

Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie und Messtechnik“

GNSS 2023 – Zeit für ein Update?!

Beiträge zum 219. Seminar der INTERGEO akademie
am 4. und 5. September 2023 in Bochum



Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie und Messtechnik“

GNSS 2023 – Zeit für ein Update?!

Beiträge zum 219. Seminar der INTERGEO akademie
am 4. und 5. September 2023 in Bochum

Redaktion:

Dr.-Ing. Barbara Görres

Prof. Dr.-Ing. Brigitte Gundlich

Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

Dr.-Ing. Florian Zimmermann

Herausgeber:

DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie,

Geoinformation und Landmanagement



Schriftenreihe des DVW

Band 106

Wißner-Verlag

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

www.dvw.de

INTERGEO

akademie

Schriftenreihe des DVW | Band 106

Die Inhalte wurden im Rahmen einer Fortbildungsveranstaltung in der INTERGEO akademie erarbeitet.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
GNSS 2023 – Zeit für ein Update?!, DVW-Schriftenreihe, Band 106,
Augsburg, 2023, S. x–y.

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 angewählten 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.

Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.

Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

ISBN: 978-3-95786-342-3

ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2023

www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg

Bildnachweis Cover: © ESA-P.Carril

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, Signale, Technik

Urs Hugentobler Der aktuelle Stand der GNSS – ein Update	9
---	---

Peter Steigenberger GNSS-Referenzsysteme – vom Systembetreiber zum Nutzer	21
--	----

Anja Heßelbarth Welches Potenzial haben neue Korrekturdatendienste und GNSS-Massenmarkt – Empfänger für zivile Anwendungen	33
--	----

Session 2: Precise Point Positioning, RTK, SSR: Unterschiede und Erfahrungen

Jürgen Alberding Dirk Stöcker ESA NAVISP EL2-Projekt SSRoverDAB+: PPP-RTK-Korrekturdaten über digitalen Rundfunk	51
--	----

Gerhard Wübbena Jannes Wübbena Temmo Wübbena Martin Schmitz Christopher Perschke Potenzial von SSR für GNSS-Korrekturdatendienste und Rover-Anwendung	67
---	----

Markus Vennebusch Lena Albert Martin Freitag Andreas Gerschwitz Thomas Goetze Hans-Jürgen Goldan Ilka von Gösseln Franziska Hartmann Cord-Hinrich Jahn Mathias Meißies Rebecca Reiling Jens Riecken Franziska Riedel Axel Rülke Volker Schneider Jürgen Siebert Timon Stockhaus Vitaly Winter Ein neuer amtlicher PPP-RTK-Positionierungsdienst für Deutschland	83
--	----

Bernd Vahrenkamp RTK Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee (AWZ)	95
--	----

Session 3: Qualitätssicherung und Sicherheit

Barbara Görres | Klaus Fritzensmeier | Uwe Ehrhorn | Rolf Hollmann |
Michael Mayer | Florian Pollinger
DIN-Norm 18213 GNSS-Feldprüfverfahren – ein effizientes Verfahren zur
Qualitätssicherung _____ 101

Hans-Georg Dick | Andreas Brünner | Ralf Däbel | Barbara Görres | Bernd Krickel |
Björn Mehlitz | Werner Pape | Anette Rietdorf | Tetyana Romanyuk | Axel Rülke |
André Sieland | Laura Vaßmer | Kerstin Westphal
Von der See bis zu den Alpen – Herausforderungen auf dem Weg zum
neuen geodätischen Raumbezug _____ 109

Steffen Schön | Johannes Kröger | Tobias Kersten | Yannick Breva
Antennenspezifische Effekte – ein aktueller Überblick _____ 121

Richard Blum | Barbara Görres | Brigitte Gundlich
Störung des GNSS-Signals – Eine reale Gefahr! _____ 135

Session 4: Anwendungen und Praxisbeispiele

Kristine M. Larson
GNSS Interferometric Reflectometry: Basic Principles, Applications for
Measuring Water Levels, and Software Tools _____ 153

Florian Kunzi
LEO PNT als zukünftige Alternative in der globalen Satellitennavigation ____ 161

Christopher Sandner | Werner Stempfhuber | Andreas Donaubaue | Manfred
Zacher
GNSS basierte Map-Matching-Verfahren im Gleisnetz der Deutschen Bahn
zur Lokalisierung von Störstellen am Fahrbahnsystem _____ 175

Andreas Wagner | Jonathan Hiller
Hochgenaue ingenieurgeodätische GNSS-Punktbestimmungen in der Praxis
_____ 189

Vorwort

GNSS (Globale Navigationssatellitensysteme) werden in der Geodäsie und in den Nachbardisziplinen für die Positionierung, Navigation und Zeitmessung sowie bei der Beobachtung von Veränderungsprozessen im Erdsystem seit langem eingesetzt. Aber auch im Alltag ist eine Welt ohne GNSS nicht mehr vorstellbar. Die etablierte Technologie ermöglicht vielfältige Anwendungen mit einer großen Bandbreite von Genauigkeiten. Der DVW hat seit vielen Jahren dieser Entwicklung durch eine lockere Reihe von GPS/GNSS-Seminaren Rechnung getragen. Nach dem letzten GNSS-Seminar in 2017 (!) fragen bzw. behaupten wir, dass es Zeit für ein Update ist. Das durch die Arbeitskreise AK 4 „Ingenieurgeodäsie und Messtechnik“ und AK 8 „Mobile und autonome Sensorsysteme“ organisierte Seminar wird neben einem Überblick über den aktuellen Status und Stand der Technik von GNSS, den Nutzer über die aktuellen Trends informieren. Ein besonderer Schwerpunkt des Seminars liegt auf dem Positionierungsverfahren PPP (Precise Point Positioning). Hierzu werden Grundlagen vermittelt, neue Dienste und Techniken vorgestellt und Anwendungsbeispiele präsentiert. Des Weiteren sind Qualität und Sicherheit wichtige Aspekte bei GNSS. Es werden effiziente Feldprüfverfahren vorgestellt, Hardwareaspekte behandelt und Störungen von GNSS-Signalen erörtert. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von GNSS, z. B. durch Beiträge zur GNSS-Reflektometrie und zu ingenieurgeodätischen Anwendungen runden die Seminarinhalte ab.

Das vielseitige Programm richtet sich damit gleichermaßen an Kolleginnen und Kollegen aus der Berufspraxis, aus Wirtschaft und Behörden sowie aus Lehre und Forschung. Es adressiert als Zielgruppe alle Interessierten – auch in Ausbildung – aus den Bereichen der Geodäsie, der Geoinformatik und aus Nachbardisziplinen, die GNSS nutzen und sich über den aktuellen Stand und moderne Entwicklungen informieren möchten.

Der besondere Dank gilt den Referentinnen und Referenten, die als anerkannte Expertinnen und Experten durch ihre Beiträge das Seminar gestalten und diesen Seminarband ermöglicht haben. Wir freuen uns auf interessante Vorträge, einen regen Austausch und anregende Diskussionen mit Ihnen, und hoffen, dass sich dieser Band auch später als nützlich erweisen wird.

Barbara Görres, Brigitte Gundlich, Ingo Neumann, Florian Zimmermann

Session 1: Grundlagen, Signale, Technik

Der aktuelle Stand der GNSS – ein Update

Urs Hugentobler

1 Einleitung

Am 22. Februar 1978 wurde der erste GPS-Satellit in den Orbit gebracht. Seither ist viel geschehen und die Nutzung der Signale der GNSS (Global Navigation Satellite System) hat die Vermessung, Navigation und Zeithaltung, aber auch die Meteorologie und die Art und Weise, wie wir Karten lesen und im täglichen Leben navigieren grundlegend verändert und ist für autonomes Fahren und Fliegen nicht mehr wegzudenken. Rund 6 Milliarde Smartphones mit GNSS-Empfängerchips sind heute im Umlauf (EUSPA 2022).

Nachdem das amerikanische GPS in den 1980er Jahren für die zivile Nutzung verfügbar wurde, wurde es sogleich für erste geodätische Messkampagnen eingesetzt. Eine der ersten Kampagnen diente 1986 der Messung von Plattenbewegungen in Kalifornien. Mit dem Start der ersten europäischen Navigationssatelliten GIOVE-A und GIOVE-B in den Jahren 2005 und 2008 wurde eine neue Ära mit mehr Signalen auf mehr Frequenzen und besseren Satellitenuhren eingeleitet. Seither ist das Galileo-Satellitennavigationssystem voll verfügbar, GPS wurde modernisiert, und auch die Chinesen haben den Aufbau ihres globalen Navigationssystems BeiDou-3 abgeschlossen. Mit dem russischen GLONASS stehen uns damit vier voll ausgebaute globale Navigationssatellitensysteme zur Verfügung.

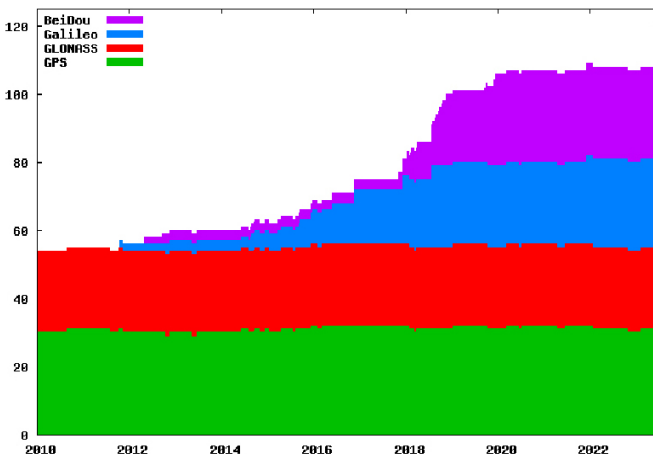


Abb. 1:
Anzahl heute verfügbarer Satelliten der vier GNSS

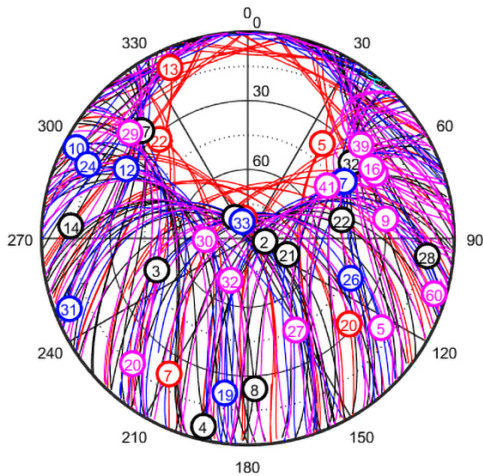


Abb. 2:
Verteilung der am 23. Juni 2023
um 14:00 UT am Himmel über
München sichtbaren GNSS-Satel-
liten (schwarz: GPS, rot: GLONASS,
blau: Galileo, magenta: BeiDou,
Ziffern: PRN)

In Abb. 1 ist die Anzahl verfügbarer GNSS-Satelliten der vier globalen Systeme über die Zeit aufgezeichnet. Heute können wir 31 Satelliten des amerikanischen GPS, 24 Satelliten des russischen GLONASS, 26 des europäischen Galileo und 27 des chinesischen BeiDou nutzen. Insgesamt stehen damit Signale von über 100 Satelliten zur Verfügung. Wie sich dies für den Himmel über München am 23. Juni 2023 auswirkt, ist in Abb. 2 gezeigt: Bei freiem Horizont können zu dem Zeitpunkt Signale von 11 GPS-Satelliten, 6 GLONASS-Satelliten, 8 Galileo-Satelliten und 12 BeiDou-Satelliten genutzt werden.

2 Vier globale Satellitennavigationsysteme – Stand

2.1 Das amerikanische GPS

Der Aufbau des amerikanischen GPS-Satellitensystems wurde in den 1970er Jahren in Angriff genommen. Der erste Satellit wurde vor über 45 Jahren in den Orbit gebracht und seit 1994 ist das System voll einsatzfähig. Der Eigenname des Satellitensystems wurde jahrzehntelang als Synonym für die Satellitennavigation verwendet. Die Modernisierung des Systems brachte 1997 die ersten Block IIR-Satelliten mit verbesserten Rubidium-Atomuhren. Ab 2005 stellten die Block IIR-M-Satelliten den zivilen Code L2C auf der zweiten Frequenz zur Verfügung. Mit den ersten Block IIF-Satelliten konnten ab 2010 Signale auf der neuen L5-Frequenz genutzt werden, und mit dem Start des ersten Block III-Satelliten 2018 stehen den Nutzern noch stabilere Uhren sowie ein zusätzliches ziviles Signal L1C auf der ersten Frequenz zur Verfügung.

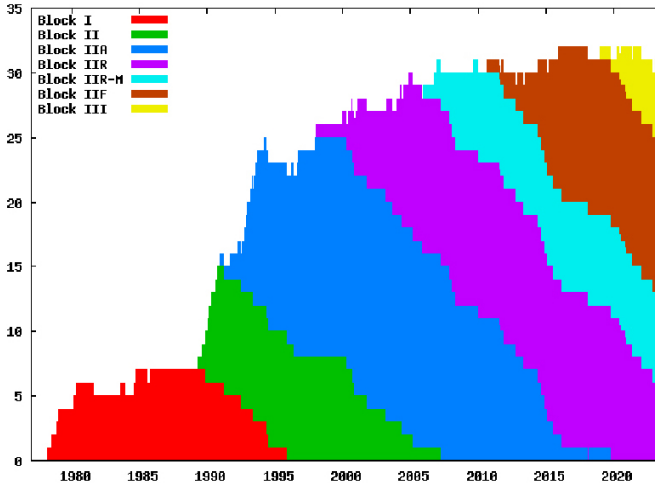


Abb. 3: Anzahl verfügbarer GPS-Satelliten der verschiedenen Block-Typen

In Abb. 3 ist dargestellt, wie sich die Zusammensetzung der GPS-Konstellation über die Zeit verändert hat. Heute senden noch 6 Block IIR- und 7 Block IIR-M-Satelliten, sowie 12 Satelliten des moderneren Typs IIF und 6 Satelliten der letzten Generation Block III Signale aus. Die heutige GPS-Konstellation ist daher heterogen, bestehend aus Satelliten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Drei weitere Satelliten dienen als Reserve, senden aber keine Signale. Abb. 4 zeigt die Verteilung der aktiven GPS-Satelliten über die sechs Bahnebenen.

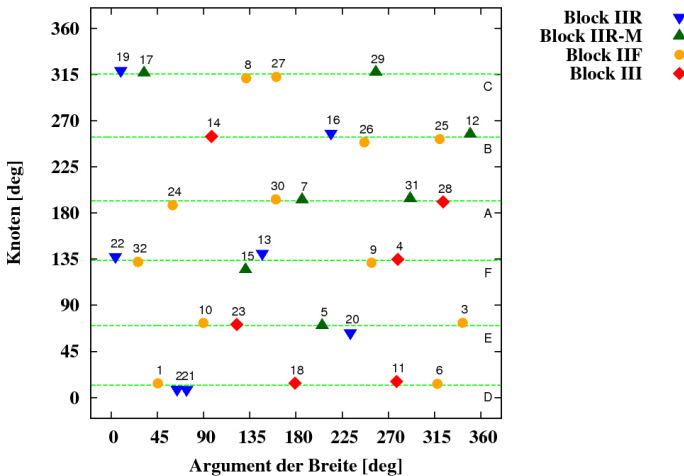


Abb. 4: Verteilung der aktiven GPS-Satelliten über die sechs Bahnebenen, charakterisiert durch die Rektaszension des aufsteigenden Knotens, für den 26. Juni 2023, OUT

Der letzte Block III-Satellit wurde am 18. Januar 2023 mit einer SpaceX Falcon 9 in Orbit gebracht und vier weitere Satelliten desselben Typs stehen am Boden bereit. Satelliten des Nachfolgetyps Block IIF sind bereits in Produktion, der erste soll 2027 gestartet werden. Insgesamt sind 22 Satelliten dieses Typs vorgesehen, welche eine voll digitalisierte Nutzlast, verbesserte Anti-Jam-Möglichkeiten sowie Laserreflektoren mitbringen werden (Dunn 2022).

Gleichzeitig muss zum Betrieb der Block III-Satelliten das Bodensegment modernisiert werden. Das OCX (Next Generation Operational Control System) wurde 2010 in Auftrag gegeben und sollte 2016 in Betrieb genommen werden. Nach mehrjährigen Verzögerungen und Budget-Überschreitungen wurde 2017 eine Version 0 in Betrieb genommen und 2021 wurden alle 17 neuen globalen Monitoring-Stationen installiert. Erst mithilfe der noch nicht ausgelieferten Systemversionen 1 und 2 können alle Möglichkeiten der neuesten Satellitengeneration genutzt werden. Bis 2025 soll eine Nachfolgeversion 3F des Bodensegments aufgebaut werden, welches auch die neuen Möglichkeiten der Block IIIIF-Satelliten unterstützen wird (Dunn 2022, Albon 2023).

2.2 Das europäische Galileo

Nachdem der Rat der Europäischen Union 1999 den Aufbau eines unabhängigen europäischen Satellitennavigationssystems unter ziviler Kontrolle beschlossen hat, wurden 2005 und 2008 die ersten beiden Testsatelliten GIOVE-A und GIOVE-B in Orbit gebracht. Die ersten zwei operationellen Satelliten, wurden 2011 gestartet und die Testsatelliten sind seit 2012 außer Betrieb. Heute sind insgesamt 28 Galileo-Satelliten im Orbit, 4 IOV (In Orbit Validation)-Satelliten und 24 FOC (Full Operational Capability)-Satelliten. Ein IOV-Satellit ist aufgrund einer Fehlfunktion an der Navigationsantenne nicht mehr in Betrieb und zwei der FOC-Satelliten senden wegen Problemen mit den Uhren keine Signale und dienen als Reserve. Die ersten beiden FOC-Satelliten wurden wegen eines Problems der Fregatt-Oberstufe zu früh ausgesetzt und befinden sich auf einer exzentrischen Bahn mit kürzer Umlaufzeit. Sie funktionieren aber einwandfrei und können wie die anderen Satelliten genutzt werden, auch wenn sie in der Navigation-Message als „unhealthy“ gekennzeichnet sind. Damit sind insgesamt 25 Galileo-Satelliten nutzbar. Im Dezember 2016 hat der Betreiber die Verfügbarkeit des Galileo Initial Services deklariert. In *Abb. 5* ist die Verteilung der verfügbaren Satelliten über die drei Bahnebenen der Konstellation dargestellt.

Die insgesamt vorgesehenen 34 FOC-Satelliten werden in drei Batches von OHB in Bremen gebaut. Von den 12 Satelliten des Batch-3 sind erst zwei im Orbit. Vier stehen zum Abschuss bereit, zwei waren schon an der Startrampe in Kourou, wurden aber wieder zurückgeschickt und eingelagert. Startverzöge-

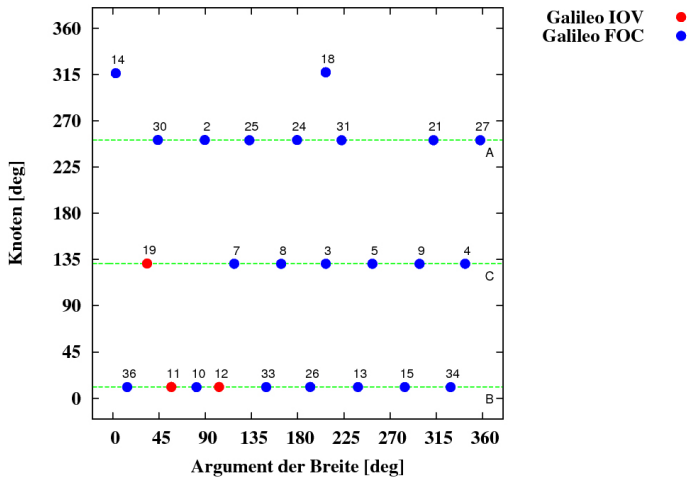


Abb. 5: Verteilung der aktiven Galileo-Satelliten über die drei Bahnebenen, charakterisiert durch die Rektaszension des aufsteigenden Knotens, für den 26. Juni 2023, 0UT. Die beiden Satelliten E14 und E18 befinden sich auf einer nicht-nominalen Bahn.

rungen gab es zuerst wegen der Schließung des Startplatzes infolge Corona. Seit Beginn des Ukraine-Krieges ist der Start mittels russischer Sojus-Raketen keine Option mehr. Da keine Ariane 5 mehr verfügbar ist, muss für den Start der nächsten Satelliten auf die Ariane 6 gewartet werden. Wegen Verzögerungen ist mit dem Erstflug der neuen Rakete frühestens Ende 2023 zu rechnen.

Parallel zum vollständigen Aufbau der Konstellation mit 30 Satelliten und dem zu erwartenden Ersatz von älteren Satelliten nach Erreichen der nominalen Lebensdauer von 12 Jahren wird am Aufbau des Galileo-Systems der zweiten Generation gearbeitet. Verträge zum Bau der ersten 12 Satelliten wurden 2021 an zwei Konsortien vergeben, geführt von Airbus Defence and Space sowie Thales Alenia Space. Die Satelliten sollen elektrische Triebwerke aufweisen, mit K-band Intersatelliten-Links für Kommunikation, Ranging und Uhrensynchronisation ausgerüstet sein, verbesserte Atomuhren tragen und die Signalgeneratoren sollen im Orbit umkonfiguriert werden können. Die ersten Satelliten sollen ab Ende 2025 die Konstellation der ersten Generation ergänzen.

Galileo ist das erste Navigationssatellitensystem, welches mit dem High Accuracy Service (HAS) einen Precise Point Positioning Service global und kostenfrei zur Verfügung stellt. Am 24. Januar 2023 wurde der HAS Initial Service offiziell deklariert. Im Service Level 1 werden Bahn- und Uhrenkorrekturen sowie Code- und später auch Phasen-Biases für Galileo und GPS über das E6-B-Signal sowie über das Internet ausgesendet. Außerhalb des pazifischen Raumes wird damit eine Positioniergenauigkeit von 20 cm horizontal und 40 cm (95 %) erreicht.

Mit dem Service Level 2, welcher für 2024 angekündigt ist, sollen zusätzlich regionale Atmosphärenkorrekturen ausgesendet werden, womit die Konvergenz von 300 sec auf 100 sec reduziert wird. Die Verfügbarkeit des HAS soll 99 % betragen. Da aber der Betreiber keine Service-Garantie gibt, wird empfohlen, den Service nicht für sicherheitskritische Anwendungen zu verwenden (HAS SDD 2023).

Korrekturen werden für die Galileo-Signale E1, E5a, E5b, E6 und die GPS-Signale L1 und L2C bereitgestellt. In Zukunft sollen Korrekturen auch für Galileo E5 AltBOC und GPS L5 verfügbar werden. Gegenwärtig können, bedingt durch die Anzahl der verfügbaren Bodenantennen, 20 Satelliten die Korrekturen gleichzeitig aussenden. Dabei werden diese Korrekturen von den verschiedenen Satelliten so verschachtelt ausgesendet, dass der Nutzer den gesamten Korrekturdatensatz in kürzerer Zeit empfangen kann, wenn er mehrere Satelliten misst.

2.3 Das russische GLONASS

Die ersten drei Satelliten des russischen GLONASS wurden 1982 in Orbit gebracht und 1996 wurde das System mit 24 Satelliten als voll einsatzfähig erklärt. Nach einem zeitweisen Rückgang auf nur sechs operationelle Satelliten nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion sind seit 2011 wieder praktisch

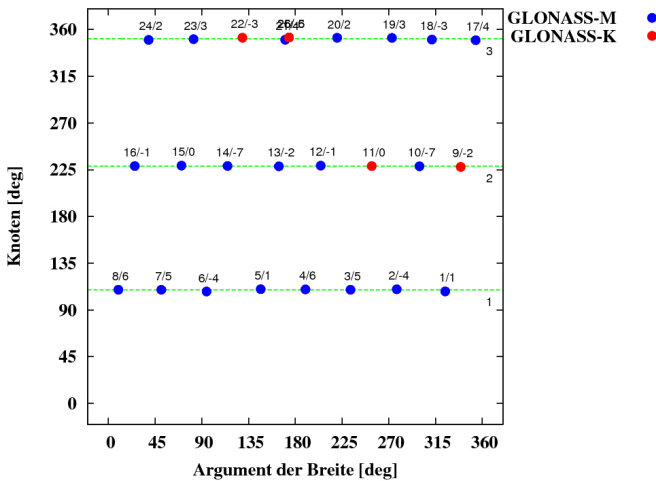


Abb. 6: Verteilung der verfügbaren GLONASS-Satelliten über die drei Bahnebenen, charakterisiert durch die Rektaszension des aufsteigenden Knotens, für den 26. Juni 2023, OUT

durchgängig 24 Satelliten aktiv. 2011 wurde der erste Satellit der moderneren Baureihe GLONASS-K in Orbit gebracht. Der Satellit ist mittlerweile nicht mehr in Betrieb, aber es wurden seither vier weitere GLONASS-K-Satelliten gestartet. Drei sind im Betrieb, der vierte im Testbetrieb. Insgesamt sollen neun Satelliten des Typs K gebaut werden, um GLONASS-M-Satelliten zu ersetzen. [Abb. 6](#) zeigt die Verteilung der Satelliten über die drei Bahnebenen am 26. Juni 2023. Drei der GLONASS-M-Satelliten senden allerdings kein Signal auf L2. Geodätisch nutzbar sind gegenwärtig daher nur 21 Satelliten.

Die GLONASS-K senden auf einer dritten Frequenz CDMA-Signale zusätzlich zu den klassischen FDMA-Signalen. Die nächste Generation GLONASS-K2 wird zivile CDMA-Signale auch im L1-Band bereitstellen. Allerdings lässt der Start des ersten K2-Satelliten auch wegen fehlender elektronischer Bauteile aufgrund westlicher Sanktionen nach der Annexion der Krim 2014 auf sich warten. Der Start wurde ursprünglich für 2013 angekündigt. Seither wurde er immer wieder verschoben und wird nun Ende 2023 erwartet. Trotzdem wird auch der Aufbau einer regionalen Komponente bestehen aus sechs GLONASS-V-Satelliten angestrebt, welche auf stark exzentrischen geosynchronen Bahnen, voraussichtlich Tundra Orbits, für das russische Territorium zusätzliche Signale bereitstellen. Mit einem Start ist aber kaum vor 2027 zu rechnen (Luzin 2022).

2.4 Das chinesische BeiDou

Das chinesische Navigationssatellitensystem BeiDou wurde in drei Phasen aufgebaut. Das experimentelle BeiDou-1 bestand aus 4 geostationären Satelliten. Die ersten beiden Satelliten wurden 2000 in Orbit gebracht. Das System ist seit 2012 außer Betrieb. Ab 2007 wurde das Nachfolgesystem BeiDou-2 aufgebaut. Neben einer globalen Komponente weist das System mit geostationären und geosynchronen Bahnen auch eine regionale Komponente auf, welche zusätzliche Signale im asiatisch-pazifischen Raum verfügbar macht. Momentan sind noch 3 Satelliten in MEO (Medium Earth Orbit), 5 in GEO (Geostationary Orbit) und 7 in IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit) aktiv.

Nachdem das System der zweiten Generation 2012 erfolgreich fertiggestellt war, wurden ab 2015 die ersten Satelliten der dritten Generation BeiDou-3 gestartet. Innerhalb von nur 5 Jahren wurde BeiDou-3, bestehend aus insgesamt 30 Satelliten, vollständig aufgebaut und im Juni 2020 fertiggestellt. Heute besteht das BeiDou-3-System aus 24 Satelliten auf MEO-Bahnen, 4 Satelliten auf GEO-Bahnen und 3 Satelliten auf IGSO-Bahnen. Die Satelliten nutzen Inter-satellite-Links im Ka-Band. Die Qualität der Signale und Stabilität der Uhren ist vergleichbar mit Galileo und GPS und mehrere der Signale sind interoperabel

nutzbar. Abb. 7 zeigt den Aufbau der beiden Systeme BeiDou-2 und BeiDou-3 und die Anzahl heute verfügbarer Satelliten. Abb. 8 stellt die Verteilung der MEO-Satelliten über die drei Bahnebenen dar.

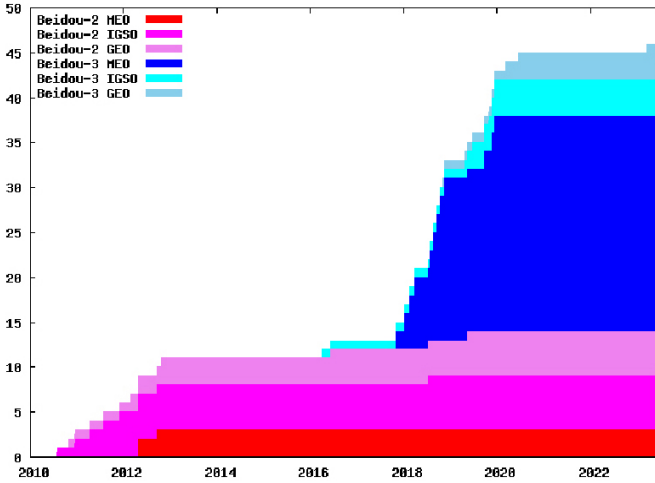


Abb. 7: Anzahl verfügbarer BeiDou-Satelliten der zweiten (rot) und dritten Generation (blau) in der jeweiligen MEO, IGSO und GEO-Konstellation als Funktion der Zeit

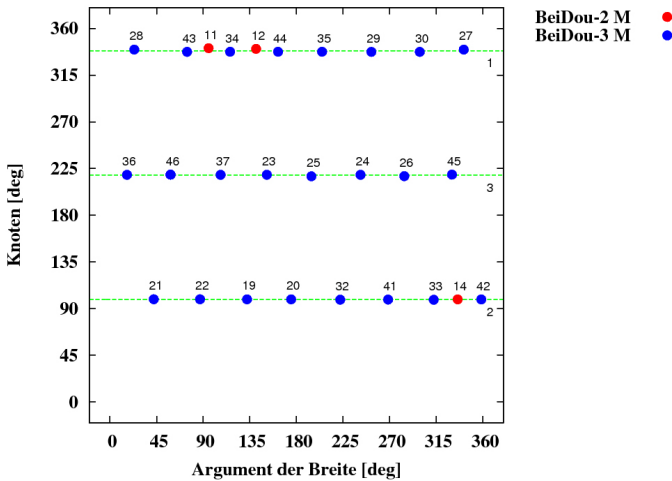


Abb. 8: Verteilung der verfügbaren MEO BeiDou-Satelliten über die drei Bahnebenen, charakterisiert durch die Rektaszension des aufsteigenden Knotens, für den 26. Juni 2023, OUT

3 Interoperable Signale

Als Nutzer wollen wir uns nicht darum kümmern, welche Satellitensysteme unser Empfänger misst. Idealerweise sollte der Empfänger alle vier GNSS als ein integriertes Satellitennavigationssystem nutzen. Tatsächlich messen heute eine Vielzahl von Navigationschips in Smartphones GPS-, Galileo-, GLONASS- und BeiDou-Signale. Seit 2018 sind erste mit Zweifrequenz-Chipsets ausgerüstete Smartphones auf dem Markt, welche L1 und L5 messen. Mit dem Aufbau der neuen und der Modernisierung der existierenden Satellitensysteme sind immer mehr interoperable Signale verfügbar. So werden die Galileo-Signale E1 sowie E5b auf denselben Frequenzen gesendet wie die GPS-Signale L1 und L5. Auch die BeiDou-Satelliten der zweiten und dritten Generation stellen Signale auf den Frequenzen E1, E5a und E5b zur Verfügung, siehe [Abb. 9](#). Auch eine modernisierte Version der GLONASS-K2-Satelliten soll in Zukunft interoperable zivile CDMA-Signale auf denselben Frequenzen wie E1, E5a und E5b senden.

BeiDou-2		B2I 1207.14	B3I 1268.52	B1I 1561.098		MHz
BeiDou-3	B2a 1176.45	B2b 1207.14	B3I 1268.52	B1I 1561.098	B1C 1575.42	MHz
Galileo	E5a 1176.45	E5b 1207.14	E6 1278.75		E1 1575.42	MHz
GPS	L5 1176.45		L2 1227.60		L1 1575.42	MHz

Abb. 9: Interoperable Signale von GPS, Galileo und BeiDou

Bei GPS senden noch nicht alle Satelliten-Signale auf der Frequenz L5 aus. Mittlerweile sind jedoch bereits 18 Block IIF und Block III-Satelliten verfügbar, welche L5 aussenden. In [Abb. 10](#) ist die Anzahl GPS-Satelliten, welche bestimmte Signale bereitstellen, als Funktion der Zeit dargestellt. Den zivilen Code L2C auf der zweiten Frequenz senden heute bereits 24 Satelliten aus, L1C ist von 6 Satelliten verfügbar, während nur noch 6 Satelliten lediglich die klassischen Signale auf L1 und L2 aussenden. Hier sei auch angemerkt, dass zwei Jahre, nachdem mindestens 24 als „healthy“ markierte GPS-Satelliten Signale auf L5 aussenden, die Verfügbarkeit des P-Codes auf L1 und L2 nicht mehr garantiert wird. Nach jetziger Planung könnte der P-Code daher nach 2031 wegfallen (US Federal Rationavigation Plan 2022).

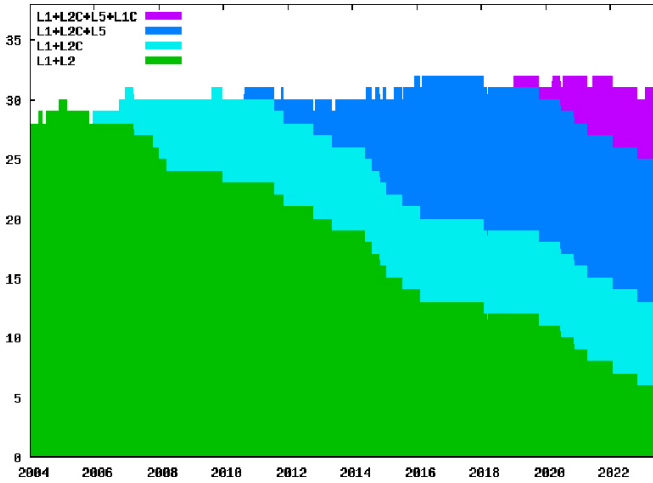


Abb. 10:
Von GPS bereit-
gestellte Signale
als Funktion der
Zeit

Heute können bereits Signale auf den Frequenzen L1 und L5 von insgesamt 67 Satelliten genutzt werden, zusätzlich zu den 18 GPS-Satelliten auch die 25 Galileo- und 24 BeiDou MEO-Satelliten gemessen werden. [Abb. 11](#) zeigt die Zunahme der Anzahl GNSS-Satelliten der drei Systeme, welche L5-Signale bereitstellen und [Abb. 12](#) zeigt exemplarisch die Verteilung der L5-Satelliten am Himmel über München am 26. Juni 2023. Mit der bereits beträchtlichen Anzahl Satelliten und dem absehbaren Abschalten der GPS-P-Codes ist es daher Zeit, den Umstieg auf die neuen Signale auf Nutzerseite zu planen.

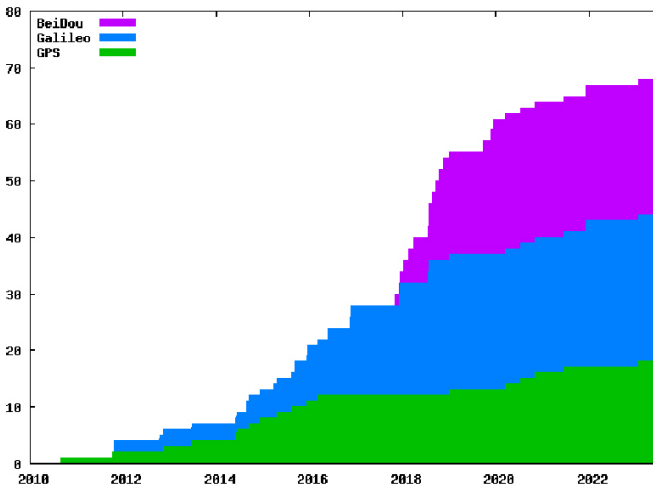


Abb. 11:
Anzahl Satelliten
der Systeme
GPS, Galileo und
BeiDou, welche
Signale auf L5
bereitstellen.

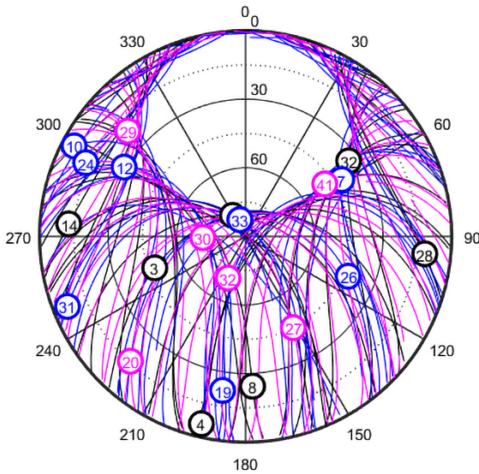


Abb. 12:
Verteilung der am 23. Juni 2023
um 14:00 UT am Himmel über
München sichtbaren GNSS-Satelli-
ten, welche Signale auf L5 bereit-
stellen (schwarz: GPS, blau: Galileo,
magenta: BeiDou).

4 Zusammenfassung

Wir haben heute Navigationssignale von über 100 Satelliten auf rund 20.000 km Bahnhöhe frei zugänglich verfügbar und können die vier GNSS als ein globales System von Navigationssatellitensystemen nutzen. Zum Vorteil der Anwender werden die Satellitensysteme immer interoperabler. Eine Vielzahl genauerer Signale wird auf gleichen Frequenzen bereitgestellt, aber auch die systemspezifischen Bezugssysteme sind mittlerweile alle innerhalb weniger Zentimeter mit dem ITRF (Internationalen Terrestrial Reference Frame) kompatibel. Die Atomuhren an Bord der Satelliten werden immer stabiler, zur Unterstützung von Echtzeit-Anwendungen. Mit der Einführung der GPS Block IIIIF-Satelliten werden alle Navigationssatelliten mit Reflektoren zur Laserdistanzmessung ausgerüstet sein, was Eingang in die konsistente Kombination des ITRF finden sollte. Signale auf der L5-Frequenz sind heute von zwei Dritteln der GNSS-Satelliten verfügbar. Auch wegen dem absehbaren Wegfall des GPS-P-Codes ist es Zeit, auf die neuen Signale auf L1 und L5 umzusteigen.

Literatur

- Albon, C. (2023): US Space Force crafting new schedule for GPS ground system. C4ISRNET, Feb. 2023. www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2023/02/14/us-space-force-crafting-new-schedule-for-gps-ground-system/.
- Dunn, M. J. (2022): Directions 2022: GPS positioned for the future, GPS Solutions. May 2022. www.gpsworld.com/directions-2022-positioned-for-the-future.

EUSPA (2022): EUSPA EO and GNSS Market Report. Issue 1. European Union Agency for the Space Programme. www.euspa.europa.eu/european-space/euspace-market/gnss-market/eo-gnss-market-report.

Federal Radionavigation Plan 2021 (2022): United States, Department of Defense, Department of Homeland Security, Department of Transportation, DOT-VNTSC-OST-R-15-0. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/63024>.

HAS SSD (2023): Galileo High Accuracy Service. Service Definition Document, Issue 1.0. European Union. www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has. DOI: 10.2878/265974.

Luzin, P. (2022): GLONASS Program for 2021–2030. Eurasia Daily Monitor, 18(12), <https://jamestown.org/program/glonass-program-for-2021-2030>.

Kontakt

Prof. Dr. Urs Hugentobler

Professur für Satellitengeodäsie, Technische Universität München

Arcisstraße 21, 80333 München

urs.hugentobler@tum.de

GNSS-Referenzsysteme – vom Systembetreiber zum Nutzer

Peter Steigenberger

1 Grundlagen

Geodätische Referenzsysteme bilden die metrologische Grundlage für globale Navigationssatellitensysteme (GNSS). Sie sind durch Ursprung, Orientierung und Skalierung definiert, siehe Abb. 1. Geozentrische und erdfeste Referenzsysteme (ECEF: Earth-centered Earth-fixed) haben ihren Ursprung im Erdmittelpunkt, sind mit der Erdoberfläche fest verbunden und drehen sich dadurch mit der Erde mit. Somit haben sie den Vorteil, dass Stationen auf der Erdoberfläche nur kleinen Variationen (Plattentektonik, Gezeiteneffekte etc.) unterworfen sind.

Geozentrische Inertialsysteme (ECI: Earth-centered inertial) haben ihren Ursprung ebenfalls im Erdmittelpunkt, ihre Orientierung folgt aber nicht der täglichen Erdrotation sondern bezieht sich auf extraterrestrische Objekte, die als raumfest angenommen werden. Für die GNSS-Anwender sind in erster Linie erdfeste Referenzsysteme relevant. Inertiale Referenzsysteme werden u. a. für die Bahnbestimmung von GNSS-Satelliten sowie GNSS-Anwendungen im Weltall benötigt.

Referenzrahmen bilden die Realisierung von Referenzsystemen, in der Regel durch die Bestimmung von Koordinaten, Geschwindigkeiten und ggf. weiterer Parameter ausgewählter Beobachtungsstationen. Das International Terrestrial Reference Frame (ITRF) ist in den Konventionen des International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS, Petit und Luzum 2010) folgendermaßen definiert:

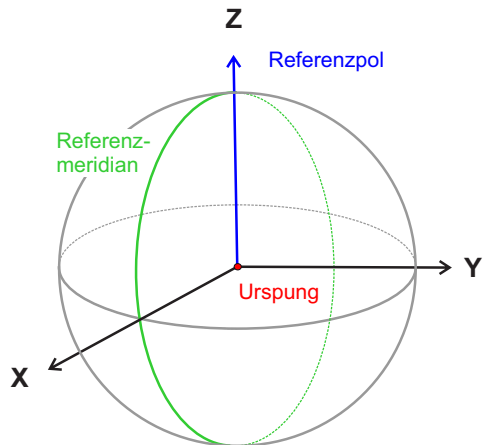


Abb. 1: Definition des Ursprungs und der Orientierung eines Referenzsystems

- Der Ursprung ist das Massenzentrum der gesamten Erde einschließlich Atmosphäre und Ozeane.
- Die Orientierung ist durch das Bureau International de l'Heure (BIH) Terrestrial System zur Epoche 1984.0 definiert, die zeitliche Entwicklung wird durch eine no-net-rotation Bedingung bezüglich der horizontalen Bewegungen über die gesamte Erde vorgegeben.
- Die Längeneinheit ist das SI Meter.

Das ITRF basiert auf Beobachtungen der geodätischen Raumverfahren

- GNSS: Globale Navigationssatellitensysteme (GPS, GLONASS, Galileo)
- SLR: Laserdistanzmessungen zu Satelliten
- VLBI: Radiointerferometrie auf langen Basislinien
- DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite sowie terrestrischen Verbindungsmessungen (local ties) an Stationen, die über mehrere Beobachtungsverfahren verfügen. Der Ursprung wird dabei durch SLR realisiert, die Skalierung durch SLR und VLBI. Weiterführende Informationen über die Definition und Realisierung von Referenzsystemen sind in Angermann et al. (2013), Jekeli und Montenbruck (2017) und Seitz et al. (2017) verfügbar.

Tab. 1: Beitrag der geodätischen Raumverfahren zu ITRF2020

Technik	Zeitraum	Stationen
GNSS	1994.0 – 2021.0	1344
SLR	1983.0 – 2021.0	136
VLBI	1980.0 – 2021.0	154
DORIS	1993.0 – 2021.0	201

Die aktuelle Realisierung des ITRS ist das ITRF2020 (Altamimi et al. 2023), das im April 2022 veröffentlicht wurde und insgesamt 1835 Stationen umfasst. Die Beiträge der geodätischen Raumverfahren zu ITRF2020 sind in Tab. 1 aufgeführt. Details zur Parametrisierung des ITRF2020 werden in Abschnitt 3 diskutiert.

2 GNSS-Referenzrahmen

Die vier globalen Navigationssatellitensysteme GPS, Galileo, BeiDou und GLONASS basieren jeweils auf eigenen Referenzrahmen, die in Tab. 2 aufgelistet sind. Diese sind allesamt an die zum Zeitpunkt ihrer Erzeugung aktuelle Version des ITRF angeglichen.

Tab. 2: Referenzrahmen der globalen Satellitennavigationssysteme

GNSS	Referenzrahmen	Abk.	Referenz
GPS	World Geodetic System 1984	WGS84	DoD (2014)
Galileo	Galileo Terrestrial Reference Frame	GTRF	GSA (2021)
BeiDou	BeiDou Coordinate System	BDCS	CSNO (2019)
GLONASS	Parametry Zemly 1990	PZ90.11	MoD (2014)

GPS

Das amerikanische Global Positioning System (GPS) verwendet das World Geodetic System 1984 (WGS84, DoD 2014). WGS84 basiert auf den sechs Monitorstationen der US Air Force (USAF) und 11 Stationen der National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Derzeit sind GPS-Beobachtungsdaten von 9 NGA Stationen (jeweils 2 Empfänger) im RINEX 2-Format (Gurtner und Estey 2006) über die Datenzentren (z. B. CDDIS¹) des International GNSS Service (IGS, Johnston et al. 2017) verfügbar. Zehn dieser Empfänger sind in ITRF2020 enthalten, so dass hier ideale Voraussetzungen für eine Angleichung der beiden Referenzrahmen vorliegen.

Die Stationskoordinaten der USAF- und NGA-Stationen sind öffentlich verfügbar, so dass in Verbindung mit den Beobachtungsdaten der NGA-Stationen durch differenzielle Positionierung ein direkter Zugang zum WGS84 möglich

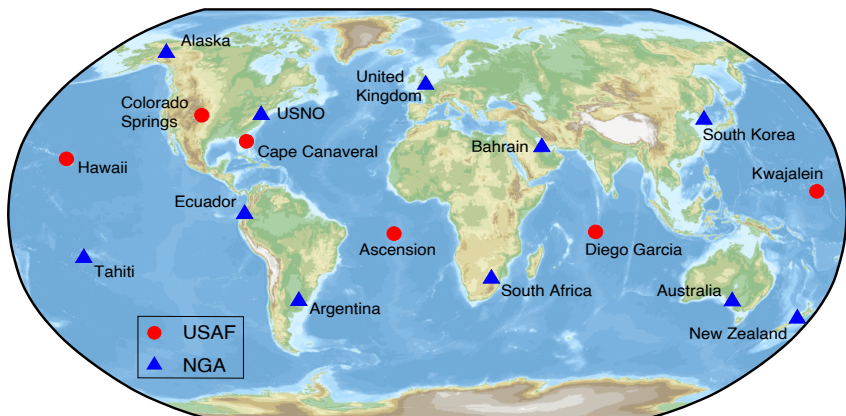


Abb. 2: Stationen des WGS84

1 <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily>

ist. Seit 3. Januar 2021 wird die WGS84-Realisierung G2139 verwendet (NGA 2021), die konsistent mit ITRF2014 bzw. der entsprechenden IGS-Realisierung IGB14 ist. Die Konsistenz der früheren Realisierung G1762 mit ITRF2008 wird in DoD (2014) mit 1 cm (RMS Differenz) angegeben.

Galileo

Das europäische GNSS Galileo basiert auf dem Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF), das vom Galileo Geodetic Reference Service Provider (GRSP) bereitgestellt wird. Das GTRF ist eine unabhängige Realisierung des ITRS und besteht im Kern aus den momentan 15 Galileo Sensor Stations (GSSs). Neben den GSSs, die Bestandteil des operationellen Galileo Systems sind, tragen noch 17 Galileo Experimental Sensor Stations (GESSs) sowie eine größere Anzahl an IGS-Stationen zum GTRF bei. Die aktuelle Version GTRF23v01 wird seit 5. Mai 2023 verwendet und ist über 90 IGS-Stationen an ITRF2020 angeglichen. Das GTRF wird mindestens einmal im Jahr aufdatiert, bei Bedarf (z. B. aufgrund signifikanter Koordinatenänderungen durch Erdbeben) auch öfter. Die Koordinatendifferenzen zwischen GTRF und ITRF müssen dabei gemäß GSA (2021) kleiner als 3 cm (2σ) sein.

BeiDou

Das BeiDou Coordinate System (BDOS) ist ebenfalls eine Realisierung des ITRS (CSNO 2019). Es besteht aus etwa 100 Stationen, davon 10 Monitorstationen des operationellen BeiDou-Systems. Die aktuelle Version 2019V01 ist dabei über 31 IGS-Stationen an ITRF2014 angeglichen. Laut Zhou et al. (2022) ist die Genauigkeit der Koordinaten besser als 1 cm. Die Translationen gegenüber ITRF2014 liegen im Bereich von 0,2 bis 3 mm, die Rotationen betragen bis zu 0,1 mas und die Differenz in der Skalierung ist 0,01 ppb.

GLONASS

GLONASS basiert auf dem System Parametry Zemly 1990 (Erdparameter 1990), das eine Realisierung des ITRS basierend auf 8 Monitorstationen und 11 IGS-Stationen auf russischem Territorium ist. Die aktuelle Version PZ-90.11 stammt aus dem Jahr 2011 und ist an ITRF2008 angeglichen. Die Genauigkeit des Ursprungs wird in MoD (2014) mit 5 cm angegeben, die Orientierung mit 1 mas und die Relativposition der Stationen mit 0,5 bis 1,0 cm.

3 Referenzrahmen im International GNSS Service

Die IGS-Produkte beziehen sich jeweils auf einen eigenen IGS-Referenzrahmen, der zwar an die entsprechende ITRF-Version angeglichen ist, sich von dieser aber dennoch unterscheidet. Die Parametrisierung ist aber jeweils identisch zur entsprechenden ITRF-Version. Koordinaten x zur Beobachtungsepoche t werden durch eine Koordinate zur Referenzeпоche t_0 und eine dazugehörige Stationsgeschwindigkeit \dot{x} dargestellt:

$$x(t) = x(t_0) + \dot{x} \cdot (t - t_0) \quad (1)$$

Koordinatendiskontinuitäten z. B. Aufgrund von Antennenwechseln werden durch unterschiedliche Koordinatensätze und ggf. auch Geschwindigkeitssätze berücksichtigt. Größere Abweichungen von diesem linearen Modell werden in erster Linie durch Erdbeben verursacht. Postseismische Deformationen (PSDs) werden durch ein Modell mit einem logarithmischen (Index l) und einem exponentiellen Anteil (Index e) beschrieben:

$$\text{PSD}(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{\tau_i^l}\right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e}}\right) \quad (2)$$

n ist dabei die Anzahl der vor t stattgefundenen Erdbeben, t_i die Epoche des Erdbebens i und τ_i die jeweilige Abklingzeit. Je nach Verhalten der Stationsbewegung kann nur der logarithmische Anteil, nur der exponentielle Anteil, oder die Kombination aus beiden verwendet werden.

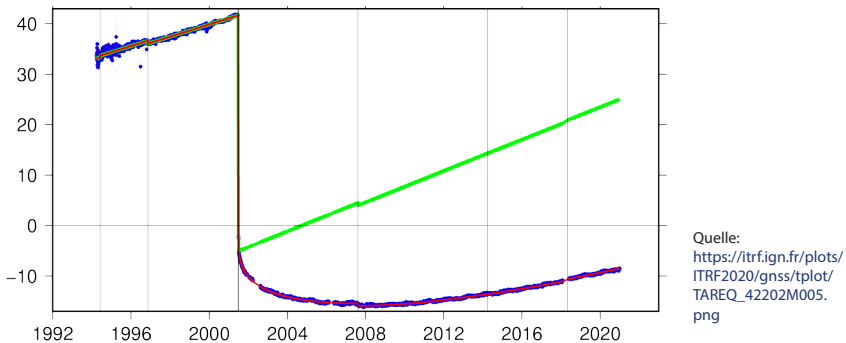


Abb. 3: Ostkomponente der IGS-Station AREQ00PER in Arequipa (Peru), blau: tägliche GNSS-Lösungen, grün: lineares Modell, rot: PSD-Modell. Die vertikalen Linien markieren Diskontinuitäten.

Abb. 3 zeigt die Zeitreihe der Ostkomponente der IGS-Station AREQ00PER in Arequipa (Peru), die am 23. Juni 2001 von einem Erdbeben der Stärke 8,4 betroffen war. Dieses äußert sich in einem Sprung von etwa einem halben Meter und einer anschließenden, sich über mehrere Jahre erstreckenden post-seismischen Phase. In dieser treten Differenzen von bis zu 30 cm bezüglich des linearen Modells (grün) auf. Die Abweichungen gegenüber dem PSD-Modell liegen hingegen lediglich im Bereich weniger Millimeter. Die vertikalen Linien in Abb. 3 markieren Diskontinuitäten aufgrund eines Antennenwechsels im Jahr 2018 sowie weiterer Erdbeben, die wegen ihrer geringeren Stärke und/oder größeren Entfernung einen deutlich kleineren Einfluss auf die Station hatten.

Erstmals wurden bei ITRF2020 auch saisonale Variationen $\Delta x_s(t)$ der Stationskoordinaten in Form von jährlichen ($j = 1$) und halbjährlichen ($j = 2$) Sinus- und Cosinusoeffizienten a_j und b_j bestimmt:

$$\Delta x_s(t) = \sum_{j=1}^{n_f} a_j^i \cos \omega_j t + b_j^i \sin \omega_j t \quad (3)$$

Für die Erzeugung der operationellen IGS-Produkte werden diese Terme momentan aber nicht berücksichtigt. Die beobachteten und modellierten saisonalen Variationen sind exemplarisch für die Station Porto Velho (Brasilien) in Abb. 4 dargestellt. Die Amplitude der modellierten jährlichen Schwingung beträgt etwa 15 mm. Die Standardabweichung nach Berücksichtigung des saisonalen Modells liegt bei 5 mm.

Für GNSS-Anwendungen spielt die Konsistenz des verwendeten Antennenmodells mit dem entsprechenden Referenzrahmen eine wichtige Rolle. Die GNSS-Lösung für ITRF2020 wurde im Rahmen der dritten Reprozessierungskampagne des IGS (repro3) mit dem dedizierten Antennenmodell `igsR3.atx` erzeugt. Dieses unterscheidet sich vom damals in der operationellen Prozessierung verwendeten IGS-Antennenmodell `igs14.atx` u. a. durch Mehrfrequenz-

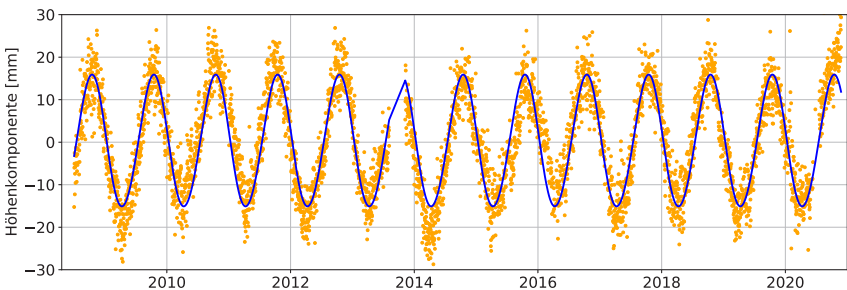


Abb. 4: Höhenkomponente der IGS-Station POVE00BRA in Porto Velho (Brasilien): Beobachtung (orange Punkte) und Modell (blaue Linie)

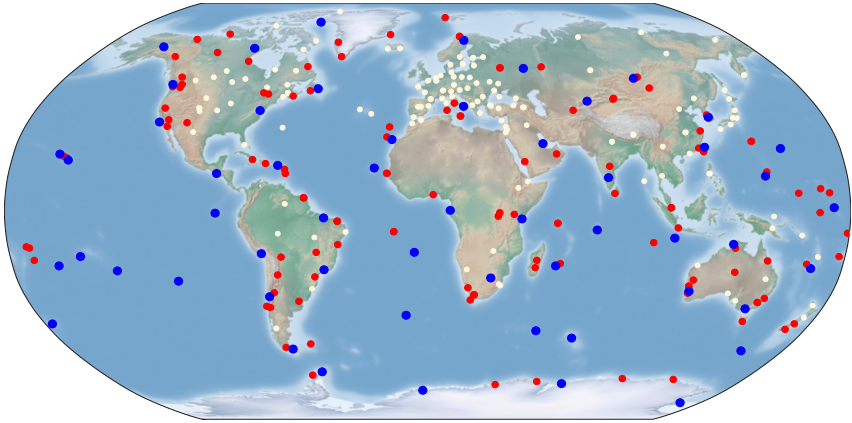


Abb. 5: Stationen des IGS20-Referenzrahmens. Primäre Kernstationen sind in blau dargestellt, weitere Kernstationen in rot.

kalibrierungen von 37 häufig verwendeten Empfängerantennen (Wübbena et al. 2019), die eine konsistente Prozessierung von Galileo E5a-Beobachtungen ermöglichen. Im Gegensatz zu früheren IGS-Reprozessierungskampagnen wurden für repro3 erstmalig auch Galileo-Beobachtungen verwendet.

Für das aktuelle Antennenmodell `igs20.atx` wurden weitere L1/L2-Empfängerantennenkalibrierungen aus `igsR3.atx` durch Mehrfrequenzkalibrierungen ersetzt. Da ein Wechsel der Antennenkalibrierung auch eine Änderung der damit bestimmten Stationskoordinaten nach sich zieht ist `igs20.atx` dadurch nicht mehr kompatibel mit repro3 bzw. ITRF2020. Um diese Inkonsistenz zu beheben wurden für Stationen mit den entsprechenden Antennen Koordinatendifferenzen zwischen PPP-Lösungen mit `igsR3.atx` und `igs20.atx` bestimmt. Diese Korrekturen betragen bis zu 3 mm für die Lagekomponenten und bis zu 13 mm für die Höhe und wurden für den IGS-Referenzrahmen IGS20 an den ITRF2020-Koordinaten angebracht. Obwohl sich die Stationskoordinaten der betroffenen Stationen somit von ITRF2020 unterscheiden ist IGS20 bezüglich Ursprung, Orientierung und Skalierung identisch mit ITRF2020.

IGS20 besteht aus insgesamt 332 Stationen aus dem ITRF2020, siehe Abb. 5, die über eine hohe Stabilität und ein niedriges Rauschen der Koordinatenzeitreihen verfügen. Gegenüber seinem Vorgänger IGB14 beinhaltet IGS20 98 zusätzliche Stationen, 25 Stationen aus IGB14 wurden nicht mehr berücksichtigt. Aufgrund der oben genannten Gründe muss der IGS20-Referenzrahmen immer zusammen mit dem `igs20.atx` Antennenmodell verwendet werden, um eine konsistente Datenauswertung zu gewährleisten.

Wie ITRF2020 ist IGS20 ein statischer Referenzrahmen, d. h. es werden keine Veränderungen (z. B. Erdbeben, Sprünge durch Antennenwechsel etc.) berücksich-

sichtigt, die nach der Erzeugung dieser Referenzrahmen auftreten. Solche Änderungen sind in den kumulativen IGS-Lösungen berücksichtigt. Diese beinhalten dabei Daten aus dem gesamten repro3-Zeitraum (2. Januar 1994 bis 31. Dezember 2020), die mit Daten aus der operationellen Prozessierung ergänzt werden. Sie werden alle 8 Wochen aktualisiert und sind bezüglich Ursprung, Orientierung und Skalierung an IGS20 angeglichen.

4 Zugang zu Referenzrahmen

Der Zugang zu einem bestimmten Referenzrahmen wird dem GNSS-Nutzer bei der Absolutpositionierung über die dafür erforderlichen Bahn- und Uhrenprodukte ermöglicht. Bei der Relativpositionierung erfolgt der Zugang über die Koordinaten der Referenzstation(en). Nutzer der von den GNSS-Betreibern zur Verfügung gestellten Positionierungsdienste, z. B. dem GPS Standard Positioning Service (SPS, GPS SPS PS 2020) oder dem Galileo Open Service (OS, GSA 2021), greifen hierfür auf die Bahn- und Uhreninformationen aus der Navigationsnachricht zurück. Für deren Erzeugung werden Beobachtungsdaten der Monitorstationen im Kontrollzentrum für die Bahn- und Uhrenbestimmung verwendet. Hierbei werden die Koordinaten der Monitorstationen fixiert, die in den Referenzrahmen des jeweiligen GNSS gegeben sind (Tab. 2).

Die so geschätzten und prädizierten Bahn- und Uhrenparameter werden über Uplink-Stationen zu den GNSS-Satelliten transferiert und von diesen in Form der Navigationsnachricht an die Nutzer übertragen, siehe Abb. 6. Somit sind die

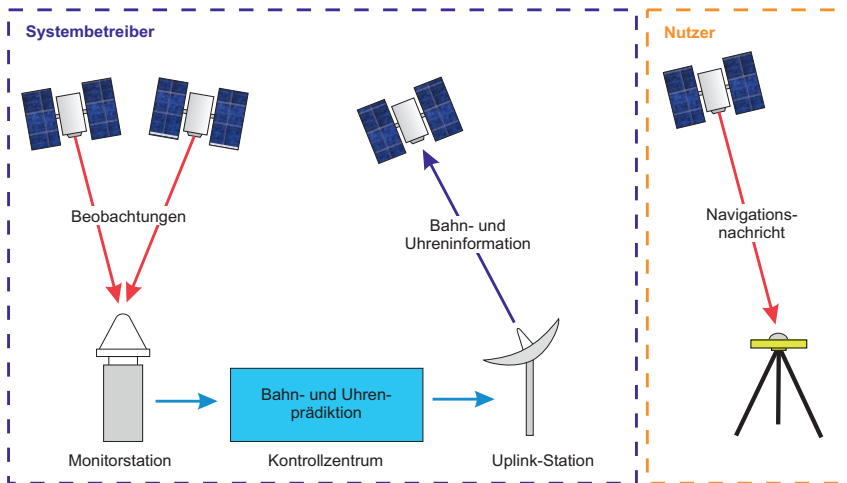


Abb. 6: Erzeugung der GNSS-Navigationsnachricht und Übertragung zum Nutzer

Tab. 3: Referenzrahmenprodukte des IGS. yyyy und ddd stehen dabei für das Jahr und den Tag des Jahres, www für die GPS-Woche

Produkt	Dateiname	
Tageslösung	IGS00PSSNX_yyyyddd0000_01D_01D_CRD.SNX	a
Wochenlösung	IGS00PSSNX_yyyyddd0000_07D_07D_CRD.SNX	a
Kum. Lösung	IGS00PSSNX_1994002_yyyddd_00U_SOL.SNX	b
IGS20	IGS20.ssc	c
IGS20 PSDs	psd_IGS20.snx	c

a <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/> (Alternativ <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>) Unterordner www für die GPS-Woche

b <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/>, Unterordner www für die GPS-Woche, alle 8 Wochen verfügbar beginnend mit GPS-Woche 2253 (Rebischung 2023)

c <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGS20/> (Alternativ: <https://files.igs.org/pub/station/coord/>)

dadurch bestimmten Koordinaten im Referenzrahmen des Systembetreibers gegeben. Die Positionierungsgenauigkeit wird aber durch die Genauigkeit der Broadcastbahnen und -uhren beschränkt und liegt deutlich über den Differenzen zwischen den GNSS-Referenzrahmen und dem ITRF. Der Signal-in-Space Range Error (SISRE, Montenbruck et al. 2015) spiegelt im Wesentlichen die Bahn- und Uhrengenauigkeit wider. Für die Broadcastbahnen und -uhren beträgt er für GPS etwa 0,5 m, für Galileo 0,20 bis 0,25 m, für BeiDou einen Meter und für GLONASS zwei Meter (Montenbruck et al. 2018).

Bei der Absolutpositionierung mit präzisen Bahn- und Uhrenprodukten liegen die Positionierungsergebnisse im bei der Produktgenerierung verwendeten Referenzrahmen vor. Die IGS-Produkte basieren seit dem 27. November 2022 (GPS-Woche 2238) auf dem Referenzrahmen IGS20 und dem Antennenmodell `igs20.atx`. Precise Point Positioning (PPP) mit präzisen Bahn- und Uhrenprodukten des IGS liefert somit Stationskoordinaten im Referenzrahmen IGS20.

Für differenzielle Positionierung im IGS20-Referenzrahmen sind entsprechende Stationskoordinaten und ggf. -geschwindigkeiten sowie PSDs erforderlich. Hierfür geeignete Produkte sind in Tab. 3 aufgeführt. Sie werden vom IGS Reference Frame Coordinator als Kombinationslösung der einzelnen IGS-Analysezentren erzeugt. Die Tages- und Wochenlösungen beinhalten dabei jeweils nur Stationskoordinaten, die kumulative Lösung und IGS20 zusätzlich noch Stationsgeschwindigkeiten, zu denen auch jeweils passende PSDs verfügbar sind. Im Rahmen des Wechsels zu IGS20/igs20.atx wurden im IGS auch lange Dateinamen eingeführt, die in IGS-IC (2022) erläutert werden.

Koordinaten in inertialen Referenzrahmen werden für Weltraumanwendungen benötigt. Über modernisierte GNSS-Navigationsnachrichten werden dem Nutzer auch Erdrotationsparameter zur Verfügung gestellt (Steigenberger

et al. 2022), die einen Zugang zum inertialen Referenzrahmen ermöglichen. Dies betrifft GPS mit CNAV auf den L2C- und L5-Signalen sowie CNAV-2 auf L1C und BeiDou mit CNAV-1 auf B1C, CNAV-2 auf B2a und CNAV-3 auf B2b. GLONASS und Galileo verfügen über keine derartigen Informationen. Die in CNAV übertragenen Erdrotationsparameter umfassen dabei die Polkoordinaten und UT1 sowie deren Raten.

Die Transformation einer erdfesten Position \mathbf{r}_{ECEF} in den inertialen Referenzrahmen wird durch eine Matrixmultiplikation dargestellt (Petit und Luzum 2010):

$$\mathbf{r}_{ECI} = \mathbf{Q}(t) \cdot \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{r}_{ECEF} \quad (4)$$

Die Matrix \mathbf{Q} beschreibt dabei den Einfluss von Nutation und Präzession, die beide hinreichend genau modelliert werden können (Wallace und Capitaine 2006). In die Matrix \mathbf{R} fließt über den Erdrotationswinkel UT1 ein, in \mathbf{W} die Polbewegung. Somit ist mit den von CNAV übertragenen Erdrotationsparametern eine Transformation ins Inertialsystem möglich.

Bei den via CNAV übertragenen Erdrotationsparametern handelt es sich um Prädiktionen mit einer Genauigkeit von 0,3 bis 1,0 mas für die Polbewegung und etwa 0,13 ms für UT1 (Steigenberger et al. 2022). Dies entspricht einem Transformationsfehler von unter 1 m im geostationären Orbit. In Anbetracht der aktuell erreichbaren GNSS-Positionierungsgenauigkeit in dieser Orbithöhe von etwa 20 m ist dieser Fehler momentan vernachlässigbar. Die Differenzen zwischen den GPS CNAV Polparametern und der IERS C04 Referenzreihe sind

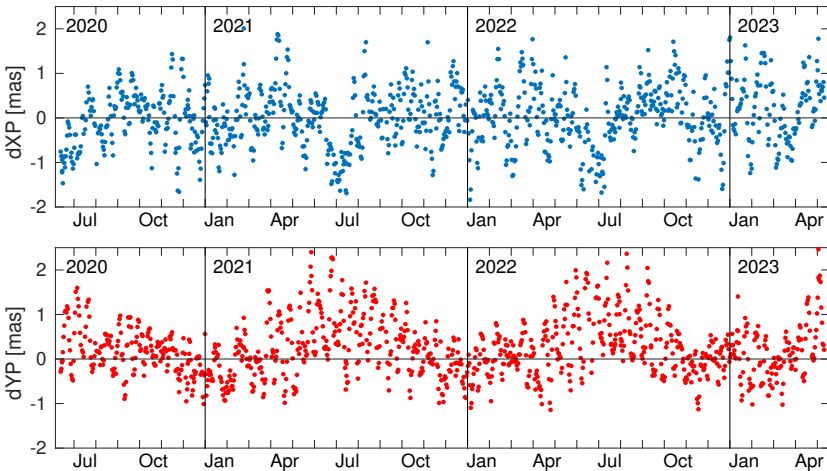


Abb. 7: Differenzen zwischen GPS CNAV Polparametern und IERS C04

in Abb. 7 dargestellt. Der RMS der Differenzen beträgt 0,70 mas für den X-Pol und 0,68 mas für den Y-Pol. Da die Differenzen für die jeweils erste Empfangs-epoche eines neuen Datensatzes bestimmt wurden repräsentieren diese Werte allerdings eine optimistische Genauigkeitsabschätzung unter Idealbedingungen.

5 Zusammenfassung

Der Zugang zu den Referenzrahmen der GNSS-Betreiber erfolgt über die Satellitenbahn- und -uhrenparameter, welche durch die Navigationsnachricht übertragen werden. WGS-84, GTRF, BDCS und PZ-90.11 sind dabei mit Zentimeter-Genauigkeit an die jeweilige ITRF-Version angeglichen. Aufgrund der deutlich höheren Fehler der Broadcast-Bahnen und -Uhren sind diese Differenzen aber vernachlässigbar.

Nutzer von präzisen Produkten des IGS erlangen durch diese den Zugang zum Referenzrahmen, der für die Erzeugung dieser Produkte verwendet wurde. Im Falle der Absolutpositionierung erfolgt dies über die Bahn- und Uhrenprodukte, im Falle der Relativpositionierung über die Koordinaten der Referenzstation(en). In beiden Fällen muss aber unbedingt auf die Verwendung des mit dem Referenzrahmen konsistenten Antennenmodells geachtet werden.

Literatur

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., Chanard, K. (2023): ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy* 97(5). DOI: [10.1007/s00190-023-01738-w](https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w).
- Angermann, D., Seitz, M., Drewes, H. (2013): *Global Terrestrial Reference Systems and Their Realizations*. Springer Berlin Heidelberg, 97–132. DOI: [10.1007/978-3-642-28000-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28000-9_3).
- CSNO (2019): BeiDou Coordinate System. <http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201912/W020191209581164831734.pdf>.
- DoD (2014): Department of Defence World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic systems. <https://nsgreg.nga.mil/doc/view?i=4085,version1.0.0>.
- GPS SPS PS (2020): Global positioning system standard positioning service performance standard. Tech. rep. www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf.
- GSA (2021): European GNSS (Galileo) open service: Service definition document. Tech. Rep. Issue 1.2. www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.2.pdf.
- Gurtner, W., Estey, L. (2006): RINEX: The receiver independent exchange format version 2.11. Tech. rep. <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>.
- IGS-IC (2022): Product filenames in the IGS, Version 2.0. https://files.igs.org/pub/re-source/guidelines/Guidelines_For_Long_Product_Filenames_in_the_IGS_v2.0.pdf.

- Jekeli, C., Montenbruck, O. (2017): Time and reference systems. In: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer International Publishing, 25–58. DOI: [10.1007/978-3-319-42928-1_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_2).
- Johnston, G., Riddell, A., Hausler, G. (2017): The International GNSS Service. In: Teunissen, P., Montenbruck, O. (Eds): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, chap 33, 967–982. DOI: [10.1007/978-3-319-42928-1_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33).
- MoD (2014): Parametry Zemli 1990 (PZ-90.11) Reference Document. https://eng.mil.ru/files/PZ-90.11_final-v8.pdf. Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation.
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. (2015): Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions* 19(2): 321–333. DOI: [10.1007/s10291-014-0390-8](https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8).
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. (2018): Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – methodology and results. *Advances in Space Research* 61(12): 3020–3038. DOI: [10.1016/j.asr.2018.03.041](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.041).
- NGA (2021): Recent update to WGS 84 reference frame and NGA transition to IGS ANTEX. [https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=\(U\)WGS 84\(G2139\).pdf](https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=(U)WGS%2084(G2139).pdf).
- Petit, G., Luzum, B. (2010): IERS Conventions (2010): IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main.
- Rebischung, P. (2023): [IGSMail-8331] IGS cumulative SINEX solution resumes. <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2023/008327.html>.
- Seitz, M., Angermann, D., Bloßfeld, M. (2017): Geometrische Referenzsysteme. In: Erdmessung und Satellitengeodäsie, Springer Berlin Heidelberg, 325–348. DOI: [10.1007/978-3-662-47100-5_17](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47100-5_17).
- Steigenberger, P., Montenbruck, O., Bradke, M., Ramatschi, M., Hessels, U. (2022): Evaluation of earth rotation parameters from modernized GNSS navigation messages. *GPS Solutions* 26(2). DOI: [10.1007/s10291-022-01232-4](https://doi.org/10.1007/s10291-022-01232-4).
- Wallace, P., Capitaine, N. (2006): Precession-nutation procedures consistent with IAU 2006 resolutions. *Astronomy & Astrophysics* 459: 981–985. DOI: [10.1051/0004-6361:20065897](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065897).
- Wübbena, G., Schmitz, M., Warneke, A. (2019): Geo++ absolute multi frequency GNSS antenna calibration. In: EUREF Analysis Center (AC) Workshop, Warsaw, Poland. www.geopp.com/pdf/gpp_cal125_euref19_p.pdf.
- Zhou, S., Liu, L., Xu, J., Qu, W., Zhang, H., Yang, Y., Hu, X., Xia, F. (2022): BeiDou Coordinate System (BDOS) status and precise transfer. In: 16th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems. www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2022/ICG16/wgd-09.pdf.

Kontakt

Peter Steigenberger
DLR/GSOC
Münchener Straße 20, 82234 Weßling
peter.steigenberger@dlr.de

Welches Potenzial haben neue Korrekturdatendienste und GNSS-Massenmarkt – Empfänger für zivile Anwendungen

Anja Heßelbarth

1 Einleitung

Bei klassischen Vermessungsaufgaben wie Absteckung oder Geländeaufnahme ist der Einsatz von GNSS-Technik schon lange etabliert. Auch langfristig statische oder permanente Messungen auf präzisen Vermessungspunkten oder Referenzstationen bilden eine wichtige Säule des weltweiten Vermessungswesens. Um die erforderlichen Genauigkeiten von mm bis cm zu erreichen, ist der Einsatz von hochpräziser GNSS-Sensorik, d. h. einem geodätischen Empfänger inkl. externer Antenne sowie hochpräziser Korrekturdatenströme erforderlich.

Zusätzlich zu diesen teuren geodätischen GNSS-Ausrüstungen haben sich im letzten Jahrzehnt die preisgünstigen sogenannten Low-Cost- bzw. Massenmarktempfänger weiterentwickelt und erreichen mittlerweile ein Genauigkeitsniveau von weniger als einem Dezimeter in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen. Diese Genauigkeiten sind für zahlreiche Anwendungen im Bereich der Positionierung, Navigation und Geodatenerfassung ausreichend.

Auch der Markt der Korrekturdaten befindet sich im Wandel. Zusätzlich zu den klassischen Beobachtungskorrekturen, ausgesandt von physischen Referenzstationen oder abgeleitet von virtuellen Referenzstationen, etablieren sich Korrekturdaten im sogenannten Zustandsraum, wie sie für Echtzeit-*Precise Point Positioning* (PPP) genutzt werden.

Dieser Beitrag liefert einen Einblick über den aktuellen Stand der Low-Cost GNSS-Sensorik und über die Entwicklungen im Bereich von Echtzeit-Korrekturdaten. Die Schwerpunkte sind dabei Ergebnisse, die mit einem Ublox ZED-F9P erreicht werden können und die hochpräzisen Korrekturdaten des im Januar 2023 gestarteten Dienst von Galileo, dem *High Accuracy Service* (HAS).

2 Low-Cost GNSS-Empfänger

Heutige Low-Cost Empfänger können Positionsgenauigkeiten von 1 bis 2 cm erreichen, sind allerdings um mehr als das 10- bis 20-fache günstiger als eine

geodätische Ausrüstung. Der Unterschied zu den geodätischen Empfängern, eine Übersicht zu ausgewählter Low-Cost GNSS-Sensorik sowie Ergebnisse des Ublox ZED-F9P werden in diesem Kapitel behandelt.

2.1 Vergleich mit Geodätischen Empfängern

Geodätische GNSS-Ausrüstungen können nahezu alle Signale auf allen Frequenzen der derzeitigen GNSS-Konstellation empfangen. Auch die meisten Low-Cost GNSS-Empfänger sind in der Lage, Signale aller GNSS zu verarbeiten, aufgrund der begrenzten Anzahl der Kanäle allerdings meist nur auf jeweils zwei Frequenzen. Im Gegensatz zum geodätischen Empfangssystem sind kein Gehäuse, Bedienfeld zur Steuerung sowie interne Akkus vorhanden. Vielmehr ist die komplette Sensorik der eigentliche GNSS-Chip und eine Platine bzw. ein Board mit den wichtigsten Anschlüssen und Verbindungen. Preislich liegen die Low-Cost Empfänger zwischen 200 und 700 Euro. Oftmals muss noch die notwendige externe Antenne von 70 bis 100 Euro dazugerechnet werden. Konfiguration bzw. Steuerung erfolgen größtenteils über eine produktspezifische kostenfreie Software. Mittels einer Ntrip (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*)-Schnittstelle kann die Low-Cost Sensorik auch Beobachtungskorrekturdaten empfangen bzw. aussenden und verarbeiten, was letztlich dazu führt, dass Genauigkeiten von ca. 1 cm erreicht werden (Wielgocka et al. 2021).

Geodätische Empfänger haben vor allen in suburbanen und urbanen Gebieten noch große Vorteile, da auch hier größtenteils cm-genaue Positionsergebnisse zuverlässig erzielt werden können, währenddessen die Low-Cost Sensorik in diesen Umgebungen teilweise noch an ihre Grenzen stößt (Janos und Kuras 2021). Die klassischen GNSS-Empfänger haben ihre Vorteile daher für den alltäglichen bzw. routinierten Einsatz im Vermessungsbetrieb, wo es auf eine schnelle und zuverlässige Positionsbestimmung mit einfachen bzw. erprobten Konfigurationen ankommt.

Die Low-Cost GNSS-Empfänger können zur statischen und kinematischen Punktbestimmung verwendet werden. Aufgrund des geringen Gewichts und Größe sind sie leicht auf kleinen mobilen Plattformen montiert. Einige Firmen bieten auch sogenannte Entwicklungssets an, sodass der Anwenderkreis eigene Multisensorsysteme aufbauen kann. Diese Empfänger werden vor allen in vielen Teilen der Forschung gerne genutzt.

2.2 Überblick aktueller Low-Cost GNSS-Empfangssysteme

Der Markt für Low-Cost Empfänger ist in den vergangenen Jahren stetig gewachsen und es gibt zahlreiche Firmen, die sich in diesen Bereich spezialisiert haben. Am bekanntesten ist die Firma Ublox (Schweiz), die seit Anfang 2000 GPS- bzw. GNSS-Chips entwickelt. Zahlreiche Forschungsinstitutionen arbeiten seit dieser Zeit mit diesen Chips und nutzen ihn für eigene Entwicklungen.

Swift Nav. bietet bereits fertige GNSS-Module für präzise GNSS-Anwendungen an. Diese enthalten sogenannte Entwicklungssets, die unter anderem den eigentlichen GNSS-Chip, die Entwicklungsboards, Antennen sowie zahlreiche Anschlüsse, Antennenadapter und Kabel enthalten.

Tab. 1 gibt einen Überblick der technischen Daten aktueller Chips bzw. fertiger GNSS-Boards der Firmen Ublox (Ublox 2023a) und Swift Nav. (Swift Navigation 2022) sowie von NVS Technologies (NVS Technologies 2022) und Skytraq (SkyTraQ 2020).

Bei allen Empfängern können nach Herstellerangaben Genauigkeiten von ca. 1 cm in weniger als 60 s erreicht werden. Bei kurzem Signalverlust beträgt die Neuinitialisierung weniger als 2 s, mit Ausnahme des NV08C-RTK. Ursache

Tab. 1: Überblick ausgewählter Low-Cost GNSS-Systeme (eigene Auswahl)

Modell	Piksi Multi (Board)	ZED-F9P (Chip)	NV08C-RTK (Board)	Px1122R (Chip)
Hersteller	Swift Nav	Ublox	NVS Technologies	SkyTraQ
Genauigkeit, TTFF lt. Hersteller	RTK: 1 bis 2 cm < 60s (Cold) < 2 s (Re-Start)	RTK: 1 cm < 24 s (Cold) < 2 s (Re-Start)	RTK: 1 cm < 40 s (Cold) < 20 s (Re-Start)	RTK: 1 cm < 29 s (Cold) < 1 s (Re-Start)
Preis	750 \$	ca. 300 \$	ca. 150 \$	275 \$
Gewicht	21 g	7 g	18 g	1,7 g
Größe mm	71 × 48 × 12,4	17 × 22 × 2,4	71 × 46 × 8,1	12 × 16 × 2,2
Signale	L1/L2, G1/G2, B1/B2, E1/E5b, SBAS	L1/L2, G1/G2, E1/E5b, B1/B2, SBAS, QZSS	L1, G1, E1, SBAS	L1/L2, B1/B2, E1/E5b, G1/G2
Data Rates	10 Hz	20 Hz	20 Hz	Keine Angaben
Kommunikation	RTCM 3.x, Swift binary protocol	RTCM 3.3, NMEA, SPARTN, UBX binary	RTCM 3.1, NMEA	RTCM 3.x, NMEA, SkyTraq raw data

könnte sein, dass bei diesem Empfänger nur auf einer Frequenz die Signale von GPS, Galileo und GLONASS verarbeitet werden. Alle anderen Chips bzw. Module können die Signale aller GNSS auf zwei Frequenzen empfangen. Das für die Echtzeitanwendung definierte RTCM-Format (RTCM SC 104 2020) sowie das für die Kommunikation zwischen Navigationsgeräten genutzte NMEA 0183-Format (NMEA 2023) wird von allen Low-Cost Empfängern unterstützt. Zusätzlich gibt es noch empfinderspezifische Datenformate.

Bei der Betrachtung von Low-Cost GNSS bzw. Massenmarktempfänger sind an dieser Stelle die Smartphones zu erwähnen. Seit Android 7 (Banville und van Diggelen 2016) im Jahre 2016 und dem Empfang von Phasenbeobachtungen kann man mit Smartphones Positionen cm-genau bestimmen. Dazu müssen die Daten aufgezeichnet und im *postprocessing* ausgewertet werden. Nach einer Beobachtungszeit von ca. 1 h und festgesetzten Phasenmehrdeutigkeiten können Genauigkeiten von 1 bis 2 cm erzielt werden. Nähere Informationen sind u. a. in Wanninger und Heßelbarth 2020 sowie Heßelbarth und Wanninger 2021 zu finden.

2.3 Ublox ZED-F9P und Multibandantenne ANN-MB

Ein derzeit häufig verwendeter Low-Cost GNSS-Chip ist der ZED-F9P der Firma Ublox. Für folgende Untersuchungen wurde dieser zusammen mit der Multibandantenne ANN-MB (Ublox 2021) verwendet. Der Ublox-Chip ist bereits auf dem GPS-RTK-SME Breakout Board der Firma *SparkFun* installiert (Abb. 1). Das Board hat einen USB- und Antennen-Anschluss sowie eine serielle Schnittstelle zum Senden und Empfangen von Korrekturdaten.

Für optimale Empfangsbedingungen wurde das Ublox-System auf dem Dach eines Gebäudes montiert. Die Datenaufzeichnung erfolgte über mehrere Stunden. Zusätzlich wurden in den ersten Stunden noch Beobachtungskorrekturen genutzt, um eine (*Real Time Kinematic*)-Lösung zu erzeugen.



Abb. 1:
Ublox ZED-F9P
mit SparkFun-
Board und
ANN-MB An-
tenne

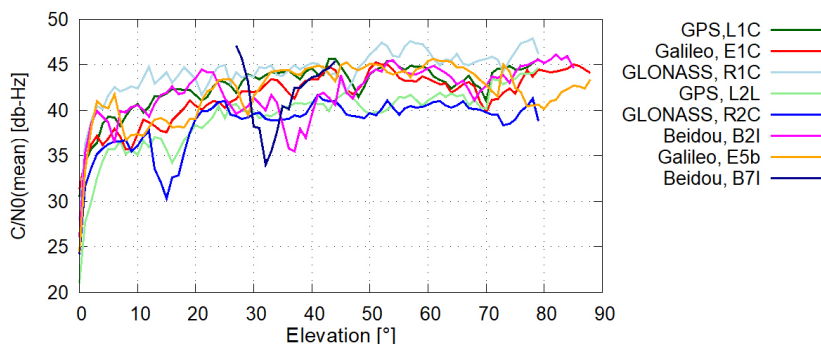


Abb. 2: Signal-Rausch-Verhältnis des Ublox ZED-F9P

In Abb. 2 ist das aus Einzelmessungen abgeleitete mittlere Signal-Rausch-Verhältnis für jedes Signal dargestellt.

Dies ist ein wichtiger Parameter, um zum einen die Signalqualität zu beurteilen. Zum anderen kann abgeleitet werden, wie stark die Antenne Signale verstärken kann. Wie bei einem geodätischen Empfänger bzw. Antenne ist eine Elevationsabhängigkeit vorhanden, d. h. Signale unter 10° Elevation haben mit <35 db-Hz eine schlechtere Signalqualität. Im Vergleich zur geodätischen GNSS-Ausrüstung ist das Signal-Rausch-Verhältnis etwas schlechter. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in Wielgocka et al. 2021 gezeigt.

Wie schon erwähnt, wurde während der Datenaufzeichnung eine RTK-Auswertung mittels Korrekturdaten durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Abweichung in Nord und Ost dargestellt (Abb. 3). Grün kennzeichnet die Lösung mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten, während Rot die Lösung mit Mehrdeutigkeitschätzung repräsentiert. Wie zu erkennen, konnte bereits nach wenigen Sekunden eine sogenannte Fixed-Lösung erzeugt werden und die Positionsgenauigkeit beträgt 1 bis 2 cm. Eine Neuinitialisierung dauerte nur wenige Sekunden.

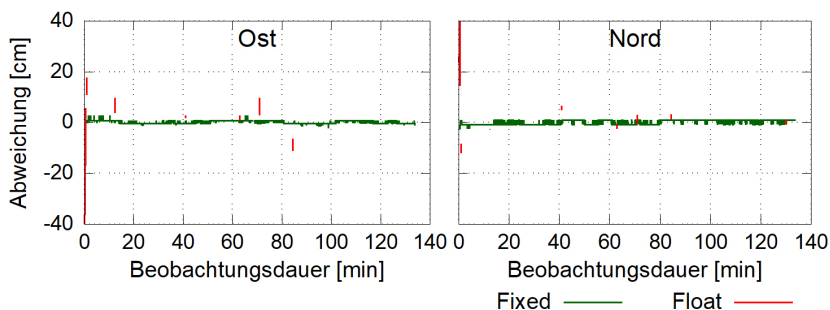


Abb. 3: Genauigkeit der RTK-Auswertung des Ublox ZED-F9P

Mit den aufgezeichneten Beobachtungen und den Daten einer virtuellen Referenzstation konnte mittels WaSoft (WaSoft 2023) eine Basislinienauswertung im *postprocessing* durchgeführt werden. Die gesamten Beobachtungen wurden dabei in 15 min Intervalle unterteilt. Aus den einzelnen Abweichungen der Zwischenergebnisse konnten folgende Standardabweichung in Nord, Ost und Höhe berechnet werden: 2/5/7 mm. Die erhaltenen Genauigkeiten unter optimalen Bedingungen bestätigen die Angaben des Herstellers sowie die von weiteren Veröffentlichungen, z. B. Hamza et al. 2023 und Wielgocka et al. 2021.

3 Korrekturdaten

Die Unterschiede, Vor- und Nachteile der einzelnen Arten von Korrekturdaten für präzise GNSS-Anwendungen werden in diesem Kapitel kurz erläutert. Anschließend wird auf die Korrekturnachrichten und die darauf beruhenden Positionsergebnisse des neuen Galileo HAS-Dienstes eingegangen.

3.1 Arten von Korrekturnachrichten

Die OSR-Nachrichten (OSR: *Observation State Representation*) beinhalten für jede GNSS-Beobachtung einen Korrekturwert. In Abhängigkeit der Basislinienlänge können so zahlreiche Fehlereinflüsse minimiert (Ionosphäre, Troposphäre, Satellitenorbit) oder eliminiert (Satellitenuhr) werden. Der Vorteil dieser Korrekturdaten ist, dass innerhalb weniger Sekunden die Phasenmehrdeutigkeiten festgesetzt werden können. Nachteilig sind die bidirektionalen Datenübertragungen und das Datenvolumen aufgrund der zahlreichen GNSS-Satelliten und Frequenzen (Wuebbena et al. 2017).

Mit den sogenannten SSR-Korrekturnachrichten (SSR: *State Space Representation*) wird der Zustandsraum beschrieben, d. h. die Korrekturen werden getrennt nach Satellitenbahn, Satellitenuhr, atmosphärischen Parametern sowie Code- und Phasenverzögerungen mit unterschiedlichen Zeitintervallen übermittelt. Die zu übertragenden Daten sind daher deutlich kompakter und das Datenvolumen verringert sich (Wuebbena et al. 2017). Je nachdem, ob und mit welcher räumlichen Auflösung die atmosphärischen Parameter übermittelt werden, gelten diese Korrekturen für ein globales oder regionales Gebiet (Abb. 4). Je mehr Korrekturdaten übertragen werden, desto schneller können die Mehrdeutigkeiten mit dem PPP-Verfahren gelöst werden. Allerdings steigt dann wieder das zu übertragende Datenvolumen (Hirokawa et al. 2021).

Der *International GNSS Service* (IGS) bzw. die einzelnen *Analytical Center* (AC) bieten seit ca. 10 Jahren verschiedene SSR-Korrekturdatenströme an, die

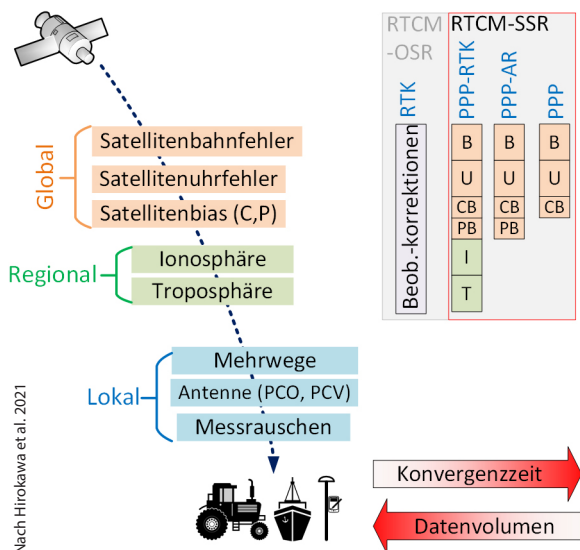


Abb. 4: GNSS-Fehlereinflüsse und Varianten der Korrekturdatenübertragung

über Internet empfangen und verarbeitet werden können (Caissy et al. 2013). Ebenso arbeitet der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) aktuell an einem eigenen SSR-Dienst (Freitag 2022).

3.2 Galileo High Accuracy Service

Der HAS-Dienst von Galileo ist am 24. Januar 2023 in seine Testphase gegangen, d. h. der Dienst bzw. die bereitgestellten Korrekturdaten können seit diesem Zeitpunkt genutzt werden.

3.2.1 Aufbau, Korrekturen und Servicedefinition des Galileo HAS

Basierend auf einem Netz von weltweit verteilten Referenzstationen, welche die Navigationsdaten empfangen, werden die Korrekturdaten berechnet und mittels der Uplink-Stationen an die Satelliten übertragen (Abb. 5). Zur präzisen Positionsbestimmung werden die Navigationsdaten in Verbindung mit den Korrekturen (Satellitenuhr- und orbit sowie Verzögerung des Codesignals) genutzt. In einer späteren Entwicklungsstufe sollen dann noch atmosphärische Korrekturen übertragen werden. Diese Nachrichten gelten sowohl für GPS als auch für Galileo und werden über das E6b-Signal mit 492 Bit/s ausgesandt (HAS SIS ICD 2022). Noch nicht verfügbar sind die Phasenverzögerungen, obwohl diese bereits für die Testphase angekündigt waren (Wanninger et al. 2023). Die

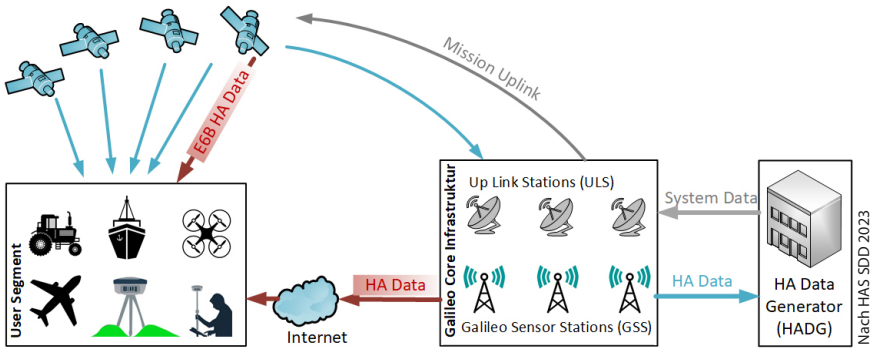


Abb. 5: Aufbau des Galileo HAS-Dienstes

Codeverzögerungen gelten nur für Galileo (E1C, E5a-Q, E5b-Q, E6C) und GPS (L1 C/A, L2 CL, L2P).

Auf Nutzerseite werden die empfangenen Daten mittels der High-Parity Vertical Reed-Solomon Codierung entschlüsselt. Nähere Information zur Entschlüsselung können in Fernández-Hernández et al. 2020 nachgelesen werden.

Die HAS-Informationen können auch über das Internet übertragen werden. Dafür werden die SSR-Nachrichten für GPS 1059/1060 im RTCM 10403.3 Standard und die noch nicht standardisierten Nachrichten für Galileo 1242/1243 verwendet (Wanninger et al. 2023, HAS IDD ICD 2023).

Das Servicegebiet für den HAS-Dienst ist aktuell für einen Bereich von 120° w.L. bis 90° o.L. definiert. D.h. für einen Großteil des ostasiatischen und australischen Kontinents sowie in Teilen von Nordamerika stehen keine vollständigen oder keine ausreichend genauen Korrekturdaten zur Verfügung (HAS SDD 2023).

Wenn der HAS-Dienst in den nächsten Jahren in seinen offiziellen Betrieb wechselt, sollen Genauigkeiten (95 %) von 20 cm und 40 cm in der horizontalen bzw. vertikalen Komponente erreicht werden. Die Konvergenzzeit wird mit 300 Sekunden für die globale Abdeckung angegeben. Im europäischen Raum werden noch zusätzliche atmosphärische Korrekturen mit angeboten, dadurch soll sich die Konvergenzzeit auf 100 Sekunden verkürzen. Alle Angaben beziehen sich auf eine Elevationsmaske von 5° (HAS SDD 2023).

3.2.2 Analyse der Orbit- und Satellitenuhrinformationen

Nachdem am 24.01.2023 der Service gestartet ist, wurden von der TU Dresden und der HTW Dresden erste Untersuchungen zum HAS-Dienst durchgeführt. Dafür wurden in den ersten zwei Wochen (DoY 025/23 bis DoY 038/23) die Nachrichten aller GNSS-Satelliten mit einem Septentrio PolaRx5 Empfänger,

welcher zusammen mit einer *navxperience*-Antenne auf dem Dach eines Bürokomplexes im Gebiet der TU Dresden montiert ist, aufgezeichnet. Bestandteil dieser Nachrichten sind auch die Galileo-C/NAV-Daten, welche undekodiert in binärer Form vorliegen. Nach der Decodierung stehen die Uhr- und Orbitkorrekturen sowie Codeverzögerungen zur Verfügung (Wanninger et al. 2023).

Die Vollständigkeitsquote der HAS-Korrekturen lag für GPS bei 90 % und für Galileo bei 95 %. Es bestätigten sich die Lücken im ostasiatischen und nordamerikanischen Raum. Zusätzliche Unvollständigkeitsgab es auch in Teilen Südamerikas (Wanninger et al. 2023).

Die Genauigkeit der HAS-Produkte wurde im Vergleich zu den hochgenauen Ephemeriden und Uhrkorrekturen des *Center for Orbit Determination* (CODE) durchgeführt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Referenzpunkte der Satellitenantennen konnten die Orbitabweichungen längs, radial und quer zur Flugrichtung berechnet werden. Anschließend ließen sich daraus sogenannte *Signal in Space Range Error* (SISRE)-Werte ableiten (Wanninger et al. 2023, Montenbruck et al. 2015). Die 3D SISRE-Werte für HAS-Ephemeriden liegen für GPS und Galileo bei 8 cm bzw. 5 cm. Werden die Uhrabweichungen (4D) einbezogen, erhöhen sich die Werte auf 21 cm (GPS) und 10 cm (Galileo). Sie sind damit deutlich genauer als die reinen *broadcast*-Ephemeriden von GPS und Galileo. Zur besseren Einordnung der Genauigkeiten wurden sowohl 3D und 4D SISRE-Werte zwischen den CODE-Ephemeriden und den aufgezeichneten Echtzeit-Produkten (*RT: Real Time*) des *Centre national d'études spatiales* (CNES-RT) berechnet. Insbesondere für GPS sind diese Echtzeitkorrekturen um den Faktor 2 genauer als die HAS-Korrekturen, dafür ist die Zuverlässigkeit geringer (Wanninger et al. 2023).

3.2.3 Positionierungsergebnisse

Zur Untersuchung der Positionsgenauigkeit mit verschiedenen Korrekturen wurden zusätzlich zu den Satellitennachrichten, Beobachtungen mit den Septentrio PolaRx5 aufgezeichnet und mittels WaSoft statisch nach dem PPP-Verfahren ausgewertet. Aufgrund fehlender Phasenverzögerungen konnten die Mehrdeutigkeiten nicht festgesetzt werden. Nach 60 min wurden horizontale und vertikale Genauigkeiten von kleiner als 1 dm erreicht (Tab. 2).

Tab. 2: RMS-Werte der PPP-Auswertung des PolaRx5-Empfängers basierend auf verschiedenen Korrekturen

	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]
HAS-C/NAV	5,1	6,4	8,2
CNES-RT	3,6	1,9	3,9

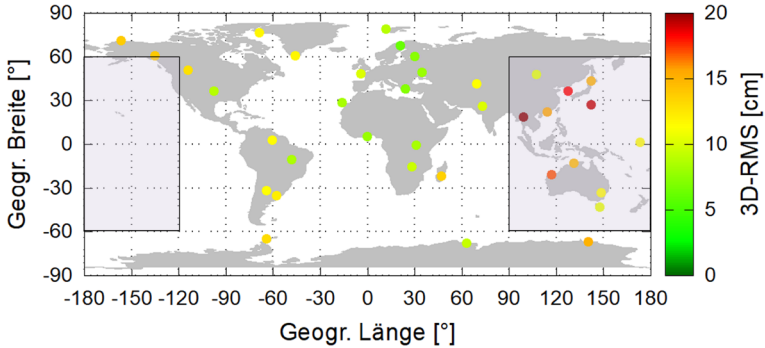


Abb. 6: Genauigkeit der PPP-Auswertung globaler Referenzstationen basierend auf HAS-Korrekturen

Ergänzend zu diesen Auswertungen der Station in Dresden wurden die Beobachtungsdaten global verteilter Referenzstationen analysiert. Die jeweiligen Beobachtungen wurden in einstündige Blöcke unterteilt, in Kombination mit aufgezeichneten HAS-Korrekturen ausgewertet und anschließend die 3D-RMS-Werte zur Sollkoordinate (24 h-Lösung mit präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen) berechnet (Abb. 6). Zusätzlich sind in der Abbildung noch die Gebiete dargestellt, die nicht durch den HAS-Service abgedeckt sind. Vor allem in Europa und Afrika werden Genauigkeiten von 10 cm oder besser erreicht.

Um die kinematische Positionsgenauigkeit von bewegten Objekten auf Grundlage satellitenbasierter HAS-Korrekturen zu untersuchen, wurden Datensätze vom Mai/Juni 2023 ausgewertet, aufgezeichnet während verschiedener Messfahrten auf der Ostsee. Der erste Datensatz stammt von dem Fährschiff Mecklenburg-Vorpommern (FS MV) und wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Neustrelitz bereitgestellt. Datensatz zwei ist von der DENEb, einem Vermessungs-, Wrack- und Forschungsschiff des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. Beide Datensätze wurden ohne Mehrdeutigkeitsfestsetzung ausgewertet. Als Referenzlösungen dienen PPP-Auswertungen, basierend auf den hochpräzisen CODE-Ephemeriden. Zur Genauigkeitseinordnung wurden zusätzliche PPP-Auswertungen basierend auf den Echtzeitprodukten von CNES-RT verwendet. Alle Berechnungen erfolgten entsprechend der Servicedefinition bei 5° Elevation.

Das FS MV ist mit einem 2-Antennenmesssystem ausgestattet, d. h. die Beobachtungen werden von 2 Antennen und 2 Empfängern (JAVAD Delta-3) aufgezeichnet. Die Abweichungen der PPP-Berechnung werden in Form von horizontalen und vertikalen RMS-Werten in Relation zur Solllösung ermittelt (Tab. 3). Mit den aufgezeichneten Beobachtungen der Back- und Steuerboard-Antenne werden mit den HAS-Korrekturen Genauigkeiten sowohl für die horizontale

Tab. 3: RMS-Werte der PPP-Auswertung der Beobachtungen des FS MV von beiden Antennen

	Backboard		Steuerboard	
	Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal
HAS-C/NAV	6,9 cm	8,9 cm	5,0 cm	7,8 cm
CNES-RT	5,8 cm	6,4 cm	2,1 cm	2,3 cm

als auch für die vertikale Position von weniger als 10 cm erreicht. Wie schon bei den statischen Analysen werden mit den präziseren CNES-RT Ephemeriden etwas bessere Genauigkeiten erzielt. Ein Vergleich der beiden Antennen zeigt bessere Ergebnisse für die Steuerboard-Antenne. Vermutlich ist der Antennenstandort etwas besser gewählt und die Signale werden weniger durch Mehrwege beeinflusst.

In Abb. 7 ist die Messfahrt von Warnemünde in Richtung Trelleborg (Schweden) grafisch dargestellt. Insgesamt liegen die 3D-RMS-Werte der PPP-Lösung für beide Antennen überwiegend unter 2 dm.

Bei der Auswertung der Messfahrt der DENEb (Trimble SPS855-Empfänger) ergaben sich RMS-Werte von ca. 10 cm in der horizontalen und vertikalen Komponente, wenn die HAS-Korrekturen verwendet worden. Zum Vergleich wurde wieder eine PPP-Auswertung auf Grundlage der präzisen Echtzeit-Ephemeriden durchgeführt (Tab. 4). Hier werden wieder erwartungsgemäß Genauigkeiten von wenigen cm erreicht.

Insgesamt liefert die Auswertung der kinematischen wie statischen Messdaten sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Die Servicedefinitionen werden mit den aktuell verfügbaren HAS-Korrekturdaten erreicht. Im Vergleich zu den Echtzeit-Ephemeriden von CNES schneiden die Ergebnisse basierend auf HAS-Korrekturnachrichten etwas schlechter ab. Für Echtzeit-Anwendungen wird es

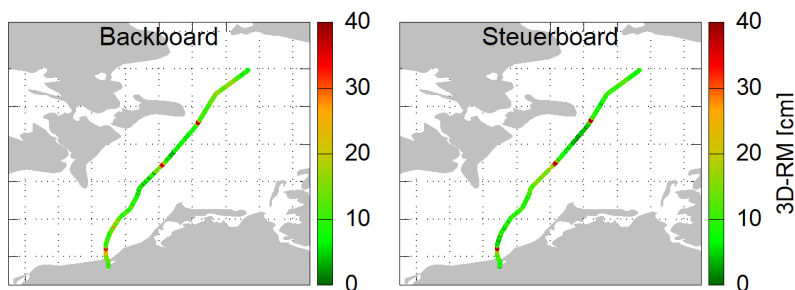


Abb. 7: 3D-RMS-Werte der PPP-Auswertung der Beobachtungen des FS MV von beiden Antennen

Tab. 4: RMS-Werte der PPP-Auswertung der Beobachtungen der DENE8

	Horizontal	Vertikal
HAS-C/NAV	10,2 cm	9,7 cm
CNES-RT	2,8 cm	3,6 cm

allerdings schwierig sein, die CNES-RT- bzw. IGS RT-Korrekturen via Internet zu empfangen. Bei der Schifffahrt auf offenem Meer hat die Datenübertragung via Satellit große Vorteile.

4 SSR-basierte Korrekturdaten und Low-Cost GNSS

In den beiden vorherigen Kapiteln wurden Low-Cost GNSS-Sensoren und für Echtzeit-PPP konzipierte Korrekturdaten vorgestellt. Das zukünftige Ziel ist es, beide Trends miteinander zu verbinden und Positionsgenauigkeiten von wenigen dm oder besser zu erzielen.

PPP-Auswertung mit Ublox-basierten Beobachtungsdaten

Mit den aufgezeichneten Beobachtungsdaten (L1/L2 und E1/E5) des Ublox-ZED-F9P Empfängers (vgl. Kapitel 2.3) wurden *postprocessing* PPP-Auswertungen durchgeführt. Die unterschiedlichen Ergebnisse basieren auf den verschiedenen Ephemeriden und Uhrkorrekturen von CNES-RT und des Galileo HAS-Dienstes. Als Beobachtungszeit wurden 3×60 Minuten und die Elevationsmaske wurde entsprechend der HAS-Service-Definition auf 5° festgelegt. Die RMS-Werte in Nord, Ost und Höhe (Tab. 5) spiegeln die Relationen in der Genauigkeit, aufgrund unterschiedlicher Korrekturdaten, wider. Im Gegensatz zu einer statischen PPP-Auswertung (vgl. Tab. 2), basierend auf den Beobachtungen eines geodätischen Empfängers, sind die erzielten RMS-Werte etwas schlechter, aber immer noch innerhalb der HAS-Service-Definition.

Tab. 5: RMS-Werte der PPP-Auswertung des Ublox-Empfängers basierend auf verschiedenen Korrekturen

	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]
HAS-C/NAV	8,6	9,0	9,3
CNES-RT	4,1	6,9	8,2

Hohensinn et al. 2023 zeigten bei der Kombination von Beobachtung des Ublox-Empfängers ZED-F9P mit den CNES-RT Korrekturen RMS-Werte in Nord, Ost und Höhe von 3,3 cm, 2,8 cm und 7,3 cm und bestätigten, dass sich Low-Cost Sensorik und SSR-Datenströme gut kombinieren lassen. Dieses hier aufgeführte Beispiel zeigt zusätzlich, dass auch die HAS-Korrekturdaten für Low-Cost-Empfänger eine Alternative sind. Mit diesen Ergebnissen werden sich zahlreiche Anwendungen im Bereich Massenmarkt ergeben.

Ublox „PointPerfect“ für Massenmarktanwendungen

Mit der Generation F9 bietet die Firma Ublox neben der Unterstützung der klassischen SSR-Korrekturdaten neue Entwicklungen im Bereich der OSR-Korrekturen an und verspricht damit cm-genaue Positionierung für globale Anwendungen. Diese Technologie wird als „PointPerfect“ bezeichnet. Die global verfügbaren Korrekturen werden über mobiles Internet oder ebenfalls über ein satellitenbasiertes Signal zur Verfügung gestellt und können für Echtzeit-PPP-Auswertungen genutzt werden. Ublox verspricht eine Verfügbarkeit von 99,9 %. Dieses an SSR angelegte Korrekturdatenformat nennt sich SPARTN 2.0 (*Secure Position Augmentation for Real Time Navigation*) und unterstützt die GPS-Signale L1 C/A, L2P, L2C und L5, die GLONASS-Signale L1C/A und L2 C/A und die Galileo-Signale E1 und E5A/B. Die Uhrkorrekturen werden alle 5 s übertragen, Orbit, Code- und Phasenverzögerungen und atmosphärische Korrekturen hingegen alle 30 s. Die Formatbeschreibung ist seit September 2021 verfügbar. In abschattungsfreien Gebieten, beim Empfang von kompletten und ununterbrochenen Korrekturdaten sowie gefixten Mehrdeutigkeiten verspricht Ublox eine Genauigkeit von 3 bis 6 cm nach wenigen Sekunden (Ublox 2023b).

Open-Source-Software zur Verarbeitung SSR-basierter Korrekturdaten

Derzeit gibt es wenige Empfänger, die die standardisierten SSR-Korrekturdaten empfangen und verarbeiten können. Eine Möglichkeit, die verschiedenen SSR-Korrekturdatenströme des IGS zu empfangen und zu testen, ist der BNC Ntrip-Client des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie (BKG 2023). Zusätzlich können HAS-Nachrichten, welche internetbasiert zur Verfügung stehen, bezogen und analysiert werden (HAS IDD ICD 2023).

Abb. 8 zeigt eine PPP-Auswertung auf Grundlage von IGS-RT und HAS-Korrekturen für die europäische Referenzstation GANP (Ganovce) in Slowenien. Bei beiden Auswertungen ist das PPP typische Einlaufverhalten zu erkennen. Die Genauigkeiten liegen nach einer Beobachtungszeit von 1 h bei 1 bis 2 dm, wobei sich die IGS-RT basierte Lösung in der Lage als etwas stabiler darstellt.

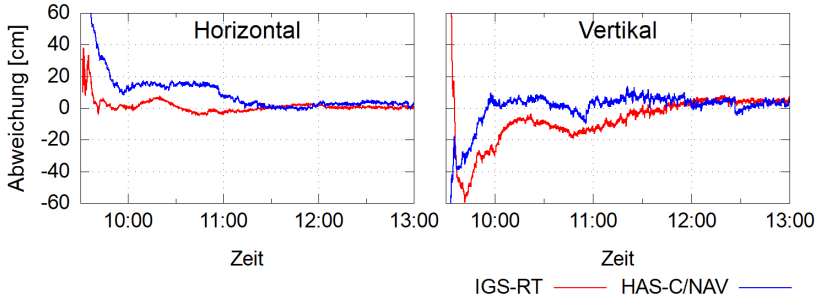


Abb. 8: Abweichungen der PPP-Auswertung basierend auf HAS-C/NAV und IGS-RT-Korrekturen

Statt einer Referenzstation können über eine serielle Schnittstelle auch die Beobachtungen eines Ublox-Empfängers im RTCM-Format mit der Software verarbeitet werden. Die Analyse dieser PPP-Lösungen hinsichtlich Genauigkeit und Konvergenzzeit ist ein Schwerpunkt der kommenden Untersuchungen.

5 Ausblick

Der Beitrag hat das Potenzial der Low-Cost GNSS-Sensorik sowie der SSR-basierten Korrekturdaten, insbesondere die des HAS-Service für Massenmarktanwendungen gezeigt. Speziell kinematische Szenarien, wie z. B. in der Schifffahrt können von satellitenbasierten Korrekturdaten profitieren. Weitere kinematische Anwendungen liegen im Bereich „Precise Farming“, Steuerung von Drohnen oder anderer bewegter Plattformen. Aber auch statische Messungen mit Genauigkeitsforderungen von einigen cm bis dm, vor allen in Gebieten mit schlecht ausgebauter Infrastruktur, profitieren von den überall verfügbaren satellitenbasierten Korrekturdaten des Galileo HAS.

Der nächste Schritt ist die Konzentration auf die schon im Kapitel 4 beschriebenen Ansätze zur Kombination von SSR-Korrekturdaten und Massenmarktempfänger. Im Detail sind dies die Untersuchung der SPARTN-Korrektionsdaten in Kombination mit dem Ublox ZED-F9P und die Verbindung des Ublox-Empfängers mit dem BNC Ntrip Client. Dabei werden neben statischen Messungen auch kinematische Anwendungen einbezogen. Auch die Verbindung von Low-Cost GNSS-Empfängern mit weiteren Antennen (z. B. Tallysman) werden ein Teil weiterer Untersuchungen sein. Zukünftig bilden auch noch die Kombination von mehreren Low-Cost Empfängern oder die Verknüpfung zu anderen Sensoren wie z. B. einer inertialen Messeinheit einen Schwerpunkt.

Literatur

- Banville, S., van Diggelen, E. (2016): Precise GNSS for everyone: Precise Positioning Using Raw GPS Measurements from Android Smartphones. *GPS World*, Nov. 2016, 43–48.
- BKG (2023): www.bkg.bund.de/DE/Das-BKG/Wir-ueber-uns/Geodasie/Satellitennavigation/Echtzeit-GNSS/ntrip.html;jsessionid=18E4D61E3F792289FFB77EBE1DD0E30E.live11#doc57946bodyText2.
- Caissy, M., Agrotis, L., Weber, G., Fisher, S. (2013): The IGS Real-Time Service. In: *Proceedings of the EGU General Assembly Conference Abstracts 2013*, Vienna, Austria, 7–12 April 2013.
- Fernández-Hernández, I., Senni, T., Borio, D., Veccione, G. (2023): High-parity vertical Reed-Solomon codes for long GNSS high-accuracy messages. *Navigation* 67(2), 365–378. DOI: [10.1002/navi.357](https://doi.org/10.1002/navi.357).
- Freitag, M. (2022): PPP-RTK-Dienst der AdV – Jetzt wird es ernst. *INTERGEO 2022*. www.ssroverdad.eu/doc/2022_INTERGEO_PPP_RTK_AdV.pdf.
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., Pavlovcic-Prešeren, P. (2023): Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers and Antennas for Surveying in Urban Areas. *Sensors*, 23, 2861. DOI: [10.3390/s23052861](https://doi.org/10.3390/s23052861).
- HAS IDD ICD (2023): Galileo High Accuracy Service – Internet Data Distribution Interface Control Document (HAS IDD ICD), Issue 1.0. European Union Agency for the Space Programme (EUSPA).
- HAS SDD (2023): Galileo High Accuracy Service – Service Definition Document (HAS SDD), Issue 1.0. European Union Agency for the Space Programme (EUSPA).
- HAS SIS ICD (2022): Galileo High Accuracy Service – Signal-In-Space Interface Control Document (HAS SIS ICD), Issue 1.0. European Union Agency for the Space Programme (EUSPA).
- Heßelbarth, A., Wanninger, L. (2021): GNSS-Messungen mit Smartphones – Analyse der Beobachtungsdaten und cm-genaue Positionsbestimmung. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2021. 146. Jg., 189–197. DOI: [10.12902/zfv-0355-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0355-2021).
- Hirokawa R., Fernández-Hernández, I., Reynolds, S. (2021): PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message. *Navigation*. 68: 759–778. DOI: [10.1002/navi.452](https://doi.org/10.1002/navi.452).
- Hohensinn, R., Herrera Pinzon, I.D., Spannagel, R., Wolf, A., Rossi, Y., Rothacher, M. (2021): Low-cost vs. Geodetic-grade GNSS Instrumentation: Geomonitoring with High-rate and Real-time PPP. Conference: 34th International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021). DOI: [10.33012/2021.18098](https://doi.org/10.33012/2021.18098).
- Janos, D., Kuras, P. (2021): Evaluation of Low-Cost GNSS Receiver under Demanding Conditions in RTK Network Mode. *Sensors*. 21, 5552. DOI: [10.3390/s21165552](https://doi.org/10.3390/s21165552).
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A. (2015): Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solut* 19(2), 321–333. DOI: [10.1007/s10291-014-0390-8](https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8).
- NMEA (2023): Serial Data Networking. www.nmea.org/nmea-0183.html.
- NVS Technologies (2022): NV08C-RTK. www.nvs-gnss.com/products/receivers/nv08c-rtk.html.

- RTCM SC 104 (2020): RTCM Standard 10403.3 Differential GNSS Services – Version 3. Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM).
- Skytraq (2020): PX1122R Centimeter-Level Accuracy. www.skytraq.com.tw/homesite/PX1122R_PB.PDF
- Swift Navigation (2022): Piksi® Multi – Product Summary. www.swiftnav.com/sites/default/files/piksi_multi_product_summary.pdf.
- Ublox (2021): ANN-MB series L1/L2 multi-band, high precision GNSS antennas. https://content.u-blox.com/sites/default/files/ANN-MB_ProductSummary_UBX-18047741.pdf.
- Ublox (2023a): ZED-F9P series u-blox F9 high precision GNSS modules. https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P_ProductSummary_UBX-17005151.pdf.
- Ublox (2023b): PointPerfect GNSS augmentation service. https://content.u-blox.com/sites/default/files/PointPerfect_ProductSummary_UBX-21024758.pdf?_ga=2.47865952.63091542.1688289246-1279294353.1670605724.
- Wanninger, L., Beer, S., Heßelbarth, A. (2023): Der Galileo High Accuracy Service (HAS): Ein neues Kapitel GNSS-Positionsbestimmung. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2023. 148. Jg., 214–218. DOI: [10.12902/zfv-0435-2023](https://doi.org/10.12902/zfv-0435-2023).
- Wanninger, L., Heßelbarth, A. (2020): GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: quality assessment and centimeter-accurate positioning. GPS Solutions, 24:64. DOI: [10.1007/s10291-020-00978-z](https://doi.org/10.1007/s10291-020-00978-z).
- WaSoft (2023): www.wasoft.de.
- Wielgocka, N., Hadas, T., Kaczmarek, A., Marut, G. (1956): Feasibility of Using Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers for Land Surveying. Sensors 21, 1956. DOI: [10.3390/s21061956](https://doi.org/10.3390/s21061956).
- Wübbena, G., Wübbena, J., Wübbena, T., Schmitz, M. (2017): SSR Technology for Scalable Real-Time GNSS Applications. IGS Workshop. Paris Diderot University. July 3–7, 2017.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Anja Heßelbarth
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
anja.hesselbarth@htw-dresden.de

Session 2:

Precise Point Positioning, RTK, SSR:

Unterschiede und Erfahrungen

ESA NAVISP EL2-Projekt SSRoverDAB+: PPP-RTK-Korrekturdaten über digitalen Rundfunk

Jürgen Alberding | Dirk Stöcker

1 Einleitung

Die Idee einer Bereitstellung des präzisen Raumbezugs über permanent messende GNSS-Referenzstationen wird in der Vermessung seit mehr als 30 Jahren (Augath 1990) intensiv verfolgt. Seit Mitte der 1990er Jahre betreiben die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer dazu den Satellitenpositionierungsdienst SAPOS®. In der höchsten Genauigkeitsstufe berechnet der SAPOS®-Dienst für jeden Nutzer aus der Vernetzungslösung einen empfängerortsspezifischen Korrekturdatenstrom. Das Verfahren wird international als VRS (Virtuelle Referenzstation) oder Netz-RTK bezeichnet.

Mit der Einführung des Ntrip-Protokolls durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) wurde im Jahr 2005 ein wichtiger Grundstein für die Datenabgabe von VRS-Korrekturdaten gelegt. Inzwischen wird das mobile Internet zur bidirektionalen Kommunikation zwischen Korrekturdatendiensten und deren Nutzern weltweit verwendet. Parallel zur Markteinführung der GNSS-Dienste wurden internationale Standards für die Korrekturdatenformate und Protokolle beschlossen und umgesetzt, so dass die auf VRS basierenden Dienste mit einer Vielzahl am Markt verfügbarer Endgeräte genutzt werden können.

Im Rahmen der Open-Data-Initiativen der Bundesländer werden die hochgenauen SAPOS®-Korrekturdaten von den Bundesländern entweder für spezielle Kundengruppen oder für sämtliche Nutzer kostenfrei abgegeben. Dieses Angebot hat zu einem deutlichen Anstieg der SAPOS®-Nutzerzahlen, insbesondere außerhalb der Vermessung, geführt. Da der gewählte VRS-Ansatz bei steigenden Nutzerzahlen erhebliche Investitionen in die Dienstinfrastruktur (Servertechnik und Lizenzen) erfordert, wird seitens der Servicebetreiber nach alternativen Ansätzen zur Bereitstellung und Übertragung präziser GNSS-Korrekturdaten gesucht.

Ein vielversprechender Ansatz ist das PPP-RTK-Verfahren, welches die Gesamtheit der systemspezifischen Fehler in satellitenbasierte (Bahn, Uhr, Biases) und signalausbreitungs-basierte Fehleranteile (Ionosphäre, Troposphäre) zerlegt.

Aufgrund unterschiedlicher Aktualisierungsraten der einzelnen Korrekturwerte und der Nutzung von Modellen für die Signallaufzeitverzögerungen, die für sämtliche GNSS-Satelliten (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) gelten, kann die Bandbreite für die präzisen Korrekturdaten reduziert werden.

Ein weiterer Vorteil vom PPP-RTK gegenüber dem VRS-Ansatz ist die Broadcastfähigkeit der Korrekturdaten ohne größeren Genauigkeitsverlust. Durch die Bereitstellung eines einzigen Korrekturdatenstromes für ein größeres Gebiet (z. B. Land oder Region) fällt so einerseits der Aufwand für nutzerpositionsabhängige Berechnungen weg. Andererseits können auch unidirektionale Datenkanäle für eine Korrekturdatenübertragung verwendet werden. Aufgrund der Flächenabdeckung und der verfügbaren Bandbreite könnten vorhandene terrestrische Datenkanäle wie z. B. der digitale Rundfunk DAB+ in ländlichen Regionen eine optimale Ergänzung zur Korrekturdatenbereitstellung über Internet sein.

Im stark wachsenden Markt der hochgenauen satellitengestützten Positionierung ist die Verfügbarkeit präziser GNSS-Korrekturdaten inzwischen zu einem wesentlichen Faktor für den Vertrieb kompletter GNSS-Nutzersysteme geworden. Führende GNSS-Anbieter haben den Vorteil des PPP-RTK-Ansatzes erkannt und betreiben inzwischen weltweit eigene Korrekturdatendienste. Parallel zum mobilen Internet werden die PPP-RTK-Korrekturdaten den Nutzern in firmeneigenen Datenformaten über geostationäre Satelliten zur Verfügung gestellt. Proprietäre Datenformate dienen der Optimierung der Performance mit eigenen Empfängern und der Abgrenzung vom Wettbewerb.

Die Standardisierung eines präzisen PPP-RTK-Datenformats hingegen erfordert eine intensive Kommunikation in den Standardisierungsgremien, Zugeständnisse bei den Formaten und umfangreiche Interoperabilitätstests. Daher haben diese Gesamtlösungsanbieter die internationale Standardisierung eines präzisen PPP-RTK-Datenformats verzögert und teilweise blockiert. Eine fehlende Standardisierung von PPP-RTK verhindert den Wettbewerb sowohl im Markt der GNSS-Korrekturdatendienste als auch im Markt der GNSS-Anwenderlösungen. Behörden müssen zwangsläufig für ihre Open-Data-Dienste standardisierte Datenformate verwenden. Sind diese Formate nicht vorhanden, müssen die Anwender insbesondere in Regionen mit schlechter Mobilfunkabdeckung auf kommerzielle Lösungen zurückgreifen.

Um Erfahrungen mit der Performance von PPP-RTK zu sammeln und alternative Übertragungskanäle zu testen, hat SAPOS® ein Pilotprojekt zur Einführung eines präzisen PPP-RTK-Dienstes in Deutschland gestartet. Da bisher noch kein international standardisiertes Datenformat existiert, werden die Korrekturdaten in dem öffentlich zugänglichen Datenformat SSRZ der Geo++ GmbH generiert und potentiellen Nutzern über mobiles Internet und den digitalen Rundfunk DAB+ bereitgestellt.

2 Projektbeschreibung

Das ESA NAVISP Projekt SSRoverDAB+ wurde im Zeitraum vom 01.05.2022 bis zum 30.06.2023 von den Firmen Alberding GmbH (Konsortialführer), Geo++ GmbH und inPosition gmbh sowie dem Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) durchgeführt. Unterstützt wurde das Konsortium von drei assoziierten Partnern, der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen Deutschlands (AdV), vertreten durch das Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV), dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Firma BayWa AG.

Ziel des Projekts war die Entwicklungen von Software- und Systemlösungen zur Nutzung präziser PPP-RTK-Korrekturdaten, welche in einem SSR-basierten Datenformat über den digitalen Rundfunk DAB+ für hochgenaue Positionierungsaufgaben übertragen werden. Teilaufgaben befassten sich auch mit der Optimierung der Aussendungen über den digitalen Datenkanal DAB+. Als Test- und Entwicklungsplattform wurde der Alberding A10-RTK-Sensor eingesetzt. Die Feldtests wurden mit weiterentwickelten Prototypensystemen durchgeführt.

Die Abb. 1 zeigt die Aufgabenstellung und den Datenfluss im Projekt SSRoverDAB+. Die Aufgaben in den gelb markierten Kästchen wurden von den

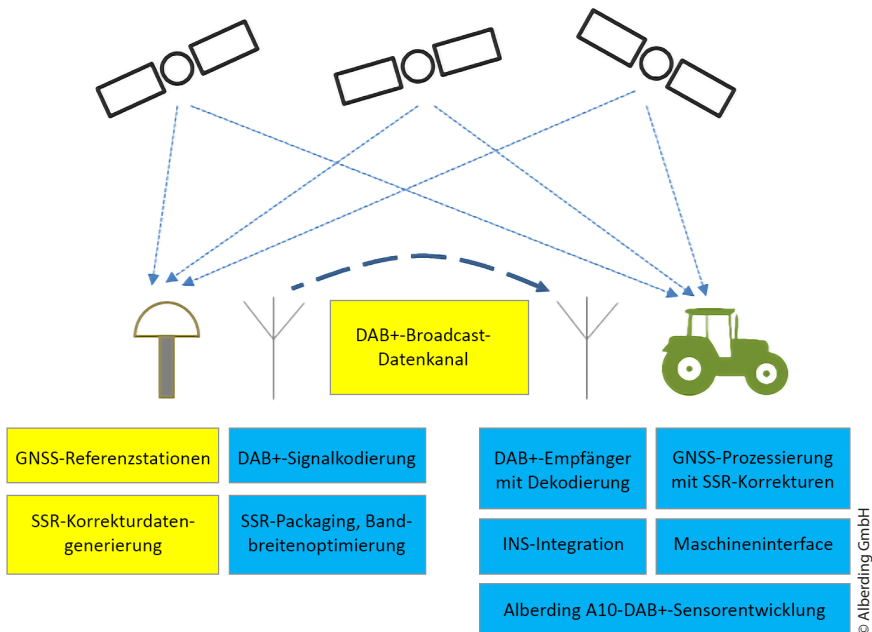


Abb. 1: Datenfluss der PPP-RTK-Korrekturen über DAB+-Aussendungen

assoziierten Projektpartnern AdV (Korrekturdaten) und BKG (DAB+ Datenkanal) bereitgestellt. Die Aufgaben in den blau markierten Kästchen waren Bestandteil der Entwicklungen im Projekt.

Die im Projekt verwendeten SSR-Korrekturdaten wurden mit der Software GNSMART (Geo++ GmbH) aus dem SAPOS®-Referenzstationsnetz generiert und dem Konsortium von der AdV als PPP-RTK-Datenstrom in dem veröffentlichten Datenformat SSRZ der Geo++ GmbH bereitgestellt.

3 Softwareentwicklungen

Infrastrukturseitig lag der Fokus auf der Optimierung der SSR-Aussendungen über den digitalen Rundfunk DAB+. Dabei wurde die Aufteilung der verfügbaren Bandbreite auf Bits für die Korrekturdaten und die Erhöhung der Übertragungsrobustheit untersucht. Je mehr Bits für Fehlerkorrekturmaßnahmen verwendet werden, desto weniger Bandbreite steht für den eigentlichen Dateninhalt, die SSR-Korrekturdaten, zur Verfügung. Simulationen haben ergeben, dass bei einem ausreichenden Fehlerschutz noch genügend Bandbreite für die Übersendung der Korrekturdaten zur Verfügung steht. Praktische Tests haben die Simulationen bestätigt.

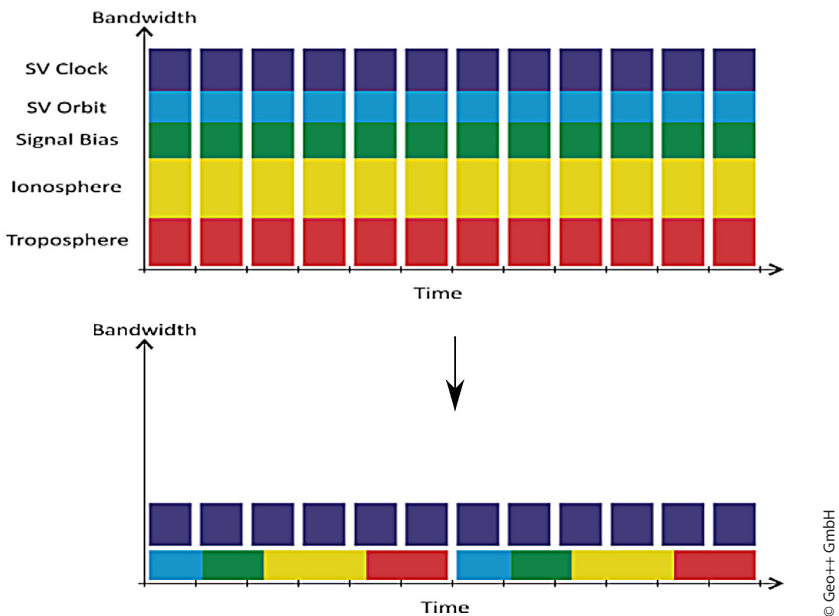


Abb. 2: SSRZ-Datenstruktur für DAB+-Aussendungen

Im Bereich der Korrekturdatenaussendungen wurde die Struktur des Datenstroms für einen deutschlandweiten SSR-Korrekturdatendienst optimiert. Eine Reduzierung der Bandbreite gelingt durch die unterschiedliche Häufigkeit der Aussendung schnell und langsam variierender Korrekturwerte. Im sogenannten 30/5-Datenstrom werden Korrekturen zu den Satellitenuhren alle 5 Sekunden und Korrekturdaten zu den Satellitenbahnen alle 30 Sekunden übertragen. Um regionale Signallaufzeiteffekte in einen deutschlandweiten Datenstrom einzubeziehen, werden die Parameter aus fünf regional verteilten Teilnetzen in unterschiedliche 5-Sekundenblöcke eines 30-sekündlichen Korrekturdatentelegramms verpackt. Abb. 2 zeigt die Sequenz der Korrekturdaten für die DAB+-Aussendungen.

Leider stand der deutschlandweite SSR-Korrekturdatenstrom bis zum Projektende nicht zur Verfügung, so dass die Optimierung der Aussendungen nur mit simulierten Werten getestet werden konnte. Für die praktischen Feldtests wurde überwiegend der bayerische SSR-Korrekturdatenstrom verwendet.

Im Fokus des Projektes stand die Entwicklung mobiler Lösungen für die präzise GNSS-Positionierung unter Verwendung SSR-basierter Korrekturen aus DAB+-Übertragungen. Als Test- und Evaluierungssystem für die Softwareentwicklungen im Projekt wurde der Alberding A10-RTK-Sensor genutzt. Der A10-RTK-Sensor (Abb. 3) vereint ein GNSS-RTK-Board, ein 4G-Mobilfunkmodem, ein BT/WLAN-Modem, einen Speicher, einen Prozessor und diverse andere Komponenten in einem Gehäuse. Um Software von Drittanbietern im Sensor ausführen zu können, wurde im A10-RTK ein Embedded-PC mit Linux-Betriebssystem integriert.

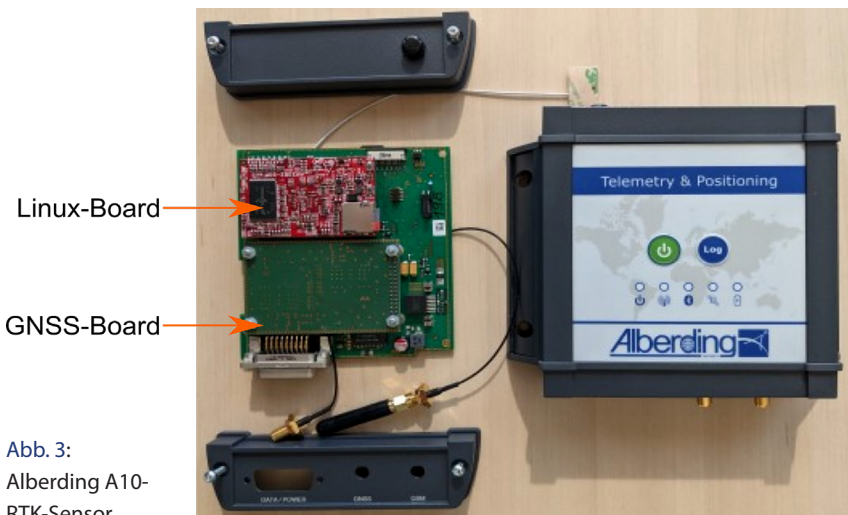


Abb. 3:
Alberding A10-
RTK-Sensor

© Alberding GmbH

Da derzeit am Markt keine GNSS-Boards verfügbar sind, welche direkt SSR-basierte Korrekturdaten im SSRZ-Datenformat verarbeiten können, wurden von den Projektpartnern Geo++ GmbH, inPosition gmbh und Fraunhofer IIS drei Interpreter und Konverter für das SSRZ-Datenformat entwickelt bzw. optimiert. Um diese Entwicklungen auf den Embedded-PC des A10-RTK-Sensors portieren zu können, musste das Linux-Betriebssystem des Rechners inklusive der Treiber aktualisiert werden. Die Alberding EuroNet-Software wurde für das Datenmanagement zwischen den Hardwarekomponenten und den Softwaremodulen weiterentwickelt.

Im Rahmen des Projekts hat die Geo++ GmbH ihr bestehendes SSR2OBS-Softwaretool zur Konvertierung der SSR-Korrekturen in standardisierte OSR-Korrekturen (RTCM 3.2 MSM) erweitert. Zur Verbesserung der Korrekturdaten wurden Algorithmen zur Einbeziehung der Rohdaten des mobilen GNSS-Empfängers entwickelt. Dieser sogenannte Rückkanal wird vorwiegend zur Interpolation von Effekten der Signallaufzeitverzögerungen verwendet. Der Datenfluss für den Rückkanal wurde in der Alberding EuroNet-Software realisiert. Die neue Funktionalität des SSR2OBS-Moduls konnte erfolgreich im A10-RTK-Sensor getestet werden.

Da SAPOS® für den Pilotbetrieb des PPP-RTK-Dienstes die Software und Formate der Geo++ GmbH verwendet, sind den Entwicklern des Softwaretools SSR2OBS die bei der Korrekturdatengenerierung verwendeten Modelle mit Auflösung und Genauigkeit sowie das SSRZ-Format bestens bekannt. Für die Beurteilung der Transparenz und Nutzbarkeit der SSR-Korrekturdaten durch externe Algorithmen wurde das SSRZ-Format von der inPosition gmbh interpretiert. Obwohl das SSRZ-Format gut dokumentiert ist und von Geo++ ein Interpreter angeboten wird, hat sich diese Aufgabe als sehr herausfordernd dargestellt.

Weiterhin wurde die RTK-Software der inPosition gmbh erfolgreich auf den Embedded-PC im A10-RTK-Sensor portiert. Mit dem Softwaretool SSR2OSR gewandelte Korrekturdaten konnten für die Berechnung cm-genaue Positionen aus den Rohdaten des mobilen Empfängers verwendet werden. Die Interpretation des SSRZ-Formats konnte durch die inPosition gmbh bis zum Projektende nicht vollständig umgesetzt werden. Die erzielten Ergebnisse können jedoch einen Beitrag für Interoperabilitätstests im Rahmen der Standardisierungsbestrebungen im RTCM-Komitee leisten.

Das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) war einerseits mit der Entwicklung der Korrekturdatenübertragung über DAB+ und andererseits mit der Entwicklung eines E5AltBoc-Prozessierungsalgorithmus und einer Sensorfusionslösung betraut. Zielmärkte für die E5AltBoc-Codelösung im Genauigkeitsbereich von 0,5 m sind robuste Positionierungslösungen im Automotive-Bereich. Durch die Einbeziehung von SSR-Korrekturdaten konnte die avisierte

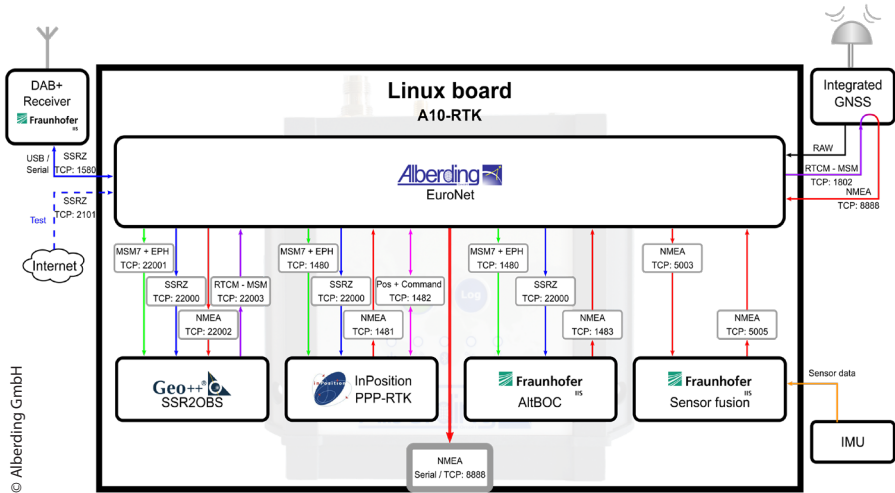


Abb. 4: Datenfluss auf dem Embedded-PC im A10-Sensor

Genauigkeit erzielt werden. Die Software von Fraunhofer IIS wurde ebenfalls erfolgreich auf den Embedded-PC im A10-Sensor portiert.

Die von Fraunhofer IIS entwickelte Sensorfusionslösung zur Verschneidung von GNSS-Positionierungs- und INS-Daten ist mit allen drei Positionierungslösungen einsetzbar. Ziel dieser Entwicklung ist die Übertragung der präzisen Koordinaten vom Dach (GNSS-Antenne) auf die Räder der Landmaschine. Weiterhin kann die Sensorfusionslösung zur Überbrückung eines kurzzeitigen Ausfalls der GNSS-Positionierung genutzt werden.

Die Abb. 4 zeigt den Datenfluss auf dem Embedded-PC des A10-Sensors. Die Alberding EuroNet-Software ist für die Bereitstellung der Eingangsdaten für die portierten Module und die Ausgaben an externe Systeme zuständig.

4 Hardwareentwicklung

Da auf dem Markt derzeit kein geeignetes DAB+-Empfangsmodul zur Integration in den A10-Sensor verfügbar ist, hat die DAB+-Gruppe von Fraunhofer IIS im Rahmen des Projektes eine Prototyphardware für den mobilen Signalempfang entwickelt. Aufgrund der Komplexität der Fraunhofer DAB+-Dekodierungssoftware konnte die Dekodierung der SSR-Nachrichten nicht auf dem Embedded-PC des A10-Sensors erfolgen. Im Prototypempfänger (Abb. 5) wurde die DAB+-Empfangseinheit mit einem zusätzlichen PC-Modul zur Dekodierung des Empfangssignals ergänzt, welches die SSR-Korrekturdaten im SSRZ-Datenformat an den A10-Sensor übergeben hat.

© Alberding GmbH

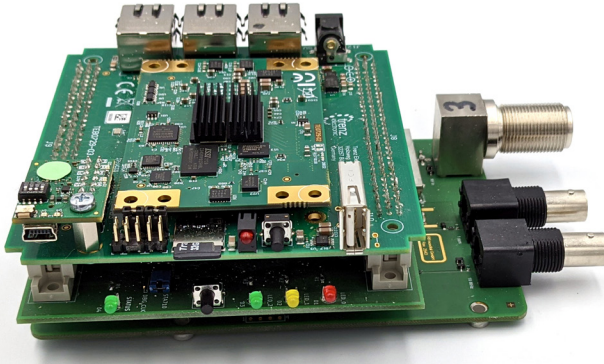


Abb. 5:
DAB+-Empfangs-
einheit

Im Vergleich zu einem am Markt verfügbaren professionellen DAB+-Receiver gibt der Prototyp die SSR-Korrekturdaten mit einer geringeren Latenz aus. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit einzelner elektronischer Komponenten konnte Fraunhofer IIS nur vier Prototypen fertigen.

Da die Fraunhofer DAB+-Empfangseinheit und der INS-Sensor räumlich nicht in das Gehäuse des A10-RTK-Sensors passten, musste die Alberding GmbH eine neue Sensorplattform für die praktischen Feldtests entwickeln. Der in Abb. 6 dargestellte A10-DAB+-Prototypsensor vereint alle notwendigen Komponenten, um das SSRZ-Datenformat per DAB+-Broadcast zu empfangen, die Korrekturen in das RTCM 3.2 MSM zu wandeln und diese Korrekturen an den integrierten GNSS-Empfänger zu übertragen.

Mit dem integrierten 4G-Modem kann der A10-DAB+-Sensor die SSR-Korrekturdaten auch über Mobilfunk (Ntrip) empfangen. Der automatisierte Wechsel zwischen zwei verschiedenen Korrekturdatenquellen wurde in der Alberding EuroNet-Software implementiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Einrichtung von Fallback-Lösungen zwischen DAB+- und internetbasierter Korrekturdatenübertragung.

Zusätzlich können über die serielle und die Ethernet-Schnittstelle des A10-DAB+-Sensors externe Hardwaremodule für den Korrekturdatenempfang

© Alberding GmbH

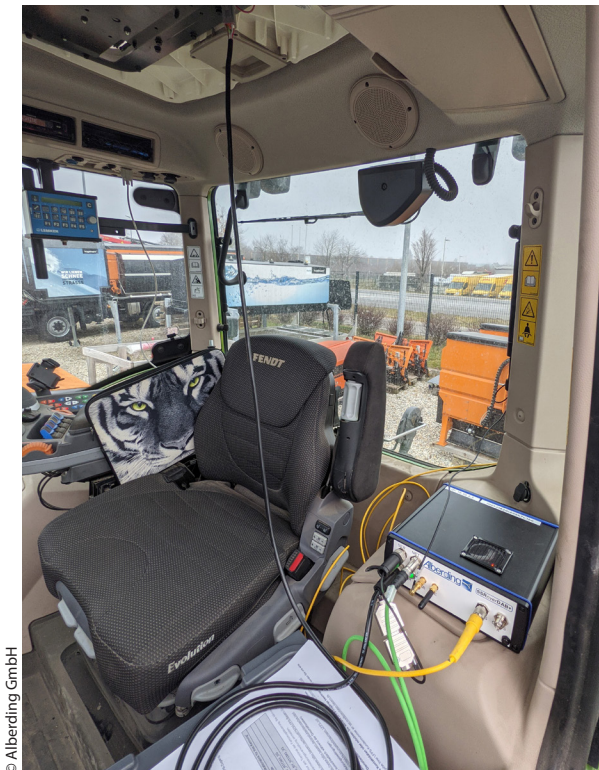


Abb. 6:
A10-DAB+-Proto-
typsensor

(z.B. AIS/VDES-Empfänger im Bereich der Binnenwasserstraßen) angeschlossen werden. Die Aussendung desselben SSR-Korrekturdatenstroms über mehrere Datenkanäle führt zu einer deutlich höheren Verfügbarkeit präziser RTK-Korrekturdaten und zu einer Erhöhung der Stabilität und Akzeptanz des Gesamtsystems.

5 Praktische Erprobung

Nach erfolgreichen Einzeltests wurde am 14.02.2023 ein erster kombinierter Feldtest auf einer Landmaschine am BayWa-Standort in Feldkirchen (bei München) durchgeführt. Der A10-DAB+-Sensor wurde über den von der BayWa bereitgestellten Traktor mit Energie versorgt und über ein serielles Kabel mit dem GNSS-Empfänger des Traktors verbunden. Am A10-DAB+-Sensor wurden eine präzise GNSS-Antenne, eine DAB+-Empfangsantenne und eine GSM-Antenne angeschlossen. **Abb. 7** zeigt den Testaufbau auf der Landmaschine.



© Alberding GmbH

Abb. 7:
A10-DAB+-Prototyp-
sensor in der Land-
maschine

Zur Optimierung des Signalempfangs wurden von Fraunhofer IIS zunächst vier unterschiedliche DAB+-Empfangsantennen untersucht. Die Signalstärken der Antennen wurden jeweils in Zehnminutenintervallen mit der Alberding EuroNet-Software auf dem A10-DAB+-Sensor erfasst und im Anschluss an die Messung ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten erhebliche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Antennen. Die richtige Antennenauswahl ist ein entscheidender Faktor für die Verfügbarkeit der DAB+-Aussendungen und somit auch für die Akzeptanz der Korrekturdatenübertragung über DAB+. Ein Ergebnis der Tests war die gute Performance der in der Fensterscheibe des Traktors integrierten DAB+-Antenne, die über eine Antennenweiche für den A10-DAB+-Sensor genutzt werden konnte.

Nach Abschluss der Antennentests wurden Positionierungstests durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die über DAB+ empfangenen SSR-Korrekturdaten mit dem Softwaretool SSR2OBS in das Format RTCM 3.2 MSM konvertiert und dem auf der Maschine installierten GNSS-Empfänger als externes Korrektursignal zugeführt. Der GNSS-Empfänger hat mit den konvertierten SSR-Korrekturdaten eine RTK-Positionierung durchgeführt. Die RTK-Positionen wurden vom Lenksystem des Traktors als RTK-Lösung erkannt und vom automatisierten Lenksystem verwendet.

Im nächsten Schritt sollten die RTK-Positionen des A10-DAB+-Sensors direkt in das Lenksystem eingespeist werden. Aufgrund des Datenaustauschs zwischen dem vorhandenen GNSS-Empfänger und dem Lenksystem war eine Einspeisung externer RTK-Positionen ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand nicht möglich. Beim Vergleich der Positionierungslösungen zwischen dem integrierten RTK-Empfänger der Maschine und dem A10-DAB+-Sensor konnte das gleiche Genauigkeitsniveau festgestellt werden. Fahrversuche mit Markierungen am Boden zeigten die Wiederholbarkeit der Positionierungslösungen.

Eine zweite Testreihe wurde im Mai 2023 auf Brandenburger Landstraßen, die teilweise weder über mobilen Internetzugang noch über DAB+-Empfang verfügten, durchgeführt. Ziel der Tests war es, die Systemperformance unter verschiedenen Beobachtungsbedingungen und den automatisierten Wechsel zwischen den Korrekturdatenquellen DAB+ und mobiles Internet zu evaluieren. Für die Tests wurden die Brandenburg-Vernetzung der AdV und das Softwaretool SSR2OBS der Geo++ GmbH verwendet.

Die Testergebnisse haben gezeigt, dass die Systemperformance überwiegend im Bereich weniger Zentimeter liegt und die automatisierte Umschaltung zwischen den Medien DAB+ und mobiles Internet erfolgreich realisiert wurde.

Aufgrund anhaltender Regenfälle im April und Mai 2023 in Südbayern verzögerte sich der zweite Praxistest mit einer Landmaschine auf Ende Mai 2023. Ein Kunde des assoziierten Partners BayWa AG hat auf einem Feld (ca. 30 km südöstlich von München) Probleme mit dem mobilen Internetempfang und

betreibt daher eine eigene GNSS-Referenzstation mit UHF-Datenfunk. Ziel des Tests war es, die Verfügbarkeit von Korrekturen über DAB+ in dem Gebiet zu verifizieren und eine RTK-Positionierung mit dem A10-DAB+-Sensor durchzuführen.

Die Testmessungen wurden am 31.05.2023 in der Nähe von Grasbrunn mit einem Traktor durchgeführt. Nach einer erfolgreichen Rekonfiguration des A10-DAB+-Sensors wurde auf dem Hof des Betriebs mit der Messfahrt begonnen. Beim Erreichen des Feldes setzte die Positionierung des A10-Sensors aus. Aufgrund der Annahme, die Ursache seien lokale Störungen, wurde der Test beendet. Da die Rohdaten und die Signalstärke des DAB+-Empfangs aufgezeichnet wurden, konnte erst bei der nachträglichen Auswertung der Messungen festgestellt werden, dass die Fehlerursache im Ausfall eines internen Datenstroms lag. Der DAB+-Empfang war während der gesamten Messfahrt gegeben. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit der Landmaschine und Befahrbarkeit des Feldes konnte dieser Test im Rahmen des Projektzeitraums nicht wiederholt werden.

6 Zusammenfassung

Im ESA NAVISP EL2-Projekt SSRoverDAB+ (SSRoverDAB+ 2023) wurden Software- und Systemlösungen zur Übertragung und Verarbeitung von PPP-RTK-Korrekturdaten über den digitalen Rundfunk DAB+ entwickelt und erprobt.

Die SSR-Korrekturdaten und der DAB+-Datenkanal wurden dem Projekt von den assoziierten Projektpartnern AdV und BKG zur Verfügung gestellt. Ziel der AdV ist es, zukünftig einen präzisen PPP-RTK-Korrekturdatendienst im Rahmen des SAPOS®-Dienstes kostenfrei anzubieten. Neben der Begrenzung der serverseitigen Investitionen für die Bereitstellung des Dienstes sind die unlimitierte Nutzerzahl, die Gültigkeit der Korrekturen für größere Regionen, reduzierte Bandbreitenanforderungen und ein sendefähiges Datenformat als Vorteile eines PPP-RTK-Dienstes zu nennen. Falls mit PPP-RTK dasselbe Genauigkeitsniveau wie mit VRS-RTK erreicht wird, könnte der VRS-Dienst aufgegeben werden.

Die Voraussetzung für die Einführung eines Open-Data PPP-RTK-Dienstes innerhalb von SAPOS® ist die Bereitstellung der Korrekturdaten in international standardisierten Datenformaten. Aktuell werden Vorschläge für ein derartiges Datenformat im RTCM-Komitee erarbeitet, eine Standardisierung ist bisher noch nicht erfolgt. Um Erfahrungen mit der Performance des PPP-RTK-Ansatzes zu sammeln, wurde das offengelegte Datenformat SSRZ der Geo++ GmbH für die Entwicklungen im Projekt SSRoverDAB+ verwendet. Laut Geo++ ist SSRZ ein geeignetes Datenformat, um die PPP-RTK-Korrekturen über Datenkanäle mit geringerer Bandbreite zu übertragen.

Infrastrukturseitig wurde im Projekt die Balance zwischen der Anzahl der Bits für die PPP-RTK-Korrekturdaten und die Fehlerkorrektur des Übertragungskanals optimiert. Weiterhin wurde die Bandbreitenreduzierung des PPP-RTK-Korrekturdatenstroms unter anderem durch die Verpackung der Effekte regionaler Signallaufzeitverzögerungen in unterschiedliche Datenblöcke realisiert. Der im Projekt genutzte DAB+-Übertragungskanal wurde vom BKG in Frankfurt bereitgestellt.

Aufgrund der fehlenden Standardisierung können kommerziell am Markt verfügbare GNSS-Empfänger derzeit das SSRZ-Datenformat nicht direkt verarbeiten. Um die Performance der SSR-Korrekturdaten mit kommerziell verfügbarer GNSS-Hardware zu erproben, wurden im Rahmen des SSRoverDAB+-Projekts drei verschiedene Interpreter für das SSRZ-Format entwickelt bzw. verbessert. Der Projektpartner Geo++ GmbH hat sein vorhandenes Softwaretool SSR2OBS, welches SSR-Korrekturdaten in standardisierte OSR-Korrekturdaten umrechnet, um einen Rückkanal erweitert. Bei dem sogenannten „Feedbackchannel“ werden die Rohdaten des mobilen GNSS-Empfängers zur Verbesserung der OSR-Korrekturdatenberechnung genutzt.

Der Projektpartner inPosition gmbh hat seine jahrelangen Erfahrungen im Bereich von GNSS-Formaten und -Algorithmen zur Nutzung von PPP-RTK-Daten für eine cm-genaue dynamische Positionierung eingebracht. Die Entwicklung eines SSRZ-Interpreters für höchste Positionierungsgenauigkeiten konnte trotz des intensiven Austauschs zwischen den Projektpartnern nicht vollumfänglich abgeschlossen werden. Die Verwendung von in RTCM 3.2 MSM konvertierter SSR-Korrekturdaten mit dem RTK-Algorithmus von inPositon wurde erfolgreich umgesetzt.

Fraunhofer IIS hat die SSRZ-Korrekturdaten zur Verbesserung einer Codebasierten E5AltBoc-Positionierung genutzt. Die für den Automotive-Markt entwickelte Positionierungslösung stellt aufgrund der avisierten Positionierungsgenauigkeit von 0,5 m geringere Ansprüche an die Dekodierung des SSRZ-Formats. Weiterhin hat Fraunhofer IIS im Rahmen des Projektes eine Fusionslösung der Messdaten eines GNSS- und eines INS-Sensors entwickelt. Ziel dieser Sensorfusion ist die Transformation der Koordinate vom GNSS-Antennenphasenzentrum auf die Räder des Traktors. Eine kurzzeitige Überbrückung von GNSS-Positionierungsausfällen ist mit dieser Fusionslösung ebenfalls möglich.

Der Alberding A10-RTK-Sensor wurde im Projekt als Test- und Entwicklungsplattform eingesetzt. Die o.g. Softwarelösungen wurden auf den im A10-RTK integrierten Embedded-PC portiert. Dazu wurde das Linux-Betriebssystem des PCs mit Treibern auf eine aktuelle Version gebracht und die Alberding EuroNet-Software weiterentwickelt. Die EuroNet-Software dient als Interface zu den Softwareentwicklungen der Projektpartner und ist für das Datenmanagement inklusive der Ausgabe der Positionen an Drittsysteme zuständig.

In Zeiten des elektronischen Bauteilemangels war die Beschaffung der Hardware zur Entwicklung eines DAB+-Rover-Empfängers herausfordernd. Für den dynamischen Empfang der über DAB+ übertragenen Korrektursignale konnte Fraunhofer IIS vier Prototypen herstellen. Da die Fraunhofer-Software zur Dekodierung nicht zusätzlich auf dem Embedded-PC des A10-Sensors betrieben werden konnte, wurden die Prototypen mit einem separaten Prozessor ausgestattet. Neben der Hardwareentwicklung verbesserte Fraunhofer IIS seine Softwaremodule für den DAB+-Empfang und die Dekodierung des SSRZ-Datenformats und führte Untersuchungen zur Performance unterschiedlicher DAB+-Antennen durch.

Für die Durchführung praktischer Testmessungen hat die Alberding GmbH den bestehenden A10-RTK-Sensor zusammen mit dem DAB+-Empfänger von Fraunhofer IIS und dem INS-Sensor in ein größeres Gehäuse integriert. Zwei A10-DAB+-Prototypen wurden hergestellt und in praktischen Feldtests an Landmaschinen evaluiert. Aufgrund der geschlossenen Schnittstelle zwischen dem GNSS-Empfänger im Testtraktor und dem Lenksystem war eine direkte Ausgabe der mit dem A10-DAB+-Empfänger berechneten Positionen an die Maschine nicht möglich. Der GNSS-RTK-Empfänger akzeptierte die vom A10-DAB+-System ausgegebenen Korrekturdaten und nutzte sie für die automatische Lenkung. Diese Funktionalität wurde in den Feldtests erfolgreich demonstriert.

7 Ausblick

Aufgrund der genannten Vorteile von PPP-RTK gegenüber dem VRS-Ansatz zeichnet sich bei den GNSS-Korrekturdaten ein Trend hin zur SSR-basierten Korrekturdatenbereitstellung ab. Die fehlende internationale Standardisierung der Formate hat zu geschlossenen Systemen weltweit agierender GNSS-Lösungsanbieter und zur Einschränkung des Wettbewerbs in den Märkten der Korrekturdatenbereitstellung und der mobilen Lösungen geführt. Die mobile Verfügbarkeit von GNSS-Korrekturdaten ist zu einem entscheidenden Faktor für den Vertrieb kompletter GNSS-Lösungen im Markt geworden.

Die Europäische Union investiert sehr viel Geld in den Aufbau und Betrieb des Galileo-Systems und zugehöriger Dienste. Zukünftig wird der Galileo High Accuracy Service (Galileo HAS) ohne zusätzliche Korrekturdaten weltweit Positionierungsgenauigkeiten im Bereich von 20 cm und besser (horizontal) nach einer Einlaufzeit von wenigen Minuten liefern. Diese Basisinfrastruktur wird aus Steuergeldern bezahlt und den Nutzer kostenlos angeboten.

Der von Galileo HAS nicht abgedeckte Genauigkeitsbereich von 0,01 m bis 0,20 m könnte europaweit durch Open-Data PPP-RTK-Dienste der jeweiligen

Landesvermessungsbehörden adressiert werden. In Deutschland werden die VRS-Korrekturdaten länderspezifisch an alle Nutzer oder bestimmte Nutzergruppen kostenlos abgegeben. Die AdV strebt für die kommenden Jahre den Betrieb eines deutschlandweiten Open-Data PPP-RTK-Korrekturdatendienstes im Rahmen des SAPOS®-Dienstes an.

Die fehlende Standardisierung des PPP-RTK-Datenformats in der höchsten Genauigkeitsstufe kann dazu führen, dass die in offenen Formaten bereitgestellten Korrekturdaten von den am Markt befindlichen GNSS-Empfängern nicht genutzt werden können. Abhilfe kann die Forderung der Verwaltungen zur Verwendung von Standardformaten bei Ausschreibungen von Beschaffungen oder Dienstleistungen schaffen. Ein Marktdruck wird das Interesse der GNSS-Empfängerhersteller an der Standardisierung deutlich steigern.

Neben der Voraussetzung zur Verarbeitbarkeit der Korrekturdaten durch die Endgeräte besteht das Problem einer flächendeckenden Bereitstellung. Obwohl man beim Aufbau des mobilen Internets gut vorangekommen ist, stellt man insbesondere in ländlichen Regionen Lücken in der Versorgung fest. In diesen Regionen können GNSS-Nutzer aktuell nicht von kostenfreien Korrekturdaten der Landesvermessung profitieren. Sie müssen auf kommerzielle GNSS-Dienste zurückgreifen.

Die zusätzliche Bereitstellung der GNSS-Korrekturdaten über vorhandene terrestrische Datenkanäle wie den digitalen Rundfunk DAB+ könnte viele Lücken im Zugang zu freien Korrekturdaten schließen. Weiterhin fallen für diese Übertragungen keine Mobilfunkkosten an. Die Antennenproblematik ist zumindest auf Land- oder Baumaschinen und im Automotive-Bereich durch die in den Scheiben integrierte DAB+-Antenne gelöst. Im Bereich personengebundener Anwendungen ist noch eine Entwicklung zum direkten Signalempfang erforderlich.

Entwicklungsbedarf besteht bei kleinen, für mobile Anwendungen geeigneten DAB+-Empfängern, welche komplett mit den GNSS-Boards zusammen in ein Gehäuse integriert werden können. Diese Entwicklungen werden im Anschluss an die erfolgreiche Machbarkeitsstudie im ESA NAVISP EL2 Projekt SSRoverDAB+ in einem Folgeprojekt angestrebt.

Falls die Standardisierung des PPP-RTK-Datenformats wie geplant vorangetrieben wird und entsprechende DAB+-Empfängerentwicklungen durchgeführt werden, könnte gegen Ende des Jahres 2024 ein deutschlandweiter PPP-RTK-Dienst, dessen Korrekturdaten parallel über Internet und DAB+ bereitgestellt werden, Realität werden. Die Hersteller von GNSS-Empfängern und -Boards werden bei einem entsprechenden Marktdruck diese Formate in die Firmware ihrer Produkte integrieren, so dass Open-Data-Korrekturdaten verwendet werden können.

Kleinere europäische Technologieunternehmen wie die Alberding GmbH können dann GNSS-Module unterschiedlicher Hersteller für eigene Produkte nutzen, so dass die Kaufentscheidung der Kunden auch vom Preis und der Adaptierung der Lösung auf die Kundenanforderung und nicht von der Verfügbarkeit geeigneter Korrekturdaten abhängt. Anderenfalls wären diese Firmen vom prognostizierten Wachstum im präzisen GNSS-Markt abgekoppelt.

Literatur

- Alberding, J., et al. (2023): SSRoverDAB+ Final Report Version 1.0. Abschlussbericht des ESA NAVISP EL2 069 Projekts „SSRoverDAB+“.
- Augath, W. (1990): Über die Anwendung satellitengestützter Verfahren in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung OuKV. In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung. Heft 3/1990.

Kontakt

Jürgen Alberding | Dirk Stöcker
Alberding GmbH
Ludwig-Witthöft-Straße 14, 15745 Wildau
info@alberding.eu

Potenzial von SSR für GNSS-Korrekturdatendienste und Rover-Anwendung

Gerhard Wübbena | Jannes Wübbena | Temmo Wübbena | Martin Schmitz |
Christopher Perschke

1 Einführung

Die weltweit verfügbaren *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) werden in einer Vielzahl von Anwendungen mit unterschiedlichen Genauigkeiten für die Navigation und Positionierung eingesetzt. Die Zahl der Anwendungen und der Nutzer nimmt stetig zu und damit auch der Bedarf an präziser Navigation und Positionierung. Aus Sicht der GNSS-Anwendung können folgende Verfahren unterschieden werden:

- absolute Positionierung (GNSS)
- differenzielle Positionierung (DGNSS)
- *Precise Point Positioning* (PPP)

Die absolute GNSS-Positionierung ist der Grundmodus eines GNSS und verwendet einen einzigen Empfänger für Navigation und Positionierung. Bahn- und Uhrinformationen werden vom GNSS-Kontrollsegment aus eigenen Beobachtungen auf Bodenstationen bestimmt und als Broadcast-Ephemeriden vom Navigationsatelliten bereitgestellt. Es werden keine weiteren GNSS-Referenzstationen des Nutzers oder eines Korrekturdatendienstes benötigt. Mit Hilfe der Broadcast-Informationen kann eine Position im Meterbereich bestimmt werden.

Für die differenzielle GNSS-Positionierung (DGNSS) sind mindestens zwei gleichzeitig arbeitende Empfänger erforderlich – einer auf einer koordinatenmäßig bekannten Referenzstation und ein Zweiter auf der unbekannt Station. Es wird die räumliche Korrelation systematischer Fehler zwischen Stationen genutzt, um deren Auswirkungen durch Differenzbildung zu reduzieren und so eine wesentlich höhere Genauigkeit im Vergleich zur absoluten Positionierung zu erreichen. Der Begriff RTK (*Real Time Kinematic*) wird oftmals für diese Anwendungen verwendet, wenn Trägerphasen als Beobachtungen genutzt werden und eine Lösung ihrer Mehrdeutigkeiten erfolgt. Die typische Anwendung heute ist ein RTK-Korrekturdatendienst, der aus einem Netzwerk von Referenzstationen flächendeckende, homogene, zuverlässige und genaue GNSS-Korrekturen

bestimmt (*Network RTK*, *NRTK*). Die Korrekturen beschreiben den gesamten Fehlerhaushalt des GNSS inklusive atmosphärischer Korrekturen und erlauben Positionsgenauigkeiten im Zentimeterbereich.

Precise Point Positioning nutzt ebenfalls Beobachtungsdaten eines einzelnen Empfängers und zusätzlich Zustandsinformationen (*State Space Information*) einzelner GNSS-Fehler, die aus einem globalen oder regionalen Netz von GNSS-Referenzstationen abgeleitet werden. Ursprünglich wurden nur Zustandsinformationen für präzise Satellitenbahnen und Uhren für Post-Prozessierung bestimmt (Zumberge et al. 1997). Inzwischen werden die Zustandsparameter in Echtzeit (z. B. Caissy et al. 2012) ermittelt und neben den ursprünglich verwendeten Korrekturen auch weitere Korrekturdaten, wie etwa für die Ionosphäre (z. B. Liu et al. 2021) generiert. Dies führt zu weiteren Verfeinerungen, wie PPP mit Mehrdeutigkeitslösung (PPP-AR, *Ambiguity Resolution*), die insbesondere Zusatzinformationen über systematische Fehler der Satellitensignale (Biases) benötigen. Es werden bei längeren Konvergenzzeiten (d. i. die notwendige Beobachtungszeit, um Mehrdeutigkeiten aufzulösen) Positionsgenauigkeiten besser als ein Dezimeter erzielt.











Die Genauigkeit und insbesondere die Konvergenzzeit von PPP limitiert den Nutzen von PPP im Vergleich zu klassischem RTK. Diese Einschränkungen können durch die Verwendung eines dichten Netzes von Referenzstationen, wie es auch für NRTK genutzt wird, weitestgehend überwunden werden. Mit dichten Netzen können insbesondere atmosphärische GNSS-Effekte besser erfasst und beschrieben werden. Dadurch sind Rover-Anwendungen in der Lage, Mehrdeutigkeiten mit kurzen Beobachtungszeiten aufzulösen und das bekannte RTK-Genauigkeitsniveau zu erreichen. Diese Verknüpfung des PPP-Konzeptes mit hochaufgelösten lokalen Atmosphäreninformationen wird oftmals als PPP-RTK (Wübbena et al. 2005) bezeichnet.

2 GNSS SSR- und OSR-Korrekturdienste

Eine präzise Positionierung mit GNSS erfordert die Kenntnis (der Summe) aller Fehlerkomponenten mit einer entsprechenden Genauigkeit, um die geforderte Genauigkeit der Anwendung zu erreichen. Die höchste Genauigkeit wird von RTK-Anwendungen im Zentimeterbereich oder besser erwartet. Dies kann nur mit der Auflösung der GNSS-Trägerphasenmehrdeutigkeiten und der Kenntnis des Gesamtfehlers mit einer Genauigkeit von deutlich besser als 1 cm erreicht werden. Die wesentlichen Fehlerquellen von GNSS sind in Tab. 1 angegeben.

Die satellitenabhängigen und atmosphärischen Fehlerquellen können durch unterschiedliche Verfahren bestimmt und als Korrekturen für Rover-Anwendungen genutzt werden. Die stationsabhängigen Fehleranteile werden auf der

Tab. 1: GNSS-Fehlerquellen, Größenordnung und Bestandteil einer GNSS-Korrektur

Fehler	Größenordnung	Anmerkung	GNSS-Korrektur
 Satellitenuhr	0,2 ... 10 m	–	
Einfluss Satellitenantenne	dm ... m mm ... cm	Code Phase	
 Satellitenbahnfehler	0,2 ... 5 m	–	
 Satellitensignal Biases	0,0 ... 50 m 0,0 ... 1 cm	Code Phase	
 Ionosphäre	0,5 ... 100 m	dispersiv	
 Troposphäre	2,1 ... 2,5 m 0,0 ... 0,5 m	hydrostatisch Wasserdampf	
Einfluss Empfangsantenne	mm ... m mm ... cm	Code Phase	
Mehrweg-Effekte	mm ... cm mm ... m	Nahfeld Fernfeld	
Empfängeruhr	>>	begrenzt < 1 ms	

generierenden Seite korrigiert bzw. reduziert; für den Rover bleibt die Aufgabe diese Fehler zu korrigieren oder durch Messanforderungen gering zu halten.

Die verschiedenen GNSS-Fehlerkomponenten weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Satellitenbahn, Ionosphäre und Troposphäre sind räumlich korreliert und es ist daher möglich, die Auswirkungen in der differenziellen GNSS-Prozessierung zu eliminieren bzw. zu reduzieren. Allerdings dekorrelieren die Effekte mit der Distanz und führen zu einem distanzabhängigen Fehler in der Positionierung. Die Uhrfehler und Biases werden im Modellierungsansatz der GNSS-Datenverarbeitung geschätzt bzw. eliminiert.

Die entfernungsabhängigen GNSS-Fehler sind die wichtigsten limitierenden Faktoren in differenziellen GNSS-Anwendungen. Die Summe der GNSS-Fehler können mit einer einzelnen Referenzstation ermittelt werden, allerdings nicht die entfernungsabhängigen Fehler. Daher werden mehrere Referenzstationen in einer RTK-Vernetzung kombiniert, um die entfernungsabhängigen GNSS-Fehler zu bestimmen und über entsprechende Korrekturen die Positionierung und Genauigkeiten für einen Nutzer vor Ort zu verbessern.

GNSS-Korrekturdienste unterscheiden zwei allgemeine Konzepte hinsichtlich der Korrekturtypen: die *Observation Space Representation* (OSR) und die

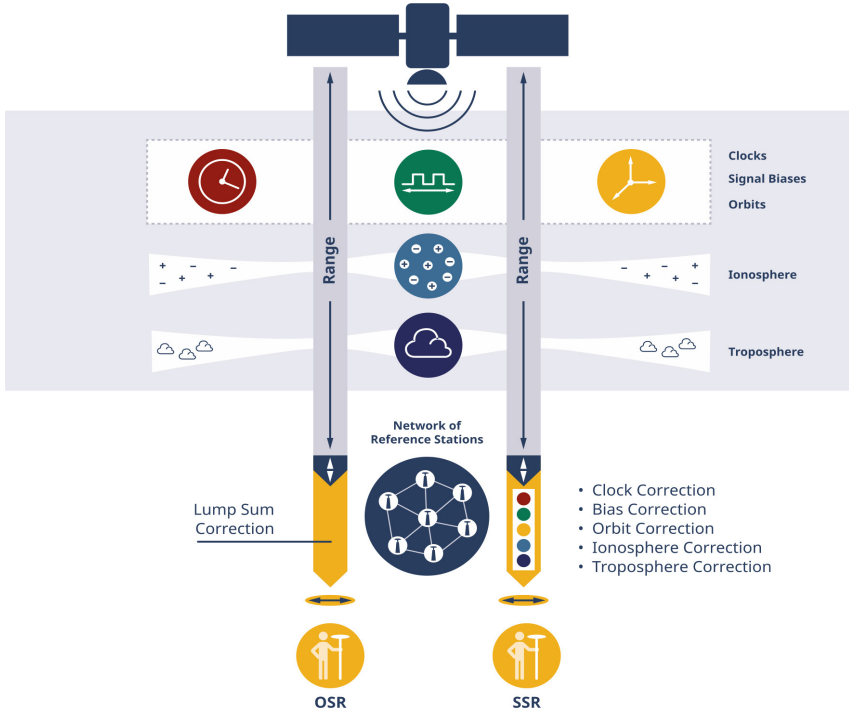


Abb. 1: Konzept der GNSS OSR- und SSR-Korrektur

State Space Representation (SSR). Der Begriff Repräsentation wird hier benutzt, da die Zustandsinformationen mit geeigneten Modellen beschrieben und dem Rover bereitgestellt werden müssen. Die beiden Konzepte sind in der folgenden Abb. 1 dargestellt.

2.1 OSR-Korrekturdienst

Im OSR-Konzept wird im Allgemeinen die Summe der GNSS-Fehlerkomponenten als GNSS-Korrekturen an den Rover übertragen (Abb. 1). OSR ist die derzeit in RTK-Anwendungen verwendete Methode, um einem Nutzer Korrekturen oder korrigierte Daten bereitzustellen. Um diese zu übermitteln, können folgende Konzepte unterschieden werden:

- VRS (Virtuelle-Referenzstation)
- PRS (Pseudo-Referenzstation)
- FKP (Flächenkorrekturparameter)
- MAC (*Master-Auxiliary*-Konzept)

Alle Verfahren sind im RTCM definiert, jedoch werden moderne Multifrequenz-GNSS nur im VRS/PRS-Konzept vollständig unterstützt, wodurch dies das vorherrschende Verfahren ist. Die Bezeichnung OSR leitet sich daraus ab, dass die Beobachtungen (*Observations*) der Referenzstationen direkt verwendet werden.

Für die Generierung von OSR-Korrekturen werden oftmals vereinfachte Modelle eingesetzt. Der Modellierungsansatz von GNSS ist jedoch ein wichtiger Aspekt für einen NRTK-Dienst. Vereinfachungen weisen auf lange Sicht Nachteile auf. Inzwischen werden in NRTK komplexere Modellierungen der einzelnen GNSS-Fehlerkomponenten angewendet.

2.2 SSR-Korrekturdienst

Der ideale Ansatz für die Erzeugung von GNSS-Korrekturen ist eine vollständige Zustandsraummodellierung (*State Space Modelling, SSM*). Die SSM ist Voraussetzung für das SSR-Konzept, bei der die einzelnen GNSS-Fehlerkomponenten als funktionale und optionale stochastische Beschreibung des Zustandes geschätzt werden. Aktuelle Zustandsparameter (*State Space Parameter*) werden dann als SSR-Parameter an den Rover übermittelt (*Abb. 1*). Der Rover korrigiert seine eigenen Beobachtungen eines einzelnen GNSS-Empfängers mit SSR-Korrekturen, die aus den Zustandsparametern für seine individuelle Position berechnet werden, und führt eine RTK-Positionierung mit korrigierten Beobachtungen durch. Da die Zustandsparameter der Rover-Anwendung bereitgestellt werden, wird dieser Ansatz als SSR bezeichnet.

2.3 GNSS-Korrekturabgabe

Zum Dienstbetrieb gehört die Übermittlung von Korrekturdaten zu den Rover-Anwendungen. OSR-Korrekturen benötigen für VRS/PRS eine bidirektionale Kommunikation, bei der die grobe Position des Nutzers an einen Server gesendet wird. Der Server berechnet für diese Position gültigen OSR-Korrekturen und schickt diese an den Nutzer, damit dieser seine Positionierung verbessern kann (*Abb. 2 links*).

Im Gegensatz dazu ermöglicht SSR dem Nutzer seine individuellen Korrekturen selbst zu berechnen. Für einen Dienst bedeutet dies, dass SSR-Korrekturen unidirektional über Broadcast-Medien (z. B. Satelliten-L-Band oder Digital Audio Broadcast DAB+ abgegeben werden können. Damit ergibt sich auch eine einfache Skalierbarkeit von SSR-Diensten, da diese (theoretisch) unendlich viele Nutzer bedienen können und somit für Massenmarktanwendungen (z. B. autonomes Fahren) geeignet sind (*Abb. 2 rechts*).

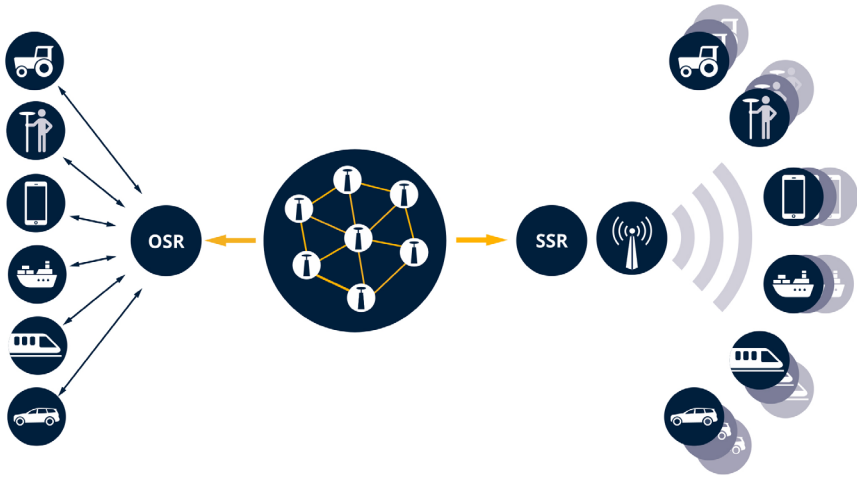


Abb. 2: Korrekturdatenabgabe von OSR (bidirektionale Kommunikation) und SSR-Broadcast (unidirektionale Kommunikation) für unbegrenzte Zahl von Nutzern

2.3.1 GNSS-Korrektur Bandbreite

Mit der Modernisierung der GNSS und der Vielzahl von zusätzlichen Frequenzen und GNSS ist die Datenmenge in GNSS-Korrekturdiensten angestiegen, stellt jedoch grundsätzlich kein Problem bei der Übertragung über das Internet dar. Allerdings steigen die Nutzerzahlen stetig und somit die Last im Internet und auf der Server-Seite eines Dienstes.

Betrachtet man andere Kommunikationsmedien, so wird man feststellen, dass die Bandbreite von Broadcast-Medien limitiert ist. Um die Datenmenge bei gleichem Informationsgehalt zu reduzieren, können SSR-Korrekturen genutzt sowie komprimiert werden und z. B. atmosphärische Einflüsse mit funktionalen Modellen und verbleibenden Residuen in unterschiedliche Anteile aufgeteilt werden. Funktionale Modelle sind z. B. Kugelflächenfunktionen zur Berechnung des Einflusses einer globalen Ionosphäre und räumlich begrenzte Polynomfunktionen für den regionalen Einfluss. Welche Modelle verwendet werden, ist in den SSR-Formatbeschreibungen spezifiziert. Für SSR-Dienste mit höchster Genauigkeit werden ortsspezifische Korrekturen in einem räumlichen Gitter oder an den Orten der Referenzstationen verwendet. Sie beschreiben die Residuen zwischen funktional modellierten und geschätzten gesamten atmosphärischen Einflüssen.

Zu unterscheiden sind die satellitenabhängigen und atmosphärischen SSR-Parameter. Satellitenuhr- und Bahnfehler sowie Satelliten-Biases sind unabhängig von der Position eines Nutzers und können als globale Einflüsse angesehen werden. Basiert die Schätzung von SSR-Korrekturen auf Informationen meh-

erer Teilnetze im Service-Gebiet, so sind globale Korrekturen für alle Teilnetze identisch und müssen nur einmal übertragen werden.

Ein SSR-Dienst muss sicherstellen, dass die Korrekturen und Modelle der einzelnen SSR-Parameters konsistent zueinander sind und vom Rover korrekt zusammengesetzt werden können. Mit einem vollständigen Satz konsistenter SSR-Korrekturen kann ein Rover seine individuellen Korrekturen bestmöglich berechnen (Abb. 3).

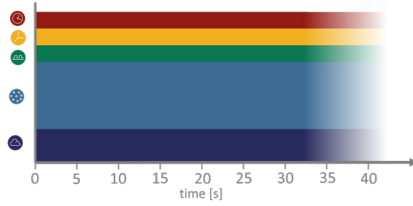


Abb. 3: Konsistenz-Diagramm der fünf Basis SSR-Parameter, die über die Zeit bereitgestellt werden. Zu einem Zeitpunkt muss Konsistenz aller Parameter gewährleistet sein (vertikaler Schnitt). Die Höhe der Balken entspricht der qualitativen Datenmenge.

Die Art und Weise, wie Konsistenz der SSR-Parameter bei deren Erzeugung gewährleistet wird, hat unmittelbaren Einfluss auf die zeitliche Abgabe der Korrekturen. Abb. 4 (links) zeigt die Generierung eines vollständigen Satzes von SSR-Korrekturen pro Sekunde. Für die Datenabgabe heißt das, dass alle Korrekturen ebenfalls innerhalb einer Sekunde ausgesendet werden müssen (Bandbreiten-Diagramm, Abb. 4 rechts).

Verschiedene SSR-Komponenten variieren jedoch unterschiedlich schnell. Bei vorgegebener Genauigkeitsanforderung ist es beispielsweise möglich einige SSR-Parameter für 30 Sekunden als konstant zu halten, den Uhrfehler alle 5 Sekunden zu schätzen und für diesen Zeitraum ebenfalls konstant zu halten (Abb. 5 links). Für die Datenabgabe bedeutet dies einerseits eine signifikante Reduzierung der Korrekturdatenmenge und andererseits eine Reduzierung der benötigten Bandbreite, da jetzt die Korrekturen in maximal 5 Sekunden statt 1 Sekunde ausgesendet werden (Transmissionszeit, Abb. 5 rechts). In dieser

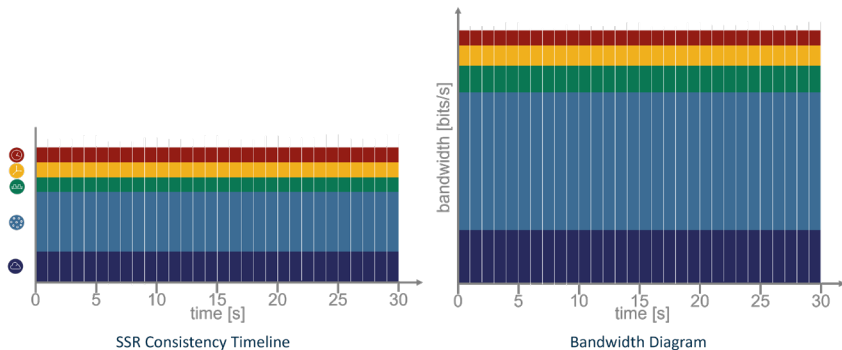


Abb. 4: Konsistenz- und Bandbreitendiagramm für eine 1 s-Konfiguration

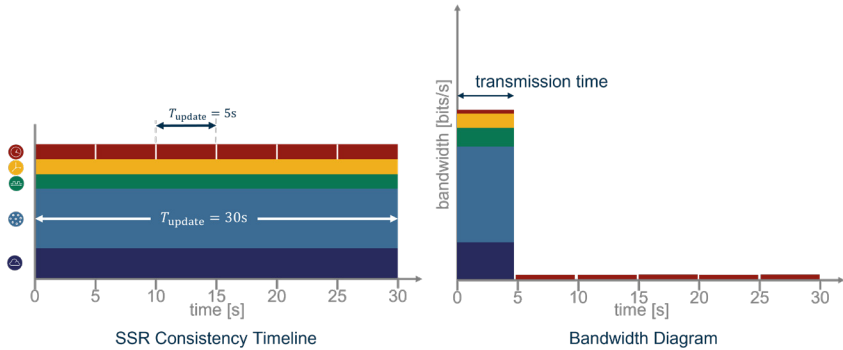


Abb. 5: 30/5 s-Konfiguration mit reduzierter Datenmenge und größerer Transmissionszeit

30/5 s-Konfiguration bleibt im Vergleich zu den Uhrfehler-Korrekturen eine hohe Datenlast alle 30 Sekunden.

Die Bandbreite von Broadcast-Medien wird optimal genutzt, wenn die zu übertragende Datenmenge ungefähr gleichbleibt. Dies kann u.a. dadurch erreicht werden, dass regionale oder netzspezifische SSR-Korrekturen mit einem Offset zu anderen SSR-Parameters geschätzt werden. Abb. 6 zeigt ein Beispiel mit fünf Teilnetzen, deren Residuen der Ionosphäre und Troposphäre mit unterschiedlichen Offsets von 5, 10, 15, 20, 25 Sekunden geschätzt und abgegeben werden. Mit dieser 30/5 + Offset Konfiguration kann eine optimale Bandbreitennutzung erreicht werden.

Die dargestellten Konzepte für eine Bandbreitennutzung sind im dem offenen SSR Format SSRZ (Wübbena et al. 2020, Geo++ 2022) umgesetzt. Die dargestellte 30/5 s-Konfiguration lässt sich bei stärkerer Variabilität der SSR-Parameter auch mit anderen Zeitparametern wie beispielsweise 15/5 s oder 20/2 s umsetzen.

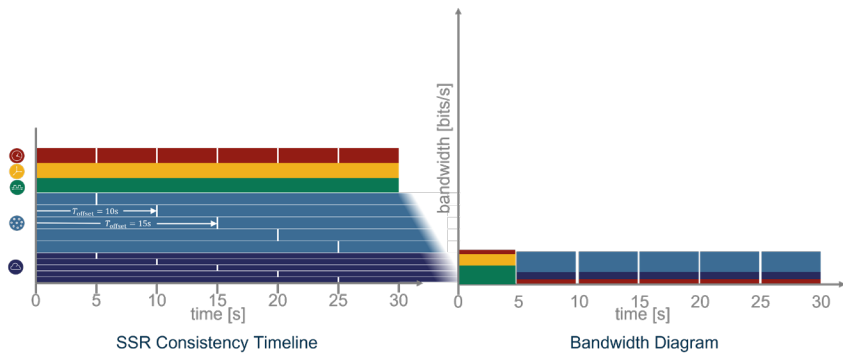


Abb. 6: 30/5 + Offset Konfiguration und optimale Bandbreitennutzung

3 Vorteile der SSR-Korrektur

Im Gegensatz zu den oben diskutierten OSR-Techniken bietet die Zustandsraumdarstellung (SSR) einige wesentliche Vorteile. Die SSR-Bandbreite kann im Vergleich zu OSR deutlich reduziert werden, da die Dynamik verschiedener Parameter zur Optimierung der Bandbreite genutzt werden kann. SSR nutzt auch Eigenschaften wie die Satellitenunabhängigkeit der troposphärischen Modellierung oder die Stationsunabhängigkeit von Satellitenuhrfehlern. SSR ist unabhängig von GNSS und Frequenz und kann um zusätzliche GNSS oder Signale einfach erweitert werden.

Die SSR-Korrekturen erlauben es, dass unterschiedliche Nutzer mit Einfrequenz- bis hin zur genauen Mehrfrequenz-Anwendung denselben SSR-Dienst nutzen können. Ebenso ist eine räumliche Skalierbarkeit in unterschiedlichen Gebieten möglich. Beispielsweise können Gebiete mit hoher Referenzstationsdichte RTK-Genauigkeiten liefern und benachbarte Gebiete PPP-Genauigkeiten.

SSR-Korrekturen haben folgenden Eigenschaften:

- keine Abhängigkeit von einzelnen Referenzstationen
 - stationsabhängige Fehler wie Mehrwegeeffekte und Rauschen werden in redundanten RTK-Vernetzungen reduziert bzw. eliminiert
- nicht alle Referenzstationen
 - müssen alle GNSS und Signale verarbeiten
 - müssen alle Satelliten sehen
- die Aktualisierungsrate für die meisten Parameter ist niedrig
 - höchste Aktualisierungsrate für Satellitenuhren (z. B. 5 s)
 - für alle anderen Parameter niedriger (z. B. 30 s)
- verschiedene Dienste mit unterschiedlichen Genauigkeiten möglich
 - durch die angewendeten SSR-Parameter
 - in unterschiedlichen räumlichen Gebieten
- Ein-, Zwei- und Mehrfrequenzanwendung

4 Offene Formate und Standardisierung

Seit 1983 standardisiert das RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) GNSS-Korrekturen. Die RTCM-Übertragungsformate sind weithin akzeptiert und heute mit allen gängigen GNSS-Empfängern kompatibel. Das aktuelle RTCM 3.3 bietet konventionelle OSR- und SSR-basierte GNSS-Korrekturen (RTCM 2016). RTCM gilt als anerkannte Organisation für die Standardisierung offener GNSS-Echtzeitkorrekturformate. Im Gegensatz hierzu, ist das von dem

IGS entwickelte RINEX-Format (Romero 2021) nur für den Austausch von GNSS-Beobachtungsdaten im Post-Prozessierung geeignet.

Die Fortschritte bei der Entwicklung von SSR-Korrekturen in RTCM entsprachen lange Zeit nicht den kommerziellen und wissenschaftlichen Forderungen. Daher wurden offene SSR-Formate entwickelt. Offenes Format bedeutet, dass die Dokumentation öffentlich zugänglich und die Nutzung nicht eingeschränkt ist.

Die Eigenschaften und Anwendungsschwerpunkte der verschiedenen offenen SSR-Formate sind unterschiedlich. SSR-Dienst- und Formatdefinitionen sind im Allgemeinen ein Kompromiss zwischen verschiedenen Anforderungen. Technische Aspekte sind (Wübbena et al. 2022):

- Service-Qualität (Dezimeter-, Zentimeter-, Millimeterbereich)
 - Auflösung der SSR-Parameter, die die Positionierung beeinflussen
 - atmosphärische Modellstufen (mit unterschiedlichen Auflösungen)
- Speicherbedarf und Rechenaufwand auf dem Rover-System
 - (kostengünstige) Massenmarktempfänger benötigen einfache Formate und Modelle aufgrund geringer Rechenleistung und begrenztem Speicher
- Bandbreitenoptimierung (Broadcast oder bidirektionale Kommunikation)
 - Verwendung dynamischer Kodierung (keine feste Message-Größe)
 - übertragene Werte klein halten (z. B. Differenz zu einer Referenz/Modell übertragen)
- Verfügbarkeit
 - ausgewählte SSR-Modelle, um Variationen der Korrekturen zu reduzieren; somit kann ein Rover ältere Korrekturen verwenden, wenn Nachrichten verloren gehen

Darüber hinaus gibt es Aspekte wie Präferenzen für eine einfache Formatsyntax zur einfachen Implementierung, eingeschränkte Funktionalitäten zur Reduzierung von Interoperabilitätstests oder Marketingaspekte zu vorgesehenen Empfängerfunktionen.

Bislang ist die Anwendung hinsichtlich der SSR-Inhalte vergleichbar, da dieselben grundlegenden SSR-Parameter definiert und verwendet werden. Dadurch werden GNSS-Empfänger mit unterschiedlichen SSR-Formaten arbeiten können. Dies wird auch an der Entwicklung der unterschiedlichen Formate deutlich, wie sie in *Abb. 7* dargestellt ist.

Standardisierte Formate haben den Vorteil, dass alle notwendigen Informationen durch die Standardisierungsorganisation und -prozesse validiert werden, um eine vollständige und korrekte Anwendung sicherzustellen. Aber auch dokumentierte offene SSR-Formate können diese Anforderungen erfüllen und somit modernste Techniken bereitstellen.

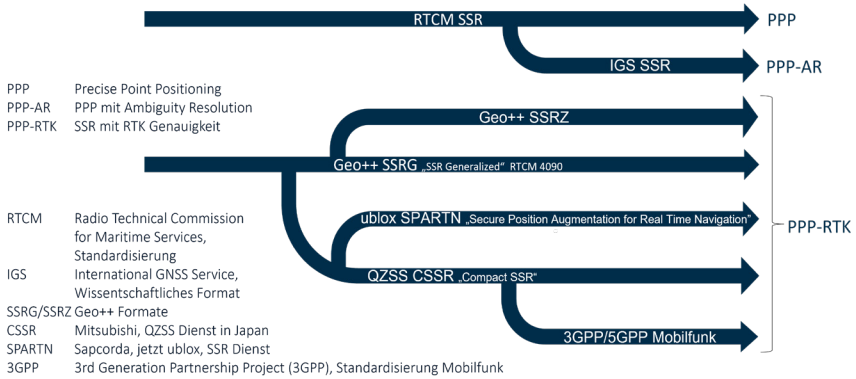


Abb. 7: Entwicklung von SSR-Formaten

Abb. 8 zeigt eine Übersicht einer Auswahl von SSR-Formaten. Es sind die unterstützten GNSS, die grundlegenden SSR-Parameter und die Eignung für eine vollständige GNSS-Korrektur insbesondere der atmosphärischen Parameter für hohe Positionierungsgenauigkeit dargestellt. Es werden auch die unterschiedlichen Komponenten bei mehrstufigen Modellansätzen angegeben. Zusätzlich zu den SSR-Formaten aus Abb. 8 ist der Galileo *High Accuracy Service* (HAS) aufgeführt. Die von den Galileo Satelliten ausgesendeten SSR-Korrekturen sind in Echtzeit auch über das Internet verfügbar und verwenden für die Internet-Abgabe gegenwärtig ein vorläufiges RTCM-Format (Fernandez-Hernandez et al. 2022).

Die SSR-Standardisierung im RTCM wird seit Oktober 2021 in einer Task Force innerhalb der SSR Working Group vorangetrieben. Ziel ist es, RTK-Anwendungen mit einem vollständigen Satz von SSR-Korrekturen zu ermöglichen, wobei die benötigte Bandbreite nicht besonders betrachtet wird.

SSR Basic Parameters	Multi-stage/ Scalability	RTCM-SSR	IGS SSR (1.0) 4076	SSRZ (1.1) RTCM Geo++ 4090.7	Compact SSR Melco	SPARTN (2.0) Sapcorda	3GPP-LPP (Release 16)	Galileo HAS
SV clock	high rate clock	available	available	available	available	available	available	available
	low rate clock	available	available	available				
SV orbit		available	available	available	available	available	available	available
SV code bias		available	available	available	available	available	available	available
SV phase bias		in preparation	available	available	available	available	available	available
ionosphere	global VTEC		available	available		available		
	global STEC	Drafting in Task Force on SSR		available				
	regional STEC		in preparation	available	available	available	available	
	residual gridded			available	available	available	available	
troposphere	global			in preparation				
	regional		in preparation	available		available	available	
	residual gridded			available	available	available	available	
complete SSR model		No	no	yes	yes	yes	yes	no

Abb. 8: Status SSR-Formate (Auswahl, Stand Juni 2023)

5 Rover-Anwendung

Die SSR-Technologie kann grundsätzlich mit bestehenden Rover-Anwendungen genutzt werden. Konventionelle GNSS-Positionierung wird durch eine SSR2OSR-Konvertierung auf der Server- oder der Rover-Seite unterstützt. Die Rover-Anwendung muss als Voraussetzung auf nicht-physikalische GNSS-Daten eingestellt sein. Dies ist aber bereits für virtuelle Referenzstationskorrekturen der Fall. Die optimale SSR-Nutzung wird erreicht, wenn SSR-Korrekturen direkt in einem SSR-Rover genutzt werden. In Abb. 9 sind die unterschiedlichen Anwendungen inklusive der OSR-Anwendung dargestellt.

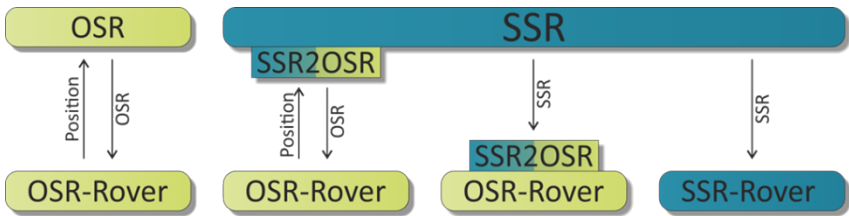


Abb. 9: Unterschiedliche Anwendung von SSR-Korrekturen für Rover-Systeme

Die SSM wendet vorab Korrekturen auf die GNSS-Beobachtungen an, wodurch die erzeugten SSR-Korrekturen zunächst frei von diesen Einflüssen sind. Bei der SSR2OSR-Generierung oder der direkten Anwendung von SSR in einen SSR-Rover sind folgende Korrekturen zu berücksichtigen:

- *Phase-Windup* des Satelliten
- (absolute) Antennenkorrektur der Satellitenantenne
- Stationseffekte (*Site Displacements*), wie Erdgezeiten, Polgezeiten, Auflasteffekte der Ozeane und der Atmosphäre, lokale Verschiebungen
- relativistische Korrekturen
- ionosphärische Korrekturen höherer Ordnung
- absolute Antennenkorrektur der Empfangsantenne

Die Ausdehnung des Netzwerks bestimmt die Bedeutung der Korrekturen und damit die Qualität der Zustandsraummodellierung. In kleineren Netzwerken können einige Korrekturen vernachlässigt werden. Ein SSR-Korrekturdatendienst definiert die angebrachten Korrekturen entweder als externe Information oder als Metadaten-Information im Datenstrom selbst.

Ein Rover muss für seine Genauigkeitsanforderung die entsprechenden Korrekturen in seiner Anwendung bzw. an seiner SSR-Position anbringen. Die SSR-Korrekturen selbst werden im Allgemeinen im GNSS-Koordinatensystem, und hier im Datum der präzisen Ephemeriden (*International Terrestrial Reference*

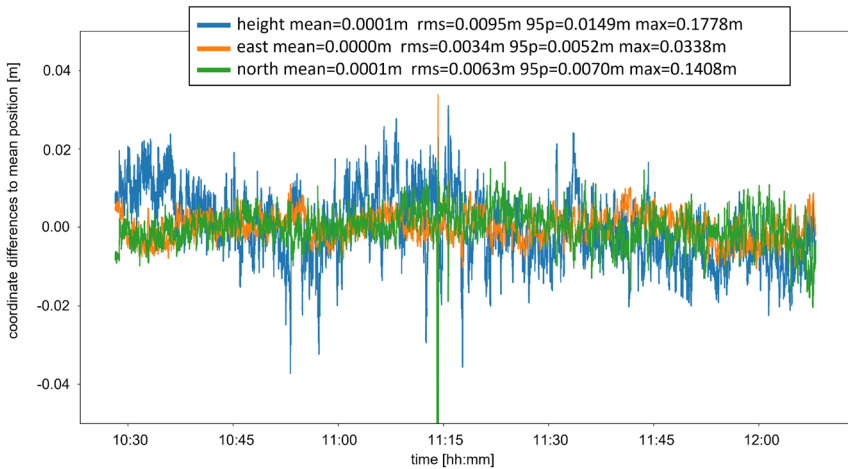


Abb. 10: Positionierung mit SSRZ-Korrekturen eines Septentrio Mosaic-X5 Rover: Koordinatendifferenzen zum Mittelwert und Statistik über zwei Stunden

Frame, ITRF), bestimmt. Eine Koordinatentransformation in das Nutzer-Datum ist daher notwendig. Diese kann bereits bei einer SSR2OSR-Konvertierung vorgenommen werden oder vom SSR-Rover selber.

In Abb. 10 ist ein aktuelles Beispiel einer zweistündigen Positionierung mit SSRZ-Korrekturdaten und einem Septentrio-Rover gezeigt. Die SSR-Korrekturen (30/5 s, vgl. Abb. 5) wurden in OSR-Korrekturen konvertiert und im RTCM-MSM-Format (*Multiple Signal Messages*) an dem Empfänger gesendet. Die Koordinatendifferenzen zum Mittelwert der Lösungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten sind in Nord-, Ost- und Höhenkomponente dargestellt. Das RMS der Koordinatenkomponenten liegt unter 1 cm. Die 95 % Perzentilen sind für die Lagekomponenten ebenfalls unter 1 cm und für die Höhe unter 2 cm.

6 Terminologie der GNSS-Anwendungen

Wie auch in diesem Beitrag, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Begriffe und Abkürzungen für GNSS-Anwendungen und Korrekturdienste, die den eigentlichen Dienst, seine Qualität und die mögliche Positionierungsgenauigkeit nicht genau definieren.

Erfahrungen zeigen, dass der gleiche Begriff für unterschiedliche Anwendungen verwendet wird und daher in der gängigen Praxis zu Missverständnissen führt. Insbesondere der Begriff PPP hat eine sehr weit gefasste Bedeutung, die von der theoretischen Einfrequenz-Anwendung mit Korrekturen von *Satellite*

Based Augmentation Systems (SBAS), über die klassische Verwendung von Produkten des *International GNSS Service* (IGS) mit ionosphärisch freier Linearkombination aus zwei Frequenzen, zusätzlicher Schätzung der Troposphäre, bis hin zur Mehrfrequenzanwendung mit Mehrdeutigkeitslösungen reicht. Werden alle GNSS-Fehlerkomponenten bereitgestellt und RTK-Leistungsqualitäten ermöglicht, wird dies als PPP-RTK bezeichnet.

Ein anderer Ansatz zur Qualifizierung eines GNSS-Korrekturdienstes besteht darin, die Anforderungen aus Nutzersicht mit einem Mindestsatz universell gültiger Parameter zu spezifizieren. Ein solcher Satz kann aus vier wesentlichen Parametern bestehen:

- Konzept (OSR, SSR)
- Genauigkeit (Klassen, z. B. halbe Meter, Dezimeter, Zentimeter, Millimeter)
- Konvergenzzeit (Klassen, z. B. Viertelstunden, Minuten, Sekunden)
- Einzel-/Mehrfrequenz (einzelne Frequenz, zwei oder mehr Frequenzen)

Dies stellt die wesentlichen Kenngrößen eines GNSS-Korrekturdatendienstes und eine Entscheidungshilfe für Anwender dar.

7 Zusammenfassung

Die SSR-Technologie gilt allgemein als der vielseitigste Ansatz für GNSS-Korrekturen in Echtzeit. Sie wird in zahlreichen kommerziellen und wissenschaftlichen PPP- und PPP-RTK-Diensten verschiedenster Dienstleister eingesetzt. Der Hauptvorteil gegenüber OSR-Techniken ist die intrinsische Unterstützung von Broadcast-Anwendungen, die Korrekturen für eine unbegrenzte Anzahl von Nutzern liefert. Darüber hinaus ermöglicht es SSR, den Fokus von Korrekturdiensten auf verschiedene Qualitätsaspekte, beispielsweise Genauigkeit, Konvergenzzeit, Abdeckungsbereich, unterstützte Signale, Integrität oder Bandbreitenverbrauch, zu legen.

Bislang gibt es kein international standardisiertes SSR-Datenformat, das flexibel genug ist, um den Anforderungen dieser verschiedenen Dienste gerecht zu werden. Im RTCM wird auf eine SSR-Standardisierung für RTK-Anwendungen hingearbeitet. Trotzdem werden aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der SSR-Formate auch weiterhin andere, offene SSR-Formate verwendet werden. Anzustreben bleibt, dass unterschiedliche Rover mit unterschiedlichen SSR-Formaten arbeiten können.

Für Rover selber ergibt sich ein Paradigmenwechsel, wenn die SSR-Korrekturen direkt verwendet werden: es ist keine Umrechnung in OSR notwendig und es wird eine genaue Positionierung mit den eigenen, um die SSR-Parameter korrigierte GNSS-Beobachtungsdaten erfolgen.

Literatur

- Caissy, M., Agrotis, L., Weber, G., Hernandez-Pajares, M., Hugentobler, U. (2012): The International GNSS Real-Time Service. GPS World. Innovation: Coming Soon. www.gpsworld.com/gnss-systemaugmentation-assistanceinnovation-coming-soon-13044/, letzter Zugriff 22.06.2023.
- Fernandez-Hernandez, I., Chamorro-Moreno, A., Cancela-Diaz, S., Calle-Calle, J. D., Zoccarato, P., Blonski, D., Senni, T., de Blas, F. J., Hernández, C., Simón, J., Mozo, A. (2022): Galileo high accuracy service: initial definition and performance. GPS Solutions 26:65. DOI: 10.1007/s10291-022-01247-x.
- Geo++ (2022): State Space Representation Format (SSRZ) – Geo++[®] SSRZ. Version 1.1.2. www.geopp.de/pdf/gpp_ssrz_v1_1_2.pdf, letzter Zugriff 22.06.2023.
- Liu, Q., Hernández-Pajares, M., Yang, H., Monte-Moreno, E., Roma-Dollase, D., García-Rigo, A., Li, Z., Wang, N., Laurichesse, D., Blot, A., Zhao, Q., Zhang, Q., Hauschild, A., Agrotis, L., Schmitz, M., Wübbena, G., Stürze, A., Krankowski, A., Schaer, S., Feltens, J., Komjathy, A., Ghoddousi-Fard, R. (2021): The cooperative IGS RT-GIMs: a global and accurate estimation of the ionospheric electron content distribution in real-time. Earth Syst. Sci. Data Discuss. DOI: 10.5194/essd-2021-136.
- Romero, I. (Ed.) (2021): The Receiver Independent EXchange Format version 4.04. IGS/RTCM RINEX Working Group, 1 December 2021.
- RTCM (2016): RTCM 10403.3, Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3. RTCM, 2016.
- Wübbena, G., Perschke, C., Wübbena, J., Wübbena, T., Schmitz, M. (2020): GNSS SSR Real-Time Corrections: The Geo++[®] SSRZ Format and Applications. ION GNSS++ Virtual, September 21–25, 2020.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A. (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. ION GNSS 2005, September 13–16, Long Beach, California.
- Wübbena, G., Wübbena, J., Wübbena, T., Perschke, C., Schmitz, M. (2022): Comparison of different ionosphere and troposphere models in open SSR correction formats in terms of accuracy, complexity, and bandwidth. 2nd Symposium of IAG Commission 4 “Positioning and Applications”, Potsdam, Germany, 5–8 Sep 2022. DOI: 10.5194/iag-comm4-2022-15.
- Zumbege, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., Webb, F. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal Geophysical Research, 102, B3.

Kontakt

Dr. Christopher Perschke
 Geo++ GmbH
 Steinriede 8, 30827 Garbsen
christopher.perschke@geopp.de

Dr.-Ing. Gerhard Wübbena | Dr. Jannes Wübbena | Dr. Temmo Wübbena |
 Dr.-Ing. Martin Schmitz
 Geo++ GmbH
 Steinriede 8, 30827 Garbsen

Ein neuer amtlicher PPP-RTK-Positionierungsdienst für Deutschland

Markus Vennebusch | Lena Albert | Martin Freitag | Andreas Gerschwitz |
Thomas Goetze | Hans-Jürgen Goldan | Ilka von Gösseln | Franziska Hartmann |
Cord-Hinrich Jahn | Mathias Meißies | Rebecca Reiling | Jens Riecken |
Franziska Riedel | Axel Rülke | Volker Schneider | Jürgen Siebert |
Timon Stockhaus | Vitaly Winter

1 Einleitung

Aktuelle Entwicklungen in der GNSS-Branche gehen hin zu immer höheren Genauigkeiten in Kombination mit preiswerten Empfängern und zu immer mehr Anwendern, wie die Beispiele autonomes Fahren und Fußgängernavigation zeigen. Verschiedene Markt-Berichte (siehe z. B. EUSPA-Bericht 2019) prognostizieren einen rasanten Anstieg der Nutzerzahlen und auch die Entwicklungen der Empfänger-Hersteller bestätigen diesen Trend (Schrock 2023). Die heute gebräuchlichen Techniken zum Erreichen einer hohen Positionsgenauigkeit sind zum Beispiel wegen der Notwendigkeit einer bidirektionalen Verbindung zwischen Dienst-Betreiber und Nutzer für diese neuen Anwendungen nicht unbedingt geeignet. Daher gehen aktuell die meisten Entwicklungen in die Richtung PPP-RTK, also eine Kombination der mittlerweile etablierten Verfahren PPP (Precise Point Positioning) und Netzwerk-Real Time Kinematic (RTK).

In einer zweijährigen Machbarkeitsstudie entwickeln die Zentrale Stelle SAPOS® (ZSS) und das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) unter dem Dach der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV, Freitag 2022) aktuell einen neuen amtlichen PPP-RTK-Dienst. Dieser Dienst soll ab 2025 operationell zur Verfügung stehen.

Dieser Beitrag beschreibt bisherige Aktivitäten, den aktuellen Stand (im Juni 2023) und die zukünftigen Entwicklungen des neuen PPP-RTK-Dienstes. Weitere Details zu PPP-RTK sind der Literatur (z. B. Teunissen und Montenbruck 2017) oder den vorherigen Beiträgen dieser Tagungsband-Reihe zu entnehmen.

2 Satellitenpositionierungsdienste unter der Dachmarke SAPOS-DE

2.1 Aktuelle SAPOS®-Dienste (und ihre Grenzen)

Der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS® ist seit über 20 Jahren im amtlichen Vermessungswesen etabliert und wird bundesweit in Spitzenzeiten täglich von tausenden Kunden u. a. für Katastervermessungen, GIS-Datenerfassung oder zur Baumaschinensteuerung genutzt. Seit einigen Jahren sind es vor allem Anwender in der Landwirtschaft, die SAPOS® nutzen, um beispielsweise ihre Fahrzeuge zentimeter-genau fahren zu lassen.

SAPOS® als Gemeinschaftsprojekt der AdV basiert auf einem Referenzstationsnetz von rund 270 Referenzstationen. Viele Bundesländer bieten ihren SAPOS®-Dienst bereits kostenfrei an; bundesweite Nutzer verwenden den Zugang über die ZSS entsprechend der AdV-Gebührenrichtlinie. Für die individuellen Anforderungen an Genauigkeit und die verschiedenen Anwendungsgebiete stellt SAPOS® aktuell drei Dienste bereit (siehe Tab. 1).

Tab. 1: SAPOS®-Dienste und ihre Genauigkeiten

Bezeichnung		Nominelle Genauigkeiten
SAPOS®-HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service	Lagegenauigkeit 1–2 cm Höhen Genauigkeit 2–3 cm
SAPOS®-EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service	Lagegenauigkeit 0,3–0,8 m Höhen Genauigkeit 0,5–1,5 m
SAPOS®-GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungs-Service	Lagegenauigkeit 1 cm Höhen Genauigkeit 1–2 cm

Der aktuell am häufigsten verwendete SAPOS®-Dienst ist der „Hochpräzise Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS)“ mit einer Lagegenauigkeit von 1 bis 2 cm. Weitere Details zu SAPOS® sind der jeweiligen aktuellen Produktinformation zu entnehmen (SAPOS®-Produktdefinition 2022).

Die derzeitigen SAPOS®-Dienste basieren auf dem bewährten Verfahren der differenziellen GNSS-Positionierung, also der Differenzbildung zwischen Beobachtungen des Rovers und von (in der Regel virtuellen) Referenzstationen. Dazu werden Fehlerkorrekturen für die jeweilige Referenzstation bestimmt und am Rover weiterverarbeitet. Diese Korrekturen beinhalten die Summe der Fehlereinflüsse (wie z. B. der Satellitenbahnen und -uhren, diverse Laufzeitverzögerungen/Biases in der Satelliten-Hardware und aufgrund von atmosphärischen Effekten), die auf dem gesamten Weg auf das GNSS-Signal einwirken. Dieser

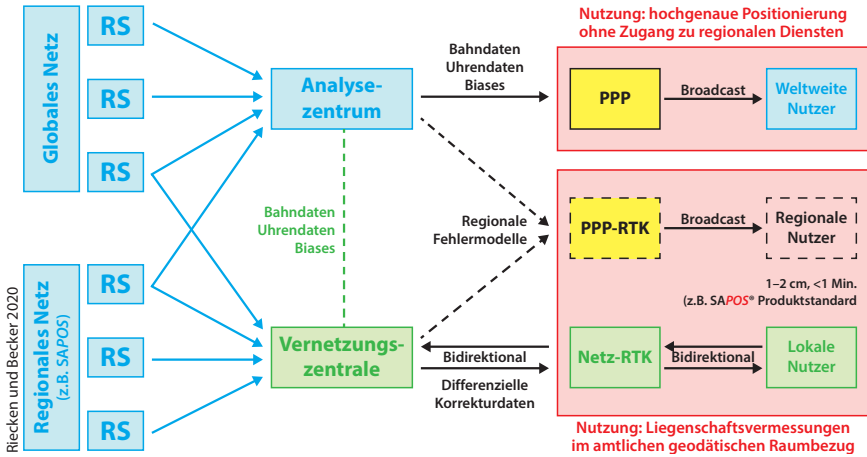


Abb. 1: Einordnung des neuen PPP-RTK-Dienstes in die Struktur vorhandener Positionierungsverfahren (RS: GNSS-Referenzstation, beinhaltet GREF- und SAPOS-Stationen)

Ansatz wird als Modellierung im Beobachtungsraum (engl.: Observation Space Representation, OSR) bezeichnet.

Dem gegenüber steht der Ansatz der Modellierung im Zustandsraum (engl.: State Space Representation, SSR), in dem die einzelnen Fehlereinflüsse individuell bestimmt werden (Wübbena et al. 2005). Die Verwendung von globalen Referenzstationsnetzen erlaubt dabei die Bestimmung von Satellitenbahnen und -Uhren, während regionale und lokale Referenzstationsnetze mit geringen Stationsabständen für die Bestimmung der kleinräumigeren atmosphärischen Effekte genutzt werden (siehe Abb. 1). Die Kombination beider Ansätze ermöglicht – unter Verwendung von Code- und Phasenbeobachtungen – eine absolute Positionierung auf dem Genauigkeitsniveau von Netzwerk-RTK (Teunissen und Montenbruck 2017). Die SSR-Technik kommt bei der Positionierung mit PPP-RTK zum Einsatz, weshalb auch bei diesem Ansatz ein dichtes Netz von Referenzstationen für eine optimale Bestimmung der regionalen Fehlereinflüsse benötigt wird.

Die Korrekturdaten können über verschiedene Übertragungsmedien an die Rover der Nutzer übertragen werden. Ein dabei bisher begrenzender Faktor im Betrieb von SAPOS® ist die Notwendigkeit einer bidirektionalen Verbindung zwischen der Vernetzungszentrale und den Nutzern im Feld. Hinzu kommt die dazu notwendige Kommunikation, die meist über Mobilfunk erfolgt und nicht immer flächendeckend gegeben ist. Außerdem müssen auf Seite des Dienst-Betreibers für jeden aktuell ausgewählten Nutzer Rechenprozesse gestartet werden, um individuelle Korrekturdaten (i. d. R. in Form von Daten einer virtuellen Referenzstation) zu berechnen. IT-Ressourcen müssen eine entsprechende

Skalierbarkeit aufweisen, um auch saisonale Variationen, insbesondere durch Nutzer aus der Landwirtschaft, verarbeiten zu können.

Damit diese großen Nutzerzahlen bedient werden können und die von der AdV angebotenen Dienste auch weiterhin konkurrenzfähig bleiben, wurde schon vor Jahren darauf hingewiesen, dass neue Wege beschritten werden müssen (Jahn et al. 2017). Das Ziel dabei ist die Unabhängigkeit des Dienstes von der Nutzerzahl unter Beibehaltung der SAPOS®-HEPS-Qualität.

2.2 Gemeinsamer Satellitenpositionierungsdienst der Länder und des Bundes

Im Jahr 2019 wurde durch die AdV die stufenweise Erweiterung des SAPOS®-Produktportfolios um einen Broadcast-SSR-Dienst beschlossen. 2020 wurde darauf aufbauend der Arbeitskreis Raumbezug mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie und eines Umsetzungskonzepts für einen neuen PPP-RTK-Dienst als gemeinsame Länder-Bund-Entwicklung beauftragt. Auch in der Bundesverwaltung wurde der Bedarf nach präziser Satellitenpositionierung erkannt.

Der neue Dienst setzt sich aus einer „Länder-Instanz“ bei der ZSS und einer „Bundes-Instanz“ beim BKG zusammen: Es ist vorgesehen, dass die jeweiligen Instanzen bestimmte Nutzergruppen bedienen. Beide Instanzen sollen sich redundant ergänzen und somit die Ausfallsicherheit des gemeinsamen Dienstes sicherstellen (Riecken und Becker 2020). Zukünftig werden der neue PPP-RTK-Dienst und sämtliche SAPOS®-Dienste unter der gemeinsamen Dachmarke SAPOS-DE firmieren.

3 PPP-RTK-Machbarkeitsstudie der AdV

3.1 Motivation und Ziele

Im Rahmen einer zweijährigen Machbarkeitsstudie der AdV soll untersucht werden, ob mit diesem neuen PPP-RTK-Dienst eine vergleichbare Qualität wie SAPOS®-HEPS erreicht werden kann. Die wesentlichen Ziele der Machbarkeitsstudie sind:

- Einsatz der Vernetzungssoftware GNSMART und des Formats SSRZ der Firma Geo++ GmbH, unter Verwendung des vorhandenen SAPOS®- und GREF-Referenzstationsnetzes (GREF: Integriertes Geodätisches Referenznetz Deutschland)
- Vergleich von Genauigkeiten (Präzision und Richtigkeit) und Initialisierungszeiten des neuen Dienstes mit SAPOS®-HEPS

- prototypischer Aufbau und Betrieb eines PPP-RTK-Korrekturdatendienstes
- Abgabe eines Korrekturdatenstroms (mangels fehlender RTCM-Standardisierungen zunächst in den Formaten SSRZ und SPARTN, siehe (SSRZ 2023) und (SPARTN 2023)), sowie Bereitstellung über einen Ntrip-Caster (Weber und Dettmering 2005)
- Analyse von verschiedenen Übertragungsmedien (zunächst vor allem Ntrip und DAB+)
- Aufbau eines Netzes von Monitoring-Stationen und Auswertung von stationären und kinematischen Test-Messungen

Zusätzlich zur Machbarkeitsstudie entsteht ein Umsetzungskonzept, in dem der gemeinsame Dienstbetrieb der beiden Instanzen und die stufenweise Einführung des neuen Broadcast-Dienstes sowie die weitere Ausgestaltung nationaler, amtlicher Satellitenpositionierungsdienste dargestellt werden. Die AdV wird sich im Rahmen der Einführung und des Übergangs in die Betriebsphase des neuen Dienstes auch mit der zukünftigen Ausrichtung der bestehenden SAPOS®-Dienste befassen müssen.

3.2 Organisation der Machbarkeitsstudie

Die Umsetzung der oben genannten Beschlüsse erfolgt im Wesentlichen durch den Arbeitskreis Raumbezug (AK RB) und dessen Projektgruppe PPP (PG PPP). Innerhalb der Projektgruppe PPP werden einzelne Aufgaben in Unterprojektgruppen (UPG) bearbeitet (siehe [Abb. 2](#)). Die Unterprojektgruppe PPP-RTK ist aktuell mit Personen der Bundesländer, der Zentralen Stelle SAPOS® (ZSS) und des BKG besetzt. Die Koordination erfolgt über eine Steuerungsgruppe, die aus Mitgliedern des Lenkungsausschuss Geobasis (LA Geobasis), des AK RB, der ZSS und des BKG besteht.

3.3 Vorarbeiten und verwandte Projekte

Bereits in den letzten Jahren wurden innerhalb der AdV anhand unterschiedlicher Projekte Erfahrungen mit dem Aufbau und der Nutzung von PPP-RTK-Diensten gewonnen. Im Folgenden wird eine Auswahl von abgeschlossenen und aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten (in zeitlicher Reihenfolge) aufgeführt:

- **SSR-Testbed der AdV:**

Von 2017 bis 2022 hat die Projektgruppe PPP des Arbeitskreises Raumbezug der AdV in Kooperation mit der Geo++ GmbH ein SSR-Testbed betrieben,

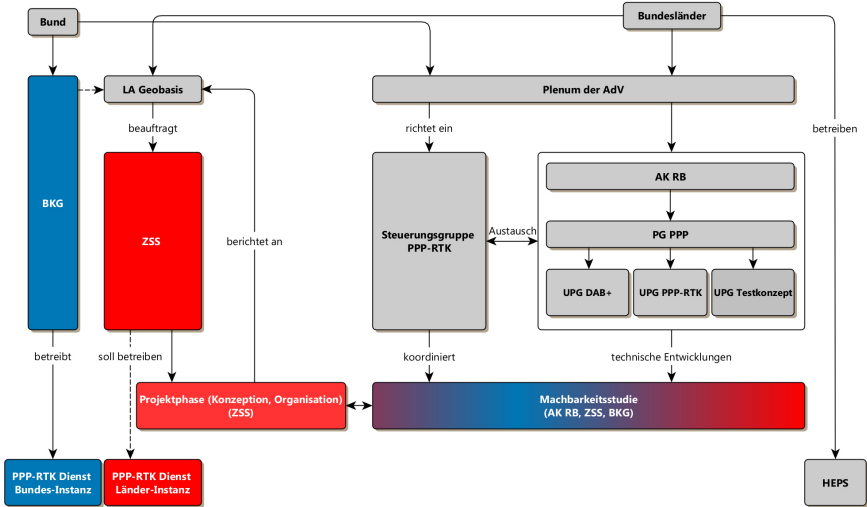


Abb. 2: Organisation und Teilnehmer der PPP-RTK-Machbarkeitsstudie

um verschiedene Projekte zur Entwicklung von Hard- und Software-Lösungen für PPP-RTK-Anwendungen zu unterstützen. So wurden z. B. das SciPP-Per-Forschungsprojekt und das ESA NAVISP Projekt SSRoverDAB+ (s. u.) mit SSR-Korrekturdaten aus dem SSR-Testbed der AdV unterstützt. Das SSR-Testbed bestand aus verschiedenen regionalen SSR-Vernetzungen, z. B. der Bayernvernetzung des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, der Mosel-Main-Vernetzung des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen und der Spree-Oder-Wasserstraßen (SOW)-Vernetzung des Landesbetriebs Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg.

■ **Nordsee-Vernetzung:**

In den Jahren 2020 bis 2022 wurde im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes in Kooperation der ZSS mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Geo++ GmbH das PPP-RTK-Verfahren in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee (AWZ) erprobt. Dabei konnte die grundsätzliche Eignung des Verfahrens PPP-RTK für die Positionierung im Genauigkeitsbereich von wenigen Zentimetern in der Nordsee nachgewiesen werden (Jahn et al. 2021 2022).

■ **Projekt „DigitalSOW“:**

Von 2021 bis Ende 2023 werden im Projekt „DigitalSOW – Digitales Testfeld für automatisierte und autonome Binnenschifffahrt auf der Spree-Oder-Wasserstraße“ Konzepte, Algorithmen und Technologien für das automatisierte und vernetzte Fahren auf Flüssen entwickelt (DigitalSOW 2023).

- **Projekt „SSRoverDAB+“:**
 Das Ziel des im Rahmen des ESA-NAVISP-Programms geförderten Projektes „SSRoverDAB+“ ist die Verbreitung von Korrekturdaten zur zentimetergenauen Positionierung über einen Datenkanal des Digitalradios DAB+. Projektbeteiligte sind u. a. die Alberding GmbH, Geo++ GmbH und als assoziierte Partner das Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV), sowie das BKG. Es wurde bereits praktisch gezeigt, dass mit diesem Dienst Landmaschinen zentimetergenau autonom geführt werden können (SSRoverDAB 2023).
- **Unterprojektgruppe „DAB+“ der Projektgruppe PPP:**
 Die Unterprojektgruppe „DAB+“ hat deutschlandweite Empfangstests durchgeführt und dabei die generelle Eignung des ersten DAB+-Bundesmux (Kanal 5C) als Übertragungskanal für den zukünftigen PPP-RTK-Dienst nachgewiesen. Besonders in ländlichen Gebieten und Gebirgsregionen verspricht DAB+ einen deutlichen Mehrwert gegenüber Mobilfunk-Empfang.

3.4 Aktueller Stand der Machbarkeitsstudie

Im Juni 2023 befindet sich sowohl die Länder- als auch die Bundesinstanz in der Aufbauphase. Die Vernetzung basiert im Wesentlichen auf SAPOS®- und GREF-Stationen aus Deutschland und dem angrenzenden Ausland (siehe Abb. 3). In beiden Instanzen ist die Software GNSMART der Firma Geo++ GmbH installiert. Die Software GNSMART wird aktuell für einen performanten Betrieb auf dedizierten Servern gehostet. Die Referenzstationen wurden in Teilnetze aufgeteilt, um die Rechenlast gleichmäßig zu verteilen. Dabei unterscheiden sich beide Instanzen in Anzahl und Auswahl der Referenzstationen. Derzeit stehen für die Teilnetze SSRZ-Korrekturdatenströme zur

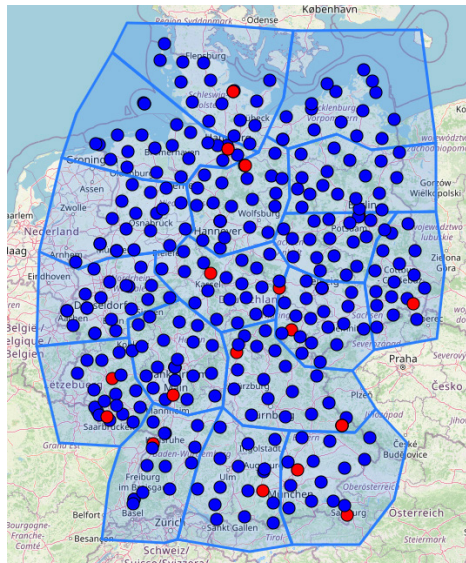


Abb. 3: Stations- und Teilnetzübersicht der Länder-Instanz. Blaue Kreise: Referenzstationen, rote Kreise: Monitorstationen, Stand: Juni 2023

Verfügung. Die kombinierten deutschlandweiten Lösungen befinden sich noch im Aufbau. Auf Anfrage können alle Datenströme für Testzwecke bereitgestellt werden.

Zur Sicherung der Qualität des Dienstes wird derzeit ein Testkonzept entwickelt. Mit Hilfe bundesweit verteilter Monitoringstationen der Bundesländer und des BKG sollen in definierten Testszenarien die Präzision und Richtigkeit der Koordinatenlösungen sowie die Initialisierungszeiten überwacht werden. Bei der Auswahl der Monitoring-Stationen wird u. a. auf eine homogene Verteilung im Bundesgebiet, auf unterschiedliche Abstände zur nächsten Referenzstation sowie auf unterschiedliche Hardwarekonfigurationen geachtet (Abb. 3). Dieses Monitoring-Netz soll in der Aufbauphase wichtige Erkenntnisse für eine optimale Konfiguration des Gesamtsystems liefern und später im Betrieb zur permanenten Qualitätssicherung dienen.

Da momentan die meisten handelsüblichen GNSS-Empfänger den PPP-RTK-Ansatz nativ noch nicht unterstützen, sind Umwandlungen von (in diesem Fall SSRZ-) Korrekturdatenströmen in klassische RTCM3-Beobachtungsdaten nötig. Im Rahmen dieser Studie erfolgt die Umwandlung mit der Geo+++-Software SSR2OBS. Im Empfänger kann anschließend eine relative Punktbestimmung mit den vorhandenen internen Algorithmen durchgeführt werden.

4 Erste Ergebnisse

Die beiden Instanzen des neuen PPP-RTK-Dienstes der AdV sind bereits prototypisch aufgebaut. Jedoch stand im Juni 2023 der deutschlandweite Datenstrom, der für flächendeckende Tests und in der späteren Betriebsphase ausgegeben werden soll, noch nicht zur Verfügung. Die folgenden Tests sind daher nur in dem Teilnetz Hannover durchgeführt worden, liefern jedoch schon annähernd die gewünschte SAPOS®-HEPS-Qualität: So zeigt beispielsweise Abb. 4 die Koordinatenreihe der Monitoringstation HAN3 (auf dem LGLN-Gebäude in Hannover, mit einem Septentrio AsterRx SB PRO-Empfänger und SSR2OBS auf einem separaten PC) über einen Zeitraum von 24 Stunden im Mittel Positions-Abweichungen von etwa 1 cm gegenüber der bekannten Soll-Position. Die Standardabweichung liegt mit 2 bis 5 cm für die Lage und etwa 7 cm für die Höhe ebenfalls schon fast im gewünschten Bereich. Der Fix-Status 4 (gelöste Mehrdeutigkeiten) wurde in fast allen Epochen erreicht. Die übrigen Epochen verursachen die größeren Abweichungen (von bis zu ± 25 cm), die in den Plots nicht mehr dargestellt sind.

Neben ersten Untersuchungen mit den SSRZ-Datenströmen wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Jade-Hochschule Oldenburg am LGLN

Messungen mit einem u-blox F9P-Modul durchgeführt (Stockhaus 2023). Dazu wurde für das Teilnetz Hannover ein Datenstrom im SPARTN-Format aufgesetzt, der direkt vom Empfängermodul weiterverarbeitet werden konnte. Die

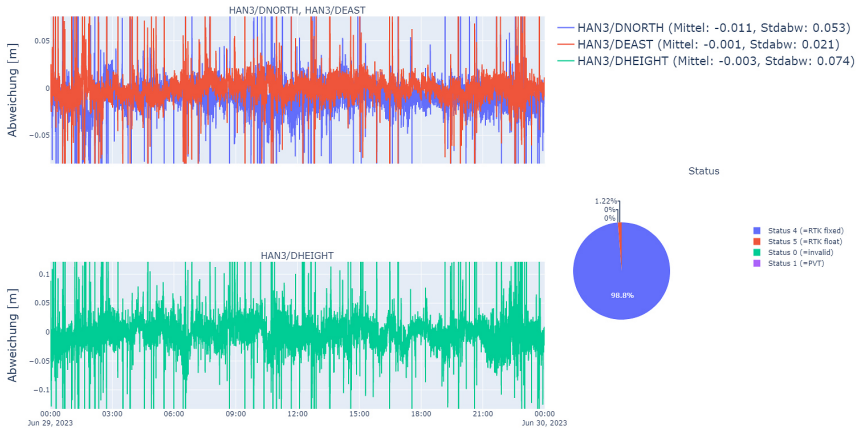


Abb. 4: Beispiel-Ergebnisse für Monitor-Station HAN3

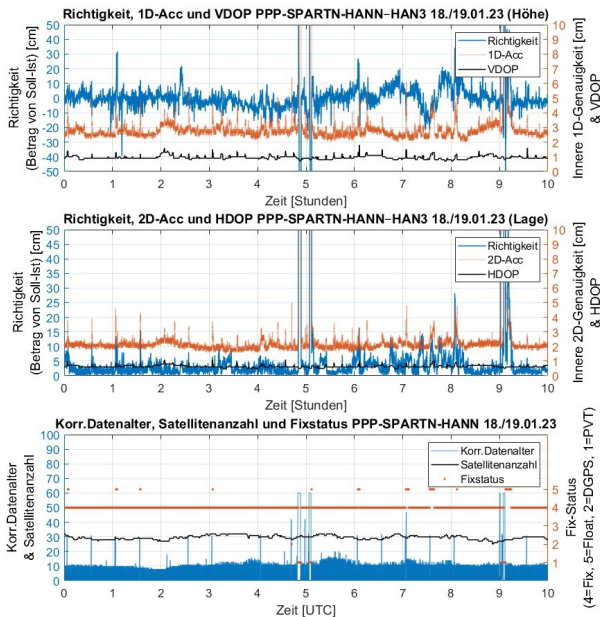


Abb. 5: Ergebnisse einer Messung mit u-blox F9P-Modul

Ergebnisse (siehe Abb. 5) zeigen mittlere Lage-Genauigkeiten von etwa 10 cm bzw. 10 bis 20 cm für die Höhe, die sehr wahrscheinlich dadurch begründet sind, dass sowohl Empfänger als auch das SPARTN-Format (im Gegensatz zum SSRZ-Format) nicht für höchste Genauigkeiten ausgelegt sind.

5 Fazit & Ausblick

Die beiden Instanzen des neuen PPP-RTK-Dienstes der AdV liefern schon annähernd die gewünschte SAPOS®-HEPS-Qualität. Aktuell konzentrieren sich die Arbeiten auf die Optimierung der Software-Konfiguration und auf das Monitoring, aber auch auf die Konzeption des zukünftigen Dienstes. Umfangreiche Untersuchungen zur Qualität und Zuverlässigkeit des Dienstes haben begonnen und werden in der Machbarkeitsstudie zusammengefasst.

Sobald es Fortschritte in Format-Standardisierung (z. B. RTCM-SSR) und nativer PPP-RTK-Unterstützung durch die Empfänger-Hersteller gibt, werden weitere Korrekturdatenstrom-Formate ergänzt und Untersuchungen ausgeweitet. In diesem Zusammenhang werden auch die Möglichkeiten von weiteren Übertragungsmedien (wie z. B. Mobilfunk-Technologien) untersucht.

Im Endzustand wird der neue PPP-RTK-Dienst für die Nutzer bundesweit einheitlich und mit marktüblichen GNSS-Empfängern der neuesten Generation zu verwenden sein. Vor allem werden die Nutzer von einem präzisen und zuverlässigen Dienst mit amtlicher Qualität profitieren. Auch für die AdV ergeben sich Chancen und Vorteile. Mit der Beteiligung an modernen Entwicklungen ergibt sich neben dem Wissensaufbau die Möglichkeit der Mitgestaltung und Positionierung auch im Massenmarkt. Durch den zentralen Betrieb des neuen Dienstes bei der ZSS können darüber hinaus in einer finalen Ausbaustufe Ressourcen und somit Kosten bei den Bundesländern eingespart werden.

Literatur

DigitalSOW (2023): www.digitalsow.de, letzter Zugriff 06/2023.

EUSPA (2019): PPP-RTK market and technology report. www.euspa.europa.eu/sites/default/files/calls_for_proposals/rd.03_-_ppp-rtk_market_and_technology_report.pdf, letzter Zugriff 06/2023.

Freitag, M. (2022): PPP-RTK-Dienst der AdV – Jetzt wird es Ernst. Intergeo 2022, Positionale I – GNSS in Practice, 18.10.2022, Essen.

Jahn, C.-H., Riecken, J., Trautvetter, C., Freitag, M., Kurtenbach, E., Fabian, G., Dick, H.-G. (2017): Quo vadis SAPOS? – Zukünftige Entwicklungen des Positionierungsdienstes der Landesvermessung. In: DVW e.V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Augsburg, 133–150. <https://geodaesie.info/dvw-schriftenreihe/schriftenreihe-archiv/schriftenreihe-band-87>.

- Jahn, C.-H., Schumann, R., Vahrenkamp, B., Westfeld, P., Wübbena, G., Schmitz, M., Walat, C. (2021): SSR-RTK – Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee: Nordsee-Vernetzung. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2021. 146. Jg., 126–130. DOI: [10.12902/zfv-0342-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0342-2021).
- Jahn, C.-H., Schumann, R., Vahrenkamp, B., Westfeld, P., Wübbena, G., Schmitz, M., Walat, C. (2022): Development and realisation of a real-time high precision positioning SSR-RTK service for the north sea exclusive economic zone. The international hydrographic review, November 2022. DOI: [10.58440/ihr-28-a16](https://doi.org/10.58440/ihr-28-a16).
- Riecken, J., Becker, P. (2020): Ein neuer Satellitenpositionierungsdienst für Deutschland. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2020. 145. Jg., 241–245. DOI: [10.12902/zfv-0304-2020](https://doi.org/10.12902/zfv-0304-2020).
- SAPOS-Produktdefinition (2022): www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/SAPOS/.
- Schrock, G. (2023): www.gpsworld.com/corrections-services-abound, letzter Zugriff 06/2023.
- SPARTN (2023): www.spartnformat.org, letzter Zugriff 06/2023.
- SSRoverDAB (2023): www.ssroverdab.eu, letzter Zugriff 06/2023.
- SSRZ (2023): www.geopp.de/ssrz, letzter Zugriff 06/2023.
- Stockhaus, T. (2023): Analyse der Möglichkeiten und Grenzen eines zukünftigen Precise-Point-Positioning-Real-Time-Kinematic Dienstes als Bestandteil von SAPOS. Bachelorarbeit, Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth (unveröffentlicht).
- Teunissen, P., Montenbruck, O. (2017): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, Kapitel 21.
- Weber, G., Dettmering, D. (2005): Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications. Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, September 2005, 2243–2247.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A. (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, September 2005, 2584–2594.

Kontakt

Lena Albert | Hans-Jürgen Goldan | Ilka von Gösseln | Franziska Hartmann |
Cord-Hinrich Jahn | Timon Stockhaus | Markus Vennebusch
Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen,
Landesvermessung Geobasisinformation
Podbielskistraße 331, 30659 Hannover
markus.vennebusch@lgl.niedersachsen.de

Martin Freitag
Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Alexandrastraße 4, 80538 München
martin.freitag@ldbv.bayern.de

Vennebusch et al.: Ein neuer amtlicher PPP-RTK-Positionierungsdienst für Deutschland

Mathias Meißies

LGB – Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg

Heinrich-Mann-Allee 104 B, 14473 Potsdam

mathias.meissies@geobasis-bb.de

Rebecca Reiling

Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg

Kriegsstraße 103, 76135 Karlsruhe

rebecca.reiling@lgl.bwl.de

Thomas Goetze | Franziska Riedel | Axel Rülke

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – Referat G2 – Satellitennavigation

Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main

thomas.goetze@bkg.bund.de

Andreas Gerschwitz

Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein

Mercatorstraße 1, 24107 Kiel

andreas.gerschwitz@lvermgeo.landsh.de

Jens Riecken | Vitaly Winter

Bezirksregierung Köln, Geobasis.NRW

Muffendorfer Straße 19–21, 53177 Bonn

jens.riecken@bezreg-koeln.nrw.de | vitaly.winter@bezreg-koeln.nrw.de

Volker Schneider

Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz

Von-Kuhl-Straße 49, 56070 Koblenz

volker.schneider@vermkv.rlp.de

Jürgen Siebert

SenSBW Berlin, Abteilung III, Geoinformation

Fehrbelliner Platz 1, 10707 Berlin

juergen.siebert@senstadt.berlin.de

RTK Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee (AWZ)

Bernd Vahrenkamp

Präambel

Das vorliegende Abstract basiert auf dem Fachzeitschriftenartikel, der im Original im November 2022 im „The International Hydrographic Review (IHR)“ erschienen ist: Jahn, C.-H., Westfeld, P., Vahrenkamp, B., Wübbena, G., Schmitz, M., Schumann, R., Wallat, C. (2022): Development and Realisation of a Real-Time High Precision Positioning SSR-RTK Service for the North Sea Exclusive Economic Zone. *The International Hydrographic Review*, 28, 139–157. DOI: [10.58440/ihr-28-a16](https://doi.org/10.58440/ihr-28-a16) und als deutsche Fassung in den Hydrographischen Nachrichten HN125/2023 veröffentlicht wurde: Jahn, C.-H., Westfeld, P., Vahrenkamp, B., Wübbena, G., Schmitz, M., Schumann, R., Wallat, C. (2023): Entwicklung und Umsetzung eines SSR-RTK Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee (AWZ).

1 Zusammenfassung

Die o.g. Manuskripte schildern die Durchführung und Ergebnisse eines zweijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojektes des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Zentralen Stelle SAPOS (ZSS) und der Firma Geo++. In diesem Projekt wurde der Prototyp eines GNSS (Global Navigation Satellite System) basierten Echtzeitdienstes unter Verwendung eines SSR-RTK (State Space Representation-Real Time Kinematic) Ansatzes für die ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in der Nordsee entwickelt.

Als Entwicklungsziele hat das BSH die folgenden Qualitätsziele des F&E-Projekts definiert:

- Die Höhengengenauigkeit für die Position der Antenne im Bezugssystem ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) soll besser als 10 cm mit einer

Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % sein, was einer einfachen Messgenauigkeit von ca. 5 cm entspricht.

- Die Einlaufzeiten des Signals bis zum Erreichen der geforderten Genauigkeit sollen im Regelfall bei Erstinitialisierung weniger als 2 Minuten und nach Signalverlust weniger als 20 Sekunden für die Neupositionierung entsprechend o. g. Genauigkeitsziel betragen.
- Der Korrekturdatendienst soll im Zielgebiet der AWZ der Nordsee eine hohe Verfügbarkeit bezüglich der Bereitstellung von Korrekturdaten haben.
- Das Format für die Korrekturdatenübertragung soll offen, lizenzfrei und dokumentiert sein.

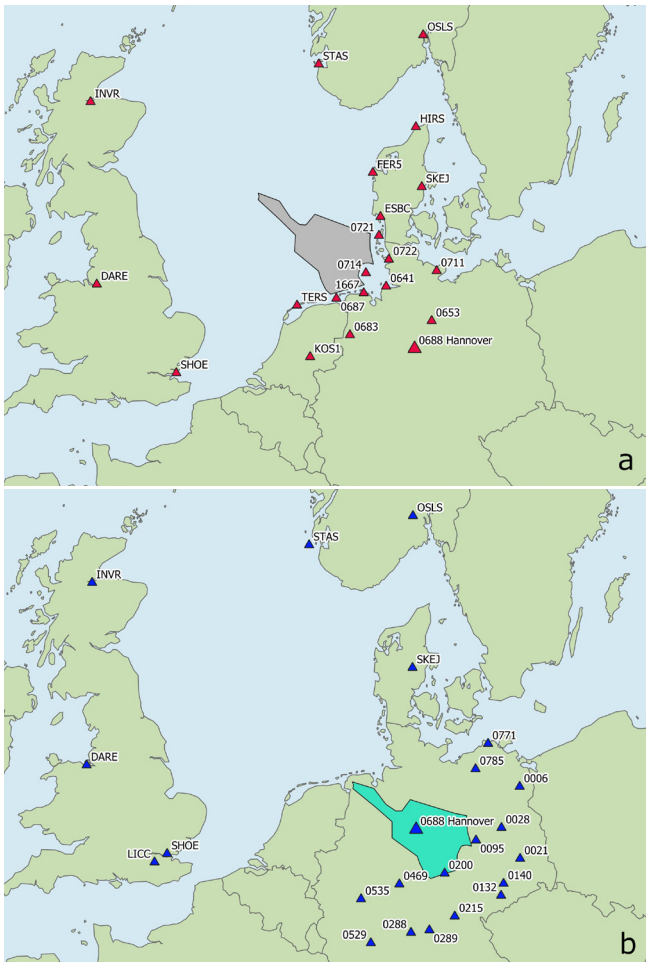


Abb. 1:
a) Referenzstationsnetz Nordsee (BSHN-Netz) und
b) Festland (Netz-Süd)

In einem ersten Schritt wurde ein Netz aus GNSS-Referenzstationen, welches das Messgebiet (deutsche AWZ) umschließt, in einem weit- und einem engmaschigen Netz kombiniert. Im weitmaschigen Teil des Netzes, mit Stationen in Großbritannien und Südnorwegen ergeben sich Entfernungen bis zu 900 km (Abb. 1a).

Da Schiffszeiten für maritime Testmessungen aus wirtschaftlichen Gründen nur in begrenztem Maße zur Verfügung stehen, wurde ein zweites Vernetzungsgebiet (Netz-Süd, Abb. 1b) eingerichtet und in Betrieb genommen. Dadurch konnte das vermeintliche Gebiet der AWZ in der Nordsee vollständig auf Land nachgebildet werden und stand für die gesamte Projektlaufzeit für unterschiedlichste Testmessungen zur Verfügung. Nachdem alle statischen und kinematischen Testmessungen an Land die vorgegebenen Qualitätsziele erreicht hatten, wurde in der 2. Phase des Projektes die Erprobung auf See vorgenommen. Im September und Oktober 2021 wurden zwei Testfahrten mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) WEGA des BSH durchgeführt (Abb. 2). Die Messungen fanden unter schweren Wetterbedingungen auf der offenen Nordsee statt. Zum Vergleich der Ergebnisse fanden parallel Messungen mit dem hierfür erweiterten Netz des SAPOS-HEPS-Dienstes und mit Fugro Marinstar statt. Aufgrund der Einschränkungen im Messaufbau auf dem Schiff (Abschattungen durch den Hauptmast) führten einige Kurse zu Ausfällen in den Aufzeichnungen. Bereinigt um diese Ausfälle erreichten auch die Messungen auf



Abb. 2: VWFS WEGA des BSH mit den für die Testfahrten relevanten Antennen im September 2021

See die als Projektziel aufgestellten Qualitätsvorgaben, so dass die Erprobung des SSR-RTK Korrekturdatendienstes zu einem positiven Ergebnis kam, welches die Möglichkeiten dieser Technologie im praktischen Einsatz aufzeigt.

Literatur

Jahn, C.-H., Schumann, R., Vahrenkamp, B., Westfeld, P., Wübbena, G., Schmitz, M., Walat, C. (2021): SSR-RTK – Korrekturdatendienst für hochgenaue Positionierung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee: Nordsee-Vernetzung. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2021. 146. Jg., 126–130. DOI: [10.12902/zfv-0342-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0342-2021).

Kontakt

Dipl.-Ing. Bernd Vahrenkamp
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Straße 78, 20359 Hamburg
bernd.vahrenkamp@bsh.de

Session 3:

Qualitätssicherung und Sicherheit

DIN-Norm 18213 GNSS-Feldprüfverfahren – ein effizientes Verfahren zur Qualitätssicherung

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

1 Motivation für eine neue GNSS-Norm

Mit der DIN 18213 „Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte“ steht seit Februar 2022 erstmals eine Norm zur Prüfung von GNSS-Instrumentarien zur Verfügung, die Anwendern aus der Praxis einfache Hilfestellungen zur Überprüfung gibt. Sie wurde vom Arbeitsausschuss NA005-03-04AA „Geodätische Instrumente und Geräte (SpA zu ISO/TC172/SC6)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) erarbeitet.

Es handelt sich um ein schlichtes Feldprüfverfahren für alle GNSS-Instrumentengruppen, das unabhängig von den eingesetzten GNSS-Verfahren und Genauigkeitsbereichen, also von simplen Navigationsanwendungen im Genauigkeitsbereich des Meters bis hin zu hochgenauen geodätischen RTK- oder PPP-Anwendungen, angewendet werden kann. Das Befolgen der Norm zur Überprüfung des eingesetzten Instrumentariums soll dem Anwender ermöglichen, sein Instrumentarium gemäß anerkannter „Best Practice“ mit einem vertretbaren Zeitaufwand im Feld zu verifizieren.

Der neue erarbeitete Ansatz verfolgt in Abgrenzung zu vielen bisherigen Instrumentennormen und Verifikationsansätzen in der geodätischen Forschung eine summarische Prüfung des Gesamtsystem „GNSS“. Sie schließt alle verwendeten Komponenten wie beispielsweise Antenne und Zubehörteile wie Lotstab ebenso ein wie eine etwaige im Gerät implementierte Koordinatentransformation. Daher wird die berechnete Koordinate als zentrales Messergebnis angesehen.

Zuvor hatte im Jahr 2014 eine Prüfung vorhandener Normen, bestehender Vorschriften und auch berufsgruppenspezifischer Empfehlungen (Fritzensmeier et al. 2017a) deutlich aufgezeigt, dass eine Übernahme des zu diesem Zeitpunkt einzigen existierenden ISO-Dokuments, dem Teil 8 „GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)“ als sogenannte DIN ISO Norm, wie dies bei anderen Normen der 17123 Reihe möglich war, nicht empfohlen werden

konnte, da es ausschließlich auf einen speziellen Typus einer GNSS-Anwendung abzielt.

Es entstand der Wunsch nach einer erweiterten GNSS-Norm, die der Vielfalt an GNSS-Verfahren und Genauigkeitsbereichen sowie verschiedenen Anwendungen besser gerecht werden und daher alle Genauigkeitsbereiche und Messverfahren umfassen sollte. Die Diskussion in und mit den Fachkreisen ergab, dass hierzu bislang auch kein geeignetes und im Aufwand vertretbares Verfahren existierte, was die Entwicklung eines vollkommen neuen Prüfverfahrens erforderte. Dabei war ein zentraler Anspruch, dieses Verfahren möglichst praxisnah zu gestalten und das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Blick zu behalten. Ziel der Norm ist es insbesondere nicht, die Leistungsfähigkeit eines GNSS Systems oder Verfahrens zu ermitteln. Die Eignung eines GNSS-Verfahrens oder eines spezifischen Instruments zur Erreichung einer angestrebten Messunsicherheit muss sachkundig aus komplementären Verfahren oder Quellen (z. B.: Herstellerangaben) gezogen werden. Ist die prinzipielle Eignung des Equipments jedoch sichergestellt, so ist das Feldprüfverfahren dazu geeignet, die Funktionsfähigkeit zum Zeitpunkt der Prüfung sicherzustellen und bei Auffälligkeiten Hinweise auf Ursachen zu geben.

2 Grundgedanken aus der DIN 18213 GNSS-Feldprüfverfahren

Ausgehend von der Tatsache, dass ein GNSS-Messgerät kein Messgerät im engeren Sinn ist, das unabhängig von externer Infrastruktur aus sich selbst heraus sowie ohne Soll-Vorgaben geprüft werden kann, muss dieses zusammen mit weiteren Komponenten (z. B. Antenne, Aufstellereinrichtung) als Teilkomponente eines Gesamtsystems betrachtet werden. Weitere Teile dieses Gesamtsystems sind Navigationssatelliten, Datenübertragungstechniken und -ströme, Datenaufbereitungsverfahren inkl. der zur Positionsbestimmung eingesetzten Algorithmen sowie optional ergänzende Komponenten, wie z. B. Dienstleister von Korrekturdiensten mit deren zugehörigem Instrumentarium und deren Vernetzungssoftware (vgl. [Abb. 1](#)).

Allen in der Norm betrachteten GNSS-Messgeräten ist gemein, dass sie ausgehend von der Auswahl der empfangenen GNSS-Beobachtungsdaten schlussendlich dreidimensionale Koordinaten erzeugen und ausgeben.

Bei Anwendung der Norm wird also die im Feldprüfverfahren ermittelte dreidimensionale Koordinate als primäre Prüfgröße verstanden, die mit einem vorhandenen Sollwert verglichen wird. Das GNSS-Messgerät wird dazu in seiner Gebrauchskonfiguration in der Weise einer Prüfung unterzogen, dass die wesentlichen die Koordinatenbestimmung beeinflussenden Parameter in das Ergebnis der Prüfung einbezogen sind.

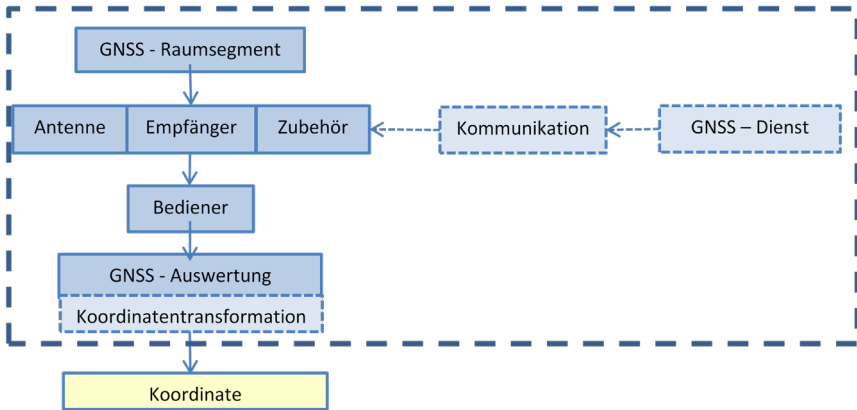


Abb. 1: GNSS-basierte Koordinate als integrales Ergebnis eines Messsystems (DIN 18213)

Als Voraussetzung zur Durchführung der Feldprüfung muss ein Referenzpunkt vorhanden sein oder angelegt werden, der sowohl von einer öffentlichen Stelle angelegt werden kann oder anwendereigen ist. Die Koordinaten dieses Punktes müssen im gewünschten Koordinatensystem mit einer Messunsicherheit mindestens um den Faktor 3 besser als diejenige der zu bestimmenden Koordinaten bekannt sein. Weitere Voraussetzungen wie beispielweise eine Horizontfreiheit oberhalb von mindestens 10° Elevation sind in der Norm genannt.

Das Feldprüfverfahren verfolgt einen dreistufigen Ansatz, so dass die Feldprüfungen hintereinander und bei Bedarf mit zunehmendem Detailierungsgrad vorgenommen werden können. Die Verfahrensstufen sind:

1. **Einfacher Soll-Ist-Koordinatenvergleich als schnelle Plausibilitätskontrolle auf einem koordinatenmäßig bekannten Messpunkt.** Es werden zwei einfachen Messungen in Gebrauchslage ohne zeitlichen Abstand kurz hintereinander durchgeführt. Die Abweichungen dieser Messergebnisse von der Referenzkoordinate werden ermittelt und in Bezug zu den angestrebten Genauigkeiten gesetzt. Damit wird für den konkreten Messtag eine einfache Rot/Grün Ampelentscheidung über die Einsatzfähigkeit zum Zeitpunkt der Prüfung erreicht.
2. **Qualifizierter Koordinatenvergleich unter Einbeziehung einer vorgegebenen Messabfolge,** der eine qualitative Bewertung erlaubt. Es werden zwölf Einzelmessungen in zwei verschiedenen Orientierungen und zwei unterschiedlichen Höhen aufgeteilt in drei Sätze, zwischen denen ein zeitlicher Abstand von mindestens 20 Minuten einzuhalten ist, durchgeführt. Stufe 2 liefert dem Anwender eine qualifizierte Aussage, ob die vorgegebene maximale Messabweichung durch die gewählte GNSS-Messausrüstung in Kombination mit dem von ihm verwendeten GNSS-Messverfahren am Ort und

zum Zeitpunkt der Prüfung eingehalten wird. Je nach Auswertekombination können Hinweise auf häufige Fehlerursachen wie der fehlerhaften Projektion des Messpunkts, dem Einfluss des elektromagnetischen Nahfelds oder der erweiterten Umgebungsbedingungen identifiziert werden.

3. Erweiterte qualifizierte Prüfung ausgewählter GNSS-Systemteile, um die die bestehende Norm erweitert werden kann.

Die Norm gibt Literaturhinweise zu vertieften Prüfverfahren, bietet aber keine dezidierten Verfahren an, um die Ursachen systematisch zu ermitteln und gar zu korrigieren. Angesichts der Komplexität einer GNSS Messung würde dies den gesetzten Rahmen einer in der Praxis in vernünftigem Kosten-Nutzen-Verhältnis stehenden Norm sprengen. Für eine qualifizierte Fehlersuche sind die Anwender auf die eigene Sachkunde, oder eben gegebenenfalls die Sachkunden von Herstellern oder Beratern angewiesen.

Tab. 1: Klassifizierung der Messunsicherheiten in Lage- (U_{Lage}) und Höhekoordinaten ($U_{Höhe}$)

Klasse	U_{Lage} in mm	$U_{Höhe}$ in mm	Anforderung ergibt sich aus Anwendung in ...
A	< 10	< 20	hochwertigen Ingenieurvermessungen, z. B. Stabilitätsüberwachungen von Bauwerken und Rutschungshängen
B	[10; 30]	[20; 50]	typischen Vermessungen, u. a. in der Ingenieur- und Liegenschaftsvermessung
C	[30; 200]	[50; 200]	bautechnischen Vermessungen, z. B. Spaltenmaß, Leitungsdokumentation
D	[> 200; 5000]	[> 200; 5000]	Vermessungsaufgaben mit unscharfen Abgrenzungen

Tab. 2: Verfahrensstufen des GNSS-Feldprüfverfahrens

Verfahrensstufe	Beschreibung	Messunsicherheitsklasse			
		A	B	C	D
1	Einfacher Koordinatenvergleich		✗	✗	✗
2	Qualifizierter Koordinatenvergleich		✗	✗	
3	Erweiterter qualifizierter Vergleich mit Konzentration auf ausgewählte Systemteile	✗			

Die Verfahrensstufen sind bestimmten Messunsicherheitsklassen zugewiesen, die nicht auf geodätische Anwendungen begrenzt sind, sondern auf GNSS-basierte Anwendungen jedweder Art abzielen, die eine Koordinatenbestimmung liefern (vgl. Tab. 1 und Tab. 2).

Die Ergebnisse von GNSS-Messverfahren sind von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig, die in der Auswerteprozedur Berücksichtigung finden

Tab. 3: wesentliche Einflussfaktoren in Abhängigkeit von der gewählten Messunsicherheitsklasse

		Messunsicherheits- klasse			
		A	B	C	D
Weltraumsegment	Satellitenbahn	×	×	×	×
	Satellitenuhr	×	×	×	×
	Satellitengeometrie	×	×	×	×
	Eigenschaften der Satellitenantenne	×	×	×	
Signalausbreitung	Ionosphärische Refraktion	×	×	×	×
	Troposphärische Refraktion	×	×	×	
	Signalbeugung	×	×		
	Mehrwege-Effekte	×	×	×	×
	Abschattungen	×	×	×	×
	Interferenzen	×	×	×	×
GNSS-Messgerät	Antennen-Nahfeld	×			
	Antenneneigenschaften	×	×		
	Antennenhöhe	×	×	×	
	Antennenzentrierung	×	×		
	Empfängeruhr	×	×	×	×
Mess- und Prüf- punkt	Aufbau (Pfeiler, Stativ, Lotstock)	×	×		
	Vermarkung	×	×		
	Koordinatenqualität des Prüfpunktes	×	×	×	
Externe Informa- tionen	Korrekturdatenqualität	×	×	×	
	Koordinatenqualität der Referenz- punkte des geodätischen Bezugs- rahmens	×	×		

Tab. 4: Hinweise zur Schnelldiagnose bei überschrittener Messabweichung

Weltraumsegment	Aktuelle Satellitengeometrie	<ul style="list-style-type: none"> ■ Richtigkeit der Einstellung des Satelliten-Health-Zustandes ■ Prüfung der DOPWerte ■ Aktualität des Almanachs ■ Eingestellte Elevationsmaske
Prüfpunkt		<ul style="list-style-type: none"> ■ Sichtprüfung des Zustands ■ Eindeutigkeit der Punkt-Zuordnung ■ Richtigkeit und Qualität der Koordinaten ■ Einstellung des korrekten Referenzrahmens und der korrekten Referenzepoche im Gerät
Einflussfaktoren, insbesondere		<ul style="list-style-type: none"> ■ Umgebungsbedingungen wie Abschattungen, Nahfeld- oder Mehrwege-Effekte ■ verstärkte Sonnenaktivität/Ionosphären-Aktivität ■ Störung durch Interferenzen mit Funk-signalen
GNSS-Mess-ausrüstung	GNSS-Empfänger	<ul style="list-style-type: none"> ■ Firmware-Aktualität ■ Richtigkeit der Betriebsparameter
	GNSS-Antenne	<ul style="list-style-type: none"> ■ Richtigkeit des eingestellten Antennentyps bzw., bei individuell kalibrierten Antennen, der Antennennummer
	Zubehör	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sichtprüfung ■ Richtigkeit der Antennenhöhe ■ Einspielung aller Libellen
	Datenweiterverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Richtigkeit der Betriebsparameter ■ Richtigkeit des Bezugssystems inkl. des Geoidmodells ■ Richtigkeit der Transformationsparameter
Kommunikation		<ul style="list-style-type: none"> ■ Unterbrechungsfreie Internet-/Mobilfunk-/Bluetooth-Verbindung
GNSS-Dienst		<ul style="list-style-type: none"> ■ Providerhinweise beachten

müssen, aber je nach eingesetztem Verfahren oder gewünschter Genauigkeit von unterschiedlicher Relevanz sind. In der Norm wird dem Nutzer als Hilfestellung eine tabellarische Auflistung der Relevanz spezieller Einflussfaktoren für seine Messunsicherheitsklasse (Tab. 3) mitgegeben.

Als Interpretationshilfe der im Prüfverfahren gewonnene Erkenntnisse insbesondere bei der Überschreitung der gewünschten Messabweichungen werden dem Anwender in der DIN Hinweise für eine Schnelldiagnose bei seiner Ursachensuche mitgegeben (Tab. 4). Im Anhang der Norm ist eine Reihe typischer Beispiele enthalten.

3 Fazit und Ausblick

Die neue, hier vorgestellte DIN 18213 „Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte“ bietet dem sachkundigen Nutzer ein neues Feldprüfverfahren zur Untersuchung seines GNSS-Instrumentariums ohne Einschränkung auf eine bestimmte Genauigkeitsklasse, eine spezielle Instrumenten-Morphologie oder ein bestimmtes Beobachtungsverfahren an, wobei der überschaubare Zeitaufwand einen routinemäßigen Einsatz ermöglichen soll. Die Mehrstufigkeit des Feldprüfverfahrens ermöglicht es, unterschiedlichsten Anforderungsprofilen gerecht werden zu können.

Der Vorschlag zur Norm wurde erstmals auf dem DVW-Seminar „GNSS 2017“ dem Fachpublikum vorgestellt (Fritzensmeier et al. 2017b) und anschließend in den Gremien der AdV, des DVW, des VDV und des BDVI vorgelegt sowie mit Herstellern und Anwenderkreisen diskutiert. Zahlreiche Stellungnahmen, Meinungen, Hinweise, Änderungswünsche und/oder ergänzende Betrachtungen konnten hierdurch Eingang in die Norm finden, die immer mit dem Wunsch verbunden waren, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen. Im zuständigen ISO Gremium ISO TC172 SC6 „Geodetic and surveying instruments“ wurde das entsprechende Projekt von den Mitgliedern durch eine erste Abstimmung unter der ISO Nummer 17123-11 formal ins Arbeitsprogramm aufgenommen. Auf Expertenebene wird der Entwurf auf Basis der DIN-Norm zurzeit diskutiert und weiterentwickelt.

Literatur

DIN 18213_2022-02: Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte.

Fritzensmeier, K., Haupt, M., Hülse, R., Hustedt, H., Kowalewski, D., Mayer, M., Peth, U. (2017a): GNSS-Einsatz in der Netzdokumentation der Energieversorgung. DVW-Merkblatt 13-2017. https://dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2017/13_DVW-Merkblatt_GNSS-Einsatz.pdf.

Fritzensmeier, K., Ehrhorn, U., Görres, B., Hollmann, R., Mayer, M., Pollinger, F. (2017b): Zum Status einer DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Augsburg, 57–69. <https://geodaesie.info/dvw-schriftenreihe/schriftenreihe-archiv/schriftenreihe-band-87>.

Kontakt

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

Dr.-Ing. Klaus Fritzensmeier
Bokumer Straße 27, 30880 Laatzen
k.fritzensmeier@t-online.de

Dipl.-Ing. Uwe Ehrhorn FRICS
ehrhorn vermessung
Neue Finien 2, 28832 Achim
u.ehrhorn@ehrhorn.de

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)
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
florian.pollinger@ptb.de

Von der See bis zu den Alpen – Herausforderungen auf dem Weg zum neuen geodätischen Raumbezug

Hans-Georg Dick | Andreas Brünner | Ralf Däbel | Barbara Görres | Bernd Krickel |
Björn Mehlitz | Werner Pape | Anette Rietdorf | Tetyana Romanyuk | Axel Rülke |
André Sieland | Laura Vaßmer | Kerstin Westphal

1 Einleitung

Die Festpunkte des amtlichen Vermessungswesens realisieren den einheitlichen geodätischen Raumbezug und stellen damit eine überaus bedeutende Infrastruktur dar. Der besondere Wert dieser Infrastruktur entsteht durch ihre ganzheitliche Ausrichtung und ihren bundeseinheitlichen Charakter, der Sorgfalt und Qualität im Aufbau, der langfristigen Erhaltung, sowie einen etablierten Aktualisierungsprozess. Diese Merkmale, im Verbund mit einer zuverlässigen und schnellen Bereitstellung von Daten durch einen Satellitenpositionierungsdienst, gewährleisten einen eindeutigen, jederzeit verfügbaren, aktuellen und genauen geodätischen Raumbezug.

Die an der Erdoberfläche dauerhaft vermarkten Festpunkte bilden das bundeseinheitliche Festpunktfeld, bestehend aus den Höhenfestpunkten 1. Ordnung, den Schwerefestpunkten 1. Ordnung, den Geodätischen Grundnetzpunkten und den Referenzstationspunkten. Sie werden zur Qualitätssicherung des geodätischen Raumbezugs überwacht sowie lokal, regional oder bundesweit überprüft. Die Überprüfungen basieren immer auf geodätischen Messungen und werden entweder turnusmäßig gem. bundesweiter oder landesspezifischer Vorgaben, anlassbezogen oder kontinuierlich durchgeführt. Im Abstand von zwölf Jahren wird auf den Datumspunkten des Geodätischen Grundnetzes (GGN) im Verbund mit den Punkten des Referenzstationsnetzes (RSN) eine bundesweite Wiederholungsmessung durchgeführt. Diese Wiederholungsmessung, ursprünglich als bundesweite GNSS-Messkampagne 2020 geplant und kommuniziert, erfolgte pandemiebedingt mit einjähriger Verzögerung im Sommer 2021.

Dieser Beitrag beleuchtet, neben der grundlegenden Konzeption des Projektes, einige Herausforderungen, die auf dem Weg zu einer Aktualisierung des geodätischen Raumbezugs entstanden sind bzw. noch bestehen. Es wird ausdrücklich betont, dass dies nur einen Zwischenbericht und keine geschlossene Abhandlung darstellt. Nach Abschluss aller noch laufenden Auswertungen und dem Vorliegen bestätigter Ergebnisse wird es dazu Veröffentlichungen in der gebotenen Ausführlichkeit geben.

2 Die GNSS-Messkampagne 2021

2.1 Definitionen und Grundlagen

Am 21. September 2016 hat das Plenum der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) beschlossen, eine neue Realisierung des amtlichen geodätischen Raumbezugs einzuführen. Damit sollten einheitliche und hochgenaue Koordinaten für Lage und Höhe sowie Schwerewerte bereitgestellt werden, basierend auf einer Neuvermessung Deutschlands, die im Zeitraum 2006 bis 2012 durchgeführt wurde. Besonderes Augenmerk wurde auf die Integration der bisher getrennt betrachteten Informationen nach Lage, Höhe und Schwere in die neu geschaffenen Geodätischen Grundnetzpunkte (GGP) gelegt.

Zur besseren Verknüpfung der geometrischen und physikalischen Raumbezugskomponenten wurden im Zuge der Erneuerung des DHHN hochgenaue satellitengeodätische Messungen auf 250 ausgewählten Geodätischen Grundnetzpunkten (GGP-Rahmennetz) durchgeführt und zusammen mit Beobachtungen aller Referenzstationen (RSP) ausgewertet (GNSS-Messkampagne 2008). Das Ergebnis stellte eine neue Realisierung des ETRS89/DREF91 in Deutschland dar (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016). Sie wurde bundesweit zum 1. Dezember 2016 als amtlicher geodätischer Bezugsrahmen eingeführt und ersetzte die bisherige Realisierung 2002. Mit dieser Einführung wurden alle GGP-Rahmennetzpunkte zu 3D-Datumspunkten des ETRS89/DREF91.

Der Arbeitskreis Raumbezug der AdV hat die „Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland“ (Rili-RB-AdV) in den Jahren 2006 bis 2017 bis zur heutigen Version 3.0 erstellt und fortgeschrieben. Mit dem integrierten Raumbezug 2016 und der Rili-RB-AdV stehen aktuelle, genaue und konsistente geodätische Bezugsrahmen und eine definierte Produktsicht mit einem begleitenden Qualitätssicherungssystem zur Verfügung. In der Nr. 2.6 Rili-RB-AdV sind bundesweite GNSS-Wiederholungsmessung im Turnus von zwölf Jahren vorgesehen, erstmals nach dem vollständigen Aufbau des europäischen Satellitensystems Galileo und spätestens im Jahr 2020.

Wiederholungsmessungen sind zusammen mit definierten Überwachungs- und Erhaltungsmaßnahmen Teil der Qualitätssicherung der amtlichen geodätischen Bezugsrahmen. Dabei festgestellte signifikante vertikale und horizontale Bewegungen der Erdoberfläche sind z. B. für Zwecke des Umweltmonitorings zu erfassen und geeignet zu dokumentieren. Ihre Auswirkungen auf die Festpunkte der amtlichen geodätischen Bezugsrahmen können zu einer Aktualisierung des geodätischen Raumbezuges Anlass geben, z. B. können bisherige Datumspunkte diese Funktion wieder verlieren.

Die Realisierungen 2016 des ETRS89/DREF91, des DHHN und des DHSN basieren auf der Nullmessung des integrierten geodätischen Raumbezugs des Jahres 2008. Sie sind die Referenz für die Darstellung von räumlichen Veränderungen in Zeitreihen aufgrund von regionalen und bundesweiten Wiederholungsmessungen. Die Nullepoche für solche Zeitreihen ist in Bezug auf ETRS89/DREF91 (Realisierung 2016) die zeitliche Mitte der GNSS-Messkampagne und wird als Jahresbruchteil 2008.46 angegeben.

2.2 Ziel der Kampagne

Die Ziele dieser Kampagne wurden durch die Projektgruppe „Konzeption der GNSS-Messkampagne“ der AdV erarbeitet und sind nachfolgend zusammengestellt:

1. Bestimmung von Koordinaten des GGP-Rahmennetzes sowie der RSP auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, u. a. durch die Nutzung des fortgeschrittenen Ausbaus des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo und der Modernisierung des GPS-Raumsegments, den damit verbundenen neuen Messsignalen, der neuen Empfänger- und Antennenmesstechnik sowie neuer Auswertemethoden. Die Maßgabe dabei: Erreichung eines vergleichbar hohen Genauigkeitsniveaus wie 2008.
2. Überprüfung der Konsistenz der Koordinaten der nationalen Referenznetze (GGN und RSN) durch die gemeinsame Beobachtung und Ausgleichung beider Festpunktfelder. Ein Soll-Ist-Vergleich nach Lage und ellipsoidischer Höhe mit der Nullmessung von 2008 dient der Beurteilung der Stabilität des amtlichen geodätischen Bezugsrahmens ETRS89/DREF91 (Deformationsanalyse). Relative Änderungen zwischen den GGP in der ellipsoidischen Höhe sind ein zuverlässiger Hinweis auf entsprechende relative Änderungen in der physikalischen Normalhöhe und damit auch auf die Stabilität des Höhenbezugsrahmens DHHN2016.
3. Überprüfung und Aktualisierung der Koordinaten der GGP und RSP im nationalen amtlichen Bezugsrahmen ETRS89/DREF91 (Realisierung 2016). Es wird insbesondere ermittelt, welche der ursprünglich 250 GGP konkret als 3D-Datumspunkte geeignet sind, um langfristig einen bundesweit möglichst stabilen amtlichen Bezugsrahmen bereitstellen sowie ggf. zeitliche Veränderungen ableiten zu können.

Die Bereitstellung des amtlichen geodätischen Raumbezugs erfolgt allerdings nicht über die GGP, sondern vorrangig über den Positionierungsdienst SAPOS, der auf den amtlichen Koordinaten der Referenzstationspunkte (RSP) aufsetzt. Unvermeidliche Wechsel der messtechnischen Einrichtungen auf den RSP führten dazu, dass viele der ursprünglich konsistent zum

GGP-Rahmennetz ermittelten RSP-Koordinaten angepasst wurden. Somit besteht eine gewisse Inhomogenität zwischen dem GGP-Rahmennetz und den RSP, die es zu detektieren gilt.

Der zum 01.12.2016 eingeführte einheitliche integrierte geodätische Raumbezug soll nach der GNSS-Kampagne 2021 in seiner amtlichen Datumsfestlegung bundesweit grundsätzlich erhalten bleiben. Wo es aufgrund der Ergebnisse der Wiederholungsmessung allerdings fachlich geboten ist, sind Koordinaten- und/oder Höhenänderungen im GGP-Rahmennetz und dem RSN auch in den amtlichen Werten vorzunehmen. Folgemaßnahmen im Höhen- und Schwerefestpunktfeld sowie beim AdV-Quasigeoid können somit erforderlich werden.

4. Erweiterung des GGP-Rahmennetzes durch permanent besetzte RSP (GREF und SAPOS-Stationen), was künftig ein operationelles Monitoring des amtlichen geodätischen 3D-Datums des integrierten Raumbezugs 2016 ermöglichen kann.

Die betreffenden langzeitstabilen (i. d. R. bodenvermarkten) RSP wurden im Vorfeld der GNSS-Messkampagne des Jahres 2021 durch die Länder und das BKG aufgebaut bzw. entsprechend instrumentell ertüchtigt. Diese Initiative „Umbau gebäudegebundener hin zu bodengebundenen Referenzstationen“ wird bedarfsgerecht fortgeführt, um eine verbesserte Flächendeckung zu erreichen. Wenn zudem der Nachweis erbracht werden kann, dass die Ergebnisse des RSN-Monitorings und anlassbezogene Deformationsanalysen die Stabilität bodenvermarkter Referenzstationen klar belegen, könnte dies künftig ein qualitativ hochwertiges operatives Monitoring des amtlichen 3D-Bezugsrahmens ermöglichen.

5. Langfristige Erhaltung des GGP-Rahmennetzes durch die Bestimmung von Ersatzpunkten für zerstörte, instabile oder nicht mehr GNSS-taugliche GGP.
6. Einbindung des nationalen Bezugsrahmens ETRS89/DREF91 in die internationalen Bezugsrahmen sowie Überprüfung der zugehörigen Transformationsvorschriften und Ableitung aktueller Transformationsparameter insbesondere für das Koordinatenmonitoring des RSN.

Über die im RSN enthaltenen GREF-Stationen wird eine enge Verbindung zum ITRF2020 hergestellt, d. h. zum aktuellen globalen Bezugsrahmen sowie zur vereinbarten europäischen Realisierung ETRF2000, letztere dient nicht zuletzt dem internationalen Koordinatenaustausch. Resultierend aus den Ergebnissen der GNSS-Kampagne 2021 werden die Transformationsvorschriften und die Transformationsparameter zwischen den internationalen Referenzrahmen und der nationalen amtlichen Realisierung ETRS89/DREF91 (Realisierung 2016) überprüft und aktualisiert. Aufgrund des verstärkten Einsatzes der GNSS-Positionierungstechniken PPP und PPP/RTK, nicht nur in der geodätischen Praxis, gewinnen diese Transformationsparameter zu-

nehmend an Bedeutung. Aus Gründen der Konsistenz in der Modellbildung liefern PPP-Verfahren grundsätzlich Ergebnisse im ITRF, so dass ein Bezug zum amtlichen Bezugsrahmen in einem separaten Schritt herzustellen ist.

7. Bereitstellung aktueller Daten für die Fortschreibung des AdV-Quasigeoids.

Ganz grundsätzlich war darüber hinaus das Ziel eine deutliche Verkürzung der Projektlaufzeit, vom Planungsbeginn bis zur Veröffentlichung der Ergebnisse, zu erreichen.

2.3 Auftrag und Organisation

Die GNSS-Kampagne 2021 wird als Gemeinschaftsprojekt der AdV durchgeführt. Das Plenum der AdV hat den Planungen zur Durchführung der Kampagne im Jahr 2016 zugestimmt und den Arbeitskreis Raumbezug (AK RB) beauftragt, für die Umsetzung die dazu notwendigen Beschlüsse zu treffen. Nach dem vorgelegten Projektrahmen durch die damit beauftragte Projektgruppe „Konzeption der GNSS-Messkampagne 2020“ hat der AK RB 2018 per Beschluss die Weichen für die Durchführung gestellt und dabei die solidarische Unterstützung aller beteiligten Stellen als Beispiel einer erfolgreichen Bund-Länder-Zusammenarbeit betont. Die Aufwendungen für die erforderlichen 35 Messtrupps trugen danach die entsendenden Verwaltungen (Bundesländer und BKG), mit der Finanzierung der Auswertung war der Lenkungsausschuss Geobasis (LA Geobasis) der AdV betraut. 2020 schloss der LA Geobasis mit den beiden GNSS-Rechenstellen beim Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) sowie beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) Verträge mit einer Laufzeit von drei Jahren ab.

Der Projektgruppe „GNSS-Kampagne 2020“ wurden die Aufgaben Kampagnenplanung, Schulung der Messtrupps, Konzeption der Auswertung, Koordination der Messkampagne und Aufbereitung der Ergebnisse der Rechenstellen übertragen.

Die Projektgruppe hat Task Forces gebildet, die die Feldmessungen koordiniert sowie den Messtrupps mit Rat und Tat und bei Bedarf mit Reserveausrüstung zur Seite standen. Die Bundesländer stellten Landesansprechpartnerinnen und Landesansprechpartner (LAP) ab, um einen möglichst reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Ihr engagierter Einsatz trug ganz wesentlich zum Erfolg der gesamten Kampagne bei.

2.4 Konzeption

2.4.1 Genauigkeitsanforderungen

Die 3D-Koordinaten der 250 GGP wurden 2008 mit einer einfachen Standardabweichung in der Lage auf 1 mm und in der ellipsoidischen Höhe auf 2 mm genau bestimmt. Für die RSP ergaben sich in der gemeinsamen Auswertung geringfügig schlechtere Werte; die Lage mit 1,5 mm und die ellipsoidische Höhe mit 3 mm Standardabweichung.

Um die räumliche Position der beteiligten Referenzpunkte wiederum in gleicher Qualität zu erhalten, war die Konzeption hinsichtlich Messausrüstung, Messverfahren und Auswertung entsprechend auszurichten.

2.4.2 Methodik

Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen für die Kampagne wurde für die Durchführung der Messungen und Auswertungen die folgende grundsätzliche Methodik entwickelt:

- Einsatz satellitengeodätischer Messverfahren unter Nutzung der global verfügbaren Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS und Galileo.
- Einsatz des bewährten statischen GNSS-Beobachtungsverfahrens.
- Einsatz typgleicher Choke-Ring-Antennen, die sich im nationalen und internationalen Einsatz besonders bewährt haben. Einer Empfehlung der Projektgruppe, dies auch beim Aufbau bodenvermarkter Referenzstationen zu beachten, wurde weitgehend gefolgt.
- Individuelle Multi-GNSS-Kalibrierung der GNSS-Empfangsantennen inklusive Unterbauten mit Hilfe der Verfahren Roboter-Feldkalibrierung und Antennenmesskammer.
- Simultane Beobachtung benachbarter Punkte zur Wahrung der Nachbarschaftstreue.
- Unterbrechungsfreie Beobachtungszeit pro Session von mindestens 24 Stunden. Dabei werden nahezu zwei komplette Satellitenumläufe sowie das gesamte atmosphärische Spektrum Tag/Nacht genutzt, was aus fehlertheoretischen Gründen die größtmögliche Zuverlässigkeit der berechneten Ergebnisse erwarten lässt. Zudem haben Tests mit unterschiedlichen Messzeiten (6, 8, 12 und 24 Stunden) im Vorfeld gezeigt, dass sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nur mit den vollen 24 Stunden die geforderte Genauigkeit erreichen lässt.
- Besetzung jedes Rahmennetz-GGP in mindestens zwei Sessionen durch unterschiedliche Trupps mit unterschiedlichem Equipment.
- Aufteilung der 35 Messtrupps in drei sich überlappende regionale Netzblöcke mit jeweils 10 bis 12 Trupps.

- Ausführung der Messungen gemäß der aktualisierten AdV-GNSS-Feldanweisung.
- Tägliche Analyse der Feldmessungen während der Kampagne analog zur Kampagne 2008.
- Aufzeichnung aller Beobachtungen der permanent operierenden Referenzstationen unterbrechungsfrei über den gesamten Kampagnenzeitraum.
- Auswertung mittels wissenschaftlicher GNSS-Analyse-Software zur Erzielung von Netzlösungen mit mathematisch strenger Ausgleichung zur Gewinnung von Koordinaten einschließlich der vollständigen Stochastik (vollbesetzte Varianz-Kovarianzmatrix).
- Auswertung durch zwei Rechenstellen unter Verwendung verschiedener Software (BKG/Bernese Software, LGLN/GNSMART) und ggf. bewusst unterschiedlicher, aber unter den Rechenstellen abgestimmter Modellierung und Parametrisierung.
- Ermittlung des Endergebnisses aus einer fachlich plausiblen Kombination der Ergebnisse der einzelnen Rechenstellen.

2.4.3 Auswertestrategie

- Die GNSS-Analysen erfolgen auf Basis hochpräziser Bahndaten und werden im globalen Bezugsrahmen ITRF2020 primär über nationale bodenvermarktete Referenzstationen zwangsfrei gelagert. Im Ergebnis entstehen Koordinaten und Normalgleichungsmatrizen im SINEX-Format.
- Die 1 Hz-Messdaten werden noch im Feld direkt nach Messungsabschluss im Rohformat an eine Rechenstelle zur Datensammlung und Konvertierung übertragen. Die zweite Rechenstelle analysiert die Daten täglich.
- Alle GNSS-Analysen erfolgen in zwei Varianten, jeweils mit unterschiedlichen Antennenkalibrierverfahren (Roboter-Feldkalibrierung, Kalibrierung in der Antennenmesskammer).
- Auswertung in drei Stufen, wobei jede davon mit unterschiedlichen Zielen verknüpft ist:
 - Netz A = Auswertung des GGP-Rahmennetzes ohne Einbeziehung der RSP
 - Netz B = Auswertung des GGP-Rahmennetzes unter Einbeziehung der ausgewählten (i. d. R. bodenvermarkter) RSP
 - Netz C = Auswertung des GGP-Rahmennetzes unter Einbeziehung aller RSP
- Alle o. g. Netze (Teillösungen/Stufen) werden finalisiert, d. h. als Kombinationen der Ergebnisse der Rechenstellen auf Normalgleichungsebene erzeugt. Die Lagerung erfolgt in jeder Stufe im ITRF2020.
- Das Ergebnis von Netz B ist die neue Realisierung des ETRS89/DREF91, da in diesem Schritt die höchste Konsistenz zwischen GGP-Rahmennetz und RSN erreicht wird.

- Die Lagerung im ETRS89/DREF91 erfolgt für alle Netze (A, B und C) auf den Koordinaten der iterativ ermittelten Stabilpunkten von Netz B.
- Transformationsparameter zwischen ITRF2020 und der neuen Realisierung des ETRS89/DREF91 werden aus der Lösung von Netz B ermittelt.
- Netz A (nur GGP-Rahmennetzpunkte) liefert mit einiger Wahrscheinlichkeit, die höchste innere Genauigkeit aller dieser Netze und eignet sich deshalb als Grundlage für eine Deformationsanalyse zwischen dem 2008 erstmals gemessenen GGP-Rahmennetz und dem 2021 aktuell bestimmten. Technisch erfolgt dies durch Transformation zwischen den Netz-A-Koordinaten und den Koordinaten der GGP-Rahmennetzpunkte aus der Messung von 2008.
- Netz C liefert die Lösung für die Koordinaten der weiteren, über Netz B hinaus verwendeten, Referenzstationen, hat also den weitaus größten Umfang an auszuwertenden Punkten und Stationen. Die Koordinaten von Netz C stellen Gebrauchskoordinaten für die Nutzung im Positionierungsdienst dar.

2.5 Vorbereitung und Durchführung

Die Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Messkampagne 2021 ist ein großes Projekt des Arbeitskreises geodätischer Raumbezug mit enormer Außenwirkung. Diese Arbeiten, insbesondere aber auch die zahlreichen sehr erfolgreichen öffentlichkeitswirksamen Aktionen, können an dieser Stelle nur angedeutet werden. Sie werden in der gebotenen Ausführlichkeit nach Abschluss des Projekts auf verschiedenen einschlägigen Informationsplattformen unseres Fachs dargestellt werden.

Vorab exemplarisch ein Thema, dass in dieser Zeit nicht nur für uns Geodäten zentral wurde: die COVID-19-Pandemie. Die ursprünglich für 2020 geplante Messkampagne musste aus diesem Grund um ein Jahr verschoben werden, in der damaligen Situation die einzig mögliche, sinnvolle Entscheidung.

Ein weiteres Beispiel: Im Gegensatz zur Kampagne 2008, bei welcher an den allermeisten Tagen schönes und beständiges Frühlingswetter vorherrschte, waren die Messtrupps in der zweiten Hälfte der Kampagne 2021 teilweise mit extremen Wetterlagen konfrontiert. Aufgrund langsam ziehender Gewitter traten Sturm, Starkregen bis zum Hagel und eine hohe Anzahl von Blitzen auf. Dieses Geschehen wurde in den Feldebüchern der Messtrupps dokumentiert. Bei der Durchsicht wurde festgestellt, dass sich wetterbedingte Einträge gegenüber 2008 vervierfacht haben.

Glücklicherweise verlief die Messkampagne ohne Personenschäden und ohne größere Sachschäden am eingesetzten Equipment, dies trotz der unwägbareren pandemiebedingten Einflüsse.

3 Projektstand

3.1 Laufende Auswertungen

Die Berechnungen der Netze A und B sind bei beiden Rechenstellen abgeschlossen. In diese Arbeiten musste ein sehr hoher Aufwand gesteckt werden, um gute Ergebnisse zu erzielen. Ein hoher Aufwand ergab sich während und unmittelbar im Anschluss an die Messungen bezüglich Konvertierung, Prüfung und Aufbereitung der Messdaten (Umfang verdreifacht gegenüber 2008), aber auch bei der Modellierung und Parametrisierung. Die Software GNSMART führt eine vollständige Parametrisierung mit einer umfassenden Fehlermodellbildung im Zustandsraum durch. Die teilweise extremen Wetterbedingungen führten dazu, dass Standardoptionen nicht mehr griffen und die Dimensionierung der Modelle angepasst werden mussten. Dieses individuelle Verfahren war letztlich nur manuell machbar. Auf Seiten der Bernese-Software waren auswertungsbedingte Anpassungen nicht erforderlich. Möglicher Grund: Das Prinzip der Nutzung von Beobachtungsdifferenzen mit Eliminierung gewisser Anteile des GNSS-Fehlerhaushalts könnte in solchen Situationen eine größere Robustheit aufweisen.

Mittlerweile sind diese Anfangsschwierigkeiten überwunden, wobei die gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Verbesserungen die noch ausstehenden Schritte erleichtern werden.

Nach Kreuzvergleichen der Ergebnisse von Netz A und B beider Rechenstellen sind diese vor den weiteren Schritten zu kombinieren und sowohl im ITRF2020 als auch im ETRS89/DREF91 zu lagern. Danach können folgende Daten erzeugt werden:

- SINEX-Datei von Netz B im Datum ITRF2020,
- SINEX-Datei von Netz B im Datum ETRS89/DREF91 (neue Realisierung),
- die Transformationsparameter zwischen ITRF2020 und ETRS/DREF91 (Neue Realisierung),
- eine Liste der bodenvermarkten Referenzstationen, die das GGP-Rahmenetz künftig ergänzen werden,
- eine Liste der als Datumpunkte bestätigten stabilen GGP-Rahmennetzpunkte
- und eine Liste der als Datumpunkte künftig auszuschließenden GGP.

Netz C stellt aufgrund der großen Anzahl auszuwertender Punkte die höchsten Anforderungen an die Rechenleistung und damit verbunden die Rechenzeit dar. Wichtig ist aber, dass die in den Netzen A und B gewonnenen Erfahrungen und erzielten Verbesserungen unmittelbar genutzt werden können.

Mit dem Vorliegen der Ergebnisse in der neuen Realisierung (Netze B und C) können dann auch die Auswirkungen auf die amtlichen Koordinaten und Höhen betrachtet werden.

3.2 Ausblick

Die Auswerterinnen und Auswerter der GNSS-Messkampagne leisten Herausragendes. Sie haben bisher etliche Herausforderungen gemeistert, immer unter der Prämisse, sowohl die hochgesteckten Ziele zu erreichen, als auch den ehrgeizigen Zeitplan einzuhalten. Die Auswertung befindet sich dadurch in einem qualitativ fortgeschrittenen Stadium, auch wenn quantitativ noch viel Prozessierungsarbeit zu leisten ist. Vertragsgemäß endet die Finanzierung der beiden Rechenstellen am 31.12.2023, ihre Arbeit endet mit diesem Datum. Im kommenden Jahr wird die Projektgruppe GNSS-Messkampagne 2020 dann intensiv an der Validierung und Finalisierung der Ergebnisse und der Fertigstellung der Gesamtdokumentation arbeiten.

Danksagung

Wir bedanken uns ausdrücklich und ganz herzlich beim ehemaligen Leiter der AdV-Projektgruppe „Konzeption der GNSS-Messkampagne 2020“ Herrn Bernhard Heckmann, der einen ganz wesentlichen Anteil an der Formulierung einer tragfähigen Gesamtkonzeption geleistet hat.

Literatur

- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2016): Raumbezug 2016 – Integriert – einheitlich – amtlich. Faltblatt zur Intergeo in Hamburg, Oktober 2016.
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2017): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-AdV) Version 3.0 – Stand 16.05.2017.
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2018): Abschlussbericht der Projektgruppe „Konzeption der GNSS-Kampagne 2020“ zur 26. Tagung des Arbeitskreises Raumbezug vom 05. bis 06.06.2018 in Bremen (unveröffentlicht).
- Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (2008): Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz für das Geodätische Festpunktfeld (Festpunktvorschrift – VwVFP) – letzte Änderung am 10.12.2015. Stuttgart.

Kontakt

Hans-Georg Dick

Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, Referat 51 –
Geodätischer Raumbezug
Kriegsstraße 103, 76135 Karlsruhe

Andreas Brünner

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Referat Geodätischer
Raumbezug
Alexandrastraße 4, 80538 München

Ralf Däbel | Laura Vaßmer

Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt
Otto-von-Guericke-Straße 15, 39104 Magdeburg

Dr. Barbara Görres

Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Dezernat V (1) Navigation/Geodäsie
Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen

Björn Mehlitz

Landesamt für innere Verwaltung, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und
Katasterwesen, Fachbereich 312 Geodätische Bezugssysteme und Festpunktfelder
Lübecker Straße 289, 19059 Schwerin

Dr. Bernd Krickel

Bezirksregierung Köln, Abt.7 – Geobasis NRW, 71 Datenstandards, Raumbezug
Muffendorfer Straße 19–21, 53177 Bonn

Tetyana Romanyuk | Dr. Axel Rülke

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Referat Satellitennavigation
Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main

Werner Pape | Anette Rietdorf | André Sieland | Kerstin Westphal

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN),
Fachbereich 23 – Landesbezugssystem
Podbielskistraße 331, 30659 Hannover

Antennenspezifische Effekte – ein aktueller Überblick

Steffen Schön | Johannes Kröger | Tobias Kersten | Yannick Breva

1 Einführung

Antennen sind das erste Element der Verarbeitungskette von GNSS-Signalen. Sie bestehen aus einem Antennenelement mit unterschiedlichem Gewinn für verschiedene Elevations- und Azimutbereiche und Signalpolarisationen, einem Vorverstärker (LNA, Low Noise Amplifier) mit Bandpassfilter für einzelne GNSS-Signalfrequenzbänder. Diese Kombination steuert die Empfangssensitivität für direkte und reflektierte Signalkomponenten. Die Auswahl der geeigneten Antenne ist daher entscheidend für die erreichbare Positionierungsgüte.

Die Grundlagen zur GNSS Antennentechnologie können beispielsweise in Balanis (2016) oder speziell für GNSS-Antennen in Rao et al. (2013) oder Maqsood et al. (2017) nachgelesen werden. Neben typischen Antennenbauformen wie Microstrip Patch-Design in Kombination mit Grundplatten, 2D oder 3D Choke-Rings, Trimble's Zephir Design oder Novatel Pinwheel Design werden insbesondere im Massenmarktsegment eine Vielzahl an weiteren Bauformen entwickelt. In den letzten Jahren stechen insbesondere Helix-Antennen hervor, die in sehr kompakten RTK-Antennen-Empfängereinheiten verbaut sind. Diese können beispielsweise als Ansteckgeräte an Tablets oder Smartphones angebracht werden. Eine Vielzahl von Anwendungen im Massenmarkt nutzen die Sensorik in Smartphones selbst. Diese Entwicklung wurde befeuert durch die offenen Schnittstellen für den Zugang zu GNSS-Rohdaten von im Smartphone verbauten GNSS-Chips unter Android-Betriebssystemen und der zunehmenden Verfügbarkeit an Zweifrequenz-Multi-GNSS-Chips. Trotz dieser hohen Leistungsfähigkeit ist die Güte der Positionierung und Navigation mit Smartphones beschränkt. Ein Grund ist, dass in Smartphones keine eigenen GNSS-Empfangsantennen verbaut sind und sich das Empfangsverhalten durch die Interaktion mit der Umgebung (z. B. Person, die das Smartphone hält) ständig ändert (Darugna et al. 2020, Darugna 2021, Heßelbarth und Wanninger 2020). Für das hochautomatisierte Fahren sind die Antenneneigenschaften der auf Fahrzeugen installierten Patch-Antennen zu untersuchen, hierzu wurde von Geo++ ein Ansatz entwickelt, der eine Drehung des gesamten Fahrzeugs vorsieht, vgl. Wübbena et al. (2022).

Dieser Artikel soll einen kurzen Überblick über antennenspezifische Effekte und Korrekturen liefern, wie sie in der Geodäsie klassisch verwendet werden; aber auch neue Erkenntnisse einfließen lassen, die für zukünftige Betrachtungen wichtig sind. In Kapitel 2 wird zunächst auf antennenspezifische Korrekturen eingegangen. In Kapitel 3 wird die Rolle des Antennengewinns bei Mehrwegeeffekten betrachtet.

2 Antennenspezifische Korrekturen

2.1 Definitionen für Phasenzentrumskorrekturen

Für die hochgenaue Positionierung sind in der Geodäsie meist hochwertige Antennen im Einsatz. Gefordert ist dabei den Bezugspunkt der Messungen (Code- oder Trägerphase), der mit Azimut und Elevation sowie Sendefrequenz und GNSS-System variiert, relativ zu einem geometrisch/mechanisch zugänglichen Antennenreferenzpunkt (ARP) festzulegen. Die Definitionen und Kalibrierverfahren wurden über die letzten Jahrzehnte entwickelt und sind beispielsweise in der ANTEX-Formatbeschreibung (Rothacher und Schmidt 2010) des Internationalen GNSS Service (IGS) oder dem DVW-Merkblatt zu Antennen (Görres et al. 2018) dargelegt.

Traditionell werden für Trägerphasenbeobachtungen die Korrekturen für jede Frequenz f und jedes GNSS-System s in einen Phasenzentrumsoffsetvektor (PCO) und Phasenzentrumsvariationen (PCV) zerlegt. Der 3×1 PCO-Vektor $\mathbf{e}_{PCO_{f,s}}$ ist in einem antennenspezifischen, linkshändigen Dreibein gegeben, dessen positive z -Achse der vertikalen Symmetrieachse entspricht und die x -Achse oft in Richtung des Koaxialantennenkabelsteckers „Nordmarke“ zeigt. Der Ursprung des Koordinatensystems ist der ARP, der sich an einer mechanisch zugänglichen Stelle befindet, in der Regel der Antennenunterbau oder das 5/8-Zoll Gewinde. Einzelheiten finden sich in der sogenannte `Antenna.gra`-Datei (IGS 2023). Die Größenordnung der Werte des Phasenzentrumsoffsets hängen oft von der Dimension der Antenne ab und reichen von Werten um 15 cm für die z -Komponente für 3D Choke-Ring Antennen bis zu wenigen Zentimeter für Rover-Antennen. Die „horizontalen Komponenten“ (x -, y -Achse im Antennensystem) betragen oft nur wenige Millimeter.

Die azimut- und elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen ($PCV_{f,s}(Az, El)$) werden meist in einer 5° -Auflösung tabellarisch dargestellt und sind bei der Anwendung bilinear zu interpolieren. Gemäß IGS Spezifikationen (Rothacher und Schmidt 2010) wird die Korrektur zu

$$PCC_{f,s}(Az, El) = -\mathbf{s}^T(Az, El) \mathbf{e}_{PCO_{f,s}} + PCV_{f,s}(Az, El) \quad (1)$$

auf die Beobachtungen angebracht, wobei $s(Az, El)$ den Einheitsvektor der Sichtverbindung vom Nutzer zum jeweiligen Satelliten angibt.

Um konform mit den Produkten des IGS oder Positionierungsdiensten zu sein, ist die Antenne zu horizontieren und mit ihrer x-Achse nach Norden zu orientieren. Daher sind beispielsweise im ANTEX-Format die Antennenachsen mit Nord, Ost und Höhe, bezeichnet.

Inwieweit bei kinematischen Anwendungen für höchste Genauigkeitsanforderungen oder bei starken Plattformneigungen eine Bestimmung der Antennen- ausrichtung notwendig ist (beispielsweise mit einer Inertialmesseinheit), hängt von der Größenordnung des PCO bzw. den azimutalen Variationen der PCV ab. Letztere können bei hochwertigen Rover-Antennen oft vernachlässigt werden.

Für Multi-Frequenz Multi-GNSS Kalibrierwerte verfolgt der IGS im Moment die Strategie, dass nur ein PCC-Korrekturdatensatz pro identischer Frequenz (z. B. L1, E1, B1) für alle GNSS-Systeme angewendet werden soll. Eine Diskussion dazu und zur Rolle des Empfängers ist auch in Kröger et al. (2021a,b) enthalten. Diese Veränderung der IGS-Strategie weg von GNSS spezifischen Kalibrierwerten führt zu Veränderungen der bekannten und bereits veröffentlichten Kalibrierwerte.

2.2 Bestimmbarkeit von Phasenzentrumskorrekturen

Die numerischen Werte der Phasenzentrumskorrekturen (PCC) werden von verschiedenen Einrichtungen mit Feld- oder Kammverfahren bestimmt. In Deutschland sind dies das Institut für Erdmessung Hannover (Seeber et al. 1998, Menge 2003, Dilßner 2007, Kersten 2014, Kröger et al. 2021), GEO++ (Wübbena et al. 1996, 2019), die Senatsverwaltung Berlin, das Geodätische Institut der TU Dresden (Wanninger und Böhme 2000), sowie die Bezirksregierung Köln in Zusammenarbeit mit der Universität Bonn (Zeimetz 2010), wobei weitere Antennenmesskammern bei Forschungs- und Universitätsinstituten existieren wie an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) oder dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Caizzone et al. 2021).

Zur Bestimmung der PCC wird zunächst eine Reihenentwicklung mit Kugelfunktionen oder Polynomen angesetzt und die jeweiligen Koeffizienten aus den Messungen des Kalibriervorgangs bestimmt. Dies sind dann zunächst individuelle Kalibrierwerte, die für eine einzelne Antenne gelten. Um die Streuung innerhalb einer Baureihe abzuschätzen können, wird aus der Kalibrierung mehrerer Antennen eines Bautyps ein sogenanntes Typmittel berechnet. Die Streubreite ist leider meist nicht öffentlich zugänglich.

Die heutzutage veröffentlichten PCC Werte wurden zu größten Teilen nach dem Verfahren der absoluten Kalibrierung bestimmt. Darunter wird verstanden,

dass durch Drehung und Neigung der Antenne und Verwendung eines geeigneten Auswertansatzes, die PCC der zu testenden Antenne bei der Kalibrierung im Feldverfahren unabhängig von den PCC der dabei verwendeten Referenzantenne sind.

Es ist weiter wichtig festzuhalten, dass die PCC-Bestimmung durch die Messanordnung einen Freiheitsgrad besitzt (Kersten et al. 2022). Dies bedeutet, dass nur die Form der PCC bestimmt werden kann, aber nicht deren absolute Größe; ein in alle Richtungen konstanter Phasenversatz bleibt unbestimmbar. Dies entspricht zum Beispiel dem Term 0. Ordnung der Kugelfunktionsentwicklung. Der Grund dafür ist, dass weder in der Kammer noch im Feldverfahren absolute Distanzen auf submm-Niveau gemessen werden. Im Fall der Kammer sind die Gesamtverzögerungen der generierten synthetischen Trägerwelle nicht im Pikosekundenbereich (= mm) bekannt oder nicht zeitlich stabil. Für die Feldverfahren werden reale GNSS-Signale verwendet, die per se nur Pseudostrecken zwischen Satellit und Empfänger bestimmen. Ein Uhrfehler (d.h. ein für alle Beobachtungen konstanter Anteil) muss geschätzt oder durch Bildung von Beobachtungsdifferenzen eliminiert werden.

Schließlich wird für die Ergebnisdarstellung im ANTEX-Format eine Trennung zwischen der PCO-Up-Komponente und den PCV durchgeführt. Dies geschieht für die meisten im offiziellen IGS ANTEX Datei gegebenen Antennenkorrekturwerte durch Fixierung des PCV-Wertes im Zenit auf Null (Zero-Zenith constraint). Eine Minderheit der PCC basiert auf einer Schätzung einer Kugel mit PCO als Zentrum und die PCV als entsprechende Residuen über die gesamte Hemisphäre der Antenne oder nur über einen Teil (zero mean constraint). In den meisten Fällen verwendet die Methode Kammer diesen zweiten Ansatz. Als Folge ergeben sich selbst für identische Kalibrierergebnisse einer Antenne unterschiedliche PCO und PCV Darstellungen. Dies muss beim Vergleich von PCC unterschiedlicher Antennen oder identischer Antennen durch unterschiedliche Kalibriereinrichtungen betrachtet werden.

Aktuell wird im Rahmen der IGS Antenna working group eine Ringkalibrierung mit ausgewählten Antennen durchgeführt, die vom Institut für Erdmessung mit koordiniert wird. Ziel ist es, einen Vergleich und Leistungsstand der einzelnen internationalen Kalibriereinrichtungen zu erhalten, Kersten et al. (2023).

2.3 Vergleich von Phasenzentrumskorrekturen

Phasenzentrumskorrekturen können direkt auf Basis der im ANTEX-Format gegeben Daten verglichen werden (Beobachtungsebene). Wichtiger kann oftmals sein, den Einfluss von Unterschieden in Phasenzentrumskorrekturen auf die Parameter von Interesse (z. B. Stationskoordinaten) abzuschätzen.

Für den direkten Vergleich von Phasenzentrumskorrekturen über alle Azimut- und Elevationsbereiche haben sich folgende Vorgehensweisen und Empfehlungen herauskristallisiert (u. a. Görres et al. 2018, Kersten et al. 2022):

1. PCV und PCO sollten zusammen als PCC betrachtet werden, vgl. Gl. (1), jeweils für jede Frequenz (z. B. L1, L2 oder L5). Es ist zu beachten, dass bei der Bildung von Linearkombinationen die resultierende PCC im Allgemeinen verstärkt wird. Dies gilt insbesondere für ionosphären-freie Linearkombinationen.
2. Der Vergleich von zwei PCC-Sätzen wie z. B. PCC_p , PCC_j basiert auf der Differenz $\Delta PCC = PCC_i - PCC_j$. Diese enthält (1) potenzielle Unterschiede in den PCOs der Ausgangskorrekturen, (2) Variationen in den PCV und (3) Variationen in der Datumsdefinition oder der angewandten Strategie zur Trennung zwischen PCO und PCV, die oft nicht bekannt sind.
3. Weitere Transformation der ΔPCC wie z. B. die Zentrierung auf Null im Zenit ist nicht erforderlich; sie können die Lesbarkeit der grafischen Darstellung verbessern.
4. Neben einer grafischen Interpretation lassen sich verschiedene skalare Maße zum Vergleich der Gesamtheit der im ANTEX-Format tabellierten Korrekturen für die Antennenhemisphäre ableiten (Kersten et al. 2022). Gut geeignet sind (a) die Standardabweichung $\sigma_{\Delta PCC}$, die die durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen den PCCs beschreibt, (b) der Range $r_{\Delta PCC} = (\max\{\Delta PCC\} - \min\{\Delta PCC\})$, der den maximalen Abstand der beiden Korrekturen misst., (c) der Spread $s_{\Delta PCC} = r_{PCC_i} - r_{PCC_j}$, der den Unterschied im Wertebereich der beiden Korrekturen beschreibt sowie (d) der Korrelationskoeffizient von zwei Korrekturen, der die allgemeine Ähnlichkeit zwischen den Korrekturen misst. Eine ausführliche Diskussion der einzelnen skalaren Maße kann Kersten et al. (2022) oder Kröger et al. (2022) entnommen werden.

Da die geschätzten Parameter das Hauptinteresse bei der Analyse von GNSS-Daten sind, sollten die Auswirkungen verschiedener Korrekturen auf die geschätzten Parameter analysiert werden. Aufgrund der hohen Korrelationen zwischen ihnen sollten alle geschätzten Parameter untersucht werden, d. h. Koordinaten, Uhrfehler, troposphärische Parameter, Mehrdeutigkeiten, etc.

Das folgende Beispiel soll verschiedene Effekte illustrieren. Gegeben sind die Phasenzentrumskorrekturen als PCO und PCV, einer identischen Antenne, die nach zwei unterschiedlichen Verfahren bestimmt wurden (rote und orange Kurve in Abb. 1). Die PCC sind bis auf einen konstanten Offset von 7 mm identisch. Es werden die Auswirkung auf die Koordinaten, einen Troposphärenparameter und einem mittleren Uhrfehler in einem Simulationsprogramm für eine Tageslösung berechnet, wobei eine elevationsabhängige Gewichtung und zwei

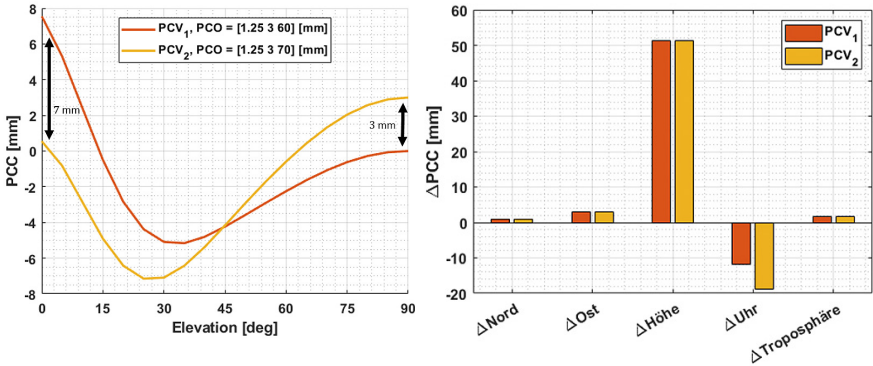


Abb. 1: Konsistente PCC und ihre Auswirkung auf die geschätzten Parameter

unterschiedliche Elevationsmasken von 3° bzw. 15° angebracht werden. Die Auswirkungen auf alle Parameter sind identisch, bis auf den Empfängeruhrfehler, der den konstanten Offset von 7 mm zwischen den beiden Pattern aufnimmt.

Die Variation der Elevationsmaske ändert aufgrund der veränderten Satellitengeometrie die numerischen Werte; aber auch hier werden für beide PCC identische Parameter geschätzt mit Ausnahme des Empfängeruhrfehlers, der die 7 mm Offset aufnimmt.

Es zeigt sich also, dass PCC, die durch eine konsistente Betrachtung von PCV und PCO entstehen (vgl. Kersten et al. 2022), zu identischen Ergebnissen im Parameterraum führen, auch wenn die PCC visuell sehr unterschiedlich aussehen mögen.

Ein weiterer Aspekt ist, dass einer gewissen Elevation nicht eindeutig ein PCV-Wert zugewiesen werden kann, da noch Anteile im Offset enthalten sein können.

Die Aussage, große PCC (PCV) Variationen in niedrigen Elevationen hätten keine Auswirkungen auf die Koordinatenlösung, weil sie durch eine Elevationsmaske oder eine Herabgewichtung nicht berücksichtigt würden, ist so nicht haltbar: Beide PCC zeigen identische Auswirkungen, auch wenn das orangene Pattern insgesamt deutlich geringere Variationen und insbesondere nicht so hohe Werte in niedrigen Elevationen zeigt.

2.4 Validierung von Phasenzentrumskorrekturen

Eine häufig gestellte Frage beim Vergleich von PCC oder dem Anbringen von PCC ist, welche Strategie zu verfolgen sei bzw. welches Kalibrierverfahren das „Beste“ sei. Zum Versuch einer Beantwortung solcher Fragen können folgende

Ansätze zur Analyse von GNSS-Beobachtungsdaten genutzt werden, wobei jeweils mindestens zwei Lösungen berechnet werden (beispielsweise mit zwei unterschiedlichen PCCs):

1. Auf Einzelpunkten können geometrie-freie Linearkombinationen gebildet werden, um die genutzten PCC einer Antenne zu validieren.
2. Auf kurzen Basislinien können für einzelnen Signale Doppeldifferenzen oder die aus GNSS-bestimmten Koordinatendifferenzen analysiert werden. In beiden Fällen werden Sollkoordinatenunterschiede eingeführt, die mit terrestrischen Methoden bestimmt wurden.

Folgende Punkte werden deutlich:

- In allen zu analysierten Beobachtungen sind mindestens zwei PCC Informationen enthalten, wie beispielsweise die PCC für L1 und L2 zur Bildung von Linearkombination oder die PCC zweier Antennen, wenn Koordinatenunterschiede oder Doppeldifferenzen betrachtet werden.
- Mehrwegeeffekte und Beobachtungsrauschen machen eine einfache Evaluation der Ergebnisse, beispielsweise durch Berechnung der Standardabweichung von Doppeldifferenzzeitreihen, schwierig, da die differenziellen PCC gegenüber Rauschen und Mehrwegeeffekten oftmals klein sind.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass Phasenzentrumskorrekturen nur schwierig validiert werden können, da Globale Satellitennavigationssysteme aufgrund des Einwegemessprinzips per Definition keine absoluten Größen bestimmen können. Aktuelle Forschung zielt daher darauf ab, geeignete Validierungsstrategien zu entwickeln.

2.5 Code-Phasenkorrekturen oder Group Delay Variationen

Antennenbedingte Verzögerungen der Code-Beobachtungen, sogenannte Code-Phasen-Variationen (CPV), wurden hauptsächlich in der Luftfahrt untersucht und werden dort oft als Group Delay Variationen (GDV) bezeichnet. Der Minimum Operation Standard (MOPS) für Avionik-Antennen enthält Grenzwerte für den maximalen L1/L5 Differenz-GDV von 1,5 ns über die Hemisphäre. Während GDV strenggenommen ein rein antennenbezogener Parameter sind (unabhängig von GNSS-Signalen), können CPV aus einer Kanalberechnung durch Gewichtung der GDV mit den entsprechenden spektralen GNSS-Signaleigenschaft erhalten werden. CPV können als eine Erweiterung der GDV auf die GNSS-Signalebene betrachtet werden.

Generell sind CPV für jene GNSS-Verarbeitungsstrategien erforderlich, bei denen Träger- und Codebeobachtungen kombiniert werden, z. B. für PPP, oder

die cycle slip bzw. Mehrdeutigkeitslösung mit der Melbourne-Wübbena (MW)-Linearkombination (Kersten und Schön 2017, Wanninger et al. 2017). CPV kann durch eine absolute Kalibrierung im Feld (Wübbena et al. 2008, Kersten 2014) bestimmt werden. Typische CPV-Werte liegen im Bereich von einem Meter für Antennen im Massenmarktsegment und wenigen Dezimetern für geodätische Antennen. Der Einfluss des Empfängers und seiner internen Tracking-Einstellungen auf das geschätzte CPV ist jedoch noch nicht untersucht worden.

Zusätzlich ist bei der Modellierung der GNSS-Beobachtungen in der Auswertesoftware zu beachten, auf welche Bezugspunkte sich die jeweilige Beobachtung bezieht. Für Trägerphasenbeobachtung ist dies das Phasenzentrum, wie es auch durch den IGS spezifiziert ist. Für die Code-Beobachtungen liegt jedoch nach Kenntnis der Autoren keine allgemeingültige Spezifikation vor und der Bezugspunkt ist in wissenschaftlichen GNSS-Softwarepaketen auch unterschiedlich implementiert. Dies kann gerade in PPP-Anwendungen zu zunächst unerwarteten Auswirkungen führen (Kersten et al. 2022), was am folgenden Beispiel kurz erläutert wird.

Wir nehmen dazu an, dass die PCC Korrekturen nur auf die Trägerphasenbeobachtungen angewandt werden und eine erste PPP-Lösung berechnet wurde. Wird nun in einer neuen Berechnung der PCO-Wert verändert, so spiegelt sich das – wie erwartet – direkt in der geschätzten Höhenkomponente im Vergleich zur Ausgangslösung wider. Allerdings entsteht eine (weitere) Inkonsistenz zwischen dem Bezugspunkt der Trägerphasen – und Code-Beobachtungen. Deren mittlerer Wert ist abhängig vom minimalen Elevationswinkel und der Veränderung des PCO-Wertes. Dies führt zu einem Offset im Uhrparameter und zu Offsets mit umgekehrten Vorzeichen in den Mehrdeutigkeiten. Die elevationsabhängigen Anteile finden sich in den Code-Residuen wieder.

3 Einfluss des Antennengewinns

3.1 Mehrwegeeffekte

Mehrwegeeffekte entstehen, wenn GNSS-Signale die Antenne auf mehreren Ausbreitungswegen erreichen und sich konstruktiv oder destruktiv überlagern, was sich in typischen zeitlichen Oszillationen der Magnitude der Mehrwegeeffekte für Code, Phase und Signalstärke äußert, vergleiche *Abb. 2*. Je näher sich der Reflektor an der Antenne befindet, desto hochfrequenter sind diese Variationen.

Die *Frequenz dieser Variation* wird zu großen Teilen durch die Veränderung der *Geometrie Satellitenantenne – Reflektor – Empfangsantenne* hervorgerufen, die durch Bewegung einzelner oder aller drei Komponenten entsteht und durch die Veränderung der Umweglänge gekennzeichnet ist.

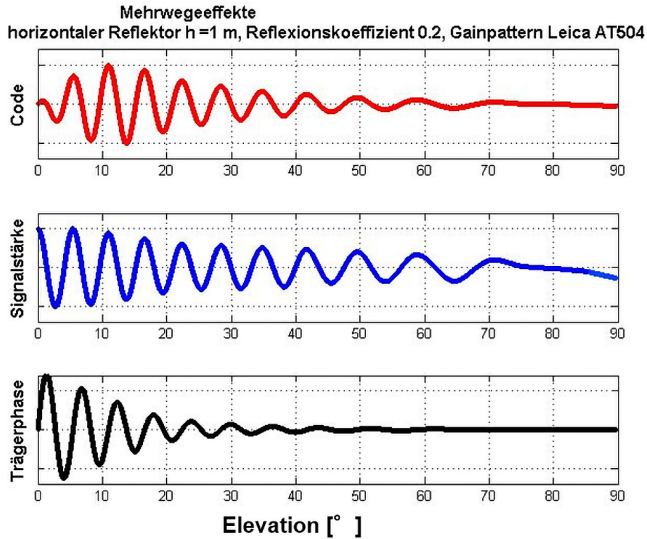


Abb. 2:
Simulation des
Mehrwegeeffekts
für C/A-Code,
L1-Trägerphase
und Signalstärke
für eine Leica
AT504 Antenne in
der Höhe von 1 m
über einem hori-
zontalen Reflektor

Die Veränderung der Geometrie kann in einem Ray-Tracing-Verfahren (Icking et al. 2022) nachverfolgt werden. Hierbei liefern die inzwischen in hoher Aktualität vorliegenden 3D-Gebäude und Oberflächenmodelle, die zum großen Teil frei zugänglich zur Verfügung gestellt werden, eine wichtige Informationsquelle. Zu beachten sind allerdings die unterschiedlichen Koordinatensysteme, bzw. Projektionen die verwendet werden und vor dem Eingang in ein Ray Tracing Verfahren berücksichtigt werden müssen, (Baasch et al. 2023). Dieses Vorgehen liefert in der Regel im Vergleich zu vollständigen kommerziellen Signalgeneratoren oder Simulatoren mit recht einfachen Mitteln eine gute Abschätzung über Reflexionen.

Für geodätische Referenzstationen mit freier Sicht sind dies typischerweise der direkte Signalweg und Umwege durch Diffraktion und Reflexionen an Objekten unterhalb des Antennenhorizonts wie an der Dachfläche eines Gebäudes auf dem die Station installiert ist. Für mobile Plattformen können die Ausbreitungen wesentlich komplizierter sein, dies ist insbesondere in der urbanen Umgebung der Fall (Schön et al. 2022), wo Signale, die in einer Straßenschlucht an Gebäuden reflektiert werden, die Antenne oberhalb des Antennenhorizonts erreichen.

Die *Amplitude der Mehrwegeeffekte* wird durch Veränderung der Signalstärke gesteuert. Um die Interaktionen besser zu verstehen, ist es hilfreich die Polarisation der GNSS-Signale zu betrachten, d. h. die Richtung der elektrischen Feldkomponente. Diese sind rechtshändig elliptisch polarisiert, d. h. der Feldstärkevektor rotiert rechtsdrehend senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Dies lässt sich

auch als eine Überlagerung eines sehr großen Anteils einer rechtshändig zirkulär polarisierten Welle (RHCP) mit einer linkshändig polarisierten Welle (LHCP) interpretieren. Die Amplitude der beiden Komponenten hängt vom jeweiligen Antennengewinn der Sendeantenne und dem Reflexionsprozess ab, der durch die Materialeigenschaften und den Auftreffwinkel beeinflusst wird. Schließlich bestimmt der Antennengewinn der Empfangsantenne in beiden Polarisierungen, wie sensitiv die Antenne für ein Signal einer gewissen Polarisation aus einer gegebenen Empfangsrichtung ist. Dadurch können beispielsweise Umwegsignale, die unterhalb des Antennenhorizontes auftreffen, deutlich abgeschwächt werden. Für die detaillierte formelmäßige Zusammenstellung sei auf Smyrnaioi et al. (2013) bzw. Smyrnaioi (2016) verwiesen. Die Mehrwegesignaturen werden im Bereich der GNSS-Reflektometrie als Signale aufgefasst um Informationen über die Umwelt abzuleiten wie Wasserhöhen und deren Variationen, vgl. *GNSS Interferometric Reflectometry: Basic Principles, Applications for Measuring Water Levels, and Software Tools* von K. Larson (2023, in diesem Band).

Für einige gängige GNSS-Antennen sind die Werte für rechts- und linkshändig zirkulär polarisierte Wellen von den Herstellern publiziert; meist nur in einem Vertikalschnitt, so dass eine azimutale Symmetrie vorausgesetzt werden muss. Alternativ wird das Elevationsprofil in 5° oder 10° Azimut-Schritten abgetastet, so dass die Hypothese der Azimutsymmetrie besser beurteilt werden kann, bzw. es deutlich wird, ob Nebenkeulen (Sidelobes) auftreten. Eine Zusammenstellung von Werten ist beispielsweise in Caizzone et al. (2021) und den darin gelisteten Referenzen gegeben.

Abb. 3 zeigt exemplarisch für ausgewählte Antennen die Gain-Pattern aus der Literatur für beide Polarisierungen in der logarithmischen Einheit dB in einem vertikalen Schnitt (blau RHCP, rot LHCP). Ein Unterschied von 3 dB entspricht einer Veränderung um Faktor zwei. Die Zenitrichtung zeigt nach oben und der Zenitwinkel wird außen im Vertikalschnitt gezählt. In Zenitrichtung ist der Antennengewinn für RHCP-Signale (blau) am größten und nimmt über den

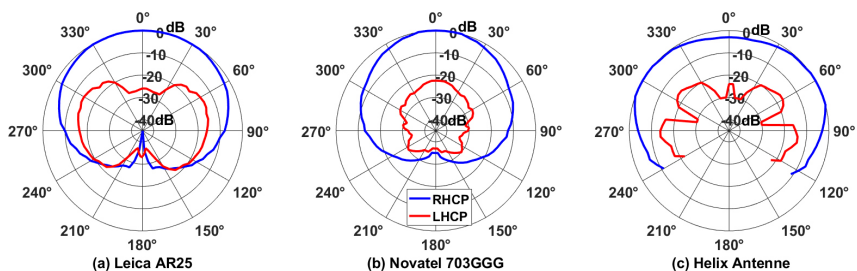


Abb. 3: Darstellung der Antennengewinnpattern für die beiden Polarisierungen (blau RHCP, rot LHCP) für drei ausgewählte Antennenbautypen

Horizont zur Antennenrückseite um bis zu einem Faktor 1000 = 30 dB ab. Der Gewinn für die LHCP-Signalkomponente (rot) ist alle Richtungen kleiner als der RHCP-Anteil. Aus dem Verhältnis des Gains in beiden Polarisierungen für eine Raumrichtung lassen sich Aussagen zur Sensitivität der Antenne für Mehrwegesignale tätigen. Wird angenommen, das Umwegesignal sei vollständig LHCP und das direkte Signal vollständig RHCP, lassen sich diese Werte direkt ablesen. Dabei ist zu beachten, dass bei einem horizontalen Reflektor das Umwegesignal unterhalb des Antennenhorizonts auftritt und dort der LHCP-Gewinn abgelesen werden muss, während bei vertikalen Reflektoren (z. B. Hauswände) das Umwegesignal oberhalb des Antennenhorizonts ankommt. Die entsprechenden Verhältnisse zeigen, dass die Antennen sensitiver für Mehrwegeeffekte von vertikalen Reflektoren sind.

Zu beachten ist weiter, dass sich der Antennengewinn und damit die Sensitivität der Antenne für Mehrwegeeffekte durch die Installation (Pfeiler, etc.) verändert. Die Beschreibung dieses Effektes ist eine aktuelle Forschungsfrage, die beispielsweise im Rahmen des Vorhabens MAESTRO durch eine Kombination aus Kalibrierung und Simulation beantwortet werden soll.

3.2 Beobachtungsrauschen

Der Antennengewinn hat weiter einen wesentlichen Einfluss auf das Rauschen der GNSS-Beobachtungen und dessen Elevationsabhängigkeit. Die Träger zu Rauschdichte (Carrier to noise density ratio, C/N_0) lässt sich berechnen zu

$$C/N_0 = P_T + G_T + G_R - L_F - N_0 \quad (2)$$

wobei P_T die gesendete Leistung, G_T und G_R den Antennengewinn der Send- bzw. Empfangsantenne, L_F die Freiraumdämpfung und N_0 die spektrale Rauschdichte darstellt. Wird das Beobachtungsrauschen nach den vereinfachten Formeln für das thermale Rauschen der Regelschleifen im Empfänger σ_{PLL} abgeschätzt, so ergibt sich ein typischer elevationsabhängiger Verlauf:

$$\sigma_{PLL} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{BW}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0} \right)} \quad (3)$$

mit der Bandbreite der Phasenregelschleife BW , der Integrationszeit T und der jeweiligen Trägerwellenlänge λ . Dies ist die Grundlage zu einer geeigneten Beobachtungsgewichtung wie beispielsweise dem SIGMA-e Modell (Hartinger und Brunner 1999).

Danksagung

Teile der Ergebnisse wurden im Vorhaben MAESTRO in Zusammenarbeit mit dem DLR Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen erarbeitet, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird (SCHO1314/6-1).

Literatur

- Baasch, K., Icking, L., Ruwisch, F., Schön, S. (2022): Coordinate Frames and Transformations in GNSS Ray-Tracing for Autonomous Driving in Urban Areas. *Remote Sensing*, 15(1), 180. DOI: [10.3390/rs15010180](https://doi.org/10.3390/rs15010180).
- Balanis, C. A. (2016): *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Caizzone, S., Schönfeldt, M., Elmarissi, W., Circiu, M. S. (2021): Antennas as precise sensors for GNSS reference stations and high-performance PNT applications on Earth and in space. *Sensors*, 21(12), 4192. DOI: [10.3390/s21124192](https://doi.org/10.3390/s21124192).
- Darugna, F. (2021): *Improving Smartphone-Based GNSS Positioning Using State Space Augmentation Techniques*. PhD Thesis Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover, Nr. 368.
- Darugna, F., Wübbena, J. B., Wübbena, G., Schmitz, M., Schön, S., Warneke, A. (2020): Impact of robot antenna calibration on dual-frequency smartphone-based high-accuracy positioning: a case study using the Huawei Mate20X. *GPS Solut* 25, 15. DOI: [10.1007/s10291-020-01048-0](https://doi.org/10.1007/s10291-020-01048-0).
- Dilßner, F. (2007): *Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS Positionsbestimmung*. PhD Thesis, Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 271.
- Hartinger, H., Brunner, F. K. (1999): Variances of GPS phase observations: The SIGMA-e model. *GPS Solutions*, 2/4, 35–43.
- Heßelbarth, A., Wanninger, L. (2021): GNSS-Messungen mit Smartphones – Analyse der Beobachtungsdaten und cm-genaue Positionsbestimmung. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2021. 146. Jg., 189–197. DOI: [10.12902/zfv-0355-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0355-2021).
- Görres, B., Kersten, T., Schön, S., Zimmermann, F., Wanninger, L. (2018): Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen. DVW-Merkblatt 1-2018. <https://dvw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1156-beruecksichtigung-von-antennenkorrekturen-bei-gnss-anwendungen-3>.
- Icking L., Ruwisch F., Schön S. (2022): Multipath Characterization Using Ray-Tracing in Urban Trenches. In: Freymueller, J. (Ed.): *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/1345_2022_166](https://doi.org/10.1007/1345_2022_166).
- IGS (2023): <https://files.igs.org/pub/station/general/antenna.gra>.
- Kersten, T. (2014): *Bestimmung von Codephasen-Variationen bei GNSS-Empfangsantennen und deren Einfluss auf die Positionierung, Navigation und Zeitübertragung*. PhD Thesis, DGK C740. DOI: [10.15488/4003](https://doi.org/10.15488/4003).
- Kersten, T., Kröger J., Schön, S. (2023): Comparing GNSS receiver antenna patterns: methods and metrics. EUREF Symposium Gothenborg.

- Kersten, T., Kröger, J., Schön, S. (2022): Comparison concept and quality metrics for GNSS antenna calibrations – Cause and effect on regional GNSS networks. *Journal of Geodesy*, 96:48. DOI: [10.1007/s00190-022-01635-8](https://doi.org/10.1007/s00190-022-01635-8).
- Kersten, T., Schön, S. (2017): GPS-Code Phase Variations (CPV) for GNSS Receiver Antennas and Their Effect on Geodetic Parameters and Ambiguity Resolution. *Journal of Geodesy*, 91(6): 579–596. DOI: [10.1007/s00190-016-0984-8](https://doi.org/10.1007/s00190-016-0984-8).
- Kröger, J., Brevi, Y., Kersten, T., Schön, S. (2021a): Are Phase Center Corrections Identical for Identical Frequencies from Different GNSS? FIG e-Working Week 2021, Smart Surveyors for Land and Water Management – Challenges in a New Reality, Paper No. 10909, pages: 15.
- Kröger, J., Kersten, T., Brevi, Y., Schön, S. (2021b): Multi-frequency multi-GNSS receiver antenna calibration at IfE: concept – calibration results – validation. *Advances in Space Research (ASR)*, Volume 68(12): 4932–4947. DOI: [10.1016/j.asr.2021.01.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.029).
- Kröger, J., Kersten, T., Brevi, Y., Schön, S. (2022a): On the Potential of Image Similarity Metrics for Comparing Phase Center Corrections. In: Freymueller, J. (Ed.): *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/1345_2022_146](https://doi.org/10.1007/1345_2022_146).
- Kröger, J., Kersten, T., Brevi, Y., Brekenkamp, M., Schön, S. (2022b): Impact of Different Phase Center Correction Values on Geodetic Parameters: A Standardized Simulation Approach. *EGU General Assembly 2022*. DOI: [10.5194/egusphere-egu22-1146](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-1146).
- Maqsood, M., Gao, S., Montenbruck, O. (2017) Antennas. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems* Springer. Seiten 505-534. DOI: [10.1007/978-3-319-42928-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1).
- Menge, F. (2003): Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. PhD Thesis, *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, Nr. 247.
- Rao, B., Kunysz, W., Fante, R. L., McDonald, K. F. (2013): *GPS/GNSS Antennas*. Artech House Boston.
- Rothacher, M., Schmid, R. (2010): ANTEX: The antenna exchange format, version 1.4. Document available at igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/antex14.txt.
- Schön, S., Baasch, K.N., Icking, L., KarimiDoona, A., Lin, Q., Ruwisch, F., Schaper, A. Su, J. (2022): Towards Integrity for GNSS-based urban navigation – challenges and lessons learned. In *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1774–1781. DOI: [10.1109/IV51971.2022.9827402](https://doi.org/10.1109/IV51971.2022.9827402).
- Seeber, G., Menge, F., Völksen, C., Wübbena, G., Schmitz, M. (1998): Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects. In: Brunner, F.K. (Ed.): *Advances in Positioning and Reference Frames*. International Association of Geodesy Symposia, vol 118. Springer International Publishing.
- Smyrniotis, M., Schön, S., Liso, M. (2013): Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS. In: Jin, S. (Ed.): *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*. InTech. DOI: [10.5772/54567](https://doi.org/10.5772/54567).
- Smyrniotis, M. (2016): Carrier-phase multipath in satellite-based positioning. *Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, 322. DOI: [10.15488/8862](https://doi.org/10.15488/8862).

- Wanninger, L., Sumaya, H., Beer, S. (2017): Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. *J. Geod.* 91(9): 1099–1116. DOI: [10.1007/s00190-017-1012-3](https://doi.org/10.1007/s00190-017-1012-3).
- Wanninger, L., Böhme, J.:(2000): GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden. GPS-Antennenworkshop, Hannover.
- Wübbena, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber, G., Völksen, C. (1996): A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS–96, Kansas City, Missouri, 1205–1214.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Propp, M. (2008): Antenna group delay calibration with Geo++ Robot – extensions to code observable. IGS Analysis Workshop, June 2–6. Miami Beach, FL, USA.
- Wübbena, G. Schmitz, M., Warneke, A. (2019): Geo++ Absolute GNSS Antenna Calibration. IGS AC Workshop, GFZ Potsdam, April 15–17, 2019.
- Wübbena, J.B., Nietsch, A., Matzke, N., Wübbena, T., Wübbena, G. (2022): GNSS Antenna Calibration for Cars – Challenges and Prospects. ION GNSS+ 2022, September 19–23, 2022, Denver, Co.
- Zeimetz, P. (2010): Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor. Dissertation, DGK C682, München.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön | Johannes Kröger |
Dr.-Ing. Tobias Kersten | Yannick Brevé
Leibniz Universität Hannover, Institut für Erdmessung
Schneiderberg 50, 30167 Hannover
schoen@ife.uni-hannover.de

Störung des GNSS-Signals – Eine reale Gefahr!

Richard Blum | Barbara Görres | Brigitte Gundlich

1 Einleitung

Für die Geodäsie sind GNSS (Globale Navigationssatellitensysteme) unverzichtbar geworden. In Deutschland bilden zum einen GNSS-Messungen einen entscheidenden Bestandteil für den integrierten geodätischen Raumbezug (Bauer 2018). Zum anderen werden die amtlichen Festpunktnetze immer weiter zurückgefahren, wodurch GNSS-Messungen vielerorts das einzige valide Mittel sind, um eine Verbindung zum amtlichen geodätischen Bezugssystem herzustellen (Bauer 2018). Es wird also immer schwieriger in der Geodäsie und im Alltag auf GNSS zu verzichten.

Dabei ist der GNSS-Empfang aus den unterschiedlichsten Gründen anfällig für Störungen, von Abschattung über Ausfälle und Fehler in den Systemen bis hin zu Interferenzen durch andere Signalquellen sowie Anomalien in der Ionosphäre.

Immer wieder gibt es aber auch Meldungen über böswillige Störungen des GNSS-Signals im Zusammenhang mit örtlichen Konflikten oder mit kriminellen Aktivitäten. Dabei soll meist kritische Infrastruktur behindert oder Sicherheitssysteme umgangen werden. Grundsätzlich ist das Stören des GNSS-Empfangs verboten. Dennoch werden kleine Störsender, sogenannte PPDs (Personal Privacy Devices), auch zum vermeintlichen Schutz der eigenen Privatsphäre eingesetzt, ohne die weiterreichenden Folgen zu berücksichtigen. Die Auswirkungen von GNSS-Störungen auf kritische Infrastrukturen können dabei fatal sein, stellen aber auch immer mehr eine Gefahr für geodätische Anwendungen dar.

Bei einem sehr bekannten Vorfall aus dem Jahr 2011 wurde das neue GNSS-basierte Landeassistenzsystem des Newark Liberty Airport in den USA durch das PPD eines täglich vorbeifahrenden LKW-Fahrers gestört (Bauer 2018, Septentrio N. V. o. J.–a). Aber auch in Deutschland kommt es zu solchen Vorfällen. So berichten Stanisak et al. (2016), dass sie Anfang 2016 an einer Autobahn nahe Braunschweig in einem Zeitfenster von zwei Wochen mehrere hundert Interferenzereignisse feststellen konnten. Darunter waren bis zu acht Ereignisse am Tag, welche die Nutzbarkeit von GNSS stark beeinträchtigt haben. Aufgrund der registrierten Interferenzsignale wird dabei zumindest teilweise von beabsichtigter Störung also *Jamming* ausgegangen. Diese Ereignisse können die Arbeit

geodätischer Empfänger unterbinden, wie unter anderem Bažec et al. (2020) gezeigt haben.

Diese Erkenntnisse konnten ebenfalls in eigenen Störversuchen der Bundeswehr bestätigt werden. Die Versuche wurden unter strikten Sicherheitsvorkehrungen in Kooperation mit internationalen Partnern durchgeführt wobei auch leistungsstärkere Störsender als typische PPDs zum Einsatz kamen. Eine nähere Vorstellung von Ergebnissen aus diesen Versuchen erfolgt unter Abschnitt 3.

2 Störungen des GNSS-Signals

Die Hauptursache für die hohe Störanfälligkeit von GNSS-Signalen liegt dabei in ihrer sehr geringen Empfangssignalstärke von um die -160 dBW (Bauer 2018). Das bedeutet, dass GNSS-Signale nahe der Erdoberfläche keine größere Signalstärke besitzen als das Licht einer 50 W-Birne auf eine Entfernung von 2000 km (Humphrey 2017).

Damit ist das GNSS-Signal noch schwächer als das immer vorhandene Grundrauschen (Noise Floor), welches unter anderem durch das thermische Rauschen der Elektronik des Empfängers entsteht (Bauer 2018).

2.1 Beeinflussung durch die Systembetreiber

Oft übersehene Ursachen für Störungen sind Fehler oder Ausfälle in den Systemen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese auftreten. So sendeten GLONASS-Satelliten am 1. April 2014 bis zu zehn Stunden lang falsche Navigationsdaten und GPS-Satelliten am 26. Januar 2016 über mehrere Stunden eine um 13 Mikrosekunden falsche Zeit (Bauer 2018).

In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass bis zum 2. Mai 2000 das GPS-Signal für zivile Nutzer künstlich verschlechtert wurde (bezeichnet als *Selective Availability*). Die Systembetreiber könnten also jederzeit eine solche künstliche Verschlechterung hervorrufen.

Ein neueres Beispiel für den Einfluss der Systembetreiber sind *Flex Power* Ereignisse. So besitzen GPS-Block-IIR-M- und -IIF-Satelliten die Fähigkeit, ihre gesamte Sendeleistung variabel auf die verschiedenen Signale zu verteilen. Wie Steigenberger et al. (2019) schildern, konnte ein solches Ereignis zum Beispiel über vier Tage im April 2018 beobachtet werden: es wurde der militärische M-Code sowohl auf der L1- als auch auf der L2-Frequenz deaktiviert, um mit dieser nun zur Verfügung stehenden Leistung das P(Y)-Signal auf beiden Frequenzen zu verstärken (Steigenberger et al. 2020). Es ist auch schon zu einer Abschwächung des zivilen L1 C/A-Signals gekommen. Ein solches Ereignis konnte

zum Beispiel zwischen dem 21. und 22. Juni 2019 beobachtet werden. Bei den in Euskirchen (Monitoringstation am ZGeoBw) während dieses Zeitraums mit geodätischen Empfängern erfassten maximalen täglichen Signalstärken (C/N_0) konnte ein Anstieg von fast 10 dBHz für die militärischen P(Y)-Signale und ein Absinken von um die 3 dBHz für das C/A-Signal bei einigen Block IIR-M- und Block IIF GPS-Satelliten registriert werden. Durch die Verstärkung der Signale soll eine höhere Resistenz gegen Störungen geschaffen werden. Weitere Beobachtungen zeigen, dass diese Ereignisse sowohl global als auch regional erzeugt werden können (Steigenberger et al. 2019). Auch wenn bis jetzt noch keine Auswirkungen auf geodätische Anwendungen bekannt sind, wären diese für die Zukunft denkbar (Steigenberger et al. 2019, 2020).

2.2 Interferenz von GNSS-Signalen

Eine typische Ursache für Störungen des GNSS-Empfangs stellt die Interferenz des GNSS-Signals mit anderen elektromagnetischen Wellen dar.

Diese Interferenzen lassen sich weiter in natürliche Interferenzen und vom Menschen erzeugte Interferenzen unterteilen. Zu natürlichen Interferenzen kommt es in den meisten Fällen aufgrund von Sonneneruptionen. Dabei interferieren von der Sonne emittierte Radiowellen entweder direkt mit den GNSS-Signalen oder es kommt zu einem vermehrten Auftreten von Szintillation, aufgrund einer Erhöhung des Total Electron Content (TEC) der Ionosphäre (Humphrey 2017).

Die von Menschen erzeugte Interferenz wird auch als Funk Interferenz bezeichnet. Die Funk Interferenz lässt sich weiterhin in unbeabsichtigte Interferenz und beabsichtigte Interferenz aufteilen (Abb. 1). Zu unbeabsichtigten Interferenzen kommt es zum Beispiel durch die Signale anderer Dienste. Beispiele dafür sind die von Funkamateuren genutzten Frequenzen (1240 MHz bis 1300 MHz) oder die gepulsten Signale des in der Luftfahrt eingesetzten Distance

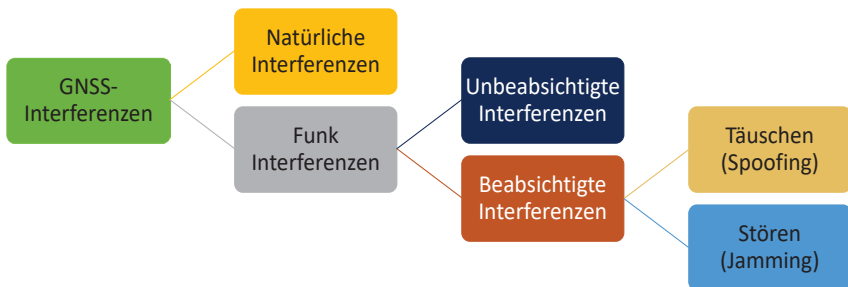


Abb. 1: Systematik von GNSS-Interferenzen

Measuring Equipments (DME) (960 MHz bis 1215 MHz) (Bauer 2018). Aber auch Interferenzen zwischen GNSS-Signalen gehören dazu. Ebenfalls gehören Fehler aufgrund von Mehrwegeausbreitung zur Kategorie der unbeabsichtigten Interferenzen.

Gegen solche unbeabsichtigten Interferenzen sind aufgrund der bekannten Signale noch relativ einfache Gegenmaßnahmen möglich, wie zum Beispiel spezielle Filtertechniken. Dies ist bei beabsichtigten Interferenzen komplizierter.

Im Allgemeinen wird bei beabsichtigter Interferenz weiter zwischen zwei Varianten unterschieden. Wird der GNSS-Empfang blockiert oder beeinträchtigt, so wird von Stören oder *Jamming* gesprochen. Einen besonderen Fall der beabsichtigten Störung stellt das *Täuschen* dar, das gemeinhin auch als *Spoofing* bezeichnet wird. Hier wird dem Nutzer eine fehlerhafte oder vollkommen falsche Position vorgegaukelt. Auf die beiden Varianten der beabsichtigten Interferenz soll im Weiteren unter Abschnitt 2.3 und 2.4 genauer eingegangen werden.

2.3 Stören (Jamming)

Als *Jamming* wird das mutwillige Beeinträchtigen oder sogar vollständige Blockieren des GNSS-Empfangs durch Interferenzsignale bezeichnet.

In den letzten Jahren gibt es immer wieder Medienberichte über Vorfälle von böswilligen GNSS-Störungen. Das bereits angeführte Beispiel vom Newark Liberty Airport in den USA ist dabei wohl eines der bekanntesten. Dass es insbesondere auch an Straßen immer wieder zu böswilligen Störungen kommt, haben unter anderem die Projekte DETECTOR und STRIKE3 der Europäischen GNSS Agency (GSA) gezeigt (GSA o. J., EUSPA 2014, 2018). Es kommt aber auch zu großräumigen Störungen von mehr als 24 Stunden und nicht nur in Krisengebieten, wie Goward (2023) berichtet.

Die Auswirkungen von Störsignalen auf eine GNSS-Messung variieren sehr stark abhängig von der Störleistung beziehungsweise der Entfernung zwischen Empfänger und Störsender sowie den eingesetzten Signaltypen des Störers. Allgemein lässt sich festhalten, dass bei großem Abstand von Störsender und GNSS-Empfängern sowie einer geringen Störleistung, kaum bis keinerlei Beeinträchtigungen erfolgen. Durch geringeren Abstand oder größerer Störleistung wird die Position immer ungenauer, bis keine Positionsbestimmung mehr möglich ist.

Einfache Störsender mit einigen Metern Reichweite können bereits von der 12 V-Steckdose aus in einem Auto betrieben werden (Konovaltsev et al. 2017, Mitch et al. 2011), während aufwendigere Sender Reichweiten von bis zu 300 km besitzen (Varfolomeeva 2018). Viele Störsender können neben GNSS zusätzlich weitere Systeme wie beispielsweise den Mobilfunk oder Radar stören.

Die häufigsten gemeldeten beabsichtigten GNSS-Signalstörungen gehen laut Konovaltsev et al. (2017) von sogenannten *Personal Privacy Devices* (PPDs) aus (Abb. 2). Diese werden, wie ihr Name schon verrät, als handliche Geräte für den Schutz der eigenen Privatsphäre beworben. Dennoch ist der Betrieb solcher Störsender in ganz Europa illegal und das aus guten Gründen (Bundesnetzagentur 2016), denn sie lassen sich gezielt für Straftaten einsetzen. So kann Bauer (2018) zufolge beispielweise der Diebstahlschutz von Baumaschinen oder die automatische Zahlung der LKW-Maut umgangen werden, welche in Deutschland GNSS gestützt erfolgt. Auch bei dem in der Einleitung erwähnten Vorfall am Newark Liberty Airport kam ein solcher Sender zum Einsatz. Obwohl diese illegal sind, ist es heute sehr einfach und auch relativ kostengünstig, diese simplen Störsender zu beschaffen. Zudem besitzen manche PPDs nach Mitch et al. (2011) bereits Reichweiten von mehreren Kilometern (ca. 8 km). Aber auch einfachste *Cigarette Lighter Jammer* (Abb. 2 links), welche durch eine 12 V-Auto-steckdose betrieben werden, können den GNSS-Empfang schon auf mehrere hundert Meter (ca. 300 m) blockieren (Mitch et al. 2011).

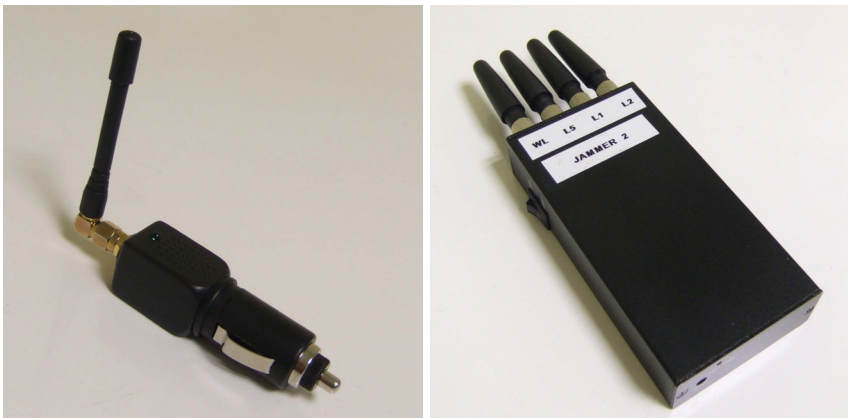


Abb. 2: Personal Privacy Devices (Bundeswehr). Links: Cigarette Lighter Jammer. Rechts: Mehrfrequenzjammer

Professionell werden GNSS-Störer besonders von Sicherheitsbehörden wie Polizei und Militär eingesetzt. Dabei reicht die Anwendung von tragbaren Jammer-Systemen, die optisch an Handfeuerwaffen erinnern, bis hin zu stationären und fahrzeuggestützten Systemen, welche großflächige Störungen verursachen können. Diese Systeme dienen zur Abwehr von GNSS-unterstützten Waffensystemen. Der Ukraine-Krieg demonstriert die hohe Relevanz von unbemannten Fluggeräten (UAV) für die moderne Kriegsführung. Dabei stellt GNSS-Jamming eine mögliche Defensivmaßnahme gegen UAVs dar. Ein weiteres in der Ukraine

eingesetztes Waffensystem ist der LKW-basierte US-amerikanische Mehrfachraketenwerfer HIMARS, welcher zur Zielerfassung teilweise auf GPS setzt. Berichten zufolge ist es den russischen Streitkräften gelungen, durch GNSS-Störangriffe die Effektivität dieses System zu begrenzen (ntv.de 2023).

Es handelt sich dabei aber nicht um ein neues Phänomen. In den letzten Jahren kam es immer wieder zu Meldungen über GNSS-Jamming durch die russischen Streitkräfte im Zusammenhang mit dem Syrienkonflikt oder bei Militärübungen an der NATO Ostflanke. Durch diese teils großräumigen Störungen sind oft auch Unbeteiligte betroffen. So gibt es immer wieder Meldungen aus der zivilen Luftfahrt (EASA 2022, Nilsen 2017, Patel 2022, Varfolomeeva 2018). Es wird aber nicht nur Russland vorgeworfen, großflächiges GNSS-Jamming zu betreiben, sondern auch Nordkorea wird für Störungen in Südkorea verantwortlich gemacht (Reuters Staff 2016).

2.3.1 Störsignaltypen

Zum Stören können unterschiedliche Signale zum Einsatz kommen.

Bei der Betrachtung von Störsignalen sind Kenntnisse aus der Signaltechnik für das Verständnis dieser Thematik hilfreich.

Um Interferenzsignale zu beschreiben, soll die Frequenzänderung des Signals betrachtet werden. Continuous Wave-Signale sind reine Sinusschwingungen mit konstanter Frequenz und Amplitude, deren Bandbreite gegen Null geht. Diese Wellen nehmen also nur eine Frequenz in Anspruch (Abb. 3, rot). Wird das Signal mit einer bestimmten Frequenz ein- und ausgeschaltet, so ist es gepulst. Die Pulslängen und -abstände können dabei variieren. Die Bandbreiten solcher gepulsten Signale können stark voneinander abweichen. Bei Chirp-Signalen (auch als Swept-Signale bezeichnet) wird die Frequenz über ein bestimmtes Intervall kontinuierlich variiert. Diese Chirp-Signale werden bevorzugt von PPDs eingesetzt.

Weitere oft verwendete Kategorisierungen werden in Abb. 3 veranschaulicht. Befindet sich der Frequenzbereich des Störsignals im GNSS-Band wird von In-Band Interferenzen gesprochen. Entsprechend werden Signale nahe den GNSS-Frequenzen als Near-Band und entferntere als Out-of-Band Interferenzen bezeichnet. Ebenfalls werden die Störsignale abhängig von ihrer Bandbreite im Vergleich zu der von GNSS-Signalen als Wideband, Matched-Spectrum oder Narrowband Signale beschrieben.

Diese Störsignale können unterschiedliche Komponenten im Empfänger angreifen und verschiedene Effekte erzeugen. Für Interessierte sei hier auf Konovaltsev et al. (2017) und Bauer (2018) verwiesen.

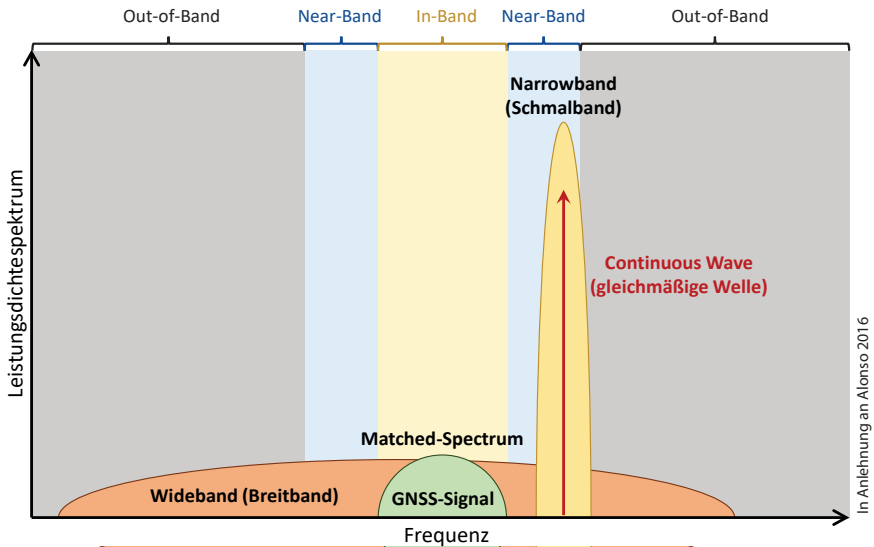


Abb. 3: Typen von Interferenzsignalen

2.4 Täuschen (Spoofing)

Weitaus komplexer als Jamming ist das *Täuschen* bzw. *Spoofen*. Dabei wird dem GNSS-Nutzer mithilfe von gefälschten Signalen eine falsche Position und/oder Zeit vorgetäuscht. Damit ein Täuschversuch unbemerkt bleibt, muss das gefälschte Signal hinsichtlich Verzögerung, Doppler und Signalstärke möglichst gut das authentische Signal imitieren. Zu diesem Zweck muss der böswillige Störer Ioannides et al. (2016) zufolge die Position des getäuschten Empfängers und des Störsenders kennen sowie die interne Laufzeitverzögerungen des Störsenders. Ein Täuschungsversuch ist also ein anspruchsvolles Unterfangen und dennoch muss mit solchen Angriffen gerechnet werden. So zeigt bereits eine kurze Recherche, dass es im Internet zahlreiche Angebote für Anleitungen, Software und die entsprechenden Sender zum Täuschen existieren.

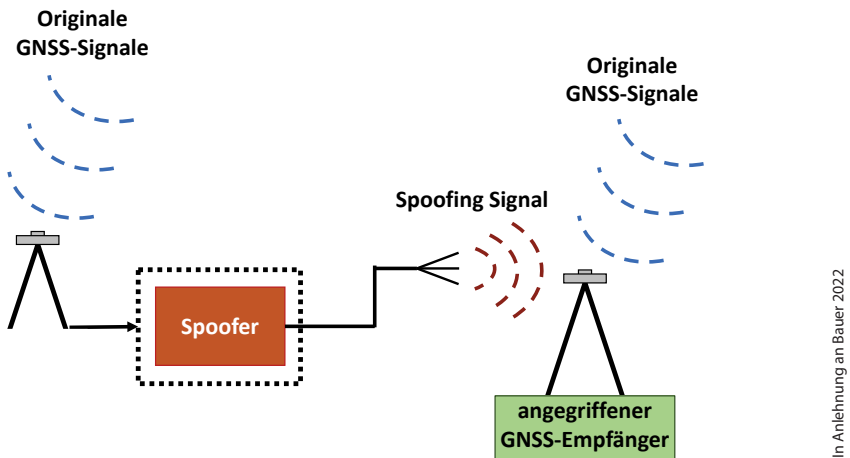
Zwei Angriffspunkte für Täuschungen bilden nach Ioannides et al. (2016) die *Navigationsnachricht* und die *Pseudorandom Noise Codes* (PRN-Codes).

Die Navigationsnachricht enthält verschiedene Informationen, welche für GNSS-Empfänger erforderlich sind, um korrekte Distanzen zu den Satelliten zu berechnen und somit auch die Empfängerposition zu ermitteln. Je nach manipuliertem Parameter der Navigationsnachricht sind verschiedene Effekte für die Positionsbestimmung, Navigation und Zeitfestlegung festzustellen (Ioannides et al. 2016). Wichtige Parameter der Navigationsnachricht sind die Ephemeriden

und Satellitenuhrfehler. Eine Manipulation dieser kann zu einer falschen Positionsbestimmung führen.

Bei einem Angriff auf den PRN-Code hingegen wird Ioannides et al. (2016) zufolge durch eine Manipulation dieses Codes ein beabsichtigter Entfernungsfehler in den entsprechenden Pseudostrecken (PSR) hervorgerufen.

Zur Durchführung eines Täuschungsversuchs können also verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen. Eine sehr einfache Art ist das *Meaconing*, wobei mithilfe eines GNSS-Repeater ein authentisches GNSS-Signal empfangen wird und zeitversetzt wieder ausgesendet wird, siehe Abb. 4 (Ioannides et al. 2016, Konovaltsev et al. 2017). Das gefälschte Signal erhält dabei eine größere Signalstärke als das originale Signal und wird dadurch vom Empfänger bevorzugt ausgewertet (Bauer 2018). Mit diesem Verfahren lassen sich sogar Verschlüsselte Signale wie der militärische GPS P(Y)-Code fälschen ohne diesen dechiffrieren zu müssen. Schilderungen zu weiteren Täuschungsverfahren geben unter anderem Ioannides et al. (2016).



In Anlehnung an Bauer 2022

Abb. 4: Prinzip von Meaconing

Ein konkretes Fallbeispiel für einen Täuschversuch stellt eine Untersuchung der Firma Regulus Cyber dar. So ist es dieser gelungen, mit einfacher Ausrüstung, wie man sie im Internet beschaffen kann, einen Tesla Model 3 zu täuschen. Es gelang, den Autopiloten des Fahrzeugs so zu manipulieren, dass ein Manöver zum Abfahren eingeleitet wurde, obwohl die Ausfahrt noch Kilometer entfernt war. Dadurch kam das Fahrzeug von der Fahrbahn ab. Weitere Informationen zu diesem Vorfall finden sich bei GPS World (2019) und Septentrio N. V. (o. J.–b). In der Vermessung kommen zunehmend autonome Systeme, zum Beispiel

UAVs zum Einsatz, die ebenfalls anfällig für solche Störungen sind. So stürzten in Hong Kong 2018 mehr als 40 UAVs bei einer Lichtshow aufgrund von Jamming ab, wodurch ein Schaden von etwa 127.000 US-Dollar entstand (Inside GNSS 2018). Auch wenn es sich in diesem Fall nicht um Täuschung gehandelt hat, können UAVs genauso durch Täuschung zum Absturz gebracht oder sogar entführt werden.

3 Störversuche der Bundeswehr

Im September 2020 und 2021 wurden an mehreren Tagen unter Beteiligung der Bundeswehr Störversuche durchgeführt. Anzumerken ist, dass diese Versuche international organisiert waren und unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen an einem abgelegenen Ort außerhalb von Deutschland durchgeführt wurden. Das Stören von GNSS-Signalen ist in der gesamten Europäischen Union sowie den meisten weiteren Ländern aus sicherheitskritischen Gründen verboten.

An diesen Versuchen hat das Dezernat Navigation und Geodäsie des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) mit eigenen GNSS-Empfängern teilgenommen. Bei diesen Empfangssystemen handelte es sich um typische geodätische Systeme. Die Störungen des GNSS-Signals wurden durch verschiedene Organisationen verursacht. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen von Jamming werden die im ZGeoBw durchgeführten Analysen herangezogen. Für die Versuche aus dem Jahr 2021 wird dabei auf die umfangreichen, im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführten Auswertungen zurückgegriffen (Blum 2022).

In Abb. 5 werden die gleichzeitig an einem Empfänger (TG07) erfassten Abweichungen im Nordwert (orange Linie), Ostwert (graue Linie) und der Höhe (blaue Linie) für reine GPS-L1-Auswertungen der Pseudostrecken während mehrerer Versuche im Jahr 2020 dargestellt. Die einzelnen Versuche sind durch EX 1 bis EX 6 gekennzeichnet. In den unterschiedlichen Versuchen wurden dabei verschiedene Störsender eingesetzt. Die eingesetzte Störleistung wird durch eine dimensionslose Zahl ausgedrückt, die hier als Störleistungsindex bezeichnet ist (gelbe Linie). Die Entfernung zwischen dem Empfänger und Störsendern betrug dabei etwa 150 Meter. Deutlich wird dabei vor allem der zunehmende Einfluss bei einer Erhöhung der Störleistung. So sind deutliche Zunahmen in den Abweichungen um bis zu 17 Meter während Versuch 1 zu erkennen (Abb. 5 EX 1). Gefährlich an diesem Fall ist besonders die relativ konstante Abweichung von der Sollkoordinate für den Störzeitraum. Solche Ereignisse können zu unbemerkten falschen Ergebnissen führen. Aber auch komplette Auswertungsverluste konnten bei steigender Störleistung während der Versuche 4, 5 und 6 registriert werden (Abb. 5 EX 4, EX 5 und EX 6).

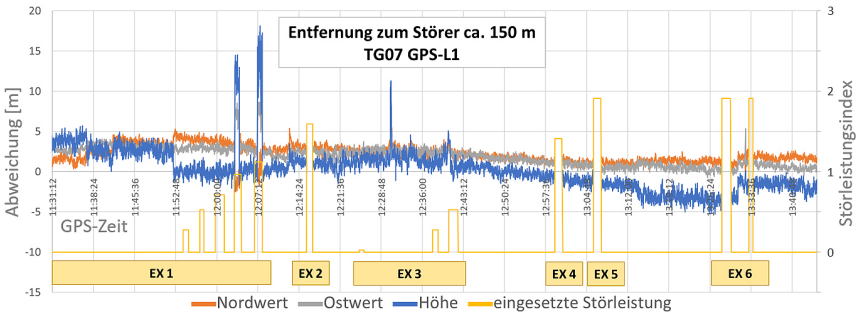


Abb. 5: Störung der GPS-L1-Frequenz bei einer Entfernung von etwa 150 Meter zum Störer

Dass solche Störungen ohne Weiteres auch über eine Distanz von zwei Kilometern erzeugt werden können, konnte bei Versuchen im Jahr 2020 beobachtet werden (Abb. 6). Interessant sind bei diesen Auswertungen der Pseudostrecken insbesondere die unterschiedlichen Auswirkungen auf den Frequenzen L1 und L2, während des Versuchs EX 9.

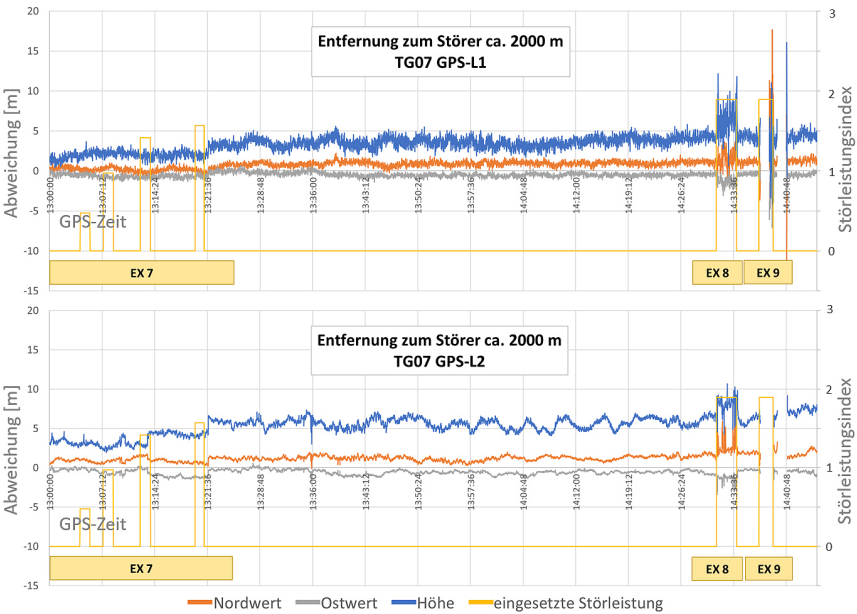


Abb. 6: Störung von GPS-L1-Frequenz (oben) und GPS-L2-Frequenz (unten) bei einer Entfernung von etwa 2000 Meter zwischen Störer und Empfänger

Eine nützliche Größe zur Identifikation von Signalinterferenzen ist die Signalstärke, welche meist durch die *Carrier-to-Noise Density Ratio*¹ (C/N_0) ausgedrückt wird. Diese setzt sich aus der Signalstärke der Trägerwelle (C [Watt]) und der Spektraldichte des Störsignals (N_0 [Watt/Hz]) zusammen. Da die Größe des Störsignals bei existenter Interferenz (I) deutlich erhöht wird, kann der effektive C/N_0 -Wert nach Ávila-Rodríguez (2008) modelliert werden:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{eff}} = \frac{C}{N_0 + I} \quad (1)$$

Die Signalqualität reduziert sich also bei vorhandener Interferenz. Der Quotient kann von den meisten Empfängern zum Beispiel im RINEX-Format ausgegeben werden. Zu beachten ist aber, dass dieser neben der Interferenz noch von weiteren Faktoren stark beeinflusst wird. So ist er insbesondere von der Satellitenelevation abhängig. Dieser Zusammenhang wird besonders in der Darstellung der C/N_0 -Werte gegen die Elevation deutlich. Solche Abbildungen wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Blum 2022) zu den Versuchen von 2021 erzeugt und sind in Abb. 7 dargestellt. Beim Abgleich der Darstellung mit Störereignissen (Abb. 7 links) und ohne Störungen (Abb. 7 rechts) wird der Einfluss von Interferenzen auf die C/N_0 -Werte deutlich. So sind in Abb. 7 (links) deutliche Ausreißer von der erwarteten Bogenform nach Oben und Unten in den C/N_0 -Werten zu erkennen.

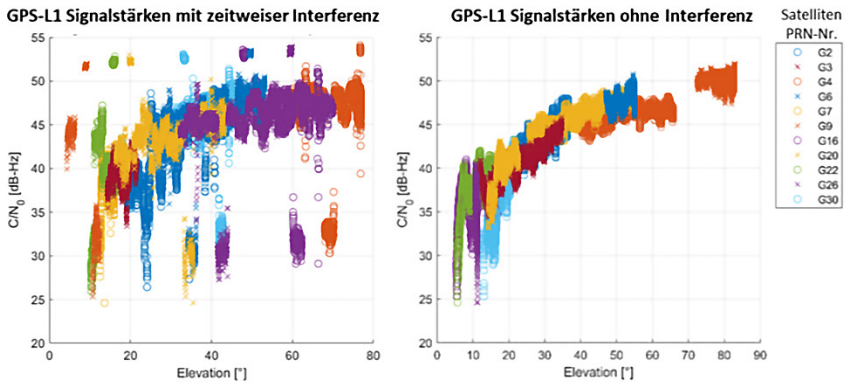
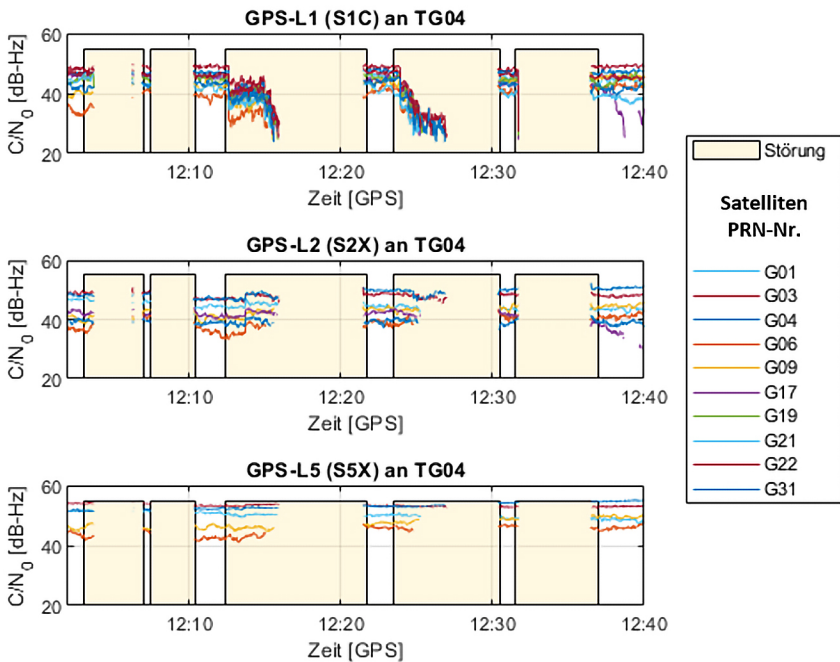


Abb. 7: Elevationsabhängigkeit von C/N_0 (Blum 2022); Links: mit zeitweiser Interferenz, Rechts: typischer Verlauf für den ungestörten Fall

1 Nicht zu verwechseln mit Signal-to-Noise Ratio (SNR) (Badke 2009).

Ebenfalls lässt sich der Wert durch manche *Spoofing*-Verfahren sogar vorgeben (Humphrey 2017). Aus diesen Gründen sollte der C/N_0 -Wert nicht alleine zur Störungsdetektion eingesetzt werden, sondern mit anderen Verfahren kombiniert werden.

Abb. 8 zeigt eine Zeitreihe von Signalqualitäten während mehrerer Störereignisse bei den Versuchen 2021 wie sie an einem typischen geodätischen GNSS-Empfänger (TG04) von mehreren GPS-Satelliten für die Frequenzen L1, L2 und L5 erfasst wurden. Dabei ist für das L1-Signal (S1C) bei mehreren Störereignissen ein Absinken der Signalqualität bis hin zu einem Verlust des Satellitensignals festzustellen (Abb. 8 oben). Dieser Verlauf ist durch die Steigerung der eingesetzten Störleistung zu erklären. Weiterhin ist interessant, dass die Signalqualitäten für L2 (S2X) und L5 (S5X) konstant bleiben (Abb. 8 Mitte und unten). Dies deutet darauf hin, dass diese Signale nicht gestört wurden. Dennoch unterbricht der Empfänger die Verfolgung des L2- und L5-Signals gleichzeitig mit der Störung des L1-Signals.



Blum 2022

Abb. 8: Signalqualitäten (C/N_0) während mehrerer Störereignisse (gelbe Balken) im zeitlichen Verlauf für die GPS-Frequenzen L1 (oben), L2 (Mitte) und L5 (unten) von mehreren Satelliten (farbliche Linien)

4 Ausblick

Böswillige Störungen des GNSS-Signals sind real und werden immer häufiger.

Es gibt bereits zahlreiche Gegenmaßnahmen zur Störungsprävention von Signalfiltern über die Sensorfusion bis hin zur Authentifizierung des Signals. Die meisten dieser Maßnahmen zur Detektion und Abwehr können aber nicht vom Anwender selber ergriffen werden, sondern sind bereits von den Herstellern in die Ausrüstung zu integrieren. Anwender können darauf achten, Mehrfrequenzempfänger mit RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) einzusetzen, da es unwahrscheinlicher ist, dass alle GNSS-Frequenzen gestört werden. Dennoch wurde in Abschnitt 3 gezeigt, dass die Störung einer Frequenz möglicherweise bereits zum Ausfall aller Signale führt. Ebenfalls können zivile Anwender in Zukunft durch *Galileo OSNMA* (Open Service Navigation Message Authentication) und *GPS Chimera* (Chips Message Robust Authentication) auf Codes mit Authentifizierungsmethoden zurückgreifen, um einen höheren Schutz vor Täuschungen zu erlangen.

Ein guter Schutz vor Störungen kann auch durch den Einsatz von *Controlled Reception Pattern Antennas* (CRPA) gewährleistet werden (Bauer 2018, Maqsood et al. 2017). Mit diesen Antennengruppen können Signale aus bestimmten Raumrichtungen eliminiert werden und so Interferenzen vermieden werden. Diese Antennen werden bereits in großen Stückzahlen beim Militär eingesetzt, finden aber auch im Zivilen besonders im Bereich der kritischen Infrastruktur immer mehr Nutzer. Die Technik ist aber bisher auf GNSS-Verfahren beschränkt, die die Pseudorange auswerten.

Sollte nach einer Messung der Verdacht aufkommen, dass eine Störung erfolgt ist, kann der Anwender selbst die unter Abschnitt 3 angesprochenen Signalqualitäten (C/N_0) auf Plausibilität prüfen.

5 Fazit

Abschließend betrachtet, bleibt die Frage: Stellen Störungen des GNSS-Empfangs eine Gefahr in der Geodäsie dar? Auf diese Frage gibt es keine eindeutige Antwort. Wie die Fallbeispiele aus Abschnitt 2 zeigen sind böswillige Störungen des GNSS-Signals real und nehmen in ihrer Anzahl weltweit zu. Weiterhin konnte von Bažec et al. (2020) sowie in den eigenen Versuchen aus Abschnitt 3 gezeigt werden, dass diese Störungen geodätische GNSS-Anwendungen behindern und sogar unterbinden können.

Auch wenn es somit immer wahrscheinlicher wird, von Störungen und auch *Jamming* sowie *Täuschungsversuchen* getroffen zu werden, geht es in der Geodäsie wohl selten um Leben und Tod. In den meisten Fällen werden Störungen

wohl zu einem höheren Zeitaufwand durch die Wiederholung von Messungen und damit zu höheren Kosten führen. Wie unter anderem gezeigt wurde, können aber auch fehlerhafte Ergebnisse eine Folge sein, was fataler ist und unbedingt einer Identifizierung bedarf.

Ebenfalls kritisch ist die starke Abhängigkeit von den Systembetreibern. Eine globale Einstellung der Dienste ist extrem unwahrscheinlich, da eine hohe wirtschaftliche Abhängigkeit von diesen besteht. Regionale Abdeckungslücken zur Verfolgung politischer Ziele scheinen allerdings durchaus realistischer. Sensibel sind insbesondere Monitoring- und Referenzstationen. Störungen sollten dort schnell auffallen, können aber zu einem Fehlalarm in Warnsystemen oder großräumigen Einschränkungen der präzisen Positionsbestimmung führen.

Auch der Blick auf die in der Vermessung immer häufiger eingesetzten UAVs zeigt eine Gefahr. So können diese am Einsatz gehindert oder in schlimmeren Fällen zum Absturz gebracht oder sogar gekapert werden.

Es ist wichtig sich der Gefahren bewusst zu sein und auf entsprechende Gegenmaßnahmen in Hard- und Software zu achten. Grundsätzlich sind wir in der Geodäsie an einem Punkt angekommen, an dem wir kaum noch auf GNSS verzichten können. Wir müssen also mit den Risiken leben, sollten uns dieser aber bewusst sein und uns soweit wie möglich davor schützen.

Danksagung

Danke an alle Angehörigen des Dezernats V (1) Navigation und Geodäsie des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) für die Erfassung und Bereitstellung der Versuchsdaten.

Literatur

- Alonso, D., Ferrara, G., Nurmi, J., Lohan, E. S. (2016): Interference Mitigation in the E5a Galileo Band: Using an Open-Source Simulator. In: Inside GNSS, July/August 2016, 55–63. www.insidegnss.com/auto/julyaug16-WP.pdf, letzter Zugriff 05/2023.
- Ávila-Rodríguez, J. A. (2008): On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation (Dissertation). Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Badke, B. (2009): GNSS Solutions: Carrier-to-Noise Density and AI for INS/GPS Integration: What is C/N0 and how is it calculated in a GNSS receiver? In: Inside GNSS, September/October 2009, 20–23. www.insidegnss.com/auto/sepoc09-gnss-sol.pdf, letzter Zugriff 04/2023.
- Bauer, M. (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 7. Aufl., Wichmann.
- Bauer, M. (2022): GNSS Störungen: Nur lästig oder auch Gefährlich? Vortrag beim Geodätischen Kolloquium an der Hafen City Universität Hamburg am 2. Juni 2022.
- Bažec, M., Dimc, F., Pavlovčič-Prešeren, P. (2020): Evaluating the Vulnerability of Several Geodetic GNSS Receivers under Chirp Signal L1/E1 Jamming. In: Sensors, 20(3), Basel, Switzerland. DOI: 10.3390/s20030814, letzter Zugriff 04/2023.

- Blum, R. (2022): Interferenz von GNSS-Signalen (Masterarbeit). Hochschule Bochum.
- Bundesnetzagentur (2016): Bundesnetzagentur geht gegen illegale Störsender vor (Pressemitteilung). Bonn. www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2016/160624_Stoersender.html, letzter Zugriff 04/2023.
- EASA (2022): Global Navigation Satellite System Outage Leading to Navigation/Surveillance Degradation (Safety Information Bulletin Operations – ATM/ANS), SIB No.: 2022-02. www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-publishes-sib-warn-intermittent-gnss-outages-near-ukraine-conflict, letzter Zugriff 04/2023.
- EUSPA (2014): Detector: Making GNSS Road Applications Even Safer. www.euspa.europa.eu/news/detector-making-gnss-road-applications-even-safer, letzter Zugriff 04/2023.
- EUSPA (2018): STRIKE3: Standardisation of GNSS Threat reporting and Receiver testing through International Knowledge Exchange, Experimentation and Exploitation. www.euspa.europa.eu/standardisation-gnss-threat-reporting-and-receiver-testing-through-international-knowledge-exchange#tab-resources, letzter Zugriff 04/2023.
- Goward, D. (2023): DHS Report on Denver Jamming – More questions than answers. In: GPS World. www.gpsworld.com/dhs-report-on-denver-jamming-more-questions-than-answers, letzter Zugriff 04/2023.
- GPS World (2019): Tesla Model S and Model 3 vulnerable to GNSS spoofing attacks. In: GPS World. www.gpsworld.com/tesla-model-s-and-model-3-vulnerable-to-gnss-spoofing-atta, letzter Zugriff 04/2023.
- GSA (o.J.): STRIKE3 Project. <https://aric-aachen.de/strike3/S3-work/index.php>, letzter Zugriff 04/2023.
- Humphrey, T. (2017): Part C GNSS Receivers and Antennas: 16. Interference. In: Montenbruck, O., Teunissen, P.J.G. (Hrsg.): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. 1. Auflage, 469–503. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- Inside GNSS (2018): Criminal Investigation Underway in GPS Jamming Incident That Crashed Drones, Caused HK\$1M in Damage. In: Inside GNSS. <https://insidegnss.com/criminal-investigation-underway-in-gps-jamming-incident-that-crashed-drones-caused-hk1m-in-damage/>, letzter Zugriff 04/2023.
- Ioannides, R. T., Pany, T., Gibbons, G. (2016): Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status, and Potential Mitigation Techniques. In: Proceedings of the IEEE, 104(6), 1174–1194. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2535898, letzter Zugriff 04/2023.
- Konovaltsev, A., Cuntz, M., Hornbostel, A. (2017): Bedrohung von GNSS durch Jamming und Spoofing. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Augsburg, 85–91. <https://geodaesie.info/dvw-schriftenreihe/schriftenreihe-archiv/schriftenreihe-band-87>.
- Maqsood, M., Gao, S., Montenbruck, O. (2017): Part C GNSS Receivers and Antennas: 17. Antennas. In: Montenbruck, O., Teunissen, P.J.G. (Hrsg.): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. 1. Auflage, 505–534. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- Mitch, R. H., Dougherty, R. C., Psiaki, M. L., Powell, S. P., O’Hanlon, B. W., Bhatti, J. A., Humphreys, T. E. (2011): Signal Characteristics of Civil GPS Jammers. Preprint from ION GNSS 2011. DOI: 10.15781/T2RR1Q38R, letzter Zugriff 04/2023.
- Nilsen, T. (2017): Electronic warfare: Norway well prepared to meet Russian jamming. In: The Independent Barents Observer. <https://thebarentsobserver.com/ru/node/3327>, letzter Zugriff 04/2023.

- ntv.de (2023): Russen stören GPS-Signale. Verlieren HIMARS für die Ukraine an Wert? ntv Nachrichtenfernsehen GmbH (Hrsg.). www.n-tv.de/politik/Verlieren-HIMARS-fuer-die-Ukraine-an-Wert-article24104392.html, letzter Zugriff 05/2023.
- Patel, T. (2022): Russia Is Jamming Commercial Planes' Satellite Navigation, French Safety Official Says. In: Bloomberg. www.bloomberg.com/news/articles/2022-04-01/russia-is-jamming-jet-navigation-french-safety-official-says?sref=IAVQtUwz, letzter Zugriff 04/2023.
- Reuters Staff (2016): South Korea tells U.N. that North Korea GPS jamming threatens boats, planes. Reuters Media (Hrsg.). www.reuters.com/article/us-northkorea-southkorea-gps-idUSKCN0X81SN, letzter Zugriff 04/2023.
- Septentrio N. V. (o. J.–a): The Chirp Jammer: a GPS hit and run. www.septentrio.com/en/learn-more/insights/chirp-jammer-gps-hit-and-run, letzter Zugriff 04/2023.
- Septentrio N. V. (o. J.–b): Why secure GPS receivers are crucial for GNSS/INS systems? Resilient GPS/GNSS receivers protect INS systems from jamming and spoofing. www.septentrio.com/en/learn-more/insights/insights/why-secure-gps-receivers-are-crucial-gnss/ins-systems, letzter Zugriff 04/2023.
- Stanisak, M., von Hünerbein, K., Bestmann, U., Lange, W. (2016): Measured GNSS Jamming Events at German Motorways. In: POSNAV 2016. Berlin. www.researchgate.net/publication/304462554_Measured_GNSS_Jamming_Events_at_German_Motorways, letzter Zugriff 04/2023.
- Steigenberger, P., Thöler, S., Montenbruck, O. (2019): Flex power on GPS Block IIR-M and IIF. In: GPS Solutions, Vol. 23, No. 8. DOI: 10.1007/s10291-018-0797-8.
- Steigenberger, P., Thöler, S., Esenbuga, Ö., Hauschild, A., Montenbruck, O. (2020): The New Flex Power Mode: From GPS IIR-M and IIF Satellites with Extended Coverage Area. In: Inside GNSS 15(3), 12–16. <https://insidegnss.com/the-new-flex-power-mode-from-gps-iir-m-and-iif-satellites-with-extended-coverage-area/>, letzter Zugriff 04/2023.
- Varfolomeeva, A. (2018): Signaling strength: Russia's real Syria success is electronic warfare against the US. In: The Defense Post. www.thedefensepost.com/2018/05/01/russia-syria-electronic-warfare, letzter Zugriff 04/2023.

Kontakt

M.Eng. Richard Blum
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen
RichardBlum@Bundeswehr.org

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

Prof. Dr.-Ing. Brigitte Gundlich
Hochschule Bochum
Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum
brigitte.gundlich@hs-bochum.de

Session 4:

Anwendungen und Praxisbeispiele

GNSS Interferometric Reflectometry: Basic Principles, Applications for Measuring Water Levels, and Software Tools

Kristine M. Larson

1 Introduction

GNSS instrumentation has been used for land surveying and geodetic positioning for more than thirty years. Carrier phase multipath has long been known to be a source of significant error for these communities. Multipath suppressing antennas are typically used by both surveyors and geodesists. There have also been extensive efforts to investigate different ways to remove multipath effects in carrier phase observables using software.

Here we examine a relatively new application for GNSS, known as GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). Rather than try to remove the effects of multipath, GNSS-IR instead deliberately uses multipath (or reflections) as an environmental sensing tool. In other words, multipath is the primary observable. Instead of carrier phase observations, GNSS-IR uses Signal to Noise Ratio (SNR) data. Although GNSS-IR was first pioneered to measure soil moisture, vegetation, and snow accumulation (Larson et al. 2008, Larson et al. 2009, Small et al. 2010), here we will focus on how the technique can be used to measure water levels (Larson et al. 2013, Larson et al. 2017). In the next section we will present representative observables and describe the basic principles used in GNSS-IR. The next section will show results for a coastal tidal site in Alaska. Finally, we describe how interested users can access software tools that are needed to apply GNSS-IR.

2 Principles of GNSS-IR

Multipath is caused by GNSS signals that deviate from the direct path between a transmitting satellite antenna and a receiving antenna. Although more complicated scenarios are possible, in Fig. 1 we present the simple example of GNSS forward scatter from a horizontal planar surface. The path of the direct signal used by the positioning and surveying communities is shown in blue, whereas the additional path taken by the reflected signal is shown in red. The angle ϵ is

The frequency of the interference pattern created by the direct and reflected GNSS signals depends on H

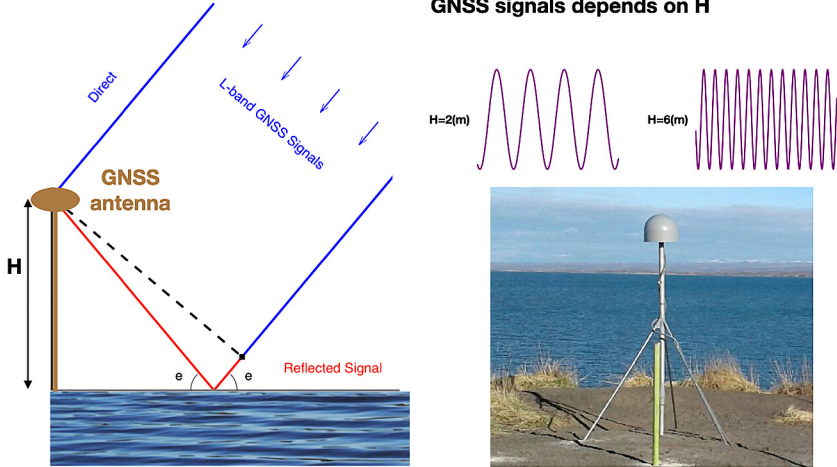


Fig. 1: Each rising or setting GNSS signal is used to estimate H – the vertical distance between the water surface and the GNSS antenna phase center. This allows the GNSS site to serve as a tide gauge defined in ITRF. The photograph shown is from a geodetic GNSS site at St Michael, Alaska, USA.

the elevation angle of the GNSS satellite above the local horizon. As a GNSS satellite rises (or sets), the reflected signal interferes with the direct signal, and that interference pattern is what we know as the multipath error. The latter has a characteristic frequency. In Fig. 1 we use purple to show the interference pattern for two different values of H , the height of the GNSS antenna phase center above the reflecting surface. The goal of GNSS-IR is to determine the frequency of these interference patterns, and thus H , as a function of time.

The dominant multipath frequency f in carrier phase observations caused by a horizontal planar reflection has been known for many years (Georgiadou and Kleusberg 1988):

$$f = \frac{2H}{\lambda} \cos(e) \frac{de}{dt} \tag{1}$$

SNR data have the same characteristic multipath frequency as carrier phase data. Axelrad et al. (2005) noted that the multipath effect in carrier phase and SNR data could be more easily modeled if the dependent observations are shown as function of sine of elevation angle rather than elevation angle or time:

$$SNR = A(e) \cos\left(2\pi \frac{2H}{\lambda} \sin(e) + \phi\right) \quad (2)$$

The amplitude term $A(e)$ depends on the roughness and dielectric constant of the reflecting surface and the antenna gain pattern. In general, the amplitude term can be modeled simply as a lower-order polynomial which is another positive feature of SNR data.

By using this functional form of the multipath equation, the dominant multipath frequency can be extracted from SNR data with a simple periodogram. Because GNSS data are not evenly sampled as a function of sine of elevation angle, the standard method used in GNSS-IR to extract the dominant multipath frequency is the Lomb Scargle periodogram. This standard methodology of using SNR data to estimate reflector heights (and thus tides) was set out ten years ago and applied to both data from a test site at Onsala, Sweden and a geodetic site at Friday Harbor, Washington in the United States (Larson et al. 2013). Since that time the Friday Harbor data have been routinely used to assess the precision and accuracy of GNSS-IR because NOAA operates a tide gauge about 300 meters from the GNSS site. For example, Larson et al. (2017) compared ten years of GPS L1 data from Friday Harbor with the NOAA tide gauge and found that while the precision of an individual reflector height retrieval was relatively poor (12 cm), the tidal coefficients agreed very well (better than 1 cm for all terms except K1 and S1). Daily and monthly averages agreed with the NOAA tide gauge at levels of 2 to 1.3 cm, respectively.

3 Results from GNSS-IR

We will demonstrate how GNSS-IR works by using data from St Michael, Alaska (station name is at01), the site shown in Fig. 1. St Michael was installed in 2018 by the Alaska Ocean Observing System (<https://aoos.org>) and Earthscope (<https://earthscope.org>) in an effort to expand access to tide gauge data in Alaska. The receiver tracks signals from multiple GNSS constellations (GPS, Galileo, Glonass); it uses a standard multipath-suppressing choke-ring antenna. Unlike many geodetic sites, modern GPS signals (L2C and L5) are tracked. One second and 15 second data are available from the Earthscope archive.

The first task in estimating water levels with GNSS-IR is to determine the site-specific azimuth/elevation angle mask you wish to use. In other words, you must determine which parts of the GNSS signals you want to keep and which you wish to discard. Unlike in positioning or surveying, where most users keep all observations above a certain elevation angle value, in GNSS-IR we must ensure that

the signals are reflecting off the surface we want to measure. Only then should you try to analyze data from the GNSS site.

We can identify the proper azimuths and elevation angles with the `gnssrefl` software, an open source python package developed for GNSS-IR applications (Larson et al. 2023). Each rising or setting GNSS satellite arc has a specific set of reflection areas known as Fresnel zones. These location and size of the Fresnel zones depends on the height of the antenna above the reflecting surface, the GNSS wavelength, the satellite elevation angle and its local azimuth.

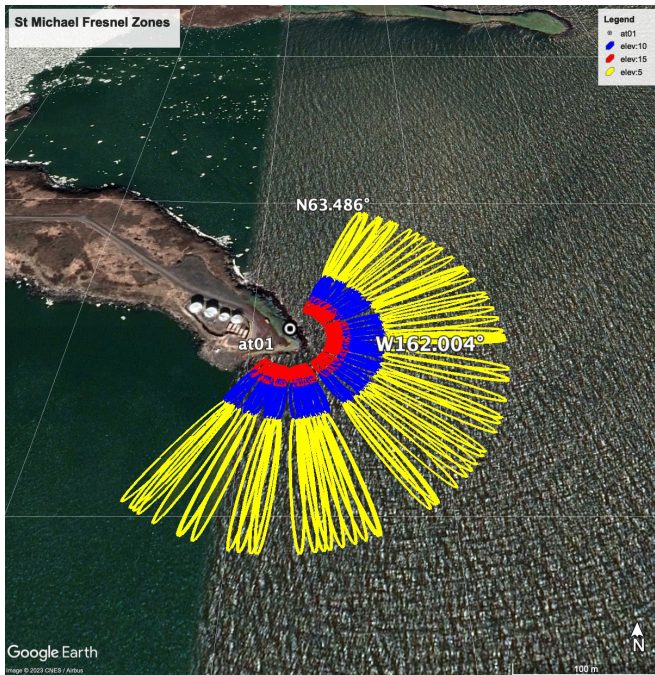


Fig. 2: Fresnel zones for each rising or setting L1 GPS signal at St Michael, Alaska. The colors represent elevation angles of 5, 10, and 15 degrees. The reflector height H used in the calculation is 12.3 meters. The location of the GNSS antenna is shown as the black and white circle.

In Fig. 2 we show the Fresnel zones for a reflector height of 12.3 meters, three different elevation angles (5, 10, and 15 degrees), and the L1 GPS frequency. Note that as elevation angles get later, the reflection zones become smaller and move closer to the GNSS antenna. If we had chosen elevation angles greater than 15 degrees, some of the signals would be contaminated by soil reflections. Using more extensive azimuth regions would have similar problems.

The second issue that must be addressed is to ensure the GNSS dataset does not violate the GNSS-IR Nyquist requirements. Using another module of the `gnssrefl` software, we calculate that the Nyquist for the standard files (15 second sampling rate) on the GPS L1 frequency is equivalent to a reflector height of

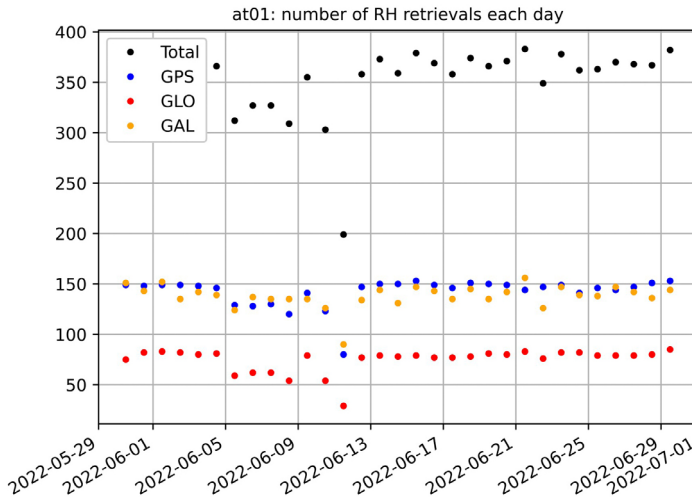


Fig. 3: Number of daily satellite arcs contributed by the GPS, Galileo, and Glonass constellations for the St Michael GNSS-IR example.

24 meters. Since the average reflector height at St Michael is 12.3 meters, the standard dataset does not violate the Nyquist. Since the reflector height Nyquist is always larger for L2/L5 than L1, we can also be sure that those frequencies are compliant.

The `gnssrefl` software can be used to analyze either personal datasets or archived datasets. It currently allows the RINEX 2.11, RINEX 3, and NMEA formats. After the GNSS data are translated, satellite azimuth and elevation angles are calculated, and the SNR data are stored on your local machine. The user must enter the azimuth and elevation angle limits chosen in the previous stage and the expected reflector height region. For St Michael, that region was restricted to reflector heights between 7 and 17 meters. Furthermore, several quality control factors should be set. In this example the estimated reflector heights were required to be 3.5 times larger than the background noise in the periodograms. Fig. 3 summarizes the signals that have been analyzed for a one-month period in 2022. We can see that the solutions are dominated by the GPS and Galileo constellations. Although GPS (L1, L2, L5) has more satellites than Galileo, the latter has more frequencies (L1, L5, L6, L7). Glonass has both fewer frequencies (L1, L2) and satellites (24) than the other two constellations and thus contributes the least number of reflector heights per day.

Fig. 4 summarizes the estimated reflector heights at St Michael that have met our quality control settings. By convention the reflector heights are plotted with a reversed y-axis so as to be consistent with tidal motion. At St Michael the tides

have a significant weather driven component. The closest NOAA tide gauge is more than 70 km away and thus it is not appropriate to compare it to the St Michael records to assess accuracy. Recall that the reason it was installed was to provide *more* tide gauges in Alaska – not as a validation site. The St Michael GNSS-IR tide gauge has had a robust operating record, with little if any data outages or equipment malfunctions since it was installed in 2018. It has also recorded multiple storm surges. Fig. 5 shows a significant storm surge recorded in the aftermath of Typhoon Merbok; over 1600 km of Alaska coastlines were overwhelmed with flooding during this event. Although the St Michael reflector heights are less precise during the storm surge, they show consistent behavior. Unlike a traditional tide gauge, which could have easily been damaged during

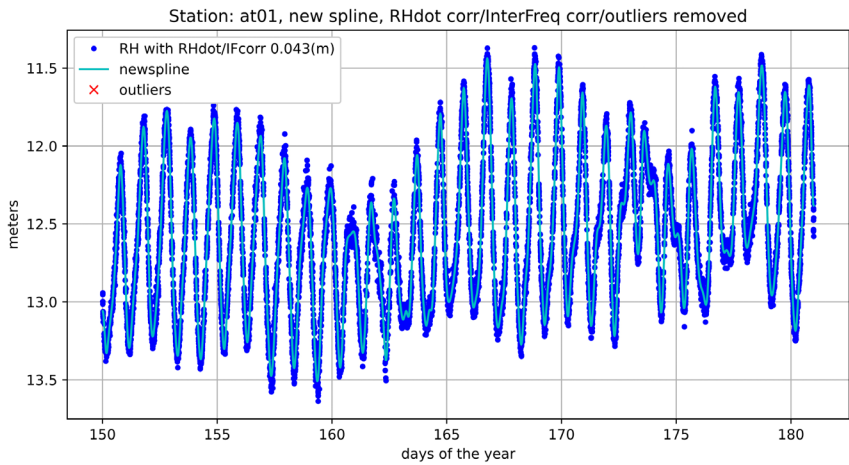


Fig. 4: St Michael reflector heights for one month in the year 2022. The cyan signal is a spline fit.

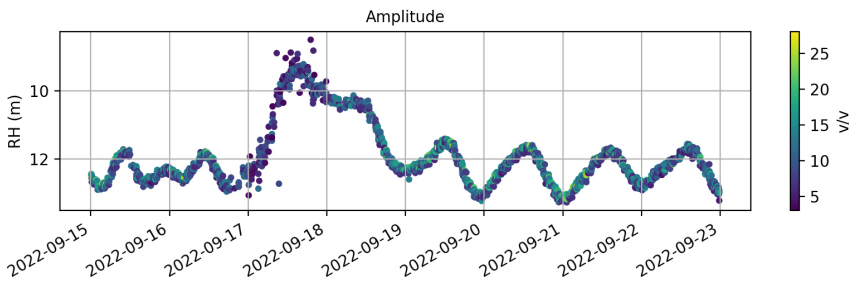


Fig. 5: St Michael reflector heights for September 15–23, 2022. The amplitudes of the periodograms used to determine reflector height (RH) are color-coded on the right.

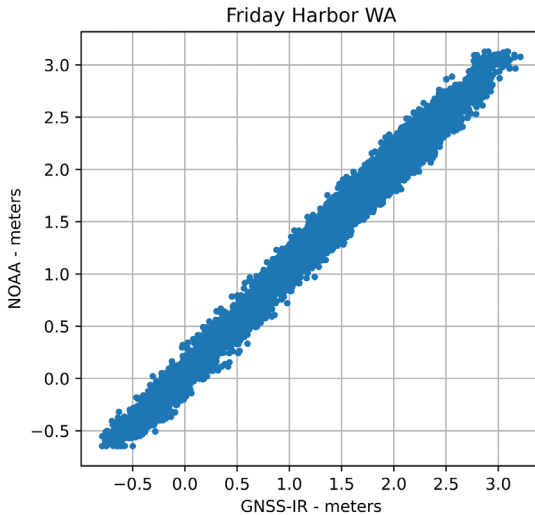


Fig. 6:
Comparison between NOAA tide gauge and GNSS-IR sensor at Friday Harbor, Washington, USA. Data were from January and February 2021.

this storm, the GNSS antenna and receiver sits safely (9 meters) above these very high waves.

To provide an assessment of accuracy, we return to the Friday Harbor GNSS site, which is now operating a multi-GNSS receiver. Using GPS, Galileo, and Glonass signals, the RMS of the difference between the NOAA and GNSS-IR sensor is 9.1 cm and the correlation between the two gauges is 0.994.

4 Access to Software

The results in the previous section were created using the `gnssrefl` software (Larson et al. 2023). This open source package is written primarily in python; it is available from github and from pypi. It can be installed directly onto your local machines for linux and mac users. For PC users or users without local python installations, dockers are available. Documentation is available via the github repository with links to videos about GNSS-IR. Short courses have been given virtually in 2021 and 2023 and are available from youtube (www.youtube.com/@funwithgps).

5 Conclusions

Here we have provided a brief overview of how GNSS-IR works and how it can be used to measure water levels. For sites that have a clear and unobstructed view

of the water surface, most comparisons have shown correlations of 0.99 with traditional tide gauge sensors. The GNSS-IR tide gauge has the advantage that it is automatically defined with respect to ITRF. This is necessary when trying to determine sea level in an absolute frame. Given that it is based on GNSS receiver technology that was developed for a highly-developed consumer market, it works well in all weather conditions. While it is inappropriate for some regions (i. e. busy harbors or areas with high surf conditions), it has the advantage that it does not have to be installed on a dock or other unstable areas.

References

- Axelrad, P., Larson, K. M., Jones, B. (2005): Use of the Correct Satellite Repeat Period to Characterize and Reduce Site-Specific Multipath Errors. In: Proc. Institute of Navigation Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, September 2005, 2638–2648.
- Georgiadou, Y., Kleusberg, A. (1988): On carrier signal multipath in relative GPS positioning. In: *Manuscripta Geodetica*, Vol. 12, 172–179.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J., Zavorotny, V. U. (2008): Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, L24405. DOI: [10.1029/2008GL036013](https://doi.org/10.1029/2008GL036013).
- Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., Nievinski, F. G. (2009): Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers? In: *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L17502. DOI: [10.1029/2009GL039430](https://doi.org/10.1029/2009GL039430).
- Larson, K. M., Löfgren, J. S., Haas, R. (2013): Coastal sea level measurements using a single geodetic receiver. In: *Advances in Space Research*, Vol. 51, 1301–1310.
- Larson, K. M., Ray, R. D., Williams, S. P. (2017): A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a traditional tide gauge. In: *J. Atmos. Ocean Tech.*, Vol 34(2). 295–305. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>.
- Larson, K. M., Lay, T., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Ye, L., Williams, S. D. P., Davis, J. L. (2021): Dynamic sea level variation from GNSS: 2020 Shumagin earthquake tsunami resonance and Hurricane Laura. In: *Geophys. Res. Lett.*, 10.1029/2020GL091378.
- Larson, K. M. (2023): gnssrefl software description. <https://github.com/kristinemlarson/gnssrefl>, last access 15/06/2023.
- Small, E. E., Larson, K. M., Braun, J. J. (2010): Sensing Vegetation Growth with GPS Reflections. In: *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, L12401. DOI: [10.1029/2010GL042951](https://doi.org/10.1029/2010GL042951).

Contact

Professor Emerita Kristine M. Larson
Universität Bonn
Kekuléstraße 39A, 53315 Bonn
kristinem.larson@gmail.com

LEO PNT als zukünftige Alternative in der globalen Satellitennavigation

Florian Kunzi

1 Einführung

Die Ursprünge der globalen Satellitennavigation gehen zurück in die 1960er Jahre, als das US-amerikanische System Transit 1963 zunächst für militärische und drei Jahre später auch für zivile Anwendungen gestartet wurde. Transit bestand während seiner über 30-jährigen Betriebsdauer zumeist aus 6 bis 10 Satelliten im niedrigen Erdorbit (Low Earth Orbit, LEO). Aufgrund der Bahnhöhe von rund 1100 km und der geringen Anzahl an Satelliten war für Nutzer am Boden maximal ein Satellit sichtbar. Für eine Positionsbestimmung musste die Dopplerverschiebung eines Satellitensignals während eines vollständigen Überflugs gemessen werden. Zusammen mit vom Satelliten ausgestrahlten Orbit- und Zeitinformationen konnte ein Nutzer seine geografische Breite und Länge auf bis zu 20 m genau bestimmen. Mit der offiziellen Inbetriebnahme von GPS im Jahr 1995 wurde Transit schlussendlich außer Dienst gestellt.

Heutzutage werden neben den vier globalen Satellitennavigationssystemen GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou auch diverse regionale Systeme wie das japanische QZSS oder das indische IRNSS betrieben. Die Konstellationen werden durch Einführung neuer Signale, Frequenzen und Satellitengenerationen kontinuierlich weiterentwickelt. Dennoch haben sich sowohl Forschung als auch Raumfahrtagenturen und Industrie in den letzten Jahren verstärkt mit der Frage auseinandergesetzt, wie der niedrige Erdorbit wieder für die Satellitennavigation genutzt werden kann. Für diese Entwicklungen zu LEO PNT (Positioning, Navigation and Timing) gibt es zwei Beweggründe: Zum einen ist im letzten Jahrzehnt unter dem Begriff „New Space“ ein neues Zeitalter in der Raumfahrt angebrochen, in dem Industrie und Wirtschaft zunehmend die Kommerzialisierung von Raumfahrtanwendungen im LEO vorantreiben. Seit dem Aufkommen von CubeSats in den 2000er Jahren werden vermehrt commercial off-the-shelf (COTS) Komponenten eingesetzt, die im Gegensatz zu raumfahrtqualifizierter und -erprobter Hardware deutlich günstiger und einfacher zu beschaffen ist. Zudem sind die Kosten für Satellitenstarts in den niedrigen Erdorbit deutlich gesunken. Dadurch ist es für Unternehmen zunehmend wirtschaftlich attraktiv geworden, kommerzielle Dienste wie Breitbandverbindungen aus dem LEO für den Massenmarkt anzubieten. Zum anderen sind die angestrebten Entwicklungen

zu LEO PNT neben kommerziellen Interessen motiviert von einer Verbesserung der Satellitennavigation in Bezug auf Resilienz und Robustheit. Die derzeitigen GNSS-Konstellationen sind bedingt durch ihre Platzierung im mittleren Erdorbit (Medium Earth Orbit, MEO) und der daraus resultierenden geringen Signalstärke auf der Erde anfällig für Störung (Jamming) und Fälschung (Spoofing) von Signalen. Aus dem LEO gesendete Signale haben das Potenzial, durch eine höhere Signalstärke und mögliche Verschlüsselung der Signale einen wichtigen Schritt in Richtung Assured PNT (A-PNT) zu gehen (Reid et al. 2020).

Der folgende Beitrag gibt eine Übersicht zum Thema LEO PNT. Im folgenden Abschnitt werden aktuelle und zukünftige Satellitenkonstellationen im LEO vorgestellt. Danach werden die Unterschiede zwischen LEO und MEO sowie daraus entstehende Vor- und Nachteile für die Satellitennavigation erläutert. Abschnitt 4 befasst sich mit vorgeschlagenen Systemarchitekturen für ein potentiell LEO PNT System. Im Anschluss werden mögliche Frequenzen und Messungen sowie Konzepte zur Orbit- und Zeitbestimmung der Satelliten besprochen.

2 Satellitenkonstellationen im niedrigen Erdorbit

Satellitenkonstellationen werden bereits seit Jahrzehnten im LEO betrieben, wie beispielsweise das zuvor beschriebene Transit-System. Mit Globalstar, Orbcomm und Iridium wurden Ende der 1990er Jahre drei unabhängige Konstellationen für Kommunikationsdienste gestartet, die jeweils aus einigen Dutzend Satelliten bestehen. In den letzten Jahren sind verschiedene Konstellationen für das LEO angekündigt worden, unter ihnen beispielsweise OneWeb, Starlink oder Kuiper. Diese sogenannten Megakonstellationen sollen aus hunderten bis tausenden Satelliten bestehen und primär globale Breitbandverbindungen als kommerzielle Dienste anbieten. Eine Übersicht verschiedener LEO-Konstellationen ist in Tab. 1 aufgeführt.

Iridium stellt seit mehr als 20 Jahren weltweite Sprach- und Datenübertragung bereit. Die Konstellation wurde zwischen 2017 und 2023 mit einer neuen Generation von 66 Iridium NEXT-Satelliten modernisiert und wird heutzutage neben Telefonie vor allem für automatisierte Machine-to-Machine (M2M) Datenverbindungen verwendet. Gleichzeitig ist Iridium die derzeit einzige Konstellation im LEO, die operationelle PNT-Dienste anbietet: Seit 2016 betreibt das Unternehmen Satelles mit der Iridium-Konstellation den Satellite Time and Location (STL) Dienst, bei dem von den Satelliten dedizierte Navigationssignale im L-Band ausgestrahlt werden (Johnson et al. 2021). Der STL-Dienst kann sowohl in Verbindung mit GNSS als auch eigenständig genutzt werden. Mit STL-Signalen und speziellen Empfängern ist dank stärkerer Signale selbst in Innenräumen ein Zeittransfer mit Genauigkeiten von unter 100 ns möglich. Da auf der Erde

Tab. 1: Ausgewählte Satellitenkonstellationen im LEO

Name	Satelliten	Höhe [km]	Inklination [°]	Dienste	Status
Transit	6–10	1200	90	PNT	Außer Dienst
Orbcomm	31	825	45	IoT, M2M	Operationell
Globalstar (2. Gen.)	24	1414	52	Telefonie, M2M	Operationell
Iridium NEXT	66	780	86,4	Telefonie, M2M, PNT	Operationell
OneWeb (Phase 1)	648	1200	87,4	Breitband	Im Aufbau
Starlink (Phase 1)	4400	540–570	53–97,6	Breitband	Im Aufbau
Kuiper (Phase 1)	578	630	51,9	Breitband	Entwicklung
GeeSpace	240	610	50	PNT	Entwicklung
Xona Pulsar	300	?	?	PNT	Entwicklung

meistens nur ein Iridium-Satellit sichtbar ist, benötigt eine Positionsbestimmung mit STL eine Konvergenzzeit von mehreren Minuten, um eine horizontale Genauigkeit von bis zu 20 m zu erreichen (Reid et al. 2021).

Neben Iridium und dem STL-Dienst befinden sich mit dem amerikanischen Xona Pulsar und dem chinesischen GeeSpace auch Konstellationen von kommerziellen Anbietern in der Entwicklung, die primär PNT-Dienste anbieten sollen. Beide Anbieter fokussieren sich insbesondere auf sicherheitskritische Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen, wie beispielsweise autonomes Fahren. Xona Pulsar soll vollständig ausgebaut aus 300 Kleinsatelliten bestehen, die eine vollständige globale Abdeckung ermöglichen (Chan 2022).

3 LEO und MEO in der Satellitennavigation

In der Einführung wurde erläutert, dass in den letzten Jahren insbesondere New Space und A-PNT die Motivation zu Entwicklungen im Bereich LEO PNT bilden. Unabhängig von diesen Beweggründen bietet der niedrige Erdbit für die Satellitennavigation grundsätzliche Unterschiede gegenüber dem MEO, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden.

3.1 Signallaufzeit

GNSS-Signale aus dem MEO müssen, je nach Konstellation und lokaler Elevation des Satelliten, eine Strecke von 20.000 bis 25.000 km zur Erde zurücklegen. Hierbei ist die Freiraumdämpfung (Free-space path loss, FSPL) die größte Verlustquelle für die Signalstärke, die infolge der räumlichen Ausbreitung des ausgesendeten Signals entsteht. Der FSPL kann beschrieben werden als

$$L_{FSPL} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \tag{1}$$

wobei r die Distanz zwischen Sender und Empfänger, λ die Wellenlänge des Signals und c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Durch den quadratischen Einfluss der Signallaufstrecke auf die Freiraumdämpfung entstehen signifikante Unterschiede zwischen LEO und MEO in Bezug auf die Signalstärke bei einem terrestrischen Empfänger. Als Beispiel kann der FSPL eines auf der Erde empfangenen Signals von einem Galileo-Satelliten in 23.233 km Höhe und einem repräsentativen LEO-Satelliten auf 700 km Bahnhöhe verglichen werden. Bei gleicher Sendeleistung der Satelliten weist das LEO-Signal bei 90° Elevation einen um 30 dB niedrigeren FSPL im Vergleich zu demselben Signal aus dem MEO auf. Entsprechend kann selbst mit niedrigerer Sendeleistung von LEO-Satelliten ein zu GNSS vergleichbares Träger-Rausch-Verhältnis (Carrier-to-noise density ratio, C/N_0) erreicht werden. Das C/N_0 beschreibt das normierte Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Trägersignals am Empfänger, unter Berücksichtigung der Sendeleistung sowie verschiedener Gewinn- und Verlustquellen, und kann beschrieben werden als (Reid et al. 2021)

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_T G_T G_R}{N_0 L_A L_R L_{FSPL}} \tag{2}$$

Die Leistung P_T und Gewinne G_T des Senders hängen von der eingesetzten Hardware im Satelliten ab, G_R und L_R sind Gewinne und Verluste der Empfängerhardware, während L_A die atmosphärischen Verluste beschreibt. Bei gleicher Send- und Empfangshardware sowie Signaleigenschaften ändert sich zwischen MEO und LEO entsprechend nur die Freiraumdämpfung. Für das vorherige Beispiel kann so bei einem 30 dB niedrigeren FSPL ein 1000-fach höheres C/N_0 für das Signal eines LEO-Satelliten erwartet werden.

Durch die potentiell höhere Signalstärke ergeben sich mit LEO PNT neue Möglichkeiten für eine Vielzahl von Anwendungen. Stärkere Signale können feste Strukturen durchdringen, und somit eine unterbrechungsfreie Navigation beispielsweise in Gebäuden, Tunneln oder Wäldern ermöglichen, wo GNSS-

Signale kaum oder gar nicht empfangen werden können. Zudem können die Energiekosten für eine Positionslösung im Vergleich zu GNSS deutlich reduziert werden. Dies ist insbesondere für Geräte interessant, deren Energiebudget limitiert ist, wie beispielsweise autonome Sensoren für das Internet-of-Things (IoT). Gleichzeitig ist ein höheres C/N_0 ein essentieller Beitrag zu A-PNT, da Angreifer komplexere und leistungsstärkere Hardware benötigen und Signalstörungen bzw. -fälschungen deutlich erschwert werden.

3.2 Winkelgeschwindigkeit der Satelliten

Nach Keplers drittem Gesetz ist die Umlaufzeit von Satelliten im LEO mit ungefähr 90 bis 120 Minuten deutlich geringer als im MEO mit 12 bis 14 Stunden. Entsprechend sind sowohl die Satellitengeschwindigkeit relativ zur Erde als auch die mittlere Winkelgeschwindigkeit deutlich höher als im MEO, und die lokalen Überflugzeiten der Satelliten werden für einen Beobachter auf der Erde von mehreren Stunden auf ungefähr 10 bis 20 Minuten verringert. Abb. 1 zeigt den direkten Überflug eines LEO-Satelliten in 1200 km Höhe, der insgesamt 20 Minuten dauert. Die relative Geschwindigkeit zwischen einem Satelliten und einem terrestrischen Beobachter ändert sich dabei im Bereich von $\pm 6,1$ km/s, mit entsprechendem Einfluss auf die Dopplerverschiebung eines ausgestrahlten Satellitensignals. Ein L1-Signal mit 1575,42 MHz von einem LEO-Satelliten in 1200 km weist bei einem solchen Überflug für einen terrestrischen Beobachter eine Dopplerverschiebung von mehr als ± 30 kHz auf. Dasselbe Signal von einem Galileo-Satelliten in 23.233 km Höhe hat weniger als ± 4 kHz Frequenzabweichung bei einer Überflughöhe von mehreren Stunden. Die vergleichsweise hohen Dopplerverschiebungen und -raten bieten die Möglichkeit, analog zu Transit oder Iridium/STL Dopplerpositionierung zu betreiben, wie in Abschnitt 5 weiter erläutert wird.

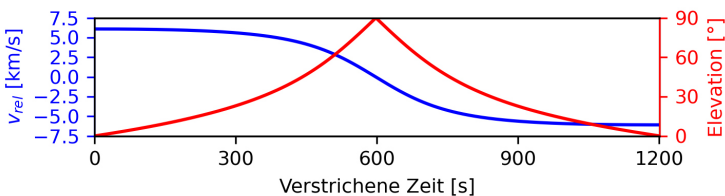


Abb. 1: Satellitengeschwindigkeit relativ zum Beobachter sowie Elevation für einen direkten Überflug eines LEO-Satelliten in 1200 km Höhe

3.3 Satellitengeometrie

Die niedrigen Bahnhöhen im LEO weisen neben den zuvor beschriebenen Vorteilen auch einen bedeutenden Nachteil gegenüber GNSS auf: Die Ausleuchtungszone, also die Fläche auf der Erde, auf der ein Satellit zu einem bestimmten Zeitpunkt sichtbar ist, ist im LEO deutlich geringer als im MEO. Als Folge müssen LEO-Konstellationen aus hunderten Satelliten bestehen, um eine vergleichbare globale Abdeckung wie GNSS zu erreichen. Dabei haben neben der Anzahl an Satelliten auch Parameter wie Orbithöhe, Anzahl der Bahnebenen und Inklination entscheidenden Einfluss auf die Sichtbarkeit der Satelliten am Boden. Die GPS-Konstellation besteht derzeit aus 31 Satelliten, welche die Erde in 20.200 km auf sechs Bahnebenen mit einer Inklination von 55° umkreisen. Galileo umfasst derzeit 23 operationelle Satelliten in 23.222 km Höhe auf drei Bahnebenen mit 56° Inklination, und soll final aus 30 Satelliten bestehen. Die Galileo-Satelliten fliegen derzeit in einer unvollständigen $56^\circ:24/3/1$ Walker-Konstellation (Walker Delta Pattern), wobei 24 die Anzahl der Satelliten, 3 die Anzahl der Bahnebenen und 1 die Phasenverschiebung zwischen Satelliten auf benachbarten Bahnebenen angibt. Die Winkel zwischen den Bahnebenen am Äquator sind identisch, für das Beispiel der Galileo-Konstellation betragen sie entsprechend 120° . Aufgrund der geringeren Ausleuchtungszone benötigen LEO-Konstellationen eine deutlich höhere Inklination, um eine globale Abdeckung erreichen zu können. Dazu werden zumeist polare Orbits mit einer Inklination von ungefähr 90° in Walker Star Konstellationen (Walker Polar Star Pattern) eingesetzt. Im Unterschied zur herkömmlichen Walker-Konstellation sind die Bahnebenen nur über

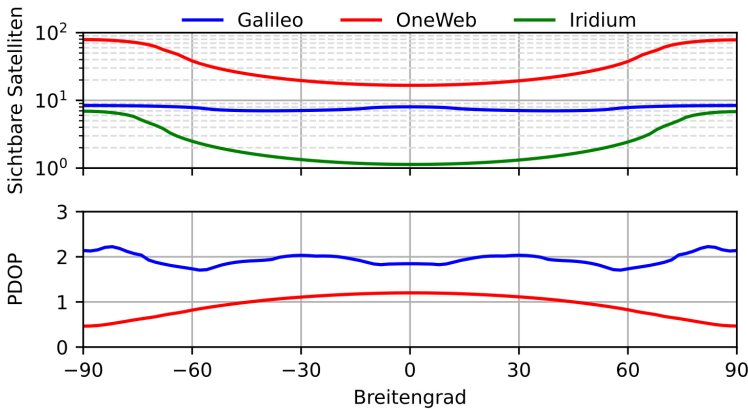


Abb. 2: Mittelwerte für PDOP (oben) und Anzahl sichtbarer Satelliten auf der Erdoberfläche mit einer Elevationsmaske von 10° in Abhängigkeit der geografischen Breite des Beobachters

180° verteilt. Beispiele für LEO-Konstellationen mit Walker Star Pattern sind Iridium und OneWeb in seiner ersten Ausbaustufe.

Neben der Anzahl an Satelliten ist die „dilution of precision“ (DOP) wichtig für eine PNT-Konstellation. Die DOP beschreibt die zu erwartende Unsicherheit in der Präzision der Navigationslösung basierend auf der räumlichen Verteilung der an der Empfängerposition sichtbaren Satelliten, beispielsweise als PDOP für die Positions- oder TDOP für die Zeitlösung. *Abb. 2* zeigt am Beispiel von drei Konstellationen, welche durchschnittliche Sichtbarkeit und PDOP zu erwarten ist. Die vergleichsweise schlechte Abdeckung von Iridium und OneWeb in den Äquatorregionen gegenüber den Polarregionen ist der hohen Inklination geschuldet. Es ist klar ersichtlich, dass Galileo, wie auch die übrigen GNSS-Konstellationen, eine homogenere Satellitengeometrie über alle Breiten bietet und für globale PNT-Dienste optimiert wurde.

4 Systemarchitekturen für LEO PNT

In den letzten Jahren wurden verschiedene Systemarchitekturen für die Bereitstellung von PNT-Diensten aus dem LEO vorgeschlagen. Basierend darauf lassen sich grundsätzlich drei verschiedene Konzepte ableiten, die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt werden.

4.1 Dedizierte Satelliten-Nutzlasten

Im Hinblick auf GNSS sind dedizierte Satellitennutzlasten für Navigationsdienste ein intuitiver Ansatz zur Realisierung einer LEO PNT-Konstellation. Wie beispielsweise von Reid et al. (2018) beschrieben, kann eine solche Nutzlast vergleichbar zu GNSS-Satelliten aus einem Oszillator als lokale Zeit- und Frequenzreferenz sowie ein Signalgenerator bestehen, um synchronisierte Navigationssignale aussenden zu können. Ein solches System kann entweder als primäre Nutzlast in speziell dafür vorgesehene Satelliten oder als Subsystem beispielsweise in Megakonstellationen integriert werden. Wie zuvor erläutert wurde, benötigt eine PNT-Konstellation im LEO hunderte von Satelliten, um eine globale Abdeckung zu ermöglichen. Da Satelliten einer LEO-Konstellation tendenziell kleiner sind als GNSS-Satelliten, wird eine PNT-Nutzlast Limitierungen in Bezug auf Parameter wie Masse, Abmessungen, Leistungsaufnahme und Kosten haben und neue Architekturen und Hardware erfordern. Während auf GNSS-Satelliten hochstabile Oszillatoren wie Rubidium- und Cäsiumuhren (GPS) oder Wasserstoffmaser (Galileo) fliegen, könnten für eine LEO PNT-Nutzlast beispielsweise Chip-Scale Atomic Clocks (CSACs) zum Einsatz kommen, die einen

Kompromiss zwischen Leistungsaufnahme, Größe und Frequenzstabilität bieten (Reid et al. 2018). Die erreichbare Leistung des gesamten PNT-Systems hängt zudem auch von der jeweiligen Konstellation und deren Satellitengeometrie ab. Dedizierte PNT-Konstellationen werden wie GNSS generell eine gute Geometrie für Navigationsdienste besitzen. Jedoch haben beispielsweise Telekommunikations-Konstellationen andere Anforderungen an die Geometrie, wie zuvor für Iridium und OneWeb gezeigt wurde, was für mitfliegende Navigationsnutzlasten und die allgemeine PNT-Systemleistung nachteilig sein kann. Ein weiteres mögliches Hindernis für die Integration einer solchen Nutzlast auf Telekommunikationssatelliten sind Interferenzen zwischen den Subsystemen für Telekommunikation und Navigation.

4.2 Fusion von Satellitenkommunikation und Navigation

Die meisten Megakonstellationen im LEO werden primär für Breitbandverbindungen entwickelt, entsprechend kann eine Integration von PNT-Diensten in solchen Konstellationen sinnvoll sein, um Kosten zu reduzieren. Neben den zuvor beschriebenen dedizierten Nutzlasten ist auch eine direkte Integration von Navigationsdiensten in eine Kommunikationsnutzlast denkbar. Iannucci und Humphreys (2022) beschreiben eine solche kooperative Architektur, bei der die Signalgenerierungseinheiten und Antennen eines Telekommunikationssatelliten auch zur Aussendung von Navigationssignalen genutzt werden. Da Megakonstellationen wie Starlink Satellitenantennen mit starker Richtwirkung und steuerbarer Hauptkeule besitzen, sind entsprechende Signale potentiell schwerer zu stören und somit ein wichtiger Schritt in Richtung A-PNT. Andererseits sind gerichtete Signale ein Nachteil für die Satellitennavigation, bei der mehrere Signale gleichzeitig empfangen werden müssen. Bei GNSS können Signale bei einer direkten Sichtverbindung zum Satelliten grundsätzlich empfangen werden. Bei Richtantennen sind jedoch nicht zwangsläufig die Signale von allen sichtbaren Satelliten empfangbar. Zudem wird für den Empfang solcher Signale eine potentiell aufwändigere Empfänger-ausrüstung benötigt, was ein entscheidender Nachteil gegenüber GNSS bzw. einer dedizierten Nutzlast für LEO PNT ist.

4.3 Navigation mit beliebigen Satelliten-Signalen

Ein weiteres Konzept für LEO PNT macht sich zunutze, dass bereits heutzutage zahlreiche Satelliten verschiedene Signale aus dem LEO senden. Mit geeigneter Empfängerhardware können beliebige Signale als sogenannte Signals of Opportunity (SoOP) verfolgt werden, wobei der Empfänger die genaue Si-

gnalstruktur nicht kennen muss. Mithilfe von SoOP lassen sich beispielsweise Trägheitsnavigationssysteme (Inertial Navigation System, INS) stützen und der Sensordrift entgegenwirken. Ein großer Vorteil des SoOP-Ansatzes ist, dass kein eigenes Weltraumsegment benötigt wird, da ausschließlich Signale bereits vorhandener Satelliten genutzt werden. Verschiedene Studien haben bereits erfolgreich demonstriert, wie sich mit SoOP von Telekommunikationskonstellationen wie beispielsweise Orbcomm oder Starlink Pseudorange- und Dopplermessungen erzeugen und in Verbindung mit einem INS nutzen lassen können (Kassas et al. 2019 und 2021). Neben der Signalverarbeitung ist eine Herausforderung bei der Nutzung von SoOP die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Ephemeriden. Wie in Abschnitt 6 weiter erläutert, gibt es keine einheitliche Quelle für Bahn- und Zeitinformationen von LEO-Satelliten, die eine vergleichbare Genauigkeit wie die Broadcast-Ephemeriden der GNSS-Konstellationen aufweist. Nicht zuletzt aus diesem Grund liegt die erreichte Positionsgenauigkeit der INS/SoOP Systeme aus den zuvor aufgeführten Studien meist bei deutlich mehr als 10 m. Um Navigation mit SoOP für Nutzer anbieten zu können, muss neben der Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Ephemeriden eine Quality of Service (QoS) Überwachung stattfinden, um die Integrität der Signale gewährleisten zu können. Zudem sind die gerichteten Signale von Megakonstellationen wie Starlink, wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, nur mit im Vergleich zu GNSS aufwändigerer Ausrüstung empfangbar.

5 Frequenzen und Messungen

Die Wahl der Frequenzen für LEO PNT hat entscheidenden Einfluss auf die Systemleistung und mögliche Anwendungsgebiete für Endnutzer. Die derzeitigen GPS- und Galileo-Signale im L-Band liegen zwischen 1176.45 (L5/E5a) und 1575.42 (L1/E1) MHz (Abb. 3) und erlauben Positionierung mit Messungen von Code und Trägerphasen. Zusätzliche Signale im L-Band aus dem LEO würden eine erhöhte Verfügbarkeit und Resilienz erzeugen, und für eine potentiell hohe Kompatibilität zwischen GNSS und LEO PNT sorgen, da vergleichbare Empfängerhardware verwendet werden kann.

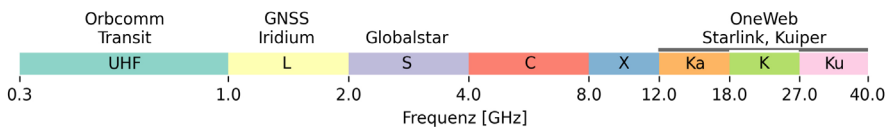


Abb. 3: Frequenzbänder verschiedener Satellitenkonstellationen

Jedoch bieten Frequenzen außerhalb des L-Bands ebenfalls hohes Potenzial für die Satellitennavigation. So sind insbesondere niedrigere Frequenzen beispielsweise im UHF-Band gut geeignet, um feste Strukturen zu durchdringen und die Navigation in Umgebungen mit eingeschränkter Satellitensichtbarkeit wie beispielsweise Innenräumen oder Großstädten zu ermöglichen. Zudem wird durch die größeren Wellenlängen eine verbesserte Mehrdeutigkeitsauflösung bei Verwendung von Trägerphasen erreicht. Große LEO-Konstellationen wie beispielsweise OneWeb oder Starlink senden auf Frequenzen oberhalb von 10 GHz mit Bandbreiten von mehreren 100 MHz, um eine hohe Datenübertragung zu ermöglichen. Solche Signale sind aufgrund ihrer Wellenlängen im Millimeterbereich deutlich anfälliger für Dämpfungen durch feste Strukturen. Andererseits sinkt der ionosphärische Einfluss auf die Signale, und Code-Messungen haben durch die hohen Bandbreiten eine im Vergleich zum L-Band signifikant höhere Genauigkeit, wodurch Trägerphasenmessungen nicht mehr zwangsläufig für eine hochpräzise Positionierung erforderlich sind.

Neben der von GNSS bekannten Navigation mit Code- und Phasenmessungen ermöglicht die zuvor erläuterte hohe Winkelgeschwindigkeit der Satelliten für Nutzer auf der Erde die Verwendung von Dopplermessungen zur Positionierung. Mit Positionierungsmethoden, die ausschließlich Dopplermessungen verwenden, ist theoretisch eine vergleichbare oder sogar höhere Genauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen GNSS-Messungen realisierbar (Psiaki 2021). Zudem kann, wie beim zuvor erwähnten STL-Service von Iridium oder dem Transit-System, theoretisch bereits mit einem Satelliten eine Position bestimmt werden. Das erhöht die Verfügbarkeit einer Positionslösung für Nutzer gegenüber GNSS, da nicht permanent mindestens vier Satelliten sichtbar sein müssen.

6 Orbit- und Zeitbestimmung

Unabhängig von Systemarchitekturen oder verwendeten Messungen sind für die Satellitennavigation die Kenntnis von Orbit und Satellitenuhren zum Messzeitpunkt für einen Nutzer essentiell. Bei den GNSS-Konstellationen generieren die jeweiligen Bodensegmente eine Systemzeitskala wie beispielsweise GPS Time (GPST) oder Galileo System Time (GST). Diese Zeitskalen sind im Nominalfall bis auf wenige Nanosekunden an die koordinierte Weltzeit (Coordinated Universal Time, UTC) gekoppelt. Die Bodensegmente bestimmen für ihre jeweiligen Satelliten Orbits und Uhrendifferenzen relativ zur Systemzeit, generieren daraus die Broadcast-Ephemeriden (BCE) und senden diese in regelmäßigen Abständen an die Satelliten. Dieses Vorgehen garantiert Nutzern der BCE eine durchgehend genaue Kenntnis der Satellitenorbits und -uhren. Über die

Uhrendifferenzen in den BCE kann die jeweilige GNSS-Systemzeit geschätzt und bis zu einer gewissen Genauigkeit und Präzision rekonstruiert werden.

Für Satelliten im Erdorbit stellt derzeit das North American Aerospace Defense Command (NORAD) die einzige einheitliche und öffentlich nutzbare Datenbasis mit sogenannten Two-Line Elements (TLEs) zur Verfügung. Allerdings können Orbits mit TLEs nur mit einer Unsicherheit von einigen hundert Metern bestimmt werden und sind für LEO PNT somit wenig geeignet. Ein bodengebundenes Prinzip der Orbit- und Zeitbestimmung analog zu GNSS stellt für eine LEO-Konstellation mit hunderten Satelliten hohe Anforderungen an das Bodenstationsnetzwerk, um jeden Satelliten kontinuierlich mit aktuellen Ephemeriden zu versorgen. LEO PNT benötigt deshalb möglicherweise neue Methoden zur Orbit- und Zeitbestimmung. Um ständige Satelliten-Uplinks zu vermeiden, können die Ephemeriden auch direkt über das Internet zur Verfügung gestellt werden, was allerdings eine zusätzliche Anforderung für Endnutzer darstellt. Alternativ können Satelliten mit Inter-Satellite Links (ISLs) ausgestattet werden und somit Daten direkt untereinander austauschen, was beispielsweise bei Starlink bereits der Fall ist. Das würde für LEO PNT den gebündelten Upload verschiedener Ephemeriden-Sets an einen einzelnen Satelliten ermöglichen, der diese wiederum per ISL im Satellitennetzwerk weiterverteilt. Zudem können ISLs zur relativen Bahnbestimmung zwischen den Satelliten genutzt werden, um die Genauigkeit der Orbitbestimmung zu verbessern.

Alternativ kann die Bahn- und Zeitbestimmung auch direkt an Bord der Satelliten durchgeführt werden. Viele Erdbeobachtungssatelliten im LEO nutzen beispielsweise das französische System DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Ein weltweites Netz aus Bodenstationen sendet Signale auf zwei verschiedenen Frequenzen aus, mit deren Dopplerverschiebung Satelliten ihren Orbit bis auf wenige Zentimeter genau bestimmen können. Das System erfordert jedoch hochstabile Oszillatoren und spezielle Empfänger an Bord der Satelliten, und ist für große Satellitenkonstellationen aufgrund von Masse, Leistungsaufnahme und Kosten ungeeignet. Eine gut skalierbare und vergleichsweise günstige Alternative zur Orbit- und Zeitbestimmung an Bord eines Satelliten ist GNSS. Bereits in den 1990er Jahren wurde GPS zur Bahnbestimmung von LEO-Satelliten genutzt (Yunck 1994). Heutzutage ist es möglich, Mehrfrequenz-Messungen von verschiedenen GNSS-Konstellationen zur präzisen Orbitbestimmung zu verwenden. Mit Zweifrequenz-GPS/Galileo Code- und Trägerphasenmessungen unter Verwendung von BCE ist so eine Genauigkeit von bis zu 10 cm in Echtzeit erreichbar (Montenbruck et al. 2022, Hauschild und Montenbruck 2021). Die Komplexität des Bodensegments kann durch die hohe Autonomie der Satelliten deutlich reduziert werden. Ein weiterer Vorteil sind die hochgenauen und eng an UTC gekoppelten GNSS-Zeitskalen, die an Bord eines LEO-Satelliten unter Verwendung von BCE mit unter 1 ns

Präzision geschätzt werden können (Kunzi und Montenbruck 2022). Der offensichtliche Nachteil bei der Nutzung von GNSS zur Bahn- und Zeitbestimmung ist die damit erzeugte Abhängigkeit des LEO PNT-Systems von GNSS. Entsprechend ist diese Lösung primär für Systeme interessant, die GNSS um zusätzliche Signale erweitern und keine eigenständigen PNT-Alternativen sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Während die GNSS-Konstellationen kontinuierlich weiterentwickelt werden und GNSS in verschiedensten Anwendungen zum Einsatz kommt, wird nach jetzigem Stand in den kommenden Jahren mit LEO PNT eine Evolution in der Satellitennavigation stattfinden. Darauf deuten wachsenden Bemühungen von Forschung und Industrie, die rasante Zunahme an Satelliten im LEO sowie angekündigte Testflüge von LEO PNT-Systemen hin. Während noch unklar ist, wie genau ein solches System aufgebaut sein wird, ist es wahrscheinlich, dass zunächst vorrangig eine Erweiterung von GNSS anstelle einer eigenständigen PNT-Alternative angestrebt wird. In weiteren Entwicklungsschritten könnten komplexere PNT-Konstellationen realisiert werden, die unabhängig von GNSS Orbit und Uhren bestimmen und eine Systemzeit definieren können. Auch eine Integration von PNT in den 5G-Standard für nicht-terrestrische Netze (NTN) wird diskutiert. Die Anwendungsgebiete von LEO PNT können vielfältig sein, wie beispielsweise Elektronikgeräte für den Massenmarkt zur Erhöhung der Signalverfügbarkeit bei reduzierter Empfängerleistung. Für anspruchsvolle Anwendungen wie Geodäsie oder Zeittransfer muss LEO PNT eine mindestens gleiche Systemleistung wie GNSS besitzen, während sicherheitskritische Anwendungen wie autonome Systeme verschlüsselte Signale benötigen.

Literatur

- Chan, B. (2022): Xona Space Systems. National PNTAB Meeting. www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2022-11/chan.pdf, letzter Zugriff 05/2023.
- Hauschild, A., Montenbruck, O. (2021): Precise real-time navigation of LEO satellites using GNSS broadcast ephemerides. *J Inst Navig* 68(2): 419–432. DOI: 10.1002/navi.416.
- Iannucci, P., Humphreys, T. (2022): Fused Low-Earth-Orbit GNSS. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*. DOI: 10.1109/TAES.2022.3180000.
- Johnson, P., Landon, T., Sommer, J. (2021): LEO PNT Performance Report: STL. *Inside GNSS Magazine*. <https://insidegnss.com/leo-pnt-performance-report-stl>, letzter Zugriff 05/2023.
- Kassas, Z., Morales, J., Khalife, J. (2019): New-age satellite-based navigation – STAN: simultaneous tracking and navigation with LEO satellite signals. *Inside GNSS Maga-*

- zine. <https://insidegnss.com/new-age-satellite-based-navigation-stan-simultaneous-tracking-and-navigation-with-leo-satellite-signals>, letzter Zugriff 05/2023.
- Kassas, Z., Neinavaie, M., Khalife, J., Khairallah, N., Kozhaya, S., Haidar-Ahmad, J., Shadram, Z. (2021): Enter LEO on the GNSS stage: Navigation with Starlink satellites. Inside GNSS Magazine. <https://insidegnss.com/enter-leo-on-the-gnss-stage-navigation-with-starlink-satellites>, letzter Zugriff 05/2023.
- Kunzi, F., Montenbruck, O. (2022): Precise Onboard Time Synchronization for LEO Satellites. *J Inst Navig* 69(3):531. DOI: [10.33012/navi.531](https://doi.org/10.33012/navi.531).
- Montenbruck, O., Kunzi, F., Hauschild, A. (2022): Performance assessment of GNSS-based real-time navigation for the Sentinel-6 spacecraft. *GPS Solut* 26, 12. DOI: [10.1007/s10291-021-01198-9](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01198-9).
- Reid, T., Neish, A., Walter, T., Enge, P. (2018): Broadband LEO Constellations for Navigation. *J Inst Navig*, 65: 205– 220. DOI: [10.1002/navi.234](https://doi.org/10.1002/navi.234).
- Reid, T., Chan, B., Goel, A., Gunning, K., Manning, B., Martin, J., Neish, A., Perkins, A., Tarantino, P. (2020): Satellite navigation for the age of autonomy. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) 2020. DOI: [10.1109/PLANS46316.2020.9109938](https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109938).
- Reid, T., Walter, T., Enge, P., Lawrence, D., Cobb, H., Gutt, G., O’Conner, M., Whelan, D. (2021): Navigation from Low Earth Orbit, in Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications. IEEE. 1359–1379. DOI: [10.1002/9781119458555.ch43a](https://doi.org/10.1002/9781119458555.ch43a).
- Psiaki, M. (2021): Navigation using carrier Doppler shift from a LEO constellation: TRANSIT on steroids. *J Inst Navig* 68(3): 621–641. DOI: [10.1002/navi.438](https://doi.org/10.1002/navi.438).
- Yunck, T., Bertiger, W., Wu, S., Bar-Sever, Y., Christensen, E., Haines, B., Lichten, S., Muellerschoen, R., Vigue, Y., Willis, P. (1994): First assessment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on TOPEX/Poseidon. *Geophys Res Lett* 21(7): 541–544. DOI: [10.1029/94GL00010](https://doi.org/10.1029/94GL00010).

Kontakt

Florian Kunzi
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
German Space Operations Center (GSOC)
Münchener Straße 20, 82234 Weßling
florian.kunzi@dlr.de

GNSS basierte Map-Matching-Verfahren im Gleisnetz der Deutschen Bahn zur Lokalisierung von Störstellen am Fahrbahnsystem

Christopher Sandner | Werner Stempfhuber | Andreas Donaubauer | Manfred Zacher

1 Einleitung und Problemstellung

Das Schienennetz der Deutschen Bahn (DB) trägt seit Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands bei. Pro Tag verkehren ca. 40.000 Züge, auf einem Streckennetz von ca. 33.300 km Länge (DB 2022). Entsprechend den nationalen und europäischen Interessen wird das Streckennetz zukünftig noch intensiver genutzt. Vor allem stehen die Stärkung des Schienengüterverkehrs und der Aufbau von Transeuropaverbindungen im Mittelpunkt (BMVI 2020). Forciert wird dieses Thema durch die Klimapolitik der Europäischen Union (EU). Mit dem Deutschland-Takt sollen allein in der Bundesrepublik die Fahrgastzahlen bis zum Jahr 2030 verdoppelt werden. Dies führt besonders auf Mischverkehrsstrecken zu Einschränkungen von notwendigen Instandsetzungszeiten im betrieblichen Ablauf. Werden keine Maßnahmen zur Gegensteuerung ergriffen, so wirkt sich dies auf die Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur aus. Um die verminderten Instandsetzungsfenster zu nutzen, ist eine Beseitigung der Mängel im Anfangsstadium notwendig, da in diesem Stadium nur kleinere Arbeiten durchgeführt werden müssen. Damit Mängel frühzeitig erkannt werden, ist eine quasi-kontinuierliche Überwachung der Eisenbahninfrastruktur unausweichlich.

Erfasst werden Gleislageveränderungen z. B. mit speziell ausgerüsteten Regelzügen. Neben der nach dem DB-Regelwerk vorgeschriebenen Inspektionsmessung mit Messzügen werden die Regelzüge wie z. B. ICE's für eine kontinuierliche Überwachung der Fahrbahn eingesetzt. Diese Methode hat sich bei der DB als „Continuous Track Monitoring“ (CTM) etabliert. Das Messsystem erlaubt aktuell jedoch nur eine Bewertung der Längshöhe und wird daher nur als ein instandhaltungsunterstützendes Verfahren eingesetzt. Aufgrund der hochabgetasteten Beschleunigung können aber deutlich mehr Information über den Zustand der Eisenbahnanlage gewonnen werden als mit der Regelinspektion der Gleisgeometrie. Darüber hinaus lassen sich mittels Transformation der Beschleunigungssignale in den Frequenzbereich die mechanischen Eigenschaften

des Fahrbahnsystems und seiner Komponenten klassifizieren. Ziel ist es, fehlerhafte Bauteile zu identifizieren und deren Zustand zu bewerten. Bei häufigen Messungen (Überfahrten) ist eine Prognose der Fehlerentwicklung möglich und es kann der technisch-wirtschaftlich optimale Zeitpunkt für eine Instandsetzung ermittelt werden.

Um Störstellen am Fahrbahnsystem automatisiert zu identifizieren, werden Beurteilungsmaßstäbe genutzt, die im Regelwerk der DB definiert sind. Die große Herausforderung liegt jedoch in der Lokalisierung dieser Mängel im Eisenbahnoberbau. Vor allem die genaue Verortung (d. h. die exakte Lagebestimmung im DB-Ref2016-System) der Messsignale stellen eine hohe Anforderung an das Gesamtsystem CTM. Dieser Monitoringansatz benötigt neben den Beschleunigungsmessungen eine hochgenaue Positionierung mit eindeutiger Streckenzuweisung. Ein Bezug zur Bahnstrecke, dem befahrenen Gleis als auch die Beziehung zum DB-Streckenkilometer inkl. allen Zusatzinformationen ist entscheidend, um einen Defekt am Fahrbahnsystem eindeutig zu identifizieren, zu überwachen und nachhaltig zu beheben. Um diese Geo-Informationen eindeutig und zuverlässig zu bestimmen, wurde ein aufwendiges und zuverlässiges Map-Matching-Verfahren entwickelt.

1.1 Aufbau des Messsystems

Die DB Netz AG nutzt Fahrzeuge des DB-Fernverkehrs, die eine kontinuierliche Überwachung der Eisenbahninfrastruktur ermöglichen. Für die Verortung der Messsysteme verfügt jeder Zug über eine bahnzugelassene GNSS-Antenne auf dem Dach sowie GNSS-Empfänger. Entsprechend dem globalen Navigationssatellitensystem (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS) werden WGS84-Koordinaten bestimmt. Unterschiedlich eingesetzte Verfahren liefern stand-alone, DGNSS oder auch near RTK-Positionen.

Diese Informationen stellen eine wichtige Verortungsgrundlage für das bei der DB eingesetzte Map-Matching-Verfahren dar. Für die Positionierung werden darüber hinaus weitere Sensorinformationen genutzt. So kann die Fahrzeugposition über die zurückgelegte Wegstrecke, die sich aus den Informationen eines verbauten Radimpulsgebers ergeben, bestimmt werden. Über ein Inertialmesssystem (engl. Inertial Measurement Unit, IMU) lassen sich zudem Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten entlang der Achsen von x , y und z messen. Diese Achsen sind entsprechend dem Fahrzeugkoordinatensystem ausgerichtet und zeigen in x -Richtung die zurückgelegte Wegstrecke. In y -Richtung die laterale Verschiebung und in z -Richtung die vertikale Auslenkung des Fahrzeugs. Für die Bewertung der Gleislagequalität verfügt jedes Messsystem außerdem über Beschleunigungssensoren an festdefinierten Achsen der

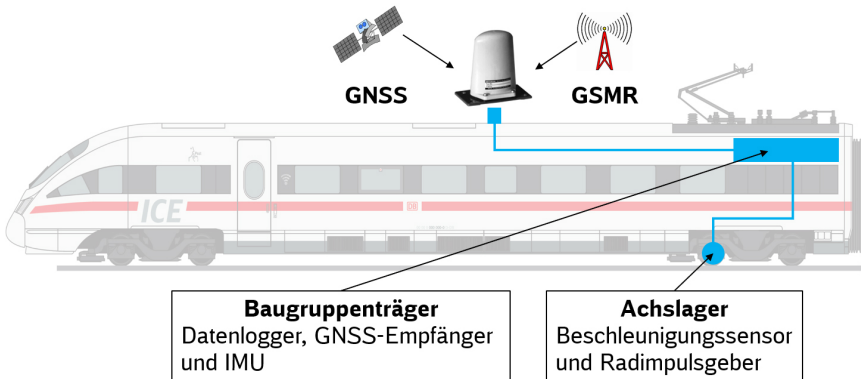


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Systemkomponenten (CTM) am ICE-T des DB Fahrwegmonitoring (FwM) zur Verortung der Fahrzeugposition

Fahrzeuge. Die Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau der Systemkomponenten am Beispiel eines ausgerüsteten ICE-T.

Die CTM-Technik hat sich über ein Jahrzehnt hinweg als eine effektive Methode zur Beurteilung der Gleislage bewehrt. Während dieser Zeit haben sich die Anforderungen weiterentwickelt, so dass es bei der DB eine Unterteilung der CTM-Systeme gibt. Die Unterschiede liegen zum einen in der Abstrakte und zum anderen im Aufbau der Systeme. Das CTM1-Messsystem wird auf einem im Fahrzeug verbauten Industrierechner betrieben, wo hingegen das CTM2-Messsystem auf Basis eines IBM-Datenloggers arbeitet. Die gemessenen Rohdaten werden wiederum in beiden Systemkonfigurationen über eine Funkverbindung oder eine mobile Festplatte, die im Fahrzeug ausgetauscht wird, an die Landseite übertragen.

1.1.1 GNSS-Empfänger

Eine wesentliche Anforderung des Monitoringsystems liegt in der Verknüpfung der gemessenen Achslagerbeschleunigung mit der Eisenbahninfrastruktur (Gleisachse). Das CTM-System verfügt daher über einen GNSS-Empfänger. Dieser erlaubt die Verortung der Achslagerbeschleunigungen auf die Soll-Gleisachse. Die GNSS-Information dient der Stationierung bzw. Bestimmung eines Streckenkilometers. Für die Berechnung der Position wird vorausgesetzt, dass die gemessenen GNSS-Koordinaten und die geometrischen Streckenelemente in einem identischen Bezugssystem abgebildet werden. Die Transformation der Koordinaten wird daher nicht weiter erläutert.

Mit der gemessenen GNSS-Koordinate wird eine Position bestimmt, die nicht der Gleisachse folgt. Jedoch ermöglicht diese Abweichung eine Genauigkeits-

Tab. 1: Konfiguration GNSS-Empfänger (Precise Positioning Management) (San 2022)

	Satellitensysteme		Genauigkeit der Lage [m]			Abtastung [Hz]
			GNSS	SBAS ¹	DGPS ²	
Monitoring-system	GPS Glonass Galileo	L1 + L2 L1 + L2 E1 + E5	1,3	0,6	0,4	1 (max. 20)

betrachtung, die laut Hersteller des GNSS-Empfängers im Meterbereich (Tab. 1) liegt. Für die satellitengestützte Verortung des Messsystems bietet der GNSS-Empfänger neben den bekannten Satellitensystemen GPS, Glonass und Galileo verschiedene Genauigkeits-Modifikationen an.

1.1.2 Achslagerbeschleunigung

Mit der Unterteilung der Messsysteme in CTM1 und CTM2 werden Unterschiede in der Ausführung der Technik deutlich. Die im CTM1-System verwendete Sensorik wird durch zwei unterschiedliche piezo-elektrische Beschleunigungssensoren bestimmt. Einerseits werden Sensoren verwendet, die eine Abtastung von 2 kHz erlauben und damit die Anforderungen zur Bewertung der Gleislage erfüllen. Zum anderen werden 25 kHz abgetastete Signale gemessen, die über alle Geschwindigkeitsbereiche hinweg eine ausreichend genaue Auflösung kurzweiliger Fehler in der Schienenoberfläche erlauben.

Das CTM2-System ist speziell auf die Messung und Beurteilung der Gleislage ausgerichtet und verfügt daher standardmäßig nicht über ein hochaufgelöstes Achslagerbeschleunigungssignal. Je nach Fahrzeug ist Sensorik verbaut, die sich an der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit orientiert. Analog zu den Gleisgeometriemessfahrzeugen ist eine Auflösung der CTM-Messsignale im Wegbereich von 0,16 m erforderlich. Die Sensorik am ICET ($v_{max} = 230 \text{ km/h}$) verfügt daher über Beschleunigungsaufnehmer mit einer Abtastung von 600 Hz (San 2022).

Die Beurteilung der Gleislage geht historisch auf die Wandersehnenmessung zurück. Für diese Art der Messsignale wurden Bewertungskriterien und Reaktionsschwellen entwickelt, die bis heute sowohl bei der Deutschen Bahn (Nic 2020) als auch bei anderen Bahnen (z. B. Frankreich oder Japan) verwendet werden. Um die vom CTM-System ermittelten Längshöhensignale mit den Messsignalen der Gleismessfahrzeuge vergleichen und nach der Inspektionsrichtlinie bewerten zu können, werden die formtreuen CTM-Signale mit der entsprechenden Wandersehne (Sehnenteilung 2,6 m/6 m) abgetastet, siehe Kapitel 2.

1.1.3 Radimpulsgeber

Radimpulsgeber dienen im eigentlichen Sinne der fahrzeugseitigen Geschwindigkeitsüberwachung. Aus der Bewegung des Fahrzeugs und der Drehung des Rades werden Signalpulse gemessen, die sich proportional zur Drehgeschwindigkeit verhalten. Durch die Summierung dieser aufeinanderfolgenden Impulse wird unter Berücksichtigung von Umdrehungsfrequenz und dem Raddurchmesser die Geschwindigkeit des Zuges bestimmt. Die berechnete Geschwindigkeit nutzt das CTM-System als einen weiteren Parameter für die Verortung. Entsprechend der zurückgelegten Wegstrecke über die Zeit, wird eine Verortung entlang der Gleisachse ermöglicht.

Wie auch andere Verortungsmethoden unterliegt diese Art der Positionierung bestimmten Fehlereinflüssen. Zum einen können durch den Verschleiß am Rad Verfälschungen in der Abwicklung des Kilometers über die zurückgelegte Wegstrecke entstehen. Dieser kann jedoch durch eine regelmäßige Überprüfung des Raddurchmessers nahezu eliminiert werden. Zum anderen kann durch die Kenntnis derartiger Faktoren eine Maßstabskorrektur an der Wegstrecke vorgenommen werden. Eine weitere Beeinflussung stellt der Schlupf der Räder, z. B. bei der Fahrt durch den Bogen, dar. Es kommt zu einer Längendifferenz zwischen innerer und äußerer Schiene, welches das Radprofil (Konizität) bei kleinen Radien nicht ausgleichen kann. Es zeigt sich jedoch, dass die Abwicklung des Streckenkilometers zurzeit die wohl zuverlässigste Methode der Verortung im Gleis darstellt. Vergleiche mit Geschwindigkeiten aus den GNSS-Positionen zeigen jedoch eine sehr gute Überlappung und helfen zusätzlich bei der Identifizierung von Messfehlern.

2 Überwachung der Gleislage im Netz der DB

Nach den Anforderungen der Technischen Spezifikation (TSI) sind die europäischen Eisenbahninfrastrukturbetreiber verpflichtet, die Gleislage regelmäßig zu kontrollieren. Geprüft werden die horizontale und vertikale Lage der linken und rechten Schiene. Außerdem wird die Spurweite, die gegenseitige Höhenlage und die Verwindung inspiziert. Die Bewertung von Verschiebungen in lateraler und vertikaler Richtung (Pfeilhöhe und Längshöhe) erfolgt dabei anhand von Beurteilungsmaßstäben, die für ein Wandersehnenmesssignal (Dreipunktsignal) ausgelegt sind.

2.1 Wandersehenmesssignal

Die Beurteilung von Gleislageveränderung wird bei der DB über geschwindigkeitsabhängige Beurteilungsmaßstäbe geregelt. Diese sind in der DB-Richtlinie 821.2001 definiert und orientieren sich an den in der DIN 31051 beschriebenen Abnutzungsvorrat. Entsprechend den in der Tab. 2 beschriebenen SR-Werten (Störgrößen/Reaktion) ergibt sich bei Überschreitung folgender Handlungsbedarf.

- SRA-Wert: „Der Wert, bei dessen Überschreitung der Zustand untersucht und in die regelmäßig geplanten Instandhaltungsarbeiten einbezogen werden muss.“ (Rei 2021)
- SR100-Wert: „Der Wert, bei dessen Überschreiten korrektive Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen, um zu verhindern, dass die Soforteingriffsschwelle vor der nächsten Inspektion erreicht wird.“ (Rei 2021)
- SRLim-Wert: „Der Wert, bei dessen Überschreitung Maßnahmen ergriffen werden müssen. Eine Instandsetzung ist unverzüglich durchzuführen“ (Rei 2023)

Tab. 2: Beurteilungsmaßstäbe für die Gleislage (Nic 2020)

		Beurteilungsmaßstäbe															
		Für die örtlich zulässige Geschwindigkeit v [km/h]															
		SRA					SR100					SRLim					
Prüfgröße	Einheit	Auswertung	v ≤ 80	80 < v ≤ 120	120 < v ≤ 160	160 < v ≤ 230	v > 230	v ≤ 80	80 < v ≤ 120	120 < v ≤ 160	160 < v ≤ 230	v > 230	v ≤ 80	80 < v ≤ 120	120 < v ≤ 160	160 < v ≤ 230	v > 230
Längshöhe	mm	Null/Spitze	12	10	8	6	5	15	13	11	9	7	21	17	14	11	9
Pfeilhöhe	mm	Null/Spitze	12	10	8	6	5	15	13	11	9	7	21	17	14	11	9
gegenseitige Höhenlage	mm	Mittelwert/Spitze	10	8	7	6	5	13	11	9	8	7			11	10	9
Spurweite	mm	1435/Spitze	15	15	15	10	5	27	27	27	20/-	15/-3					
Verwindung	‰	Null/Spitze						ORE B55 Kurve 1					ORE B55 Kurve 2				

Um aus den Achslagerbeschleunigungen ein nach Regelwerk vergleichbares Dreipunktsignal der Längshöhe zu berechnen, werden die Beschleunigungen integriert und entsprechend den Vorgaben aus der DIN 13848 gefiltert. Die Norm unterscheidet hier unterschiedliche Wellenlängenbereiche, welche bei der Beurteilung der Gleislagequalität berücksichtigt werden müssen. Als Referenz dient das gemessene Gleislagesignal der Inspektionsmessung. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis der Regelinspektion und dem Monitoringsignal. Um die sehr hohe Ähnlichkeit in der Wiederholbarkeit der Monitoringdaten zu verdeutlichen, werden in der Abb. 2 unterschiedliche Messungen eines Streckenabschnittes überlagert. Die Abb. 3 zeigt wiederum den Mittelwert aus diesen Messungen zur Regelinspektion mit dem Rollenden Analyse und Inspektionslabor (RAILab). Das Ergebnis aus dem DB Fahrwegmonitoring zeigt dabei eine maximale Differenz von wenigen 1/10 Millimetern.

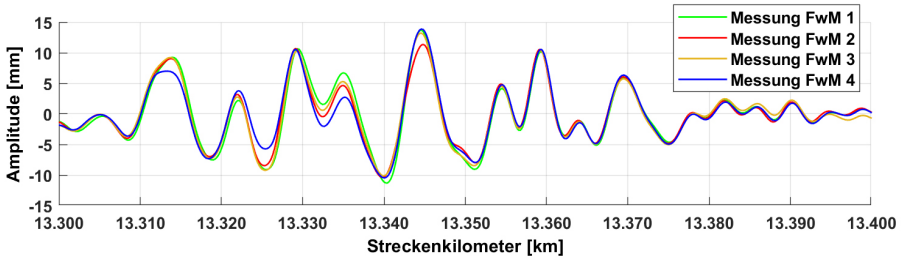


Abb. 2: Vergleich von Dreipunktsignalen der Längshöhe aus 4 Messungen

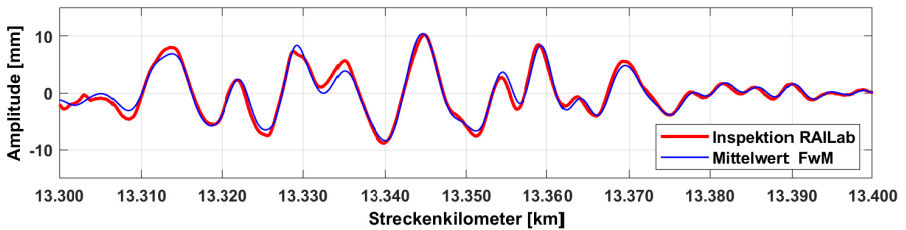


Abb. 3: Vergleich Inspektionsmessung zum Mittelwert der 4 Messungen

Der wesentliche Vorteil eines Monitoringsystem liegt in der häufigeren Befahrung von bestimmten Gleisabschnitten. Diese sind durch den Fahrplan festgelegt. Eine Disponierung und Überwachung anderer Strecken, die nicht im Fahrplan definiert sind, gestaltet sich hingegen als schwierig. Jedoch wird durch die bereits ausgerüsteten CTM-Fahrzeuge ein Großteil des Streckennetzes abgedeckt. Gegenüber der Inspektionsmessung erlaubt das Monitoring mit Regelzügen eine deutlich genauere Prognose des Fehlerwachstums. In der *Abb. 4* wird dieses exemplarisch für einen Bahnübergang aufgezeigt. Durch die Berechnung von Trends können Instandhaltungsmaßnahmen rechtzeitig geplant und eingetaktet werden, um den Regelbetrieb nicht zu stören und die Verfügbarkeit der Fahrbahn sicher zu stellen.

In der *Abb. 4* wird über einen Zeitraum von 4 Monaten die Entwicklung der Längshöhe gezeigt. Mit der Darstellung des Fehlerwachstums und der Bestimmung eines Trends wird die Planung einer Instandsetzung optimiert. Wie in der Grafik erkennbar, wird das Überschreiten der SRLim Schwelle nach dem 19.01.2022 durch eine Instandsetzung verhindert. Durch die häufigen CTM-Messungen kann die Nachhaltigkeit der Instandsetzungsmaßnahmen überprüft werden. In dem dargestellten Beispiel wurde durch die Instandsetzung die Fehleramplitude zwar kurzfristig reduziert, aber die Fehlerursache nicht behoben. Um wiederum die Ursache der Störstelle zu identifizieren, wird das Frequenzverhalten analysiert.

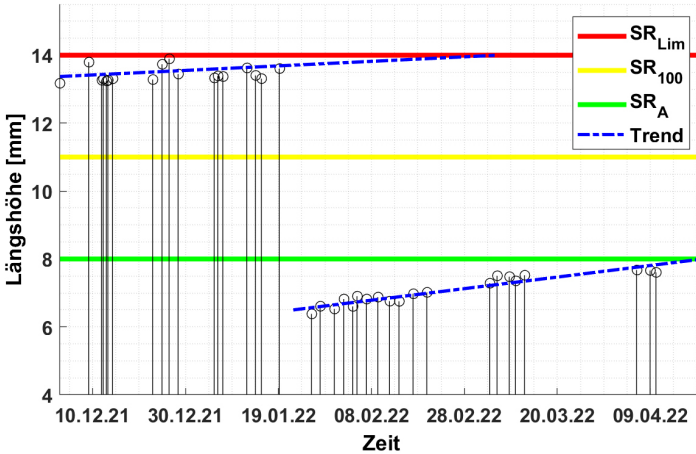


Abb. 4: Beispiel für die Entwicklung der Gleislage am Bahnübergang

2.2 Frequenzanalyse

Neben der Beurteilung des Dreipunktsignals der Längshöhe wird das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen analysiert. Dabei werden nicht nur Auffälligkeiten in der Gleislage frühzeitig erkannt. Vielmehr kann die Fehlerursache einer Störstelle identifiziert und anhand der Schwingungseigenschaften klassifiziert werden. Vor allem kurzweilige Eigenschaften aus den Achslagerbeschleunigungssignalen erlauben eine Interpretation von Reaktionen, die sich entsprechend der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg aus dem Rad-Schiene-Kontakt ergeben. Somit lassen sich Mängel in der Fahrfläche wie z. B. Schlupfwellen oder Riffeln, ausgefahrene Schweiß- oder Isolierstöße vor der Ausprägung einer Gleislageveränderung aufzeigen. Dies lässt eine detaillierte Aussage über die Qualität und Verfügbarkeit des Eisenbahnoberbaus zu.

Um das Frequenzverhalten der gemessenen Achslagerbeschleunigungen zu charakterisieren, wird eine Wavelet-Transformation genutzt. Gegenüber der Fourier-Transformation erlaubt diese eine Auflösung der Frequenzinhalte über den gefahrenen Kilometer. Um ein möglichst breites Spektrum von möglichen Fehlern in der Fahrbahn abzudecken, wird ein Morlet-Wavelet eingesetzt. Entsprechend seiner geometrischen Wellenform lässt es die Erkennung von ausgeprägten Signalstrukturen zu. Beim Einsatz dieser Methode geht es vor allem darum, einen dem Wavelet ähnlich sehenden Signalabschnitt zu detektieren. Die Abb. 5 zeigt z. B. das analysierte Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigung im Weichenbereich. Die rechte Farbskala an der y-Achse beschreibt den Übereinstimmungsgrad zwischen Wavelet und Messsignal. Ein Wert von 1 (blau)

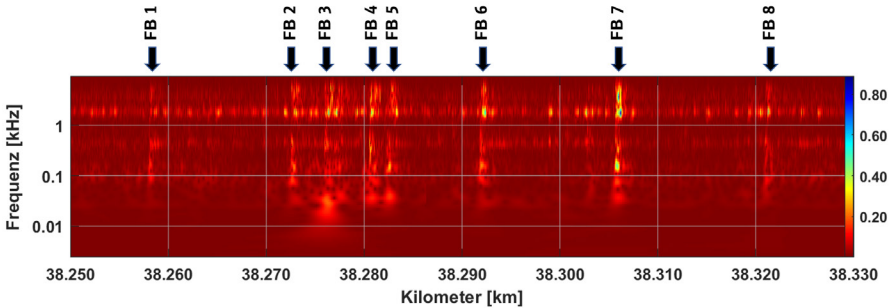


Abb. 5: Auflösung des Frequenzverhaltens aus dem Ergebnis einer Wavelet-Transformation mit dem Fokus auf markante Frequenzbänder (FB)

bedeutet eine absolute Übereinstimmung zwischen dem Wavelet und dem Beschleunigungssignal. Der Wert 0 (rot) hingegen beschreibt keinerlei Ähnlichkeit zwischen den beiden Signalverläufen.

In der Abb. 5 sind 8 auffällige Frequenzstrukturen hervorgehoben. Die Querschnitte FB1 und FB2 sowie FB6 bis FB8 zeigen hier das typische Frequenzverhalten bei der Befahrung von verschweißten Schienenenden. Im FB3 zeigt sich hingegen das Frequenzverhalten aus dem Kreuzen des Herzstückbereichs. Am FB4 und FB5 befand sich ein mangelhafter Isolierstoß. Um die Interpretation der aufgezeigten Signalanalyse bzgl. der Komponenten der Fahrbahn zu erleichtern, werden diese wie folgt in das Frequenzspektrum von

- Fehler in der Schienenoberfläche,
- Fehler an Fahrbahnkomponenten und
- Fehler in der Gleislage

unterteilt. Anschließend werden diese integriert, um Reaktionswerte zu bestimmen. Diese sollen die Interpretation der analysierten Wavelet-Koeffizienten erleichtern. In der Abb. 6 werden Fahrflächenfehler zwischen 400 Hz bis 9000 Hz

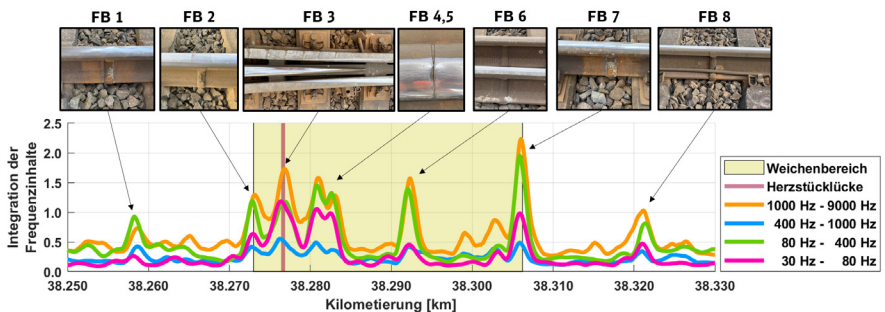


Abb. 6: Klassifizierung von Fehlern über das integrierte Frequenzverhalten

darstellt. Zwischen 80 Hz bis 400 Hz lassen sich Fehler in den Fahrbahnkomponenten verorten. Unter 80 Hz werden Gleislagefehler zugeordnet. Da das Frequenzverhalten immer in Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit betrachtet werden muss, ist das Ergebnis in *Abb. 6* bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h zu interpretieren (Wellenlänge = Geschwindigkeit/Frequenz).

Das Ergebnis der *Abb. 6* hebt Bereiche hervor, an denen das Rad zwischen zwei Bauteilen übergeben wird. Am Übergabepunkt treten hohe Kräfte auf, die aktuell nicht über das integrierte Frequenzsignal beurteilt werden können, wie z. B. das Dreipunktsignal. Die Grafik zeigt am Streckenkilometer 38,277 km das Ergebnis einer stumpfbefahrenen Weiche. In diesem Fall wird das Rad von der Herzstückspitze auf die Flügelschiene übergeben und erzeugt damit ein spezielles Frequenzmuster. Der große Vorteil dieser Analysemethode liegt in der Zuordnung der Komponenten, über die eine Fehlerursache festgestellt werden kann und die Nachhaltigkeit der Instandhaltung verbessert (SRFZ 2022).

3 Verortung der Fahrzeugdaten

Für die Zuordnung der analysierten Frequenzinhalte und Einzelfehler im Dreipunktsignal ist die Bestimmung einer hochgenau verorteten Position im DB-Schienenetz zwingend erforderlich. Die Lokalisierung der Störstelle liegt dabei im Bereich weniger Zentimeter.

Das DB Map-Matching verknüpft Positionsdaten mit der Eisenbahninfrastruktur. Grundlage dafür bildet das DB-Gleisnetz, welches für diese Aufgabe topologisch als Knoten-Kantenmodell und zusätzlich geometrisch in Form von Linienzügen aufgebaut ist. Daraus wird eine digitale Karte erzeugt, über welche topologische und geometrische Verläufe aus der GNSS-Trajektorie zugeordnet werden. Die Kanten beschreiben Linienzüge, die sich an der Trassierung der Gleise orientieren und durch die Knotenpunkte begrenzt werden. Jeder Kante werden zwei Knoten zugeordnet, die das ankommende oder abgehende Ende definieren und einen Streckenwechsel, Gleisende oder Weichenanfang darstellen. Neben der Angabe von geografischer Breite und Länge können über die Knoten weitere Informationen zur Strecke abgefragt werden. Für die Orientierung entlang der Gleisachse werden z. B. Streckenkilometer, Gleisnummer oder Betriebsstelle genutzt, um die Anlage zweifelsfrei der richtigen Örtlichkeit zuzuordnen. Diese GIS-Datengrundlage ist die Grundlage des DB Map-Matching-Verfahrens. Fehlerhafte Zuordnungen müssen im nachfolgenden Verfahren automatisiert korrigiert werden.

4 Map-Matching-Verfahren

Das Ziel des entwickelten Map-Matching-Verfahrens ist es aus den fehlerbehafteten GNSS-Positionen durch Zusatzinformationen aus dem Schienennetz, der Fahrrichtung, der Geschwindigkeit, der Streckennummer und der Kilometrierung eine genaue Position des CTM-Fahrzeugs zu ermitteln. Der datenbankbasierte Algorithmus des Map-Matching-Verfahrens besteht aus geometrischen, netzwerktopologischen, statistischen und semantischen Elementen. Ziel ist es, die GNSS-Positionen immer auf eine plausible Trajektorie im DB-Streckennetz zu beziehen, so dass z. B. bei mehrgleisigen Strecken der Wechsel von einem auf ein anderes Gleis nur bei einer Weiche möglich ist.

Im Kern des Algorithmus werden in einem Moving-Window-Verfahren für jeweils zwei zeitlich aufeinanderfolgende GNSS-Positionen sowohl die kürzeste Distanz im DB-Streckennetz als auch die euklidische Distanz berechnet und miteinander verglichen. Um die kürzeste Verbindung auf dem Gleisnetz zu berechnen, kommt hierbei der Routing-Algorithmus nach Dijkstra (Dij 1959) zum Einsatz. Die so gefundene Trajektorie wird zusätzlich mittels Azimut-Differenzen und der statistischen Analyse der Distanzen aufeinanderfolgender GNSS-Punkte zum Gleis plausibilisiert.

Die Implementierung des Algorithmus erfolgte auf Basis des Open Source-Datenbanksystems PostgreSQL mit den Erweiterungen PostGIS und pgRouting, ergänzt durch Python-Scripts.

Die mehrjährige Entwicklungsphase ermöglicht nun eine geometrische Korrektur der GNSS-Positionen und Verrechnung in die DB-Geometrieumgebung mit Berücksichtigung der erforderlichen Abwicklung als Kilometrierung für unterschiedliche Fragestellungen. Das System ist für Cloud-Computing auf

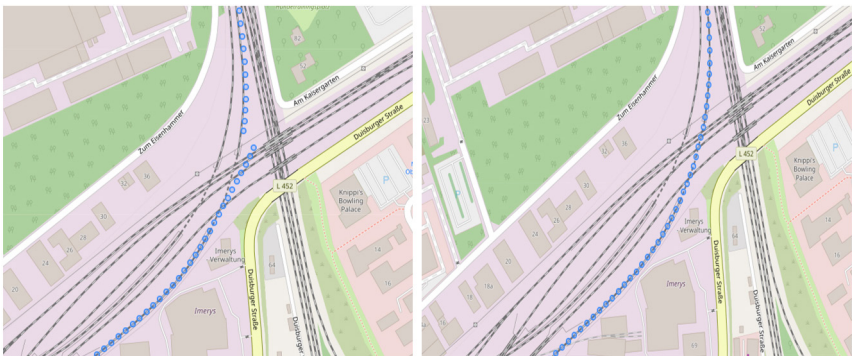


Abb. 7: GNSS-Punkte vor dem Map Matching (links) und GNSS-Punkte nach dem Map Matching (rechts)

einem Linux-Betriebssystem konzipiert. Es kann jedoch auch problemlos auf einer kleinen Recheneinheit im Zug betrieben werden. Die Datenbank-basierte Lösung erlaubt es, mit den großen Datenmengen umzugehen, die durch das kontinuierliche Monitoring entstehen. So werden die Ergebnisse aus dem Map-Matching-Verfahren in einer Ergebnisdatenbank verwaltet. Metadatatabelle helfen die großen Datenmengen gut und übersichtlich zu organisieren. Die Auswertung der in der Ergebnisdatenbank gespeicherten Daten kann über Dashboard-Webseiten erfolgen. Die hinterlegten SQL-Abfragen ermöglichen dem Nutzer die erforderlichen Daten (z. B. wann wurde eine bestimmte Strecke von welchem Fahrzeug zuletzt befahren, wie oft wurde die Strecke befahren etc.) zu extrahieren und in Form von Berichten sowie in Kartenform darzustellen. Für die Kartendarstellung wird die JavaScript-Bibliothek leaflet in das Dashboard eingebunden. Zusätzlich können auch CSV-Files extrahiert werden. Die Ergebnistabelle ermöglicht viele Abfragemöglichkeiten basierend auf dem Informationsgehalt der eingelesenen Daten. Der Ergebnisreport beinhaltet die finalen Zuverlässigkeitsprüfungen.

Tests des DB-Map-Matching-Verfahrens zeigen eine 80- bis 100%ige fehlerfreie und eindeutige Zuordnung in Abhängigkeit der eingelesenen Rohdaten. Bei zu großen Datenlücken kommt der Algorithmus an seine Grenzen.

5 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte Verortungsalgorithmus soll die Lokalisierung von Störstellen im Gleis verbessern. Die Auswertungen beziehen sich dabei ausschließlich auf die Daten des Instandhaltungsunterstützenden DB Fahrwegmonitorings mit Regelzügen. Mittels dem DB Map-Matching-Verfahren wird die eindeutige Bestimmung des befahrenen Gleises bzw. der Bahnstrecke berechnet. Umfangreiche Tests des Verfahrens haben gezeigt, dass es in seltenen Fällen zu fehlerhaften Positionsbestimmungen einzelner Gleisabschnitt kommt, die aufgrund ihrer Konstellation im Gleisnetz nicht eindeutig für die Verortung genutzt werden können. Die Gründe dafür sind entweder fehlerhafte oder fehlende Informationen im Gleisnetzdatensatz.

Eine weitere Herausforderung des DB Map-Matching-Verfahrens liegt in der Verbesserung der Positionsgenauigkeit über den zurückgelegten Gleiskilometer. Die Bewertung der Gleislage bzw. die Anforderung an die Lokalisierung von Fehlern auf der Schienenoberfläche stellen hohe Ansprüche an das Verortungstool. Je nach Fehlertyp können am Fahrbahnssystem Störstellen auftreten, die im Zentimeterbereich (Schlupfwellen, Headcheck, etc.) verortet werden müssen. Dementsprechend muss die Genauigkeit der prozessierten Position der Störstel-

le dem Gleiskilometer zuortbar sein. Durch die Kombination von GNSS- und Geschwindigkeitsinformation wurde ein optimaler Lösungsansatz aufgezeigt, der in Verbindung mit der Krümmung einen auf wenige Zentimeter genaue Lokalisierung der Störstelle erlaubt. Dies erfordert jedoch eine kontinuierliche Synchronisation der Messdaten, die in Abhängigkeit zur GNSS-Qualität und dem Vergleich zwischen SOLL- und IST-Krümmung erfordert.

Eine weitere Möglichkeit der Vorortung basiert auf der Auswertung der gemessenen Achslagerbeschleunigungen selbst. Aus der Signalanalyse mittels einer Wavelet-Transformation können typische Frequenzverhalten bzw. Eigenschaften der Fahrbahn detektiert werden. Diese können wiederum nicht nur für die Bewertung des Fahrbahnsystems eingesetzt, sondern ebenfalls anhand ihrer eindeutigen Reaktion aus dem Kontakt zwischen Rad und Schiene einem bestimmten Bauteil am Eisenbahnoberbau zugeordnet werden (San 2022). Dies könnten einerseits Herzstücke in Weichen oder Isolierstöße an den Schienen sein.

Zukünftig soll das DB Map-Matching-Verfahren nicht nur landseitig eingesetzt und für die Nachverortung der Fahrzeugposition genutzt werden. Die mittelfristige Zielstellung des DB Fahrwegmonitorings ist die Bestimmung einer hochgenauen und exakten Positionsinformation während der Zugfahrt selbst. Mit diesem Schritt und der Bewertung der gemessenen Achslagerbeschleunigung nach RIL 821.2001 für das Dreipunktsignal der Längshöhe und der Beurteilung von Störstellen mittels einer Wavelet-Transformation wird die fahrzeugseitige Detektion von Fehlern am Fahrbahnsystem automatisierbar. Dadurch können manuelle Aufgaben eliminiert, Personal für die Auswertung reduziert und Informationen direkt an die Instandhaltung weitergegeben werden.

Literatur

- BMVI (2020): www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/pressekonferenz-trans-europ-express, letzter Zugriff 05/2022.
- DB (2022): www.deutschebahn.com/de/konzern/konzernprofil/zahlen_fakten#, letzter Zugriff 02/2023.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik. 1, 269–271.
- Nicklisch, D. (2020): Oberbau inspizieren – Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleisfahrzeugen. Deutsche Bahn AG, DB-Richtlinie 821.2001, Version 17.
- Reifenhäuser, M. (2021): Gleis- und Bauvermessung – Bahnstrecken kilometrieren. Deutsche Bahn AG, DB-Richtlinie 883.1000, Version 4.

Sandner, C. (2022): Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau aus Messfahrten der Regelinspektion und dem Fahrwegmonitoring mit Regelzügen. Dissertation, München.

Sandner, C., Ripke, B., Feng, J., Zacher, M. (2022): Detektion von Störstellen am Fahrbahnsystem. Eurailpress, Eisenbahningenieur 09/22, Hamburg, 78–84.

Kontakt

Dr. Christopher Sandner

DB Netz AG – Messtechnik und Rad-Schiene-System (I.NAI 414)

Richelstraße 3, 80634 München

christopher.sandner@deutschebahn.com

Hochgenaue ingenieurgeodätische GNSS-Punktbestimmungen in der Praxis

Andreas Wagner | Jonathan Hiller

1 Einführung

Die geodätische Überwachung von Ingenieurbauwerken ist ein zentraler Aufgabenbereich der Ingenieurvermessung und unterstützt – neben anderen Verfahren und Methoden – die Gewährleistung einer sicheren und zuverlässigen Verkehrsinfrastruktur. Typische Messverfahren, die in geodätischen Messungen bzw. in geodätischen Überwachungsnetzen angewandt werden, sind die Tachymetrie, das geometrische Nivellement und die satellitengestützte differenzielle Positionsbestimmung. Mit deren kombinierten Nutzung können dabei Vorteile aus allen Systemen genutzt werden. Da es sich um voneinander unabhängige Messungen handelt, erhöht sich auch die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich. Gleichzeitig steigen aber die Anforderungen und der Aufwand an die Messdurchführung sowie an die hybride Ausgleichung der Messdaten, um sinnvolle Resultate zu erzielen.

Im folgenden Beitrag wird ein Beispiel einer jährlich stattfindenden geodätischen Überwachungsmessung an einer Schleusenanlage vorgestellt. Neben der Beschreibung des Messablaufs wird auf die kombinierte Auswertung und Untersuchungen zu einzelnen Aspekten der GNSS-Messung eingegangen.

2 Geodätisches Monitoring der Schleusenanlage Hessigheim

Die Schleusenanlage Hessigheim am mittleren Neckar ist eine von 27 derartigen Neckaranlagen. Sie besteht aus einer Doppelschleuse mit einer dreifeldrigen Wehranlage und einem Kraftwerk an der gegenüberliegenden Flussseite (Abb. 1). Die Wehrpfeiler dienen zugleich als Auflager für eine Straßenbrücke. Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse im Bereich der Schleusenanlage sind schwierig und waren Gegenstand verschiedener Baugrunduntersuchungen, z. B. Hinrichs (2017) oder Straßer et al. (2017).

An der Anlage werden Instandsetzungs-, Modernisierungs- und Ausbaumaßnahmen durchgeführt, die von einem umfangreichen ingenieurgeodätischen Monitoringprogramm begleitet werden. Ziel ist es, die Gewährleistung der Standicherheit aufgrund der schwierigen Verhältnisse im Baugrund sicherzustellen,



Abb. 1: Ansicht der Schleusenanlage Hessigheim. Die Anlage besteht aus zwei Schleusenkammern, einer dreifeldrigen Wehranlage sowie einem Kraftwerk.

indem das Bauwerksverhalten und mögliche Deformationen im Umfeld kontinuierlich beobachtet werden.

Daneben hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) das Projekt „Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke“ konzipiert und bearbeitet, bei dem am Beispiel der Schleusenanlage Hessigheim weitere Monitoringlösungen und -strategien evaluiert wurden. So wurde mit der Persistent-Scatterer-Interferometrie ein Satellitenverfahren genutzt, um Oberflächenbewegungen zu detektieren (Schneider und Sörgel 2020), mit UAV erfasste Bild- und Laserdaten ausgewertet (Cramer et al. 2020) und hochgenaue Neigungssensoren verwendet (Schwarz und Fedan 2020).

Das ingenieurgeodätische Bauwerksmonitoring wird seit 2018 einmal jährlich im Herbst durchgeführt, zusätzlich gab es im Zusammenhang mit dem o. g. Forschungsprojekt des BfG einzelne zusätzliche Frühjahrskampagnen. In jeder Messkampagne wird ein geodätisches Bauwerksreferenz- und Bauwerksnetz gemessen und ausgewertet. Es kommen sowohl GNSS-Messungen als auch terrestrische Verfahren (Tachymetrie und Nivellement) zum Einsatz. Alle Messdaten werden in einer kombinierten Gesamtausgleichung ausgewertet.

Zur Untersuchung des Bauwerksverhaltens werden sowohl Lage- und Höhenveränderungen der Funktionsbereiche sowie Höhenänderungen im Schleusenumfeld beobachtet. Zur Feststellung von Veränderungen der Objektpunkte wurde eine Messtoleranz von 10 mm definiert. Aus dieser ergibt sich eine

(erweiterte) Messunsicherheit je Epoche U (95 %) = 1,8 mm, sowohl in Lage (Δx , Δy), als auch Höhe (Δz). Darauf aufbauend wurde in Messkonzepten die Messverfahren inkl. des zu verwendenden Instrumentariums, die Messkonfigurationen, die geplanten Messabläufe sowie die kombinierte Auswertung der Daten festgelegt (Böhm et al. 2019a, 2019b, 2019c).

3 Durchführung der Messungen

3.1 Tachymetrische Messung

Im Bauwerksreferenznetz sind unter anderem tachymetrische Beobachtungen vorzunehmen. Von insgesamt 11 fest vermarkten dauerhaften Messpfeilern sowie 3 Hilfspunkten (mit festmontierten Konsolen bzw. Stativpunkten) sind Beobachtungen durchzuführen. Zur Signalisierung der Zielpunkte werden hochgenaue Kugelprismen verwendet, wobei das Präzisionstachymeter eine Winkelmessgenauigkeit $\leq 0,15$ mgon und eine Streckenmessgenauigkeit von $\leq 0,6$ mm + 1 ppm aufweisen muss. Alle Netzpunkte sind in mindestens 3 Vollsätzen zu erfassen, bei der ersten Einzelbeobachtung jedes Netzpunktes ist eine simultane Bildaufnahme mit der Okularkamera des Tachymeters vorzunehmen (d.h. ein Bild pro Zielpunkt, um ggf. Einschränkungen der Visuren zu dokumentieren).

Für das Bauwerksnetz werden von den genannten Pfeilerpunkten sowie von zusätzlichen temporären Stativstandpunkten in einer zum Bauwerksreferenznetz getrennten Aufnahme weitere ca. 165 Objektpunkte aufgenommen. Diese werden wechselweise mit Kugelprismen signalisiert. Vorgabe ist, dass jeder Objektpunkt von mindestens drei unterschiedlichen Standpunkten beobachtet wird, sodass der Öffnungswinkel der Beobachtungsrichtungen zwischen 50 und 150 gon beträgt; schleifende Schnitte sollen vermieden werden.

Pro Epoche werden tachymetrisch im Schnitt ca. 1600 Beobachtungselemente, d. h. je ca. 530 Richtungen, Zenitwinkel und Strecken erfasst (vgl. Abb. 2).

3.2 Nivellitische Messung

Die Anforderungen an das Nivellement sind an die Empfehlungen und Arbeitsrichtlinien zur Bestimmung von Höhenfestpunkten 1. Ordnung (AdV 2009) angelehnt. Es müssen Digitalnivelliere höchster Genauigkeit (Messunsicherheit $\leq 0,4$ mm je 1 km Doppelnivellement) und mit nachgewiesener Unempfindlichkeit gegenüber dem Erdmagnetfeld verwendet werden. Als weitere Ausrüstung sind Präzisionsnivellierlatten gemäß DIN 18717 inkl. jährlichem Kalibriernachweis, definierte Lattenuntersätze und starre Instrumentenstative vorgeschrieben.

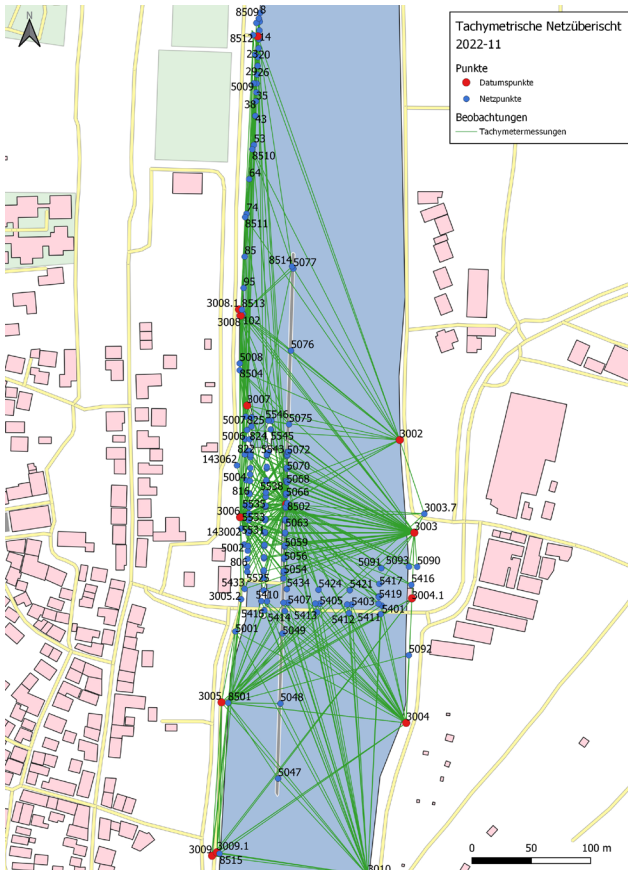


Abb. 2:
Netzübersicht der
tachymetrischen
Beobachtungen
(Kartengrundlage:
OpenStreetMap)

Weitere exakte Vorgaben an den Messablauf gewährleisten, dass die geforderte hohe Genauigkeit/die einzuhaltende Messtoleranz erreicht werden kann. So sind neben der täglichen Ausrüstungsprüfung (inkl. Nivellierprobe) z. B. Zielweiten über 30 m nicht erlaubt, Ablesungen nur im Bereich > 1 m und mindestens 0,15 m unterhalb des oberen Lattenende zulässig sowie Zielweiten im Vor- und Rückblick auf 1 m gleichzuhalten. Insgesamt darf die Summe der Zielweiten der Vor- und Rückblicke max. 2 m (bei Nivellementstrecken < 400 m) bzw. max. 3 m (bei Nivellementstrecken ≥ 400 m) betragen. Die Ablesefolge ist mit alternierend RVVR vorgegeben, u. v. m.

Auch hier sind die Messungen in ein Bauwerksreferenznetz und Bauwerksnetz getrennt und separat zu messen. Die Ausgleichung der nivellierten Höhendifferenzen unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung der Nivellierlatten ergibt i. d. R. Genauigkeiten von 0,2 bis 0,3 mm/km im Bauwerksreferenznetz

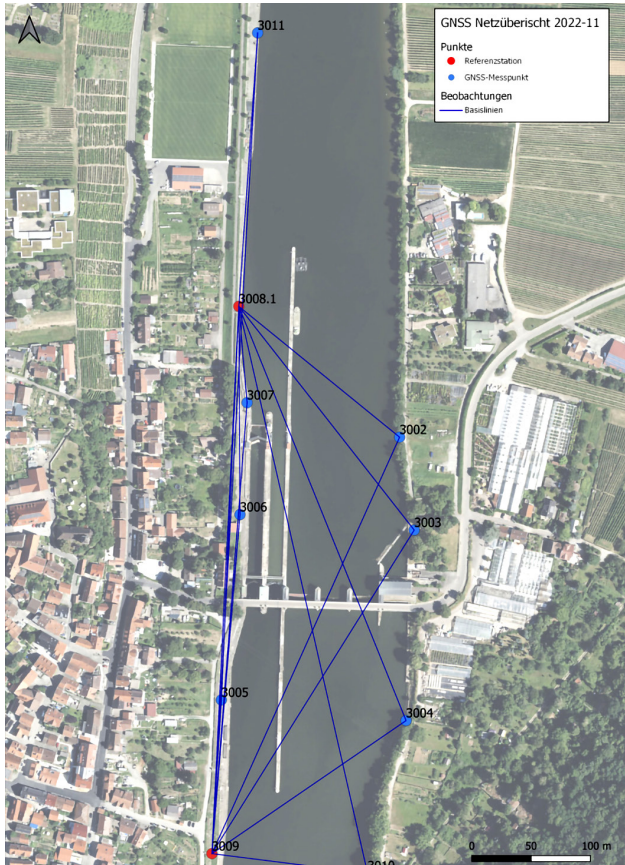


Abb. 3:
Netzübersicht der
GNSS-Beobachtungen (Kartengrundlage: Bing Maps)

und 0,3 bis 0,4 mm/km im kleinteiligeren Bauwerksnetz. Die rund 400 Höhenunterschiede werden in der Folge in die hybride Ausgleichung eingebracht.

3.3 GNSS-Messung

Zur Einhaltung der vorgegebenen Messtoleranz von 10 Millimetern in Lage und Höhe des Bauwerksreferenznetzes sind für die GNSS-Messungen ebenfalls eine Reihe von Anforderungen definiert: Es wird ein statisches differenzielles Verfahren mit Auswertung im Postprocessing durchgeführt. Dabei werden auf acht Messpeilern, die über die gesamte Schleusenanlage verteilt sind, mit geodätischen Präzisions-GNSS-Empfängern und GNSS-Choke-Ring-Antennen für mindestens 7 Stunden (idealerweise > 8 h) simultan alle verfügbaren Satelliten-

signale von GPS, GLONASS und Galileo aufgezeichnet. Die Daten werden direkt im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) gespeichert, um ggf. Ungenauigkeiten bei einer Umwandlung aus nativen Herstellerformaten zu vermeiden.

Parallel zu diesen Beobachtungen werden auf zwei permanent messenden Referenzstationen im direkten Umfeld der Schleusenanlage GNSS-Beobachtungen aufgezeichnet. In der Auswertung können mit Hilfe dieser Messdaten dreidimensionale Koordinatendifferenzen zwischen den Referenzempfängern und den Empfängern (Phasenzentren der Antennen) auf den einzelnen Messpfadern berechnet werden. Es werden in Summe 16 unabhängige Basislinien beobachtet (Abb. 3).

Mithilfe der eingesetzten Choke-Ring-Antennen ist es möglich, reflektierte GNSS-Signale oder Signale mit einem niedrigen Elevationswinkel abzuschwächen bzw. zu blocken und dadurch den Fehler durch Mehrwegeeffekte zu reduzieren (vgl. Zhang und Schwieger 2018). Das Hauptmerkmal der Choke-Ring-Antennen ist eine Bodenplatte, auf der sich konzentrische Ringe zur Dämpfung von Mehrwegsignalen befinden (siehe Abb. 4). Die eigentliche Antenne befindet sich in der Mitte der Ringe und ist meist von einer Art Schutzkuppel umschlossen (vgl. Ashjaee et al. 2001).



Abb. 4: Messpfiler mit den verwendeten Choke-Ring-Antennen der Typen Leica AT504GG (links) und Leica AR25 (rechts)

4 Auswertung der Messdaten

Direkt nach der GNSS-Messung wird eine Qualitätskontrolle der Messdaten durchgeführt und wenn notwendig die Messung wiederholt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die zeitnahe Erfassung der GNSS-Daten in Verbindung mit den terrestrischen Messungen.

Für die Qualitätskontrolle wird das Software-Paket TEQC des UNAVC-Konsortiums verwendet (Estey und Meertens 1999). Damit lassen sich Anzahl und Qualität der Beobachtungen, Phasensprünge, Uhrenfehler usw. relativ kompakt und schnell bewerten.

4.1 Erhebung von Korrekturdaten

Neben den Messdaten der GNSS-Messkampagne werden für die Auswertung der Basislinien verschiedene Korrekturdaten herangezogen, um die Genauigkeit der berechneten Positionen zu steigern.

Zum einen werden präzise Ephemeriden (Satellitenbahndaten) und ein Ionosphärenmodell des International GNSS Service (IGS) verwendet. Diese Daten werden im Internet in verschiedenen Produktlinien mit unterschiedlichen Genauigkeiten und Latenzzeiten zur Verfügung gestellt. Für die Auswertung in Hesse/Heim werden die finalen Produkte verwendet. Sie weisen die höchste Qualität auf, sind allerdings erst mit einer Verzögerung von 13 bis 20 Tagen nach der Messung verfügbar (vgl. International GNSS Service 2021).

Zusätzlich werden für alle bei der Messung eingesetzten Antennen individuelle Antennenkalibrierdaten verwendet, welche aus einer absoluten Kalibrierung stammen. Diese Antennenkalibrierdaten enthalten Korrekturwerte für Phasenzentrumsoffset und Phasenzentrumsvariationen und stehen als ANTEX-Datei (Antenna Exchange) zur Verfügung.

4.2 Berechnung von Basislinien

Das Ziel der GNSS-Auswertung ist es Basislinien zwischen den zu messenden Punkten und den beiden Referenzstationen zu berechnen.

Die Berechnung der Basislinien wird mit Hilfe des Basislinienprozessors Wa2 durchgeführt (WaSoft 2020). Dieser gehört zu dem von Prof. Dr.-Ing. L. Wanning entwickelten Softwarepaket WaSoft und ist ein reines Kommandozeilenprogramm. Wa2 kann direkt über die Kommandozeile oder über eine Batch-Datei gesteuert werden.

Die Basislinien werden im Weiteren zusammen mit den terrestrischen Messdaten (Nivellement und Tachymetrie) einer hybriden Ausgleichung zugeführt.

4.3 Hybride Ausgleichung

Auf die Auswertung der terrestrischen Messdaten wird in diesem Beitrag nicht näher eingegangen. Zur Überprüfung der Präzision und Zuverlässigkeit sowie zur Aufdeckung grober Beobachtungsfehler werden die einzelnen Beobachtungsgruppen aber separat ausgeglichen und überprüft. Die endgültigen Ergebnisse ergeben sich aus einer kombinierten/hybriden Ausgleichung der Höhenunterschiede, Tachymeterbeobachtungen und GNSS-Basislinien.

Die Lagerung des Netzes erfolgt aktuell auf den UTM-Koordinaten der Permanentstationen der Nullepoche aus dem Jahr 2018, die als Festpunkte eingeführt werden. Es handelt sich somit zwar um eine gezwängte Ausgleichung, der Einfluss der festgehaltenen Punkte wird aber mit einem Vergleich der Basislinien im Vorfeld abgeschätzt. Aktuell sind diese Differenzen so gering, dass keine signifikante Bewegung der beiden Punkte zueinander festgestellt werden kann. Es ergibt sich durch die o. g. Auswertemethode somit kein signifikanter Zwang auf die übrigen Beobachtungspunkte.

In allen bisher durchgeführten Messkampagnen konnten extrem hohe Genauigkeiten im Bereich < 1 mm erreicht werden. Dies ist zum einen durch die hohen Anforderungen an die Erfassung, Konfiguration und Auswertungen begründet und zum anderen ergänzen sich die terrestrischen Messungen mit den GNSS-Beobachtungen.

5 Vergleich verschiedener Auswertevarianten und ihrer Ergebnisse

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit wurden am Beispiel der o. g. Monitorings grundsätzliche Untersuchungen zu verschiedenen Aspekten der GNSS-Messung durchgeführt (Hiller 2022). Ziel dieser Untersuchungen war es, die Genauigkeit und Effizienz der Messung und ihrer Auswertung zu steigern. Ein Teil dieser Analysen und ihrer Ergebnisse werden in diesem Kapitel beschrieben. Es handelt sich dabei um die Einflüsse der Nutzung von Galileo-Signalen, unterschiedlich langen Beobachtungsdauern, verschiedenen Korrekturdaten und der Anwendung von Abschattungsmasken auf die Ergebnisse. Des Weiteren wurden Auswertungen mit verschiedenen Softwarelösungen durchgeführt und die Ergebnisse aus einem differenziellen Positionierungsverfahren mit denen eines absoluten Verfahrens verglichen.

5.1 Ausschluss von Galileo Signalen

Bei dieser Auswertevariante wurden gezielt Beobachtungen des Galileo-Systems von der Auswertung ausgeschlossen. Es galt festzustellen, ob die zusätzliche Verwendung dieser Signale (neben GPS und GLONASS) eine signifikante Auswirkung auf das Ergebnis hat.

Die durchschnittliche Anzahl von Satelliten pro Epoche, von denen Beobachtungsdaten für die Auswertung der Basislinien genutzt wurden, ist erwartungsgemäß deutlich gesunken. An den verschiedenen Messpunkten waren im Schnitt zwischen 1,6 und 5,2 Satelliten weniger sichtbar. Dies führt zu einer geringfügigen Verschlechterung der Satellitengeometrie, was anhand der durchschnittlichen PDOP-Werte einer einzelnen Epoche festgestellt werden kann. Der PDOP-Wert ist ein dimensionsloser Wert, der die Genauigkeit einer dreidimensionalen Positionsbestimmung in Abhängigkeit von der Satellitengeometrie beschreibt. Die Werte verschlechtern sich um 0,1 bis 0,2 für die jeweiligen Punkte.

Die Koordinaten selbst haben sich durch den Verzicht auf die Galileo-Signale dagegen nur minimal verändert. Die höchste Differenz in einer Koordinatenkomponente liegt bei 1,0 mm, was zu einer maximalen streckenmäßigen Abweichung (3D) eines Punktes von 1,3 mm führt. Die zusätzliche Verwendung von Galileo-Signalen hat in diesem Fall somit nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

5.2 Vergleich verschiedener Beobachtungsdauern

In diesen Auswertevarianten wurden die Auswirkungen kürzerer Beobachtungsdauern auf die Messergebnisse untersucht. Gemäß Messprogramm muss die Beobachtungsdauer mindestens 7 Stunden betragen. Bei der im Rahmen der Untersuchung betrachteten Messkampagne lag sie sogar zwischen 8 und 9 Stunden. Zum Vergleich wurden Auswertungen mit gekürzten Beobachtungsdauern von vier Stunden, zwei Stunden und einer Stunde durchgeführt.

Die Ergebnisse der Auswertung mit der einstündigen Beobachtungsdauer ergeben eine mittlere, streckenmäßige Abweichung (3D) von 4,1 mm. Die maximale streckenmäßige Abweichung liegt bei 7,2 mm. Für die vorgegebene Mess-toleranz von 10 mm sind dies verhältnismäßig hohe Abweichungen.

Je länger die Beobachtungsdauer ist, desto geringer werden die Abweichungen. Bei der zweistündigen Beobachtung liegt die mittlere, streckenmäßige Abweichung (3D) noch bei 3,1 mm. Die Auswertungsvariante mit einer Beobachtungsdauer von vier Stunden hat schließlich eine mittlere streckenmäßige Abweichung (3D) von 1,7 mm und eine maximale von 3,5 mm (Abb. 5). Die maximalen Abweichungen traten an Punkten mit starker Abschattung durch z. B. Bäume auf.

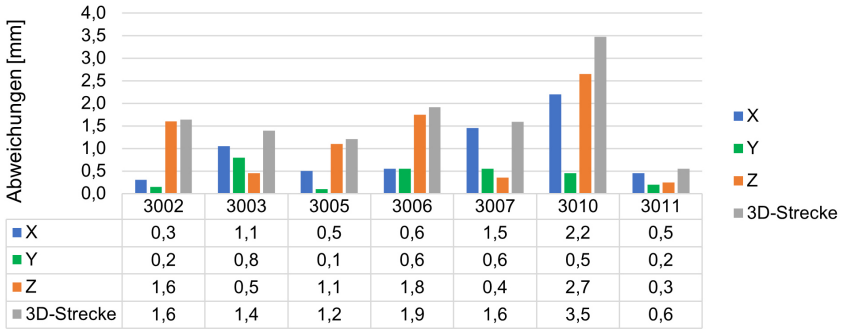


Abb. 5: Abweichungen in den einzelnen Koordinatenkomponenten und streckenmäßige Abweichung zwischen der standardmäßigen (7–8 h) und der reduzierten Beobachtungsdauer (4 h)

Beobachtungsdauern von 15 bis 20 Minuten reichen in der Regel aus, um Mehrdeutigkeiten sicher auflösen zu können. Für das Erreichen höchster Genauigkeiten sind jedoch längere Beobachtungsdauern notwendig, um Fehler durch z. B. Mehrwegeinflüsse herausmitteln zu können.

5.3 Einfluss verschiedener Korrekturdaten

5.3.1 Präzise Ephemeriden

Bei der Auswertung ohne Verwendung von präzisen Ephemeriden kommt es zu keinen signifikanten Unterschieden in den Ergebnissen. Die höchste Differenz in einer Koordinatenkomponente liegt bei 0,1 mm.

Der Grund dafür ist, dass der sogenannte Nutzer-Streckenfehler bei einer Relativpositionierung mit kurzen Basislinien quasi vollständig eliminiert werden kann. Da diese Bedingungen im vorliegenden Anwendungsfall erfüllt sind, führen die präzisen Ephemeriden zu keiner Genauigkeitssteigerung.

5.3.2 Ionosphärenmodell

Auch bei der Auswertung ohne Verwendung eines Ionosphärenmodells kommt es nur zu vernachlässigbaren Abweichungen. Die höchste Abweichung in einer Koordinatenkomponente liegt bei 0,4 mm.

Hierfür gibt es verschiedene Erklärungen. Zum einen können mit Hilfe der Mehrfrequenz-Beobachtungen, welche in die Auswertung eingegangen sind, ionosphärische Laufzeitkorrekturen berechnet werden, welche den Einfluss der

Ionosphäre praktisch vollständig beseitigen. Zum anderen wird der Fehler durch die differenzielle Positionierung mit sehr kurzen Basislinien ohnehin weitgehend eliminiert.

5.4 Einfluss von Abschattungsmasken

An manchen Messpunkten kommt es zu Abschattungen durch Bäume oder große Höhenunterschiede des Geländes. Deswegen wurden mit Hilfe von Abschattungsmasken an einige Messpunkten Beobachtungen, welche aus dem Abschattungsbereich stammen, gezielt von der Auswertung ausgeschlossen.

Je stärker die Abschattung an einem Punkt ist, desto größer fallen auch die Differenzen zu den Ergebnissen der Auswertung ohne Abschattungsmasken aus. Sie reichten vom niedrigen Millimeter Bereich bis hin zu einer streckenmäßigen Abweichung (3D) von knapp über einem Zentimeter. Auch die Satellitengeometrie verschlechterte sich durch das Anwenden von Abschattungsmasken.

Die Ergebnisse ermöglichen keine Aussage darüber, ob alle durch Abschattungsmasken ausgeschlossenen Signale durch Mehrwegeeffekte verfälscht wurden oder ob es sich teilweise um fehlerfreie Signale handelte.

6 Zusammenfassung

In vorliegendem Beitrag wurde das geodätische Monitoring der Schleusenanlage Hessigheim beschrieben, bei dem GNSS-Messungen einen signifikanten Anteil einnimmt und in der kombinierten Auswertung mit terrestrischen Messverfahren eine enorm hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse erreicht wird. Eine Untersuchung unterschiedlicher Auswertevarianten bestätigt bekannte Tatsachen, wie z. B. den geringen Einfluss präziser Ephemeriden oder Ionosphärenmodelle bei kurzen Basislinien. Andererseits konnte aber auch deutlich gemacht werden, dass ggf. zu großzügig gewählte Abschattungsmasken nicht immer Vorteile auf das Ergebnis bringen.

Literatur

- AdV (2009): Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006 bis 2011. 3. überarb. Fassung v. 01.08.2009.
- Ashjaee, J., Astakhov, A., Filippov, V., Sutjagin, I., Tatarnikov, D. (2001): Dual-frequency Chokering ground planes am 21.08.2001. Anmeldenr: US 6,278,407 B1.

- Böhm, K., Brockmann, H., Meutsch, M., Röpel, L., Selinka, D. (2019a): Geodätisches Monitoring der Schleusenanlage Hessigheim – Messprogramm 1: GNSS-Netzmessungen, Version 1.3 (unveröffentlicht).
- Böhm, K., Brockmann, H., Meutsch, M., Röpel, L., Selinka, D. (2019b): Geodätisches Monitoring der Schleusenanlage Hessigheim – Messprogramm 2: Terrestrische Netzmessungen, Version 2.2 (unveröffentlicht).
- Böhm, K., Brockmann, H., Meutsch, M., Röpel, L., Selinka, D. (2019c): Geodätisches Monitoring der Schleusenanlage Hessigheim – Messprogramm 4: Netzausgleichung, Version 1.2 (unveröffentlicht).
- Cramer, M., Kölle, M., Haala, N., Havel, P. (2020): Flächenhaftes UAV-Monitoring: das Hessigheim-Projekt. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 127(3), 107–117.
- Estey, L. H., Meertens, C. M. (1999) TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLO-NASS Data. *GPS Solutions*, 3(1), 42–49.
- Hiller, J. (2022): Untersuchung von hochgenauen statischen GNSS-Punktbestimmungen. Bachelorarbeit im Studiengang Vermessung und Geoinformatik an der Hochschule für Technik Stuttgart (unveröffentlicht).
- Hinrichs, J. (2017): Vom Aufschluss im Fels zum Baugrundmodell – Aufnahme von Felsbohrkernen am Beispiel der Schleusen Besigheim und Hessigheim. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): Bohrungen und Baugrund. Herausforderungen bei der Ausführung in der horizontalen und vertikalen Bohrtechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. 111–114.
- International GNSS Service (2021): Homepage IGS. <https://igs.org>, letzter Zugriff 21.06.2023.
- Schneider, P. J., Sörgel, U. (2020): Monitoring einer Schleuse mittels Persistent-Scatterer-Interferometrie. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 127(3), 118–124.
- Schwarz, W., Fedan, M. (2020): Effiziente Neigungsmessungen – ein Verfahren der permanenten Bauwerksüberwachung. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 127(3), 125–146.
- Straßer, D., Montenegro, H., Odenwald, B., Blechschmidt, L., Liesch, T., Goldscheider, N. (2017): Hydrogeologische Untersuchungen im Bereich der Staustufe Hessigheim am Neckar. In: BAW Mitteilungen 100. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. 55–75.
- WaSoft (2020): Wa2 – Programm zur Basislinienprozessierung. www.wasoft.de, Version 2.0a.
- Zhang, L., Schwieger, V. (2018): Investigation of a L1-optimized choke ring ground plane for a low-cost GPS receiver-system. In: *Journal of Applied Geodesy* 12(1), 55–64. DOI: 10.1515/jag-2017-0026.

Kontakt

Dr.-Ing. Andreas Wagner | Jonathan Hiller, B. Eng.
ANGERMEIER INGENIEURE GmbH
i_PARK Klingholz 16, 97232 Giebelstadt
wagner.andreas@angermeier.de | hiller.jonathan@angermeier.de

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) werden in der Geodäsie und ihren Nachbardisziplinen standardmäßig zur Erfassung von Geodaten eingesetzt und decken dabei einen weiten Bereich von erreichbaren Genauigkeiten ab. Die Technik wird kontinuierlich ausgebaut, Systeme, Auswertekonzepte und Dienstangebote werden innovativ weiterentwickelt.

Es wird ein Überblick über den aktuellen Status von GNSS, den Stand der Technik und Trends gegeben. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Positionierungsverfahren PPP, zu dem Grundlagen vermittelt, neue Dienste vorgestellt und Anwendungsbeispiele präsentiert werden. Zu Qualität und Sicherheit – wichtige Aspekte bei GNSS – werden effiziente Feldprüfverfahren vorgestellt, Hardwareaspekte behandelt und Störungen von GNSS-Signalen erörtert. Anwendungen und Praxisbeispiele zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von GNSS auf.



ISBN: 978-3-95786-342-3



9 783957 863423

Schriftenreihe des DVW
Band 106 / 2023
Printversion: 29,60 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

