die Möglichkeit der Verbesserung von Genauigkeit, Verfügbarkeit, Interoperabilität und Integrität in hochpräzisen GNSS-Anwendungen.

2 Multi-GNSS-Signalverarbeitung

Die Vorteile der Multi-GNSS-Signalverarbeitung liegen u. a. in einer besseren Störsicherheit und Multipath-Unterdrückung sowie robusterem Tracking auch bei schwachen Signalstärken (Montenbruck et al. 2014).

Tab. 1 zeigt die Übersicht der aktuell verfügbaren GNSS-Systeme. Eine Herausforderung in der Signalverarbeitung liegt u. a. im parallelen Tracken der unterschiedlichen Satellitensysteme (z. B. Satellitensignale, aufmodulierte Informationen), der Zeitsynchronisierung und der Berechnung von Positionen in einem einheitlichen Bezugssystem. Hierbei ergeben sich – ergänzend zu den klassischen (z. B. Ionosphäre) auch neue Einflussfaktoren (z. B. Intersystem Biases).

Tab. 1: Übersicht der GNSS-Systeme (Stand: Dez. 2016)

	GNSS-System			
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou (BDS)
Anzahl Satelliten in voller Ausbaustufe	24	24	30	35 (5 GEO, 3 IGSO, 27 MEO)
Anzahl Satelliten (momentan genutzt)	32 (31)	27 (23)	8 (6)	19 (7 GEO, 6 IGSO, 6 MEO)
Bahnebenen	6	3	3	3 (+GEOs)
Bahnhalbachse	26 560 km	25 510 km	29 600 km	27 840 km
Bahnneigung	55°	65°	56°	55°(+ GEO)
Systemzustand, global	FOC ¹	FOC	im Aufbau	im Aufbau
Signale	L1, L2, L2c, L5	L1, L2, L3	E1, E5A, E5B, AltBoc, E6	B1, B2, B3
Trends/Entwicklungen	GPS III-Satelliten (L1c) 17 Bodenstationen	(weitere) Starts Typ K1 Start Typ K2	2017: Betrieb Initial Servcies 2020: 24 Satelliten, Betrieb SoL ² + FOC	ca. 2020: Aufbau beendet

Die GNSS-Frequenzübersicht in [Abb. 1](#) zeigt, dass für das komplette Tracken aller verfügbaren Signale eine relativ breitbandige Antennen/LNA¹ Kombination erforderlich ist. Hierdurch werden auch mehr Störsignale empfangen, was unterschiedliche Filter-Techniken zur In-Band und Out-of-Band Interference Rejection (Ashjaee 2011) erforderlich machen wird.

Weitere Details zum aktuellen und zukünftigen GNSS-Status sind Hugentobler (2017) zu entnehmen.

Die Herausforderungen an die Multi-GNSS-Signalverarbeitung werden in [Abb. 2](#) deutlich. Hier wird die aktuelle Satelliten-Trackingübersicht eines JAVAD Delta-3 Empfängers am 14. Dezember 2016 dargestellt. Dabei werden parallel

1 LNA: Low Noise Amplifier (dt. rauscharmer Verstärker)

2 FOC: Full Operational Capability (dt.: volle Betriebsfähigkeit)

3 SoL: Safty of Life; Anwendungen, bei denen Gefahr für Menschen besteht

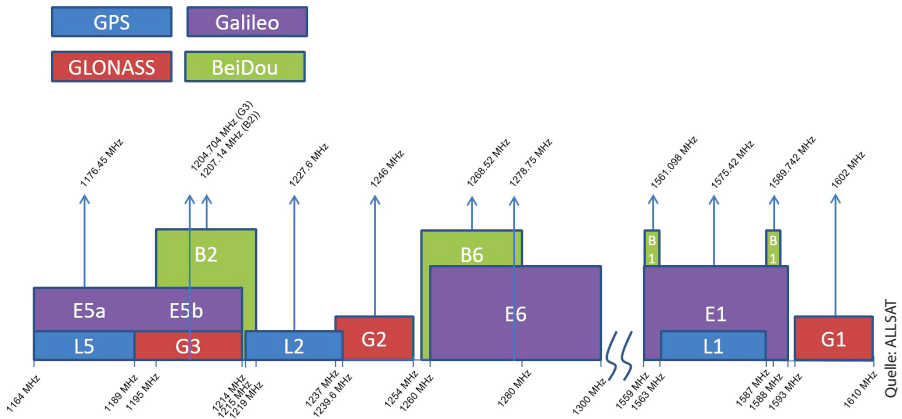


Abb. 1: GNSS-Frequenzübersicht

zwölf GPS-, zehn GLONASS-, fünf Galileo- und fünf BeiDou-Satelliten mit jeweils unterschiedlichen Frequenzen und Signalen bzw. Modulationen empfangen. Die parallele Signalverarbeitung stellt hohe Anforderungen an die Empfänger-Technik.

3 Anforderungen an Multi-GNSS-Referenzdienste

Die aktuellen Herausforderungen für die Betreiber von Multi-GNSS-Referenzdiensten (z. B. SAPOS, AXIO-NET) liegen im Upgrade ihrer Infrastruktur auf die neuen GNSS und der Integration in die Vernetzungssoftware auf der einen Seite und in der Homogenisierung und Standardisierung ihrer (Korrekturdaten-)Dienste auf der anderen Seite.

Aktuelle high-end GNSS-Empfänger (z. B. Leica Viva GS16, JAVAD Delta-3) liefern eine Vielzahl an Messdaten. Die Beobachtungen werden in proprietären Formaten geliefert, so dass eine Kompatibilität der einzelnen Hersteller über eine RINEX-v3 Konvertierung erreicht werden könnte, die allerdings keine effektive Real-Time Performance unterstützt.

Die Notwendigkeit eines standardisierten Streaming-Protokolls für GNSS ist offensichtlich. Es gibt bereits standardisierte GPS und GLONASS RTCM-3 Messages, welche für RTK-Anwendungen verwendet werden, aber diese Messages können nicht effektiv auf andere GNSS (z. B. Galileo) oder andere Signale (z. B. L5) erweitert werden. Die Lösung sind Multiple Signal Messages (MSM), wobei dem neuen RTCM-3 eine Schlüsselrolle zukommt, um alle GNSS-Beobachtungsdaten in einer einheitlichen Form darzustellen (Boriskin et al. 2012).

Sys ▼	Num	EI	Az	CA	P1	P2	L2C	L5	L1C	Track Time	Status	Cont. Track L1/L2
GPS	6	7	306	43	30	30	43	37		00:19:43	0	/
GPS	1	56	142	51	44	44	51	50		00:19:49	0	/
GPS	22	74	82	50	45	45				00:19:42	0	/
GPS	14	29	50	44	33	33				00:19:42	0	/
GPS	4*	30	138	49	38	38				00:19:48	6	/
GPS	31	25	76	46	38	38	46			00:19:43	0	/
GPS	23	42	192	49	40	40				00:19:42	0	/
GPS	19	33	306	47	39	39				00:19:42	0	/
GPS	17	40	288	47	40	40	48			00:19:43	0	/
GPS	9	7	210	42	30	30	44	40		00:17:00	0	/
GPS	3	86	310	54	48	48	54	50		00:19:49	0	/
GPS	11	31	162	47	33	33				00:19:42	0	/
GLO	4/6	79	360	51	51	49	50			00:19:47	0	/
GLO	3/5	27	54	46	46	45	46			00:19:45	0	/
GLO	13/-2	18	68	38	37	39	39			00:19:41	0	/
GLO	12/-1	15	12	43	42					00:19:42	29	/
GLO	18/-3	6	168	44	44	42	44			00:19:45	0	/
GLO	21/4	7	334	42	41	41	43			00:16:45	0	/
GLO	5/1	38	248	41	40	40	41			00:19:45	0	/
GLO	19/3	54	194	49	48	47	48			00:19:45	0	/
GLO	20/2	53	308	46	45	47	48			00:19:45	0	/
GLO	26/-5*	48	312	50	50	48	50			00:19:45	6	/
GAL	9	28	234	48	51(E5)	51(E5b)	44(E6)	44(E5a)		00:19:44	19	/
GAL	19	37	62	47	48(E5)	48(E5b)	38(E6)	41(E5a)		00:19:40	19	/
GAL	18	5	324	43	48(E5)	48(E5b)	32(E6)	38(E5a)		00:12:16	19	/
GAL	11	62	222	48	53(E5)	53(E5b)	45(E6)	45(E5a)		00:19:40	19	/
GAL	12	27	168	46	49(E5)	49(E5b)	40(E6)	41(E5a)		00:19:42	19	/
BDS	5	14	126	41			39(B3)	40(B2)		00:19:44	19	/
BDS	7	14	66	42			40(B3)	40(B2)		00:19:35	19	/
BDS	10	11	92	39				42(B2)		00:19:35	19	/
BDS	12	10	328	40			40(B3)	44(B2)		00:19:35	19	/
BDS	9	13	60	44			37(B3)	41(B2)		00:19:35	19	/

Abb. 2: Satellitenübersicht JAVAD Delta-3 am 14.12.2016 (12 GPS, 10 GLONASS, 5 Galileo, 5 BeiDou)

MSM kann sowohl genutzt werden, um Korrekturdaten für RTK-Anwendungen bereitzustellen, als auch um Beobachtungsdaten von Referenzstationen zu übertragen. Die Anforderungen an Betreiber von Multi-GNSS-Referenzdiensten liegen aktuell darin, diesen Standard zu implementieren und qualitätsgesichert zur Verfügung zu stellen.

4 Multi-GNSS-Mehrdeutigkeitslösung und Validierung

Die prinzipielle Verfügbarkeit von unverschlüsselten Signalen auf jeweils drei Frequenzen ermöglicht neue Ansätze der Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten und der Modellierung (z. B. ionosphärische Laufzeitverzögerungen). Nicht zuletzt wird die Erhöhung der Anzahl der verfügbaren Satelliten eine Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung mit sich bringen. Insbesondere wird sich dies in städtischen Gebieten zeigen, in denen die Satellitensignale teilweise von Gebäuden abgeschattet werden. In solchen Anwendungen spielt wiederum die Unterdrückung von Mehrwegeeffekten (vgl. Görres 2017) eine sehr wichtige Rolle.

5 Ausblick

In den vorhergehenden Kapiteln dieses Beitrags wurde der aktuelle und der zukünftige Zustand von GNSS umrissen. In der Präsentation werden erste spannende Erfahrungen mit aktueller high-end GNSS-Technik unter der Verwendung von MSM-Korrekturdaten von allen verfügbaren GNSS gezeigt und Empfehlungen für mögliche Konfigurationen gegeben.

Literatur

- Ashjaee, J.: JAVAD Triumph-VS GNSS Spectrum Analyzer Video. <https://youtu.be/OJlQDkKi4Sg>, April 2011.
- Boriskin, A.; Kozlov, D.; Zyryanov, G.: The RTCM Multiple Signal Messages: A New Step in GNSS Data Standardization. ION GNSS 2012.
- Görres, B.: Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Hugentobler, U.: Globale Satellitennavigationssysteme – Status und Ausblick. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Montenbruck, O.; Steigenberger, P.; Khachikyan, R.; Weber, G.; Langley, R. B.; Mervart, L.; Hugentobler, U.: IGS-MGEX Preparing the Ground for Multi-Constellation GNSS Science. InsideGNSS, Jan/Feb 2014.

Kontakt

Michael Schulz | Jürgen Rüffer
ALLSAT GmbH
Sokelantstraße 5, 30165 Hannover
info@allsat.de



GNSS im Tagesgeschäft von Ingenieurbüros: Anwendungen im ÖbVI-Büro Ehrhorn

Uwe Ehrhorn | Henning Anhalt | Rüdiger Dierks

1 Was bedeutet Tagesgeschäft in einem Vermessungsbüro?

In seinen Anfängen vor mehr als einem Vierteljahrhundert ist die satellitengestützte Positionierung mit GPS von der Fachwelt als Expertensystem der höheren Geodäsie eingesetzt worden. In der Zwischenzeit hat sich GPS bzw. GNSS zu einem weit verbreiteten Standard-Messsystem der angewandten Geodäsie entwickelt.

Die Anwenderseite interessieren dabei im täglichen Einsatz nicht so sehr Einzelaspekte des Systems, sondern im Wesentlichen ein funktionierendes Gesamtsystem.

Bei der täglichen Arbeit im vermessungstechnischen Außendienst sind folgende Aspekte von besonderer Bedeutung:

- Das Gesamtsystem muss permanent zur Verfügung stehen.
- Vermessungen müssen „Real-Time“ erledigt werden können.
- Geforderte Standards müssen eingehalten werden.
- Mit dem Einsatz von GNSS müssen Gewinne erzielt werden können.

2 Rahmenbedingungen und Umfeld

2.1 Rahmenbedingungen im ÖbVI-Büro Ehrhorn

Das ÖbVI Büro Ehrhorn ist sowohl im Liegenschaftskataster als auch in der Bau- und der Entwurfsvermessung tätig und setzt in allen Tätigkeitsfeldern GNSS ein. Um die am Markt erforderliche Flexibilität erzielen zu können, sind alle Vermessungstrupps sowohl mit Tachymetern als auch mit GNSS-Empfängern und der erforderlichen Software GART2000 ausgestattet.

2.2 Rahmenbedingungen in Niedersachsen

Das Niedersächsische Vermessungsgesetz schreibt den Anschluss sämtlicher Liegenschaftsvermessungen an das amtliche Raumbezugssystem vor, das heute im Wesentlichen durch ein ausgeglichenes TP- und Lagefestpunktfeld (Aufnah-

mepunkte = AP) repräsentiert wird. In den letzten Jahren gewinnt jedoch das Satellitenpositionierungssystem SAPOS® immer mehr an Bedeutung, da Pflege des Lagefestpunktfeldes eingestellt worden ist.

Die einschlägigen Katastervorschriften fordern, dass Liegenschaftsvermessungen in der Regel durch satellitengestützte oder polare Verfassungsvermessungsverfahren durchgeführt werden.

Um die einschlägigen Messsysteme einsetzen zu können, ist deren Eignung regelmäßig zu überprüfen.

Für Bau- und Entwurfsvermessungen werden von den Auftraggebern regelmäßig keine Forderungen gestellt. Im Sinne der ISO 9001:2015 ist jedoch davon auszugehen, dass Auftraggeber vergleichbare Anforderungen wie im Liegenschaftskataster stellen. Auch für diesen Teil der Tätigkeit sind die Messsysteme regelmäßig zu überprüfen.

2.3 Grundsätze für satellitengestützte Vermessungsverfahren in Niedersachsen gemäß LiegVermErlass

Liegenschaftsvermessungen sind in der Regel durch satellitengestützte oder polare Vermessungen durchzuführen. Lageabweichungen dürfen die in Tab. 1 genannten größten zulässigen Abweichungen nicht überschreiten. Für Liegenschaftsvermessungen sind SAPOS®-Dienste zu verwenden und die in Tab. 2 genannten Grundsätze einzuhalten.

Tab. 1: Zulässige Lageabweichungen

Lagefestpunkte bezogen auf Sicherungs- und Nachbarpunkte	0,014 m
Anschluss an Lagefestpunkte bei polaren u. satellitengestützten Vermessungsverfahren	0,020 m
Neu bestimmte Objektpunkte bei Mehrfachbestimmungen zwischen größtem und kleinstem Wert	0,040 m

2.4 Kalibrierung und Prüfung der Vermessungsgeräte einschließlich der Auswertprogramme

Um Vermessungsgeräte im niedersächsischen Liegenschaftskataster einsetzen zu können, schreibt der LiegVermErlass vor, dass Vermessungsgeräte regelmäßig zu überprüfen sind und Programme für die Auswertung von Liegenschaftsvermessungen geeignet sein müssen:

- Tachymeter mit automatischer Zielerfassung sind mittels Koordinatenvergleich zu prüfen.

Tab. 2: Grundsätze satellitengestützte Vermessungen

PDOP	Darf den Wert 3 nicht übersteigen
Verteilung der Satelliten	Auf eine ausreichende Nord-Süd- und Ost-West-Verteilung ist zu achten.
Elevationsmaske	Der Wert von 10° sollte nicht überschritten werden.
Beobachtungsdauer	Die Dauer bis zur Festsetzungen der Trägerphasenmehrdeutigkeit sollte nicht mehr als eine Minute betragen. Bei einer Überschreitung ist die Messung zu wiederholen.
Antennenhöhen	Höhen sind für alle Punkte zu messen und in der Auswertung zu berücksichtigen.
Unabhängigkeit der Messungen	Als unabhängig gelten Messungen, wenn zwischen den beiden Aufstellungen eines Punktes eine Zeitdifferenz von mindestens 15 Minuten besteht. Bei Kontrollpunkten kann die Zeitdifferenz unterschritten werden, wenn die zweite Aufstellung mit einer um 0,5 m geänderten Höhe der Antenne erfolgt.
Bestimmung von Aufnahmepunkten und Kontrollpunkten	Koordinaten sind bei jeder Aufstellung aus dem Mittelwert mindestens dreier Einzelmessungen abzuleiten; dabei ist vor jeder Einzelmessung neu zu initialisieren. Die größten zulässigen Abweichungen v_E und v_N zwischen dem Mittelwert einer Aufstellung und den zugehörigen Einzelmessungen und zwischen dem Gesamtmittel und dem Mittelwert einer Aufstellung betragen jeweils 0,012 m.
Bestimmung der Objektpunkte	Es sind zwei Aufstellungen mit je einer Einzelmessung erforderlich.

- Satellitenempfänger sind mittels Koordinatenvergleich zu überprüfen die Lageabweichung darf 0,008 m nicht überschreiten.
- Eingesetzte Programme sind mit dem in der Formelsammlung der Vermessungs- und Katasterverwaltung angegebenen Prüfdatensatz zu überprüfen.

2.5 Überprüfung Messmittel

Als Beispiel für die Implementierung eines solchen Prüfprozesses kann die Einführung der Leica SmartStation im Vermessungsbüro Ehrhorn dienen. Nachdem alle Einzelkomponenten der Leica SmartStation auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen überprüft worden sind, ist das Zusammenspiel des gesamten Messsystems zu überprüfen.

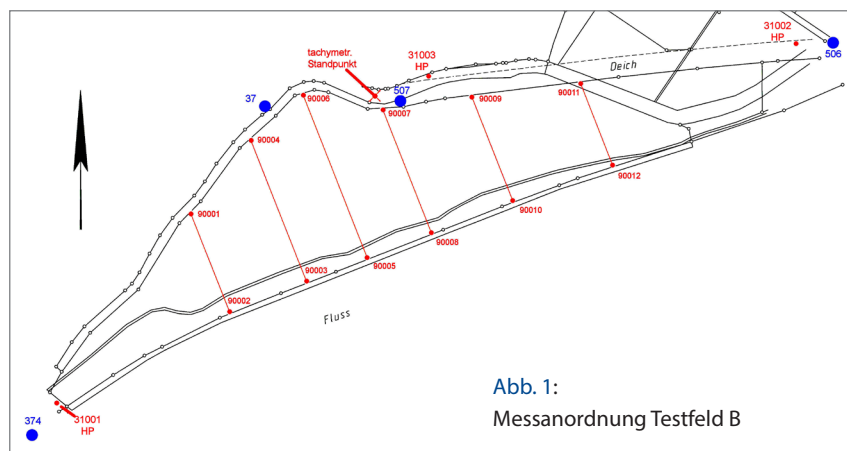


Abb. 1:
Messanordnung Testfeld B

Zur Vermeidung von Zentrierfehlern sind die mit SAPOS® bestimmten temporären Anschlusspunkte mit Stativen aufgebaut worden. Die Aufnahmepunkte sowie die Objektpunkte sind zudem mit Leica SmartPole bestückt worden, so dass die Tachymetermessungen und die SAPOS®-Messungen annähernd zeitgleich durchgeführt worden sind (Abb. 1).

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Messungen sind für jeden Objektpunkt die Koordinaten als Mittel aus allen vier Varianten bestimmt worden. Die Abweichungen zwischen den Einzelmessungen und dem jeweiligen Einzelwert betragen in Mittel 0,003 m und maximal 0,006 m. Die größten Abweichungen treten zwischen den Varianten 1 und 4 auf (Tab. 3). Zwischen den Koordinatenpaaren betragen die Abweichungen im Mittel 0,007 m und maximal 0,009 m.

Tab. 3: Messanordnungen im Testfeld B

Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung des Tachymeterstandpunktes durch freie Stationierung im AP-Feld ■ tachymetrische Aufnahme der Objektpunkte
Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aufnahme der Objektpunkte mit SAPOS®-Daten
Variante 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung des Tachymeter-Standpunktes mit SAPOS® sowie tachymetrischer Anschluss an zwei Aufnahmepunkte ■ anschließende tachymetrische Aufnahme der Objektpunkte
Variante 4	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung des Tachymeter-Standpunktes mit SAPOS® sowie tachymetrischer Anschluss an zwei mit SAPOS® bestimmte temporäre Anschlusspunkte ■ anschließende tachymetrische Aufnahme der Objektpunkte

Die bei der Nullmessung erzielten Genauigkeiten haben sich auch bei Wiederholungsmessungen in den Folgejahren erzielen lassen, d. h. die im LiegVerm Erlass vorgegebene Schranke von 0,040 m-Differenz zwischen größtem und kleinstem Wert zwischen allen Bestimmungen wird in jedem Einzelfall eingehalten.

Diese entwickelte Vorgehensweise ist als Verfahren in das Qualitätsmanagement übernommen worden und wird seitdem einmal jährlich durchgeführt.

3 GNSS im Tagesgeschäft

3.1 Praxisbeispiel Zerlegung

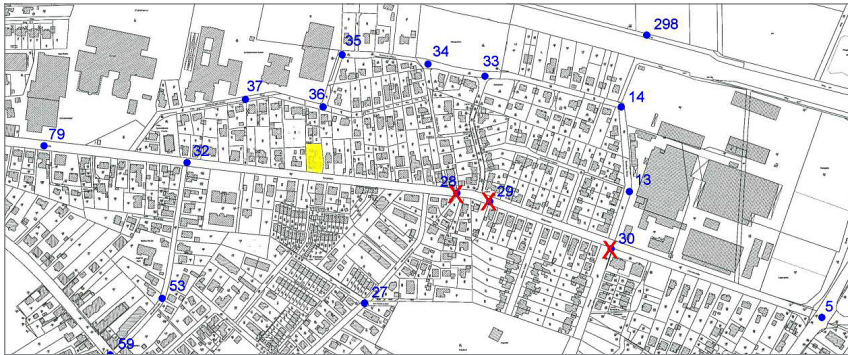


Abb. 2: Aufnahmepunktübersicht (Copyright LGLN Sulingen-Verden 2016)

Das in Abb. 2 markierte Flurstück ist zu zerlegen gewesen. Vor Ort ist folgende Situation vorgefunden worden:

- Durch den Ausbau einer Straße sind drei AP-Punktgruppen (28; 29; 30) vollständig zerstört worden. Der vorgeschriebene Anschluss an Aufnahmepunkte ist nicht ohne weiteres möglich gewesen.
- Durch die vorhandene Bebauung und den vorhandenen Bewuchs ist eine Bestimmung aller Objektpunkte allein mit SAPOS® nicht möglich gewesen.
- Einige Objektpunkte sind nur durch vorgeschobene Standpunkte zu erfassen gewesen (siehe Abb. 3).

Durch eine Kombination aus GNSS-Messungen und tachymetrischen Messungen ist die Zerlegung entsprechend dem LiegVermErlass durchgeführt worden. Dabei sind die neu geschaffenen Aufnahmepunkte 2.109 und 2.108, die Tachymeterstandpunkte 20.011 und 20.016, sowie die vorgeschobenen Standpunkte 20.012 und 20.015 mit Hilfe des Anschlusses an SAPOS® bestimmt worden. Neben

den Objektpunkten sind zusätzlich zur Genauigkeitsabschätzung einige Tachymeterstandpunkte mittels freier Stationierungen sowie die vorgeschobenen Standpunkte durch polares Anhängen bestimmt worden.

Ein Vergleich zwischen den ermittelten Koordinaten zeigt, dass die Differenzen zwischen den so bestimmten Werten maximal 0,007 m ausmachen. Eine beliebige Kombination der verschiedenen Messmethoden ist also möglich.

Als größter Vorteil bei dieser Vorgehensweise hat sich in der Nachbetrachtung erwiesen, dass trotz des Totalausfalls mehrerer Aufnahmepunktgruppen durch den Einsatz der Leica SmartStation der zeitliche Mehraufwand gering gehalten worden ist.

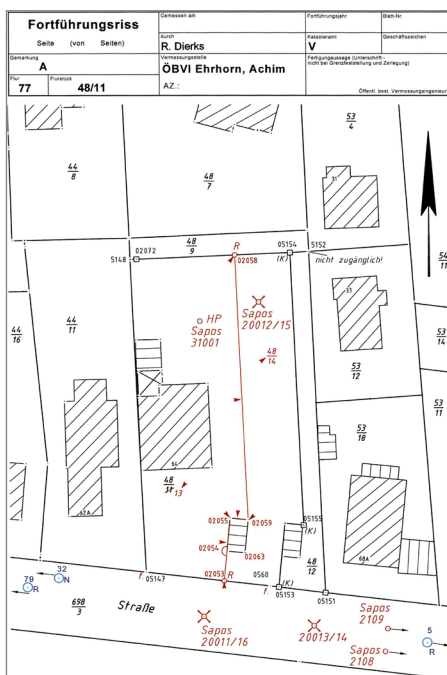


Abb. 3: Fortführungsriß Zerlegung

3.2 Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Gebäudevermessungen

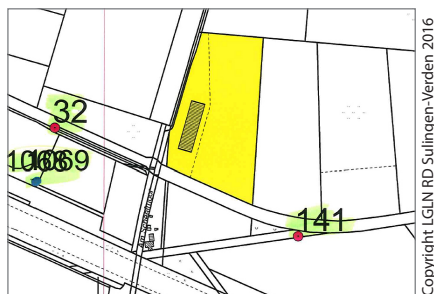
Nicht nur bei Zerlegungen/Grenzfeststellungen sondern auch bei Gebäudevermessungen sind die Möglichkeiten begrenzt, wenn rein polare oder rein satellitengestützte Vermessungen durchgeführt werden. Deshalb sind angepasst an die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten Kombinationen aus beiden Vermessungsverfahren (hybride Vermessung) zu wählen.

Um über Genauigkeiten und Wirtschaftlichkeit Klarheit zu gewinnen, sind verschiedene Vorschläge (Dierks, Hösl, Lambers) im Rahmen einer Bachelorarbeit (Anhalt) untersucht worden. Dazu sind zwei verschiedene Gebäudetypen – Lagerhalle mit vier Gebäudeecken, kreisrunde Windenergieanlage – in verschiedenen Varianten vermessungstechnisch erfasst worden. Als Vergleichsgröße für die Genauigkeit der Verfahren sind mit Hilfe der klassischen Freien Stationierung bestimmte Objektpunkte herangezogen worden.

3.2.1 Praxisbeispiel Gebäudevermessung: Lagerhalle im Außenbereich

Auf dem in Abb. 4 dargestellten Grundstück ist eine zweite Halle aufzumessen. Vor Ort ist folgende Situation vorgefunden worden:

- Das zu messende Gebäude ist frei zugänglich, Sichthindernisse bestehen nicht.
- Die Objektpunkte des vorhandenen Gebäudes sind doppelt polar bestimmt und können gemäß Lieg-VermErläss für die Gebäudevermessung als Anschlusspunkte verwendet werden.



Copyright LGLN RD Sulingen-Verden 2016

Abb. 4: Aufnahmeübersicht

Neben dem direkten Anschluss mit Hilfe der Freien Stationierung über zwei AP-Punktgruppen sind die in Tab. 4 genannten hybriden Messanordnungen denkbar.

Ein Vergleich mit der klassischen Freien Stationierung über je zwei Anschlusspunkte hat für alle Varianten Abweichungen von maximal 0,010 m ergeben (siehe Abb. 5). Alle Varianten genügen also den Anforderungen des Lieg-VermErlasses. Zu beachten bleibt bei der Variante 14 jedoch, dass die Abstände zwischen Gebäudeecke und Fluchtpunkt nicht mehr als 15 m betragen sollen, da

Tab. 4: Messanordnungen Gebäudevermessung Halle

Variante 11	Freie Stationierung mit <ul style="list-style-type: none"> ■ Anschluss an zwei Punkte einer AP-Gruppe sowie ■ Anschluss an zwei Objektpunkte des vorhandenen Gebäudes
Variante 12	Freie Stationierung mit <ul style="list-style-type: none"> ■ Anschluss an zwei Punkte einer AP-Gruppe sowie ■ Anschluss an zwei temporäre mit GNSS bestimmte Aufnahme-punkte
Variante 13	Freie Stationierung mit <ul style="list-style-type: none"> ■ Anschluss an 2 × 2 temporäre mit GNSS bestimmte Aufnahme-punkte
Variante 14	Lineare Vermessung mit GNSS-Messung <ul style="list-style-type: none"> ■ Verlängerung der Gebäudeseiten um ca. 10 m und ■ Bestimmung der Flucht-Punkte mit GNSS, Distanzmessung Fluchtpunkt–Gebäudeecke

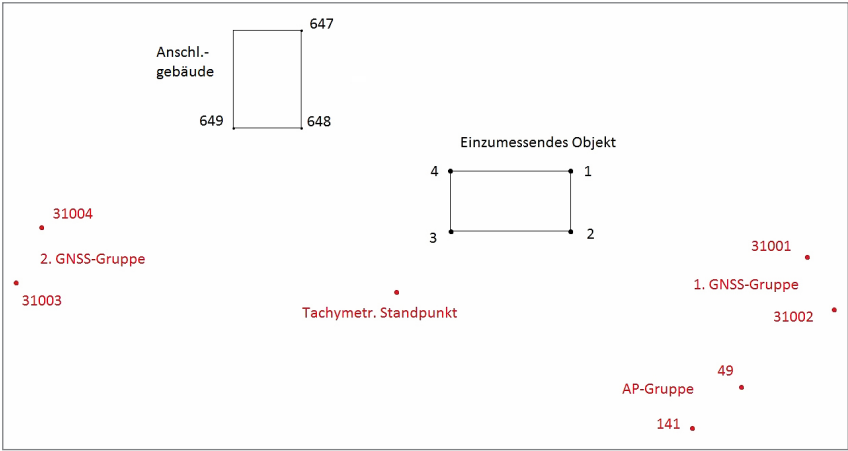


Abb. 5: Schematische Darstellung der Lage der Objektpunkte und der jeweiligen Anschlusspunkte

sonst für einzelne Punkte die Fehlergrenze von 0,40 m zwischen den Aufnahmen nicht eingehalten werden kann.

Da alle Varianten die Genauigkeitsgrenzen einhalten, bleibt noch zu klären, welcher Aufwand für die verschiedenen Varianten zu erwarten ist. Ein Vergleich des Aufwandes führt zu den in Tab. 5 genannten Ergebnissen.

Tab. 5: Zeitvergleich Messanordnungen

Variante	Gesamte Messdauer	Index
V11	1 h	1,00
V12	1 h und 10 min	1,17
V13	1 h und 25 min	1,42
V14	50 min	0,83

Die Variante 13 wird von Seiten der Aufsichtsbehörde neben dem direkten Anschluss an die Aufnahmepunkte als die Standardvariante betrachtet, ist jedoch die am wenigsten wirtschaftliche Kombination und sollte bei Gebäudevermessungen nur als letzte der Möglichkeiten verwendet werden.

3.2.2 Praxisbeispiel Gebäudevermessung: Windenergieanlage

Eine für die Vermessung von Windenergieanlagen (WEA) typische Situation ist in Abb. 6 dargestellt. Die WEA befindet sich auf dem gelb markierten Grundstück. Vor Ort ist regelmäßig folgende Situation vorzufinden:

- Die AP sind teilweise mehr als 500 m vom zu vermessenden Objekt entfernt.
- AP sind zum Teil unzugänglich.
- Sichtverbindungen zu vorhandenen AP sind eingeschränkt
- Die Erkundung von Sichtverbindungen zur den AP ist aufwendig.

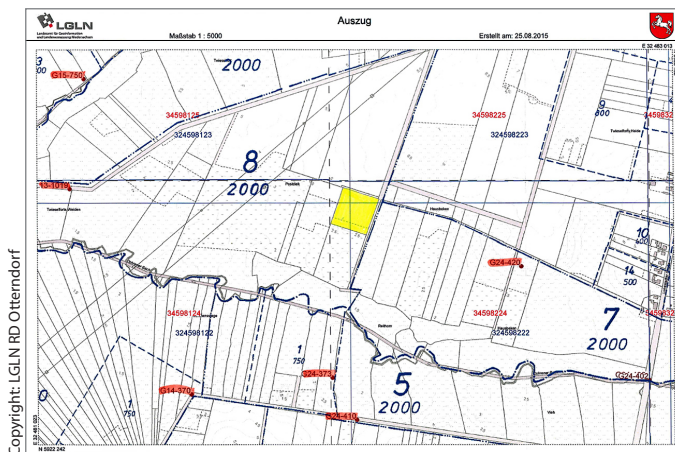


Abb. 6:
Typische Verteilung
Aufnahmepunkte im
Außenbereich

- Die aufzumessende WEA ist frei zugänglich, Sichthindernisse in der Umgebung der WEA bestehen nicht.

Neben dem direkten Anschluss über zwei AP-Punktgruppen mit Hilfe der Freien Stationierung sind die in Tab. 6 genannten hybriden Messanordnungen denkbar.

Tab. 6: Messanordnungen Gebäudevermessung WEA

Variante 21	Freie Stationierung mit <ul style="list-style-type: none"> ■ Anschluss an zwei Punkte je einer AP-Gruppe sowie ■ Anschluss an einen temporären mit GNSS bestimmten Aufnahmepunkt
Variante 22	Polares Anhängen von bekannten Punkten nach Dierks <ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung von drei räumlich verteilten mit GNSS temporären Anschlusspunkten ■ Polares Anhängen auf bekanntem Standpunkt und Richtungsanschluss an zwei bekannte temporäre Aufnahmepunkte
Variante 23	GNSS – lineare Vermessung nach Lambers <ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung von je zwei Hauptpunkten und 2×3 temporären Fluchtpunkten mit GNSS ■ Verlängerung der Fluchten bis zu je drei Objektpunkten ■ Distanzmessung von den Fluchtpunkten bis zu den Objektpunkten
Variante 24	Kombinierte GNSS-Orthogonalaufnahme <ul style="list-style-type: none"> ■ Bestimmung von Anfangs- und Endpunkt einer Linie ■ Je eine Orthogonalaufnahme der Objektpunkte

Zur Verdeutlichung werden die Varianten in den Systemskizzen dargestellt:

- Variante 21: Anschluss an das AP-Netz und einen temporären GNSS-Punkt (Abb. 7)
- Variante 22: Polares Anhängen (Abb. 8)
- Variante 23: GNSS-lineare Vermessung (Abb. 9)
- Variante 24: GNSS-Orthogonalaufnahme (Abb. 10)

Ein Vergleich mit der klassischen Freien Stationierung über je zwei Anschlusspunkte hat für die Varianten 21 und 22 Abweichungen von maximal 0,010 m ergeben, für die Varianten 23 und 24 Abweichungen von ca. 0,020 m. Alle Varianten genügen also den Anforderungen des LiegVermErlasses. Zu beachten bleibt bei der Variante 23 jedoch, dass die Abstände zwischen den Objektpunkten und den Fluchtpunkten nicht mehr als 15 m betragen sollten, da sonst für einzelne Punkte die Fehlergrenze von 0,040 m zwischen den Aufnahmen nicht eingehalten werden kann.

Da alle Varianten die Genauigkeitsgrenzen einhalten, bleibt noch zu klären, welcher Aufwand für die verschiedenen Varianten zu erwarten ist. Ein Vergleich des Aufwandes führt zu in Tab. 7 genannten Ergebnissen

Tab. 7: Zeitvergleich Messanordnungen

Verfahren	Gesamte Messdauer	Index
V21	55 min	1,00
V22	45 min	0,82
V23	1 h und 25 min	1,55
V24	1 h und 10 min	1,27

Die Variante 22 hat sich als wirtschaftlichste Lösung herausgestellt und sollte in vergleichbaren Fällen verwendet werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, Vermessungstrupps zum Beispiel mit einer Leica SmartStation bzw. einer vergleichbaren Lösung auszustatten.

4 Fazit

GNSS ist aus dem Alltag des Vermessungsbüros Ehrhorn nicht mehr wegzudenken. Sowohl die Mitarbeiterzufriedenheit als auch die Wirtschaftlichkeit sind mit der vollständigen Ausrüstung aller Vermessungstrupps mit einer Kombination aus Tachymetern und GNSS-Empfängern deutlich angestiegen.

Literatur

- Anhalt, H.: Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen beim Einsatz von hybriden Messverfahren im Liegenschaftskataster. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), 2012.
- Dierks, R.: Messanordnung mit der Leica SmartStation. Unveröffentlicht, 2011.

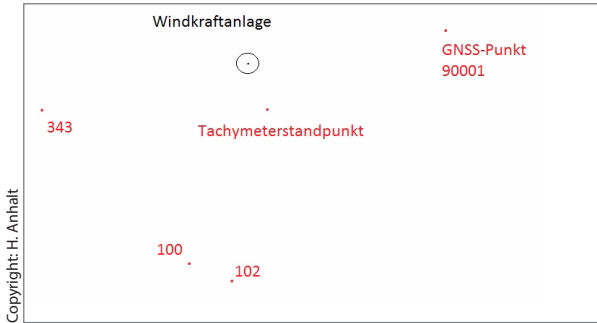


Abb. 7:
Schematische Darstellung der Variante 21

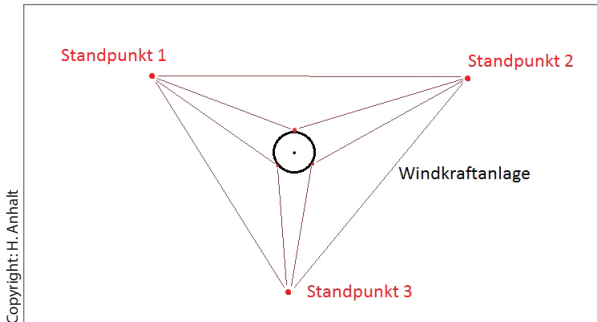


Abb. 8:
Schematische Darstellung der Variante 22

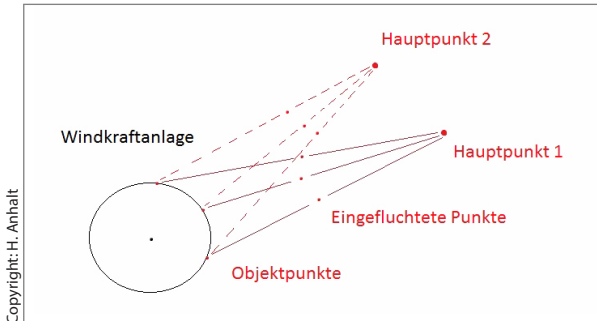


Abb. 9:
Schematische Darstellung der Variante 23

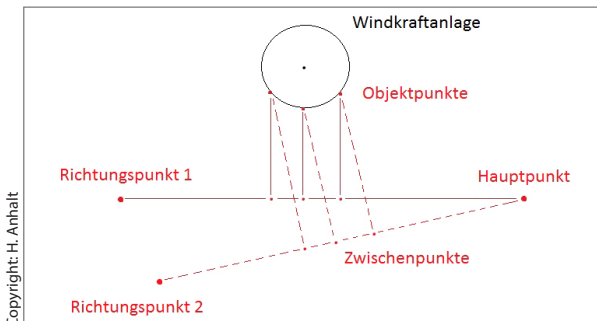


Abb. 10:
Schematische Darstellung der Variante 24

Ehrhorn Vermessung: Qualitätsmanagementhandbuch. Unveröffentlicht, Fassung 01/2017.

Ehrhorn, U.; Rother, F.: Vom QMS nach DIN EN ISO 9002 zum Total Quality Management – 10 Jahre Arbeit an und mit Qualitätsmanagementsystemen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2010, 135. Jahrgang, S. 326–329.

Formelsammlung der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung RdErl. d. MI. v. 1.10.1988.

Hösl, N.: Liegenschaftsvermessungen mit SAPOS®. Dienstbesprechung Aufgabenträger November 2009.

Lambers, B.: SAPOS®-Anwendungen in einem ÖbVI-Büro. DVW-Seminar „Liegenschaftsvermessungen“, Hannover 2008.

LiegVermErlass: Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErlass) vom 18.05.2015 (Nds. MBl S. 683), geändert durch RdErl. v. 28.10.2016 (Nds. MBl. 1088).

Schmidt, J.; Dierks, R.; Ehrhorn, U.: Leica SmartStation im Liegenschaftskataster – Erste Erfahrungen mit einem neuen Messsystem. VDV-Magazin, 5/2008, S. 378–381.

Kontakt

Uwe Ehrhorn | Henning Anhalt | Rüdiger Dierks
Georgstraße 15, 28832 Achim
info@ehrhorn.de
www.ehrhorn.de



Uwe Ehrhorn



Henning Anhalt



Rüdiger Dierks

Von Low-Cost bis High-End: Anwendungspotenzial von OEM-GNSS-Boards

Christian Eling | Lasse Klingbeil | Heiner Kuhlmann

1 Einleitung

Mit der Entwicklung der amerikanischen und russischen Satellitennavigationssysteme GPS (Global Positioning System) und GLONASS (Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema) stehen nun bereits seit vielen Jahren GNSS (Global Navigation Satellite Systems) für 3D-Positionierungen und -Ortungen im Bereich der Vermessung, der Navigation oder der Maschinensteuerung zur Verfügung. Durch die kontinuierliche Modernisierung dieser Systeme und die Entwicklung weiterer GNSS, wie z. B. des europäischen Systems Galileo, des chinesischen Systems BeiDou und des japanischen Systems QZSS, hat sich die ohnehin schon komfortable Situation, was die Qualitätsparameter (z. B. Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit) der Ergebnisse betrifft, für den Nutzer seitdem weiter verbessert.

Grundsätzlich besteht ein Satellitennavigationssystem aus drei Komponenten: Dem Kontrollsegment, dem Satellitensegment und dem Nutzersegment. Die Aufgabe des Nutzersegments ist es dabei, die vielfältigen Daten, die von der GNSS-Infrastruktur geliefert werden, in Dienste und Produkte umzuwandeln, an denen der Nutzer interessiert ist. Die Auswahl eines GNSS-Empfängers ist demnach auch immer mit der geplanten Anwendung verbunden.

Mit den Modernisierungsmaßnahmen des GPS und der Entwicklung neuer Satellitennavigationssysteme sind in den letzten Jahren viele neue Frequenzen, Signale und Dienste hinzugekommen. Zusätzlich steigen die Anzahl an Herstellern von GNSS-Empfängern und das Angebot an verschiedenen Empfänger-typen. Entsprechend der zunehmenden Möglichkeiten wird auch die Entscheidung nach der Wahl des richtigen Empfängers immer komplexer.

In diesem Beitrag wird das Anwendungspotenzial von OEM-GNSS-Boards erläutert. Um die verschiedenen Möglichkeiten und die Kriterien für die Auswahl eines OEM-Empfängers etwas transparenter zu gestalten, soll in diesem Beitrag ein grober Überblick über die Hersteller von OEM-GNSS-Empfängern gegeben werden. Des Weiteren werden die relevanten Parameter für die Auswahl eines solchen Produktes beschrieben. Anschließend wird eine kleine Auswahl an verschiedenen OEM-Empfängern im Praxistest verglichen. Dabei wird explizit auch auf low-cost-Produkte eingegangen, die als Multi-GNSS-Empfänger zukünftig eine größere Rolle spielen könnten.

2 OEM-GNSS-Empfänger

In diesem Beitrag soll zwischen zwei Empfängertypen unterschieden werden: (1) Endnutzerprodukt und (2) OEM-Empfänger. Die Abkürzung OEM steht dabei für Original Equipment Manufacturer (OEM). Dabei handelt es sich um Komponenten, die von den Herstellern von Endnutzerprodukten verarbeitet werden. Bei OEM-Empfängern handelt es sich um Boards, Chipsätze oder Module. Im Folgenden wird dies mit der Bezeichnung OEM-Board zusammenge-

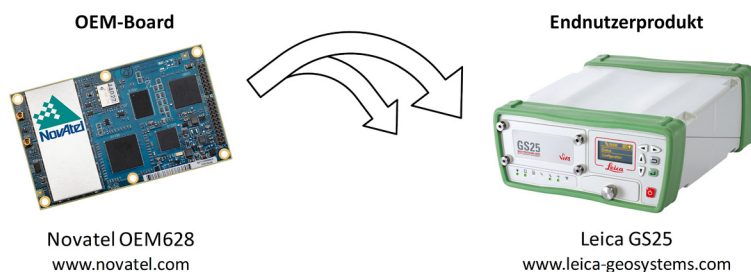


Abb. 1: OEM-Board (links) und Endnutzerprodukt (rechts). Die hier dargestellte Kombination ist nur beispielhaft gewählt.

fasst. Am Beispiel eines GNSS-Empfängers ist ein OEM-Board ein Zwischenprodukt, das in der Regel die tatsächliche Empfangseinheit darstellt (Abb. 1). D. h., ein Endnutzerprodukt beinhaltet als Empfangseinheit ein OEM-Board, das ggf. von einem anderen Hersteller produziert wird. Das Endnutzerprodukt unterscheidet sich vom OEM-Produkt dabei dadurch, dass es über ein solides, meist wasserfestes Gehäuse, eine Stromversorgung, Stecker für Schnittstellen sowie ein benutzerfreundliches Interface verfügt.

Seit einigen Jahren werden OEM-Produkte nicht mehr nur noch von Herstellern von Endnutzerprodukten sondern immer häufiger auch von Endnutzern selbst eingesetzt. Beispiele für die Verwendung von OEM-Boards sind in (Takasu und Yasuda 2009, Bäumker et al. 2013, Eling et al. 2014) zu finden. Die fehlenden Komponenten, wie die Stecker, die Stromversorgung und das Interface müssen vom Endnutzer dann in Eigenregie realisiert werden. Trotz dieses Aufwandes gibt es Gründe, die für die Verwendung von OEM-Produkten sprechen.

Die wesentlichen Vorteile von OEM-Boards sind, dass sie im Vergleich zu Endnutzerprodukten einen geringeren Stromverbrauch aufweisen, kleiner und leichter sind und vor allem mehr Flexibilität in der Anwendung bieten. Dies gilt nicht nur für den Einbau in einem System, sondern auch für die Konfiguration des Empfängers. Oftmals stehen bei OEM-Empfängern mehr Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung. Sie erlauben damit eine individuellere Konfiguration

im Vergleich zu Endnutzerprodukten. Für die meisten OEM-Boards stehen on-board Softwarelösungen für verschiedene Auswertestrategien (z. B. RTK-GNSS) als Option zur Verfügung. Dem Käufer wird dann meist die Entscheidung überlassen, ob er diese Optionen gegen einen Aufpreis erwerben oder nur auf Rohdatenebene (z. B. Pseudorange und Trägerphasen) arbeiten möchte.

Nachteile sind, dass OEM-Boards über keine Stecker für Schnittstellen, wie z. B. USB, RS232, Ethernet oder CAN verfügen und die Steckverbindungen, genau wie die Stromversorgung, vom Nutzer selbst realisiert werden müssen. Des Weiteren wird ein OEM-Empfänger ohne Gehäuse geliefert. Dementsprechend ist er weder vor Dreck, Wind, Wasser noch vor elektromagnetischen Störquellen geschützt. Vor allem letztere können auch unter guten Wetterbedingungen dazu führen, dass keine GNSS-Signale empfangen werden können. Je nach Anwendungsbereich des Empfängers muss ein eigenes Gehäuse gebaut werden.

2.1 Anwendungsbeispiel: Direkte Georeferenzierung leichter UAVs in Echtzeit

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist für den Nutzer von OEM-GNSS-Boards mit einem zusätzlichen Aufwand im Vergleich zu Endnutzerprodukten zu rechnen. Damit stellt sich also die Frage, für welche Anwendungen die zuvor genannten Vorteile der OEM-Boards im Vergleich zu Endnutzerprodukten entscheidend sind.

Am häufigsten werden OEM-GNSS-Boards für die Entwicklung eigener GNSS- oder Multisensorsysteme für Mobile-Mapping-Anwendungen oder Monitoring-aufgaben eingesetzt. Besonders für die Verwendung auf kleinen und leichten Plattformen sowie für die Umsetzung von kostengünstigen Lösungen bieten sich OEM-Produkte an. In den letzten Jahren wurden vor allem im UAV-Bereich vermehrt OEM-GNSS-Boards eingesetzt. Da für UAVs Gewichtsobergrenzen von 5 bis 10 kg einzuhalten sind und zudem Platz- und Stromversorgungslimitationen vorliegen, sollten GNSS- und Multisensorsysteme für UAVs möglichst klein und leicht sein. Die Entwicklungen im OEM-Segment spielen für die Verwendbarkeit von UAVs für vermessungstechnische Zwecke deshalb eine entscheidende Rolle (Eling et al. 2016).

Ein Beispiel für die Realisierung eines Multisensorsystems zur hochgenauen Positions- und Orientierungsbestimmung leichter UAVs in Echtzeit ist in [Abb. 2](#) zu sehen. Dieses System verfügt neben einer IMU (Inertial Measurement Unit), Magnetfeldsensoren, einem Funkmodul und einer Echtzeit-Recheneinheit auch über ein geodätisches OEM-GNSS-Board (Novatel OEM 615) sowie über einen low-cost OEM-Chipsatz (Ublox LEA6T). Aufgrund der geringen Größe ($10,2 \times 11,0 \times 4,5$ cm) und des geringen Gewichts (ca. 240 g) ist das System auf sogenannten Mikro-UAVs, die eine Gewichtsobergrenze von 5 kg aufweisen,

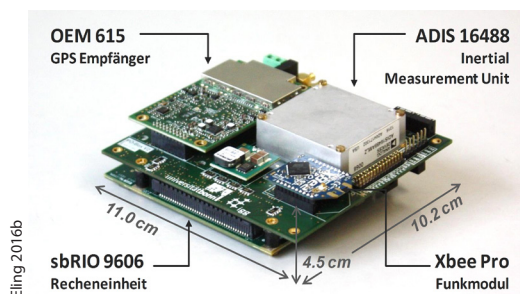


Abb. 2: Darstellung eines Multisensorsystems zur Positions- und Orientierungsbestimmung leichter UAVs in Echtzeit

einsetzbar. Unter Verwendung von Algorithmen zur Fusion von GNSS-Trägerphasen- und Inertialsensorbeobachtungen werden unter guten GNSS-Bedingungen Genauigkeiten von <5 cm in der Positions- und $<0,5$ deg in der Orientierungsbestimmung eines UAVs während der Flüge erreicht (Eling 2016).

3 Marktübersicht OEM-Empfänger

Ein guter Überblick über den Markt für GNSS-Empfänger liefert der jährlich erscheinende *Receiver Survey* der Zeitschrift *GPS World* (GPS World 2016). Im Jahr 2016 wurden in dieser Übersicht 438 GNSS-Empfänger von 45 Herstellern aufgelistet. Neben der Größe, dem Gewicht und der Stromversorgung werden dort unter anderem die verfügbaren Signale, die Genauigkeiten, die Einsatzgebiete sowie die Art des Produkts angegeben. Von den insgesamt 438 Empfängern handelt es sich in dem Bericht aus dem Jahr 2016 um 183 Endnutzerprodukte (41,8 %), 202 OEM-Empfänger (46,1 %), 21 Empfänger, für die beides gilt (4,8 %) und 32 Andere (7,3 %). Im Vergleich zu den Jahren zwischen 2011 und 2016 hat sich diese prozentuale Verteilung kaum verändert, d. h. der Marktanteil an OEM-Produkten ist in den letzten Jahren kaum gestiegen.

In Tab. 1 sind zwölf verschiedene Hersteller von OEM-Empfängern zu sehen. Diese sind fast alle auch im Receiver Survey der GPS World aus dem Jahr 2016 zu finden. Da es aus Platzgründen hier nicht möglich ist, alle OEM-Empfänger der verschiedenen Hersteller im Detail zu präsentieren, wird in Tab. 1 jeweils aufgelistet, welche Optionen die einzelnen Hersteller bieten. Demnach befinden sich bei fast allen hier genannten Herstellern mittlerweile Multi-GNSS-Empfänger im Angebot. Einige der Hersteller produzieren bislang jedoch keine Multi-Frequenz-Empfänger. Die Hersteller, die ausschließlich Einfrequenz-Empfänger anbieten, sind in der Regel zum low-cost-Segment zu zählen, wie beispielsweise die Firma *Ublox*. Der erste low-cost-Empfänger, der mehrere Frequenzen empfängt wird seit Anfang 2017 von der Firma *Swift Navigation* mit dem *Piksi Multi* für einen Preis von 600 Dollar vertrieben.

Zu den fünf großen Anbietern geodätischer OEM-Boards gehören die Firmen *Hemisphere*, *Javad*, *Novatel*, *Septentrio* und *Trimble* (alphabetisch sortiert).

Tab. 1: Auflistung der Hersteller von OEM-GNSS-Boards

Hersteller	Land	Multi-GNSS	Multi-Frequenz	Multi-Antennen	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	SBAS
ComNav	CHN	X	X	X	X	X	X	(X)	(X)	X
Hemisphere	USA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Javad	USA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Novatel	CAN	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NVS-Techn.	CHE	X	-	X	X	X	-	X	-	X
Septentrio	BEL	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Skytraq	TWN	X	-	-	X	-	X	-	X	X
Swift Nav.	USA	(X)	X	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)	X
Topcon	JPN	X	X	X	X	X	-	-	X	X
Trimble	USA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ublox	CHE	X	-	-	X	X	X	X	X	X
Unicore Co.	CHN	X	X	X	X	X	X	-	-	-

Dies sind auch die einzigen Firmen, die alle in [Tab. 1](#) aufgelisteten Optionen bei OEM-Boards anbieten.

3.1 Relevante Parameter

Im nächsten Abschnitt werden einige Beispiele von auf dem Markt erhältlichen OEM-Boards vorgestellt (siehe [Tab. 2](#)). Die dort aufgelisteten Angaben sind den Datenblättern entnommen, wobei auf die Quellen dieser Angaben verzichtet wird, da die Datenblätter mit Hilfe einer Suchmaschine und dem jeweiligen Modellnamen einfach zu finden sein sollten.

Um zwischen einzelnen Produkten unterscheiden zu können, werden in diesem Abschnitt nun kurz die relevanten Parameter erläutert:

Kategorie Die GNSS-Empfänger werden verschiedenen Kategorien zugeordnet. Dabei wird jeweils angegeben, ob es sich um Single- oder Multi-GNSS- (SG oder MG) sowie Single-Frequenz- oder Multi-Frequenz- (SF oder MF) Empfänger handelt. Die Verwendung mehrerer Frequenzen ist vor allem bei langen Basislinien (>5–10 km) zur Korrektur der Ionosphäre notwendig (Hofmann-Wellenhof et al. 2008). Bei kurzen Basislinien kann darauf verzichtet werden, so

dass hier Single-Frequenz-Beobachtungen im Grunde ausreichen. Je nach Anwendungsbereich des Empfängers, ob statisch oder kinematisch, spielt die Unterscheidung, ob es sich um einen Single-Frequenz- oder einen Multi-Frequenz-Empfänger handelt, jedoch auch bei kurzen Basislinien eine wichtige Rolle. Der Grund dafür ist, dass die Konvergenzzeit der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung bei Multi-Frequenz-Empfängern in der Regel deutlich kürzer ausfällt, als bei Single-Frequenz-Empfängern.

Größe, Gewicht und Energieverbrauch Die mechanischen Parameter Größe und Gewicht sowie die benötigte Energie sind maßgeblich für die Einsetzbarkeit des OEM-Boards. Vor allem für den Einsatz auf kleinen und leichten Trägerplattformen (wie z. B. UAVs) spielen diese Parameter eine wichtige Rolle.

Kanäle Die Anzahl der Kanäle gibt an, wie viele Satelliten der Empfänger gleichzeitig tracken kann. In der Regel wird pro Satellit und Frequenz ein Kanal benötigt. Für MG/MF-Empfänger sollten deshalb deutlich mehr Kanäle zur Verfügung stehen, als für SG/SF-Empfänger. Gute MG/SF-Empfänger verfügen mittlerweile über mehr als 100 Kanäle. Moderne geodätische MG/MF-Empfänger weisen teilweise über 500 Kanäle auf.

Anzahl Antennen Seit einigen Jahren muss zwischen Single- und Multi-Antennen-Boards unterschieden werden. Bei Multi-Antennen-Boards befinden sich mindestens zwei Antennenanschlüsse (Dual-Antenna) auf dem Empfänger. Damit stehen die Signale von mehreren Antennen gleichzeitig zur Verfügung. Diese Option ist vor allem für die Orientierungsbestimmung mit GNSS über kurze Basislinien auf einem mobilen Objekt gedacht.

Signale In einigen Datenblättern werden die Codes und die Frequenzen angegeben, die der jeweilige Empfänger in der Lage ist zu empfangen. Oftmals werden nur die Frequenzen der jeweiligen GNSS angegeben, die zur Verfügung stehen.

Genauigkeit Meist werden in den Datenblättern horizontale und vertikale Positionsgenauigkeiten für verschiedene Auswertestrategien angegeben: Single Point Positioning (SPP), Differential GPS (DGPS), Real-time Kinematic (RTK). Dabei handelt es sich um die Auswertestrategien, die auf den Boards zur Verfügung stehen. Bei den Genauigkeitsangaben werden in der Regel RMS (Root Mean Square)-Werte genannt. Diese geben einen Bereich an, innerhalb dessen die berechnete Position entsprechend der jeweiligen Auswertestrategie unter idealen Bedingungen (auf einem freien Feld, gute Satellitengeometrie, geringe Ionosphärenaktivität, keine Mehrwegeeffekte, kurze Basislinie) mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68 % (1σ) liegen sollte. Es wird dabei keine Unterscheidung zwischen Richtigkeit und Präzision vorgenommen. In den nachfolgenden Tabellen beschränken wir uns hier auf die Angabe der horizontalen Positionsgenauigkeit. Da die Positionsgenauigkeit bei relativen Positionsbestimmungen von der Basislinienlänge abhängt, werden zu den Genauigkeitsanga-

ben des RTK-GNSS jeweils ppm-Werte genannt, die eine Distanzabhängigkeit ausdrücken.

Neben der Positionsgenauigkeit werden in der Regel auch Genauigkeitswerte für die Zeit angegeben. Diese liegen meist im Bereich zwischen 5 und 50 ns. Genauigkeiten für Orientierungswinkel werden jeweils für Multi-Antennen-Boards genannt, wobei zwischen Heading (Kurswinkel) und Pitch/Roll (Nick-/Rollwinkel) unterschieden wird. Die Genauigkeitsangaben für die Orientierungswinkel sind zudem abhängig von der Distanz zwischen den beiden Antennen einer Basislinie und werden deshalb pro Meter Basislinienlänge angegeben.

TTFF (Time To First Fix) Unter den Begriffen *Cold Start*, *Warm Start* und *Reacquisition* wird die Zeit angegeben, die der Empfänger benötigt, um nach dem Einschalten oder nach einer Signalunterbrechung eine Position zu bestimmen (Time To First Fix). Bei einem *Cold Start* sind dazu weder der Almanach, noch Ephemeriden, eine Näherungsposition oder die Zeit bekannt. Typische Werte für einen *Cold Start* liegen zwischen 45 s und wenigen Minuten. Für einen *Warm Start* stehen nach dem Einschalten der Almanach, evtl. kürzlich empfangene Ephemeriden, eine Näherungsposition und eine aktuelle Zeit zur Verfügung. Die Dauer bis zur ersten vom Empfänger bestimmten Position verkürzt sich damit im Vergleich zum *Cold Start* etwas. Typische Werte für einen *Warm Start* liegen zwischen 30 und 60 s. Unter dem Begriff *Reacquisition* wird die Zeit verstanden, die der Empfänger nach einer kurzen Signalunterbrechung von etwa einer Minute benötigt, um wieder eine Position zur Verfügung stellen zu können. Sehr gute Werte liegen bei 0,1 s, meist sind sie im Bereich von 1 bis 3 s.

Raten Bei den Datenraten, die der Empfänger bereitstellen kann, wird üblicherweise zwischen den Messungen (z. B. Pseudoranges und Trägerphasen) und den Parametern (z. B. PVT (Position, Velocity, Time) und ggf. Orientierungen für PNT-Lösungen (Positioning, Navigation and Timing)) unterschieden. Gute Empfänger stellen Messungen und Parameter mittlerweile mit Raten von bis zu 50 bis 100 Hz zur Verfügung.

Interfaces Die Anzahl an verfügbaren Schnittstellen sowie die Schnittstellentypen sind für die Anwendung eines Empfängers von enormer Bedeutung. Meist werden serielle Schnittstellen für die Übertragung von Daten und eine USB-Schnittstelle für die Empfängerkonfiguration verwendet. Einige Empfänger sind zusätzlich mit schnelleren Ethernet-Schnittstellen oder mit CAN-Schnittstellen ausgestattet.

Protokolle Nicht alle Empfänger unterstützen jeden Standard an Protokollen für die Übertragung von Daten. Typischerweise stehen verschiedene RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services)-Formate für RTK-Anwendungen, das NMEA (National Marine Electronics Association)-Datenformat sowie teilweise verschiedene CMR (Compact Measurement Record)-Protokolle zur Verfügung. Die Verfügbarkeit verschiedener Standards für die Übertragung

von Daten ist oftmals eine wichtige Grundvoraussetzung für die Einbindung eines OEM-Boards in ein bestehendes System.

3.2 Vergleich der Parameter verschiedener OEM-Boards

In Tab. 2 sind die relevanten Parameter für eine kleine Auswahl an OEM-Boards und -Chipsätzen dargestellt. Dabei handelt es sich um GNSS-Empfänger verschiedener Preisklassen und verschiedener Kategorien. Die Empfänger der Firma Swift Navigation und der Firma Ublox sind mit Kosten von einigen Hundert Euro oder sogar weniger dem low-cost-Segment zuzuordnen. Die anderen Empfänger sind geodätische GNSS-Empfänger mit Kosten von mehreren Tausend Euro.

Der erste in Tab. 2 genannte Empfänger (Hemisphere P306) ist ein typischer Multi-Frequenz-Empfänger, der Beobachtungen von allen GNSS zur Verfügung stellt. Bei dem zweiten Empfänger (Novatel OEM617D) handelt es sich um ein Beispiel für ein Dual-Antenna-Board. Bei diesem Empfänger besteht also die Möglichkeit zwei Antennen anzuschließen, so dass zusätzlich zur Positionsbestimmung auch eine Orientierungsbestimmung mit einer kurzen Basislinie durchgeführt werden kann. Die Besonderheit des dritten OEM-Boards ist, dass dieses Produkt speziell für die Verwendung auf UAVs entwickelt wurde. Zusätzlich zum GNSS-Empfänger verfügt dieses OEM-Board über eine Platine zur Zeitsynchronisation zwischen dem GNSS-Empfänger und den Bildaufnahmen einer externen Digitalkamera. Bei den letzten beiden in Tab. 2 genannten Empfängern handelt es sich jeweils um low-cost-Produkte, wobei das Piksi Multi von Swift Navigation 600 Dollar und der M8-Chipsatz von Ublox unter 100 Euro kosten. Das Piksi Multi ist dabei das erste Multi-Frequenz OEM-Board dieser Preisklasse. Da es bis auf das GPS derzeit für alle weiteren GNSS lediglich vorbereitet ist, wird es hier unter der Kategorie SG/MF geführt. Sowohl das Piksi Multi als auch der Ublox-Chip stellen Rohdaten (Pseudoranges und Trägerphasen) jeweils nur über ein herstellerspezifisches Binärformat zur Verfügung.

4 Empirischer Vergleich verschiedener OEM-Boards

In Tab. 2 sind die aus den Datenblättern entnommenen Informationen für fünf verschiedene OEM-Boards zusammengefasst. Im Folgenden sollen nun drei OEM-Boards empirisch miteinander verglichen werden. Dazu wurden Messungen unter verschiedenen GNSS-Bedingungen durchgeführt. Bei den zu vergleichenden Empfängern handelt es sich um den Single-Frequenz GPS-Chipsatz Ublox LEA6T, das Multi-Frequenz GNSS-OEM-Board OEM 615 der Firma Novatel und das Multi-Frequenz GNSS-OEM-Board Eclipse P303 der

Tab. 2: Vergleich verschiedener OEM-Boards und -Chipsätze. Die Angaben entstammen den Datenblättern der einzelnen Produkte. Diese sind auf den Webseiten der jeweiligen Hersteller verfügbar.

Hersteller	Hemisphere	Novatel	Septentrio	Swift Nav.	Ublox
Modell	P306	OEM 617D	AsteRx-m UAS	Piksi Multi	C94-M8P
Kategorie	MG/MF	MG/MF	MG/MF	SG/MF	MG/SF
Größe [mm]	72 × 41 × 13	71 × 46 × 11	70 × 47,5	71 × 48 × 12	75 × 55 × 17
Gewicht [g]	< 23	24	37	20	na
Energie	3,3 V, 3,2 W	3,3 V, 2,1 W	6,0 V, 0,7 W	5,0 V, 3,0 W	2,7 V/na
Kanäle	372	120	132	na	72
Antennen	1	2	1	1	1
Signale					
GPS	L1, L2	L1, L2, L2C	L1, L2	L1, L2	L1
GLONASS	L1, L2	L1, L2	L1, L2	(L1, L2)	L1
BeiDou	B1, B2, B3	B1, B2	–	(B1, B2)	B1
Galileo	E1, E5b	E1, E5b	–	(E1, E5b)	E1
QZSS	L1, L2C	ja, na	–	(L1, L2)	L1
SBAS	ja	ja	ja	ja	ja
Genauigkeit					
SPP/DGPS/ RTK [m]	1,2 / 0,3 / 0,01 + 1 ppm	1,2 / 0,4 / 0,01 + 1 ppm	1,2 / 0,4 / 0,006 + 0,5 ppm	1,2 / 0,3 / 0,015 + 1 ppm	2,5 / na / 0,025 CEP
Zeit [ns]	20	20	20	20	30
Orient. [°/m]	–	0,16/na	–	–	–
TTFF [s]					
Cold Start	< 60	< 50	< 45	< 45	< 25
Warm Start	< 30	< 35	< 20	< 30	na
Reacquis.	< 10	< 1	1,2	< 2	na
Raten [Hz]					
Messungen	20	20	20	10	10
PVT	20	20	10	10	5
Interfaces	4 × RS232, 2 × USB	3 × RS232, 1 × USB, 2 × CAN	3 × RS232, 1 × USB, SD-Karte	2 × RS232, 2 × USB, 1 × Ethernet, 2 × CAN	1 × UART, 1 × USB
Protokolle	RTCM 2.x, 3.x, CMR, NMEA	RTCM 2.x, 3.x, CMR, NMEA	RTCM 2.x, 3.x, CMR, CMR+, NMEA	NMEA, Swift Binary	NMEA, RTCM, UBX

Firma Hemisphere. Im Gegenteil zu den Multi-Frequenz-Empfängern verfügt der Ublox-Chipsatz über keine onboard RTK-Prozessierung. Die beiden Multi-Frequenz-Empfänger sind entsprechend der Angaben in den Datenblättern grundsätzlich als vergleichbar anzusehen.

4.1 Versuchsaufbau und grober Vergleich der Genauigkeiten

Um die Empfänger miteinander vergleichen zu können, wurden sie mit einem Antennen-Splitter an der gleichen Antenne angeschlossen, so dass sie die gleichen Voraussetzungen für die Erzeugung von GNSS-Beobachtungen haben (siehe Abb. 3). Für den Ublox-Empfänger wurde hier ein Evaluation-Kit eingesetzt, bei dem der Chipsatz zum Testen bereits auf einer Platine mit Steckern und Stromversorgung verbaut ist. Die beiden Zwei-Frequenz OEM-Boards wurden

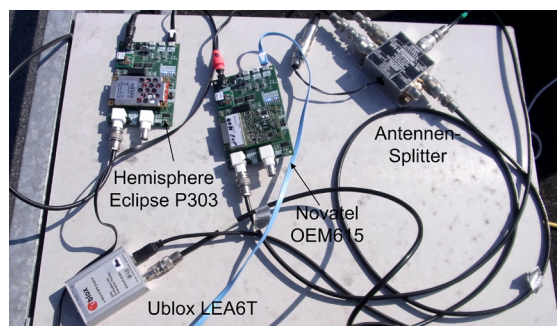


Abb. 3: Messaufbau zum Vergleich verschiedener GNSS-Empfänger

für die Messungen auf zwei eigens entwickelten Platinen angebracht, mittels derer die Stromversorgung und die Schnittstellen der Empfänger realisiert werden.

Dass mit low-cost Single-Frequenz GPS-Empfängern grundsätzlich vergleichbare Genauigkeiten (Zentimeter bis Millimeter) erreicht werden können, wie mit

geodätischen Multi-Frequenz-GNSS-Empfängern, ist bereits seit einigen Jahren bekannt (Schwieger und Gläser 2005, Zhang und Schwieger 2013). Um das Genauigkeitsniveau für die hier vorliegenden Empfänger zu untersuchen, wurden zunächst einmal statische Rohdaten für eine Referenzstation und die zu testenden Empfänger unter guten GNSS-Bedingungen (relativ freie Himmelssicht, kaum Multipath, sehr kurze Basislinie (<10 m)) aufgezeichnet. In Abb. 4 ist ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Empfänger auf Koordinatenebene (Up-Komponente) zu sehen. Die gesammelten Rohdaten wurden dazu jeweils in Rinex-Dateien exportiert und mit der OpenSource Software RTKLIB (Takasu und Yasuda 2009) zusammen mit den Daten der Referenzstation als Basislinie ausgewertet. Für alle Empfänger wurden dabei die L1-GPS-Beobachtungen sowie die gleichen Einstellungen in der Software verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Empfänger trotz sehr unterschiedlicher Preisklassen unter guten GNSS-Bedingungen vergleichbare Genauigkeiten lie-

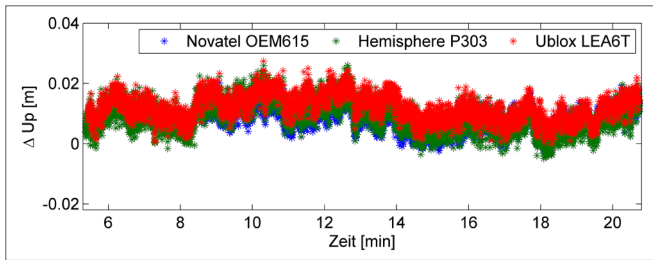


Abb. 4:
Vergleich der
Up-Komponente
einer Basislinie,
die zeitgleich mit
verschiedenen
OEM-Boards ge-
messen wurde.

fern. Die Differenzen der einzelnen Lösungen liegen für die gesamte Beobachtungszeit im geringen Millimeter-Bereich. Für kurze Basislinien, bei denen mit Single-Frequenz-Beobachtungen gearbeitet werden kann, ist demnach kein signifikanter Unterschied in den Koordinatengenauigkeiten der verwendeten low-cost- und high-end-Empfänger festzustellen, wenn die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasenbeobachtungen zu ganzzahligen Werten fixiert sind.

4.2 Signalunterbrechungen und Mehrdeutigkeitslösung

Für statische Anwendungen spielt die Dauer der Mehrdeutigkeitslösung keine so wesentliche Rolle, da in der Regel ausreichend viel Zeit zur Verfügung steht, um die richtigen Mehrdeutigkeitsparameter zu finden. Für kinematische Anwendungen, d. h. für die Positionsbestimmung mobiler Objekte, wie z. B. UAVs, oder RTK-Vermessungen ist dies anders. Aufgrund von Abschattungen der Signale kommt es bei kinematischen Anwendungen häufig zu Signalunterbrechungen. Diese erfordern jeweils eine neue Fixierung der Mehrdeutigkeiten. Um nach einer Signalunterbrechung möglichst schnell wieder cm-genaue Positionen liefern zu können, sollten die GNSS-Empfänger zwei Voraussetzungen mitbringen: 1) Die abgeschatteten Signale sollten nach einer Signalunterbrechung möglichst schnell wieder zur Verfügung stehen. 2) Die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasenbeobachtungen sollten innerhalb weniger Sekunden gelöst werden können. Die Frage, die sich für kinematische Anwendungen stellt ist demnach: Wie gehen die verschiedenen Empfänger mit Signalunterbrechungen um und was folgt daraus für die Mehrdeutigkeitslösung? Um diese Frage zu beantworten wurden weitere statische Testmessungen mit dem gleichen Versuchsaufbau wie zuvor durchgeführt, wobei die Antenne der drei zu testenden Empfänger hierbei immer wieder abgeschattet wurde.

4.2.1 Reinitialisierung von GPS-Signalen nach Abschattungen

In [Tab. 3](#) ist dargestellt, wie viel Zeit die jeweiligen Empfänger durchschnittlich benötigen, um die Signale der sichtbaren Satelliten nach einer Abschattung wie-

Tab. 3: Vergleich der Reinitialisierungszeiten der GPS-Satellitensignale nach Signalunterbrechungen für verschiedene Empfängertypen und Frequenzen

Empfänger	LEA 6T (L1)	OEM 615 (L1)	P303 (L1)	OEM 615 (L2)	P303 (L2)
# Sat (vorher)	10,95	10,47	10,37	10,32	10,05
# Sat (nachher)	10,63	10,32	10,26	10,21	10,05
Reinitialisierung					
Mittelwert [s]	0,99	11,51	4,95	12,22	14,52
Median [s]	0,90	6,00	4,90	11,30	13,60

der zu reinitialisieren. Im Vergleich zu der Reacquisition-Angabe im Datenblatt wurde hier also nicht analysiert, wie lange es dauert, bis der Empfänger wieder eine Position ausgibt, sondern wie lange es dauert, bis alle zuvor sichtbaren Satelliten wieder verfügbar sind. Dazu wurde die Empfangsantenne 19mal für 10 s künstlich abgeschattet. Neben den Reinitialisierungszeiten ist in Tab. 3 auch die durchschnittliche Anzahl der sichtbaren Satelliten vor und nach den Abschattungen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der low-cost-Empfänger von Ublox durchschnittlich mehr Satellitensignale ausgibt, als die geodätischen Empfänger von Novatel und Hemisphere. Die Reinitialisierungszeiten sind zudem auch sehr unterschiedlich. Während der Ublox-Empfänger durchschnittlich lediglich 1 s benötigt, um die Signale aller zuvor sichtbaren Satelliten wieder zur Verfügung zu stellen, dauert dies für den Novatel-Empfänger mit etwa 6 s für die L1-Frequenz und 11,3 s für die L2-Frequenz des GPS deutlich länger. Im Vergleich zu dem Novatel-Board benötigt der Hemisphere-Empfänger für die Reinitialisierung des GPS-L1-Signals mit etwa 4,9 s weniger Zeit, wohingegen die Reinitialisierung des L2-Signals mit ca. 13,6 s nochmals länger dauert. Zwischen den einzelnen Empfängern sind demnach deutliche Unterschiede zu erkennen, was den Umgang mit Signalunterbrechungen angeht.

Der Grund für die schnellere Signalaquisition und die größere Anzahl an sichtbaren Satelliten beim Ublox-Empfänger ist, dass es sich bei diesem Empfänger um einen sogenannten high-sensitivity-Empfänger handelt (Wieser 2006). Durch die größere Signalverstärkung werden mit diesen low-cost-Empfängern mehr Signale schneller empfangen. Dies führt allerdings auch zu einer größeren Herausforderung in der Mehrdeutigkeitslösung, da systematische Abweichungen einzelner Signale die Fixierung der Mehrdeutigkeiten aller Beobachtungen verhindern kann (Eling 2016).

4.2.2 Dauer der Mehrdeutigkeitslösung für Trägerphasenbeobachtungen

In einem weiteren Test wurde erneut eine künstliche Abschattung der Empfangsantenne der drei zu testenden Empfänger erzeugt. Im Vergleich zu dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Test wurde die Antenne dabei mit 30 s nun jedoch etwas länger abgeschattet. Zusätzlich wurde zwischen den Abschattungen auch die Empfangszeit länger gewählt, so dass in Bereichen von vier bis fünf Minuten geprüft werden konnte, wie die Daten der einzelnen Empfänger sich unter guten GNSS-Bedingungen mit sieben bis acht sichtbaren GPS-Satelliten für die Fixierung der Mehrdeutigkeiten eignen. Dazu wurden jeweils sehr kurze Basislinien (<10 m) zu einer Referenzstation ausgewertet. Als Auswertesoftware wurde erneut die OpenSource Software RTKLIB verwendet, die für die Mehrdeutigkeitslösung die LAMBDA-Methode (Teunissen 1995) nutzt. Die Float-Lösung erfolgt dabei in einem Extended Kalman Filter. Wie auch im vorherigen Test wurden für alle drei Datensätze die gleichen Softwareeinstellungen gewählt, wobei für die beiden geodätischen Empfänger L1+L2-Auswertungen durchgeführt wurden, während für den low-cost Single-Frequenz Empfänger von Ublox lediglich L1-GPS-Beobachtungen zur Verfügung standen.

In Tab. 4 sind die Ergebnisse der Tests zur Mehrdeutigkeitslösung zu sehen. Dabei sind jeweils die Zeiten in Sekunden bis zur ersten Fixierung nach einer Signalunterbrechung dargestellt. Insgesamt wurden elf Abschattungen durchgeführt. Der Vergleich zwischen den Multi-Frequenz-Empfängern von Novatel und Hemisphere zum low-cost Single-Frequenz Empfänger von Ublox macht den Vorteil der zweiten Frequenz deutlich. Während die durchschnittliche Zeit (Median) für die Fixierung der Mehrdeutigkeiten der Daten des Ublox-Empfängers bei ca. 71,1 s liegt, sind die Werte für den Novatel- und den Hemisphere-Empfänger mit 3,2 s und 5,6 s erheblich kleiner. Des Weiteren ist für den Ublox-

Tab. 4: Dauer bis zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten nach einer Signalunterbrechung für drei verschiedene Empfänger

Versuch	1 [s]	2 [s]	3 [s]	4 [s]	5 [s]	6 [s]	7 [s]	8 [s]	9 [s]	10 [s]	11 [s]	Me- dian [s]
LEA 6T (L1)	–	43,8	45,8	71,5	–	70,6	–	207,6	129,6	–	–	71,1
OEM 615 (L1+L2)	–	0,3	0,5	1,3	0	42,0	5,7	5,3	12,2	1,9	4,4	3,2
P303 (L1+L2)	5,7	3,3	0	3,6	14,1	66,0	5,7	4,3	6,1	4,4	5,6	5,6

Empfänger im vierten Versuch eine fehlerhafte Fixierung aufgetreten, so dass nicht nur die Dauer bis zur Fixierung, sondern auch die Zuverlässigkeit der Lösung schlechter ausfällt.

5 Test des Low-Cost RTK-Kits C94-M8P der Firma Ublox

Die ersten low-cost RTK-Systeme gibt es seit 2015/16. Beispiele sind das Piksi von Swift Navigation und das C94-M8P Paket von Ublox. Die Kosten für diese Systeme liegen im Bereich weniger 100 Euro. Damit sind sie im Vergleich zu teuren geodätischen RTK-Systemen (10.000–20.000 Euro) deutlich günstiger und sollen RTK-Technologie für den Massenmarkt tauglich machen. Aufgrund des geringen Gewichts und der kleinen Ausmaße eignen sie sich zudem besonders für die präzise direkte Georeferenzierung leichter UAVs.

Im Vergleich zu dem Vorgängermodell, dem Ublox LEA 6T, der in den Tests im vorherigen Abschnitt verwendet wurde, zeichnet sich der Ublox-M8-Chipset dadurch aus, dass er Multi-GNSS-fähig ist. Wie in Odolinski und Teunissen (2016) gezeigt wird, ist mit einem low-cost Single-Frequenz/Multi-GNSS-Empfänger prinzipiell eine vergleichbare Erfolgsrate in der Mehrdeutigkeitslösung erzielbar, wie mit einem geodätischen Multi-Frequenz/Single-GNSS-Empfänger. Mit dem C94-M8P-System von Ublox, bei dem zwei M8-Chipsätze zum Testen der RTK-Funktionalität als Evaluation-Kit bereits auf Platinen zur Verfügung stehen, sind Single-Frequenz GPS/GLONASS- oder GPS/BeiDou-Auswertungen in Echtzeit möglich. Aufgrund der FDMA (Frequency Division Multiple Access)-Technik, die bei GLONASS bislang zur Identifikation der Satelliten verwendet wird, und der damit verbundenen Problematik bzgl. der Mehrdeutigkeitslösung, ist die GPS/BeiDou-Kombination grundsätzlich die bessere Variante für eine schnelle Mehrdeutigkeitsfixierung (Mongrédien et al. 2016). Da die BeiDou-Satellitenkonstellation für Europa jedoch noch nicht gut ausgebaut ist, ist in Deutschland derzeit die GPS/GLONASS-Kombination praktikabler.

In Abb. 5 ist das C94-M8P RTK-Kit von Ublox dargestellt. Es verfügt über einen Master- und einen Rover-Empfänger mit jeweils einer low-cost-Antenne. Die Übertragung der Daten wird per UHF-Funkmodul im RTCM-Format realisiert. Damit soll eine RTK-Positionsbestimmung mit cm-Genauigkeit in Echtzeit möglich sein. Die Frage ist nun, ob dies für die Praxis tatsächlich realistisch ist. Zur Evaluierung des Systems haben wir Testmessungen im Bonner Stadtgebiet durchgeführt. Dabei sollte untersucht werden, an wie vielen Positionen die Mehrdeutigkeiten erfolgreich fixiert werden und welche Genauigkeiten in der Positionsbestimmung dann erreicht werden. Bereits erste Tests haben gezeigt, dass die Fixierung der Mehrdeutigkeiten sehr lange dauert, wenn mit der low-cost-Antenne von Ublox gearbeitet wird. Aus diesem Grund wurde für weitere

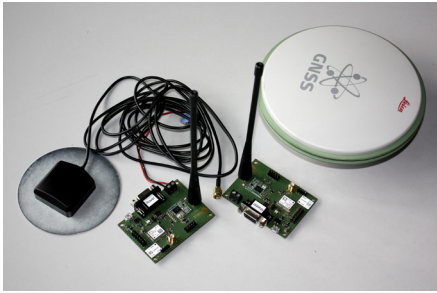


Abb. 5: Ublox C94-M8P RTK-Package mit einer der beiden zugehörigen low-cost-Antennen (links) und einer geodätischen Antenne (Leica AS10, rechts).

Untersuchungen eine geodätische Antenne (Leica AS10) verwendet, mit der die Mehrdeutigkeiten aufgrund einer besseren Signalqualität deutlich schneller fixiert werden konnten. Um die Genauigkeit des Systems analysieren zu können, wurden zur Bestimmung einer Referenzlösung unter Verwendung von Antennen-Splittern Daten mit geodätischen Empfängern (Leica GS25) an denselben Antennen aufgenommen, die auch für das low-cost RTK-Kit verwendet wurden.

In Abb. 6 sind die Positionen dargestellt, an denen Messungen durchgeführt wurden. In Grün sind dabei die Positionen zu sehen, an denen die Mehrdeutigkeiten mit dem Ublox-System erfolgreich fixiert wurden. In Orange sind Positionen gekennzeichnet, an denen nur Float-Lösungen zur Verfügung standen und in Rot sind die Punkte dargestellt, an denen aufgrund einer fehlenden Funkverbindung keine Daten vom Master empfangen werden konnten. Es wird deutlich, dass im näheren Umfeld der Referenzstation fast an allen Positionen fixierte Lösungen erzielt wurden, wobei die Dauer bis zur Fixierung oftmals sehr lang ausgefallen ist. Die Zeit, die für das Fixieren der Mehrdeutigkeiten benötigt wurde, ist neben den grünen Punkten dargestellt. An sechs von elf Punkten musste demnach über zwei Minuten auf die Fixierung gewartet werden. An zwei Punkten (mit einem „k“ gekennzeichnet), ist die Fixierung zudem nach kurzer Zeit wieder verloren gegangen.

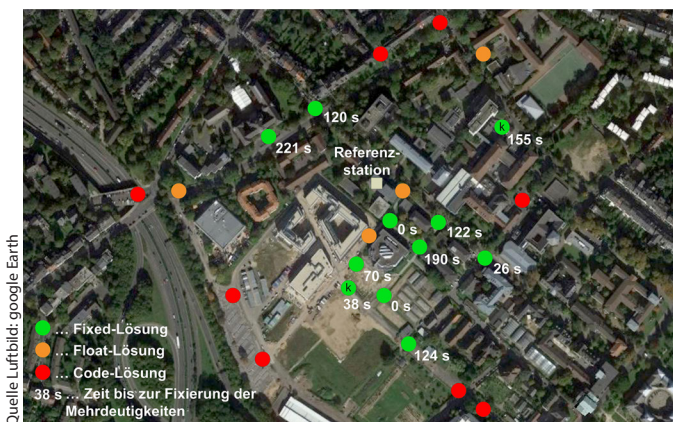


Abb. 6: Darstellung von Positionen, die mit dem RTK-Kit M8P der Firma Ublox im Bonner Stadtgebiet aufgenommen wurden. Dabei wird jeweils zwischen der Lösungsart der Position unterschieden.

In Abb. 7 sind in Grün die mittleren Abweichungen der Koordinaten (Norm des Differenzvektors) zur Referenzlösung für die Positionen dargestellt, an denen mit dem Ublox-Empfänger fixierte Lösungen erzielt wurden. Meist liegen die Abweichungen unter 1 cm. Die maximale Abweichung beträgt ca. 2 cm.

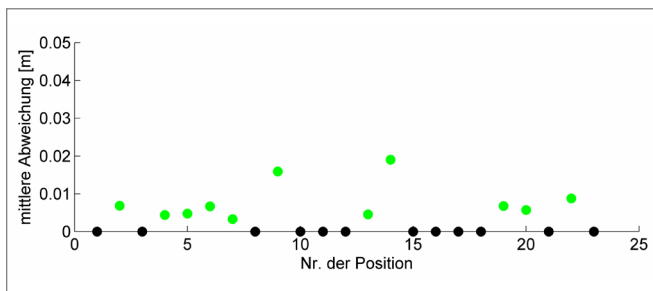


Abb. 7: Darstellung der Differenzen (Grün) zwischen den Positionen des low-cost RTK-Kits C94-M8P der Firma Ublox im Vergleich zu einer Referenzlösung (Leica). Für die Positionen, an denen mit dem Ublox-Empfänger keine fixierten Lösungen vorlagen sind die Differenzen zu null gesetzt (Schwarz).

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass mit dem low-cost RTK-System von Ublox auch unter schwierigen GNSS-Bedingungen Positionen mit cm-Genauigkeiten in Echtzeit bestimmt werden können. Auf die Fixierung der Mehrdeutigkeiten muss dabei allerdings oftmals mehr als zwei Minuten gewartet werden. Für eine Stop&Go Anwendung ist dies zu verkraften, für kinematische Anwendungen sind solch lange Fixierungszeiten nicht praktikabel. Mit der Weiterentwicklung der GNSS BeiDou und Galileo sollte diese Situation in Zukunft jedoch besser werden. Tests unter guten GNSS-Bedingungen, die aus Platzgründen hier nicht dargestellt werden konnten, haben zudem gezeigt, dass die Mehrdeutigkeitsfixierung ohne Abschattungen mit dem low-cost-System sehr lange beibehalten wird, so dass die Mehrdeutigkeiten nur selten neu gelöst werden mussten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Überblick über das Anwendungspotenzial von GNSS-OEM-Boards, die Unterschiede zwischen verschiedenen Empfängern unterschiedlicher Preisklassen und die Anwendbarkeit von low-cost OEM-Chipsätzen in der Praxis gegeben. Zusammenfassend lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- OEM-Boards eignen sich vor allem für die Entwicklung eigener GNSS- oder Multisensorsysteme sowie für den Einsatz auf kleinen und leichten Trägerplattformen, wie z.B. Mikro-UAVs. Im Vergleich zu Endnutzerprodukten

bieten OEM-Boards mehr Flexibilität. Nachteilig ist jedoch, dass der Einsatz vom OEM-Boards mit zusätzlichem Aufwand (Realisierung von Schnittstellen, Stromversorgung, Gehäuse etc.) verbunden ist.

- Die Anzahl an Herstellern, die GNSS-OEM-Boards anbieten, ist mittlerweile recht groß, so dass die Auswahl des richtigen Empfängers durchaus schwierig erscheint. Nicht alle Hersteller bieten jedoch alle Optionen an möglichen Empfängertypen an. Reduziert man sich zudem auf die für einen selber relevanten Parameter, wie z. B. (Single-GNSS- oder Multi-GNSS-, Single-Antennen- oder Dual-Antennen-Board etc.) lässt sich die mögliche Auswahl deutlich eingrenzen.
- Zwischen vergleichbaren OEM-Boards verschiedener Hersteller sind signifikante Unterschiede in Praxistests erkennbar (beispielsweise im Umgang mit Signalunterbrechungen). Es macht also durchaus Sinn, verschiedene OEM-Boards unter den Bedingungen der angestrebten Anwendung zu testen.
- Mittlerweile sind auf dem Markt auch erste low-cost RTK-Module erhältlich, die cm-genaue Positionsbestimmungen in Echtzeit versprechen. Tests haben gezeigt, dass diese Genauigkeiten durchaus auch erreicht werden. Die Dauer der Mehrdeutigkeitslösung für die Auswertung von low-cost Single-Frequenz GPS/GLONASS-Daten überschreitet zwei Minuten jedoch oft. Für Stop&Go-Anwendungen ist dies akzeptabel, für kinematische Anwendungen eher nicht. Mit dem weiteren Ausbau der GNSS BeiDou und Galileo sollte dies in Zukunft jedoch besser werden.

Für die Zukunft wird es vor allem spannend zu beobachten sein, in wie weit RTK-fähige OEM-Hardware den Massenmarkt erobern kann. Seit Beginn des Jahres 2017 sind erste low-cost Multi-Frequenz-GNSS-Empfänger verfügbar und auch die Multi-GNSS-Auswertung mit Single-Frequenz-Empfängern wird weiter zunehmen. Die Frage wird sein, wie die etablierten Hersteller auf diese Konkurrenz reagieren werden. Es ist also durchaus denkbar, dass in den nächsten Jahren ein gewisser Umbruch im Rahmen der GNSS-Empfängertechnologie bevorsteht.

Literatur

- Bäumker, M.; Przybilla, H.-J.; Zurhorst, A. (2013): Enhancements in UAV flight control and sensor orientation. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. XL-1/W2 (S. 33–38), UAV-g 2013, Rostock, Deutschland.
- Eling, C. (2016): Entwicklung einer direkten Georeferenzierungseinheit zur Positions- und Orientierungsbestimmung leichter UAVs in Echtzeit. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, ISSN 1864-1113, Nr. 53.

- Eling, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2016): Warum UAVs und warum jetzt? In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg. S. 9–30.
- Eling, C.; Klingbeil, L.; Wieland, M.; Kuhlmann, H. (2014): Direct geo-referencing of micro aerial vehicles – system design, system calibration and first evaluation tests. PFG, 4, S. 227–237.
- GPS World (2016): Receiver Survey. http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2012/10/GPSWorld_2016ReceiverSurvey.pdf, letzter Zugriff Januar 2017.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. (2008): GNSS Global Navigation Satellite Systems. Springer, Wien, New York.
- Mongrédien, C.; Hide, C.; Fairhurst, P.; Ammann, D. (2016): Centimeter positioning for UAVs and mass-market applications. GPS World, October 2016, S. 24–33.
- Odolinski, R.; Teunissen, P.J.G. (2016): Single-frequency, dual-GNSS versus dual-frequency, single-GNSS: a low-cost and high-grade receivers GPS-BDS RTK analysis. Journal of Geodesy, 90, S. 1255–1278.
- Schwieger, V.; Gläser, A. (2005): Possibilities of Low Cost GPS Technology For Precise Geodetic Applications. Proceedings of FIG Working Week, Kairo.
- Takasu, T.; Yasuda, A. (2009): Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. International Symposium on GPS/GNSS ICC Jeju, Korea.
- Teunissen, P.J.G. (1995): The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. Journal of Geodesy, 70, S. 65–82.
- Wieser, A. (2006): High-sensitivity GNSS: The trade-off between availability and accuracy. In: 3rd Symposium on Geodesy and Geotechnical and Structural Engineering, Baden, Austria.
- Zhang, L.; Schwieger, V. (2013): Monitoring mit Low-Cost GPS Empfängern – Chancen und Grenzen. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW-Schriftenreihe, Band 70/2013, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013, S. 207–225.

Kontakt

Dr.-Ing. Christian Eling | Dr. rer. nat. Lasse Klingbeil | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
Nussallee 17, 53115 Bonn
eling@igg.uni-bonn.de



Christian Eling



Lasse Klingbeil



Heiner Kuhlmann

Fernerkundung der Erdoberfläche mit Navigationssatelliten: GNSS-Reflektometrie

Jens Wickert

1 Zusammenfassung

Nach einer kurzen Einführung in die Thematik und der Vermittlung von Grundlagen werden aktuelle Forschungsergebnisse des GFZ auf dem Gebiet der GNSS-Reflektometrie (GNSS-R) vorgestellt. GNSS-R ist eine innovative Erdbeobachtungstechnik, die auf klassischen geodätischen Verfahren aufbaut und die Fernerkundung geophysikalischer Eigenschaften von Wasser-, Land-, und Eisoberflächen ermöglicht. Potenziell kann die Methode auch zur Beobachtung von Atmosphären- und Ionosphärenparametern eingesetzt werden.

In den vergangenen Jahren wurden am GFZ beachtliche wissenschaftliche Ergebnisse für die Erdbeobachtung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen erreicht. Schwerpunkt dabei war vor allem die altimetrische Vermessung von Wasseroberflächen mit boden- und fluggestützten Messungen (Abb. 1 und Abb. 2). In jüngster Zeit komplettieren Untersuchungen zur Bestimmung von Landoberflächenparametern mit geodätischen GNSS-Bodenstationen das Forschungsspektrum. Zielparameter sind hier die Bodenfeuchte oder die Schnee-
höhe (Abb. 3 und Abb. 4). Einer der Schwerpunkte der gegenwärtigen Arbeiten ist die Vorbereitung eines GNSS-R Experiments der Europäischen Weltraumbe-

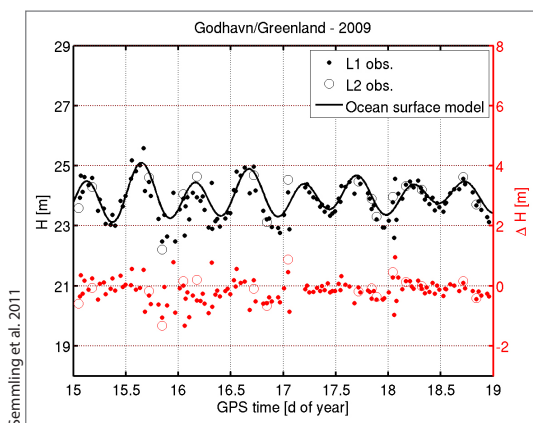


Abb. 1:

Zeitverlauf der Meeresoberflächenhöhe H in der Disko-Bucht (Grönland) zwischen 15. und 19. Januar 2009. Kleine Punkte bzw. größere Kreise stellen die Messungen für L1 bzw. L2 dar. Daten eines Ozeanoberflächenmodells sind zum Vergleich dargestellt (schwarze Linie); es berücksichtigt die Geoidundulation und die Meeresgezeiten. Die roten Punkte charakterisieren die Abweichungen zwischen Messungen und Modell.

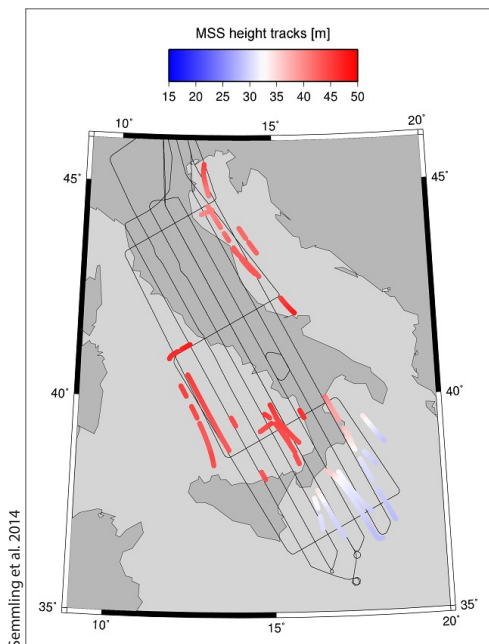


Abb. 2:

Bodenspur der spiegelnden GNSS-Reflexionen, die während der GEOHALO-Flugkampagne über dem Mittelmeer im Bereich der italienischen Halbinsel zwischen dem 6. und 12. Juni 2012 aufgezeichnet wurden. Die Farbe zeigt die entsprechenden Höhenanomalien der Meeresoberfläche. Die Bodenspur der HALO-Flugtrajektorie sind mit dünnen schwarzen Linien gekennzeichnet.

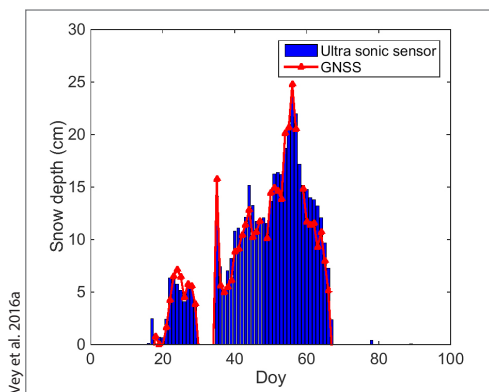


Abb. 3:

Vergleich der Schneehöhen am Geodätischen Observatorium Wettzell in 2013, gemessen mit einem geodätischen GNSS-Empfänger unter Anwendung der GNSS-Reflektometrie (rote Linie) mit Ultraschallmessungen vor Ort (blaue Balken)

hörde ESA auf der Internationalen Raumstation ISS: GEROS-ISS (GNSS rEflexometry, Radio Occultation and Scatterometry). Es wurde von einem internationalen Wissenschaftlerteam unter Leitung des GFZ vorgeschlagen. Hauptziel von GEROS-ISS (siehe Abbildung) ist die erstmalige weltraumgestützte Bestimmung von mesoskaligen Ozeanströmungen mit hoher Genauigkeit. Zusätzlich sollen Windgeschwindigkeiten über Ozeanoberflächen, Landoberflächenparameter und auch atmosphärische Eigenschaften bestimmt werden (Abb. 5 und Abb. 6).

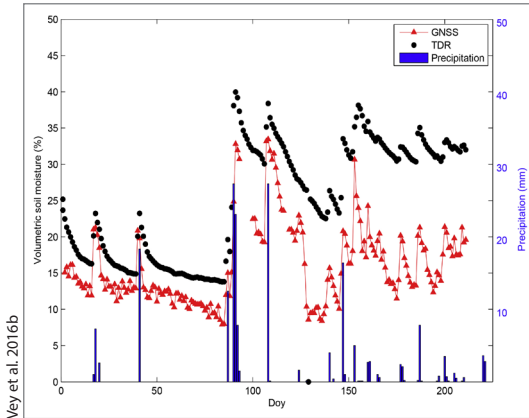


Abb. 4:

Variation der Bodenfeuchte in Sutherland, Südafrika, abgeleitet aus GNSS-Daten (rot) und klassischen Bodenfeuchtesensoren (TDR, Time-Domain-Reflectometry; schwarz). Blaue Linien markieren Niederschlagsereignisse.

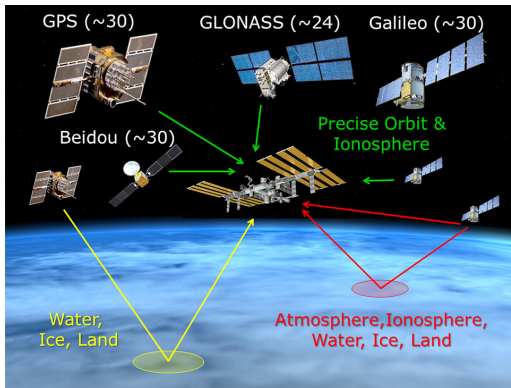


Abb. 5:

Schematische Übersicht über das GEROS-ISS Experiment, das auf der Internationalen Weltraumstation ISS geplant ist und vom GFZ wissenschaftlich koordiniert wird. Gelbe Linien symbolisieren nadirgerichtete Reflektometriemessung für Wasser-, Eis- und Landoberflächenmonitoring. Rot verweist auf tangentielle Reflektometriemessungen, die mit GNSS-Radiookkultationen zur Atmosphärensondierung verwandt sind und die grüne Farbe symbolisiert GNSS-Signale, die aus Zenit-Richtung empfangen werden. Für genauere Informationen siehe Wickert et al. 2016.

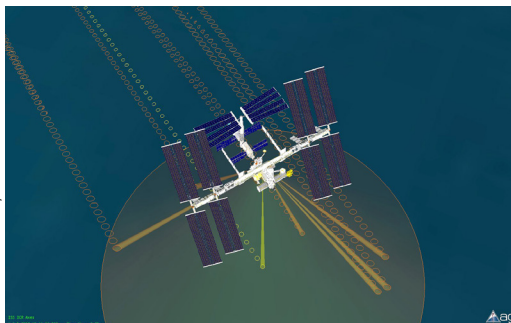


Abb. 6: Schematische Darstellung der geplanten GNSS-Reflektometriemessungen an Bord der Internationalen Weltraumstation ISS innerhalb des GEROS-ISS Experimentes. Die Kreise symbolisieren die Reflektionspunkte. Für diese Simulation wurden acht Reflektionen parallel aufgezeichnet.

Literatur

- Saynisch, J.; Semmling, M.; Wickert, J.; Thomas, M.: Potential of space-borne GNSS reflectometry to constrain simulations of the ocean circulation. *Ocean Dyn.*, vol. 65, no. 11, pp. 1441–1460, 2015.
- Semmling, A. M.; Beckheinrich, J.; Wickert, J.; Beyerle, G.; Schön, S.; Fabra, F.; Pflug, H.; He, K.; Schwabe, J.; Scheinert, M.: Sea surface topography retrieved from GNSS-R phase data of the GEOHALO flight mission. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3, pp. 954–960, 2014.
- Semmling, A. M.; Beyerle, G.; Stosius, R.; Dick, G.; Wickert, J.; Fabra, F.; Cardellach, E.; Ribo, S.; Rius, A.; Helm, A.; Yudanov, S.; d'Addio, S.: Detection of arctic ocean tides using interferometric GNSS-R signals. *Geophys. Res. Letters*, 38, L04103, 2011.
- Semmling, A. M.; Schmidt, T.; Wickert, J.; Schön, S.; Fabra, F.; Cardellach, E.; Rius, A.: A Zeppelin experiment to study airborne altimetry using specular Global Navigation Satellite System reflections. *Radio Science*, 48, 427–440, 2013.
- Stosius, R.; Beyerle, G.; Hoechner, A.; Wickert, J.; Lauterjung, J.: The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with GLO-NASS and Galileo on GNSS-Reflectometry tsunami detection from space. *Advances in Space Research*, 47, 5, 843–853, 2011.
- Vey, S.; Güntner, A.; Wickert, J.; Blume, T.; Ramatschi, M.: Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. *GPS Solutions*, 20, 4, pp. 641–654. DOI: [10.1007/s10291-015-0474-0](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0474-0), 2016b.
- Vey, S.; Güntner, A.; Wickert, J.; Blume, T.; Thoss, H.; Ramatschi, M.: Monitoring Snow Depth by GNSS Reflectometry in Built-up Areas: A Case Study for Wettzell, Germany. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and Remote Sensing*, Vol. 9 (10), 4809–4816. DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2516041](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2516041), 2016a.
- Wickert, J.; Cardellach, E.; Martin-Neira, M.; Bandejas, J.; Bertino, L.; Andersen, O. B.; Camps, A.; Catarino, N.; Chapron, B.; Fabra, F.; Floury, N.; Foti, G.; Gommenginger, C.; Hatton, J.; Høeg, P.; Jäggi, A.; Kern, M.; Lee, T.; Li, Z.; Park, H.; Pierdicca, N.; Ressler, G.; Rius, A.; Rosello, J.; Saynisch, J.; Soulat, F.; Shum, C. K.; Semmling, M.; Sousa, A.; Xie, J.; Zuffada, C.: GEROSS- ISS: GNSS Reflectometry, Radio Occultation, and Scatterometry Onboard the International Space Station. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and Remote Sensing*, Vol. 9, No. 10, October, pp. 4452–4581. DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2614428](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2614428), 2016.
- Wickert, J.; Semmling, M.; Beckheinrich, J.; Beyerle, G.; Vey, S.; Schuh, H.: Innovative Satellitengeodäsie am GFZ – Fernerkundung mit reflektierten GNSS-Signalen. *avn*, 121 (214) 10, 347–352, 2015

Kontakt

Prof. Dr. Jens Wickert
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
14473 Potsdam, Germany
Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
wickert@gfz-potsdam.de



Globale Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) werden bei der Erfassung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten in der Geodäsie und ihren Nachbardisziplinen genutzt. Die dabei erzielbaren Genauigkeiten decken eine große Bandbreite ab, vom Meter- bis zum Submillimeterbereich. Ein aktueller Fokus von GNSS-Anwendungen liegt zudem auf der Echtzeitfähigkeit und in der kombinierten Nutzung in Multisensorsystemen.



ISBN: 978-3-95786-108-5



9 783957 861085

Schriftenreihe des DVW
Band 87 / 2017
Printversion: 29,40 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

