

# Innovative Satellitengeodäsie am GFZ – Fernerkundung mit reflektierten GNSS-Signalen

## Innovative Satellite Geodesy at GFZ – Remote Sensing with Reflected GNSS Signals

Jens Wickert, Maximilian Semmling, Jamila Beckheinrich, Georg Beyerle, Sibylle Vey, Harald Schuh

Aktuelle Forschungsergebnisse zur GNSS-Reflektometrie (GNSS-R) am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam werden vorgestellt. Diese innovative Beobachtungstechnik geht über die klassischen geodätischen Verfahren hinaus und zielt auf die Fernerkundung geophysikalischer Eigenschaften von Wasser-, Land- und Eisoberflächen sowie potenziell auch von Atmosphären- und Ionosphärenparametern. Mit verschiedenen boden- und fluggestützten Experimenten konnten bereits die interessanten Möglichkeiten dieser neuen geodätisch basierten Beobachtungstechnik für die Erdbeobachtung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen demonstriert werden. In jüngster Zeit sind auch erste satellitengestützte GNSS-R-Experimente zur globalen Fernerkundung in Planung. Es ist jedoch noch ein erheblicher Forschungsaufwand notwendig, um das hohe Potenzial dieser Technik auszuschöpfen und operationelle Anwendungen zu ermöglichen. Die Bedeutung der GNSS-R-Erdbeobachtungstechniken wird in den nächsten Jahren weiter wachsen. Basis dafür sind Entwicklung und Ausbau der neuen GNSS-Systeme und die sich kontinuierlich vergrößernde GNSS-Empfängerinfrastruktur (Bodennetze, Flugplattformen und LEO-Satelliten mit GNSS-Empfängern).

**Schlüsselwörter:** GNSS, Reflektometrie, Geodäsie, Erdbeobachtung, Fernerkundung, Altimetrie, HALO, GEROS, Bodenfeuchte

*Recent results of GNSS-Reflectometry (GNSS-R) activities at the German Research Centre for Geosciences GFZ are introduced. This innovative Earth Observation technique goes beyond standard geodetic applications and aims at to remote sensing of geophysical properties of water, land, and ice surfaces and potentially also of atmospheric and ionospheric parameters. Several ground and airborne experiments were successfully performed and demonstrated various applications of this innovative space geodetic technique for Earth Observation on different spatiotemporal scales. Recently also initial dedicated satellite-based GNSS-R experiments for global remote sensing are in preparation. However more international research work and cooperation are necessary to fully exploit the large potential of the GNSS reflectometry and to enable operational applications. The importance of GNSS-R based Earth Observation techniques will increase during the next years. This is due to the upcoming new GNSS systems, the increasing regional and global GNSS ground networks and the continuously rising number of dedicated GNSS receivers at flight platforms including Low Earth Orbiting satellites*

**Keywords:** GNSS, Reflectometry, Geodesy, Earth Observation, Remote Sensing, Altimetry, HALO, GEROS, Soil moisture

## 1 EINLEITUNG UND HINTERGRUND

Weltraumgestützte geodätische Verfahren wie GNSS, VLBI, SLR/LLR und Doris haben ein hohes Qualitätsniveau bezüglich ihrer „klassischen“ geodätischen Anwendungen, wie der präzisen Bestimmung von Stationskoordinaten und Erdrotationsparametern, erreicht. Dabei erlauben vor allem die GNSS-Verfahren in der praktischen Umsetzung ein hohes Maß an Operationalität, verbunden mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung der Messungen. Hier soll eine kurze Einführung in die Nutzung von GNSS-Verfahren zur Fernerkundung am Beispiel der GNSS-Reflektometrie gegeben und mit aktuellen Forschungsergebnissen illustriert werden.

Hinter dem Engagement des GFZ in der GNSS-Reflektometrie steht der Erfolg von GNSS-Techniken zur Atmosphärenfernerkundung. In den vergangenen zwei Jahrzehnten erlebten diese Methoden eine rasante Entwicklung (z. B. /Kursinski et al. 1997/, /Rocken et al. 1997/, /Bevis et al. 1992/). Grundprinzip ist die Ableitung atmosphärischer Parameter (Refraktivität, Luftdruck, geopotenzielle Höhe, Temperatur, Wasserdampf, Elektronendichte) aus Veränderungen der GNSS-Signale beim Durchgang durch die Atmosphäre und Ionosphäre der Erde /Wickert & Gendt 2006/. GNSS-Methoden zeichnen sich durch Langzeitstabilität, Wetterunabhängigkeit, hohe Genauigkeit und Kosteneffektivität aus. Bodengestützte Verfahren erlauben ein regionales Monitoring des vertikal integrierten Wasserdampfgehalts und der Elektronendichte mit hoher zeitlicher Auflösung /Gendt et al. 2004/. Mit zusätzlichem Analyseaufwand können Wasserdampfverteilungen auch dreidimensional abgeleitet werden /Bender et al. 2011/. Neue Entwicklungen sind hier u. a. Echtzeitanalysen für Kurzfristwettervorhersagen (z. B. /Li et al. 2014/). Die satellitengestützte GNSS-Radiokultationsmethode ist Basis für die Bestimmung vertikal hoch aufgelöster Verteilungen atmosphärischer und ionosphärischer Parameter im globalen Maßstab /Wickert et al. 2009/. Dabei sind die boden- und satellitengestützten Verfahren komplementär im Sinne der räumlichen und zeitlichen Abdeckung der Messungen. Die vorteilhaften Eigenschaften der GNSS-Verfahren eröffnen ein hohes Potenzial für Anwendungen in der Atmosphären- und Ionosphärenforschung, die Verbesserung numerischer Wettervorhersagen, das Monitoring des Weltraumwetters und die Klimaforschung (u. a. /Schmidt et al. 2010/ und /Wickert et al. 2009/). Der Beginn der operationellen Assimilation sowohl boden- als auch satellitengestützter GNSS-Atmosphärenparameter durch verschiedene internationale Wetterzentren im Jahr 2006 war dabei ein Durchbruch für die Akzeptanz dieser Techniken als etablierte Fernerkundungsmethode (z. B. /Wickert 2010/).

Die GNSS-Reflektometrie, d. h. die Nutzung reflektierter GNSS-Signale zur Fernerkundung von Wasser-, Eis- und Landoberflächen, wurde in den frühen 1990er-Jahren erstmals vorgeschlagen (z. B. /Martin-Neira 1993/) und ist gegenwärtig im Fokus breiter internationaler geophysikalisch-geodätischer Forschungsarbeiten. Eine Hauptanwendung der GNSS-Reflektometrie ist die Bestimmung der altimetrischen Höhe und der Rauigkeit von Meeresoberflächen. Weiterhin können Windgeschwindigkeit und -richtung aus der Verteilung der gestreuten Signalleistung abgeleitet werden (u. a. /Komjathy et al. 2000/). Eine andere potenzielle GNSS-R-Anwendung ist die Ableitung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung zur Korrektur

altimetrischer Messungen von Radarsatelliten. Derartige Daten können beispielsweise auch in globale ionosphärische Modelle zu deren Verbesserung assimiliert werden (z. B. /Katzberg et al. 1996/). Im Folgenden stellen wir kurz einige ausgewählte aktuelle Ergebnisse von GFZ-Forschungsarbeiten zur GNSS-Reflektometrie vor.

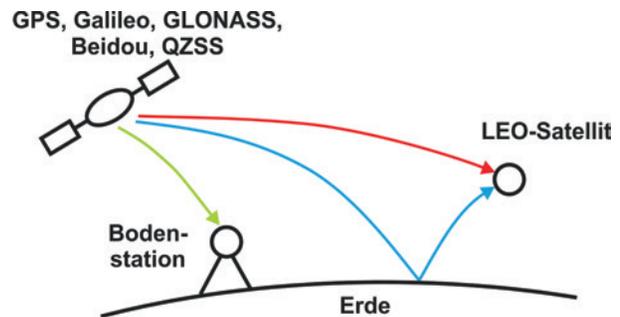


Abb. 1 | Prinzipdarstellung GNSS-basierter Methoden zur Fernerkundung. Die grüne und rote Farbe symbolisiert boden- und satellitengestützte Atmosphärensondierung. Hellblau sind GNSS-Signale dargestellt, die von Wasser-, Eis- und Landoberflächen reflektiert werden und für die Ableitung geophysikalischer Parameter dieser reflektierenden Oberflächen genutzt werden können (Quelle: GFZ)

## 2 AKTUELLE FORSCHUNGSERGEBNISSE ZUR GNSS-REFLEKTOMETRIE AM GFZ

Die Hauptmotivation für den Beginn der GFZ-Forschungsaktivitäten zur GNSS-Reflektometrie waren vielversprechende wissenschaftliche Ergebnisse, die im Rahmen des GPS-Radiokultationsexperiments an Bord des CHAMP-Satelliten erreicht wurden /Reigber et al. 2005/ und /Wickert et al. 2001/. Spezifische Signaturen in den GPS-RO-Daten konnten eindeutig Signalreflexionen an Wasser- und Eisoberflächen zugeordnet werden /Beyerle et al. 2002/ (Abb. 2). Verschiedene, umfangreiche bodengestützte Experimente und Kampagnen wurden anschließend durchgeführt, um diese Resultate zu verifizieren und auszubauen (z. B. /Helm 2008/ und /Helm et al. 2007/). Hier geben wir einen kurzen Überblick über aktuelle Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Von Meeresoberflächen reflektierte GNSS-Signale werden gegenwärtig für altimetrische Messungen im Küstenbereich /Fabra et al. 2011/ und /Semmling 2012/ und für die fluggestützte Fernerkundung von Wasseroberflächen /Semmling et al. 2013, 2014/ verwendet. Abb. 3 zeigt dazu die Beobachtungsgeometrie für ein Reflektometrieexperiment im Küstenbereich. Während der Messung wandert der Reflexionspunkt S auf der reflektierenden Wasseroberfläche. Der genaue Verlauf dieser Spur kann mit den Orbitdaten der GPS-Satelliten und der genauen Empfängerposition bestimmt werden. Derartige Beobachtungen enthalten altimetrische Informationen über die reflektierende Oberfläche am Punkt S und können genutzt werden, um die Meereshöhe (SSH, Sea Surface Height) abzuleiten (Abb. 4). Im Rahmen eines spezifischen Experiments auf der Disko-Insel (69,27° N, 53,54° W) in West-Grönland wurden ca. 40 Reflexionen pro Tag aufgezeichnet, mit denen die Meereszeiten in der angrenzenden Disko-Bucht deutlich aufgelöst wurden (Abb. 4).

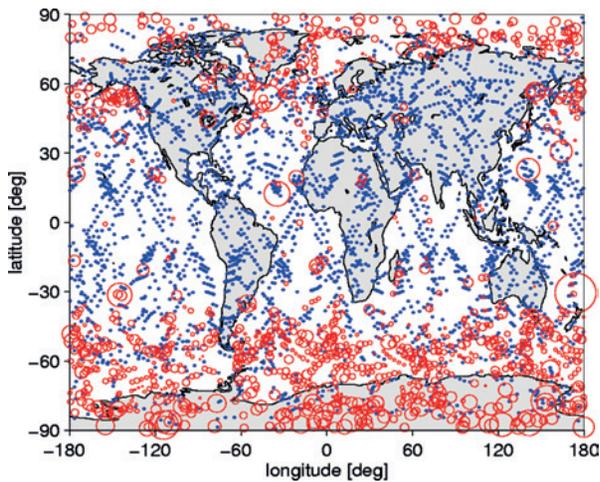


Abb. 2 | Geographische Verteilung von 3783 GPS-Okkultationsmessungen des deutschen CHAMP-Satelliten zwischen dem 14. Mai und 10. Juni 2001. Die blauen Punkte zeigen die 2571 Okkultationen ohne Signaturen reflektierter Signale, 1212 Reflexionsereignisse sind rot markiert /Beyerle et al. 2002/

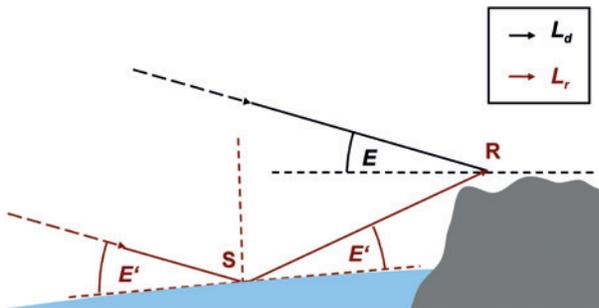


Abb. 3 | Beobachtungsgeometrie für Meeresoberflächenmonitoring im Küstenbereich mit der GNSS-Reflektometrie. Das direkte Signal erreicht den GNSS-Empfänger R auf dem kürzesten optischen Weg (schwarz). Das reflektierte Signal (rot) legt einen längeren Weg zurück; es wird spiegelnd im Punkt S an der Wasseroberfläche reflektiert /Semmling 2012/

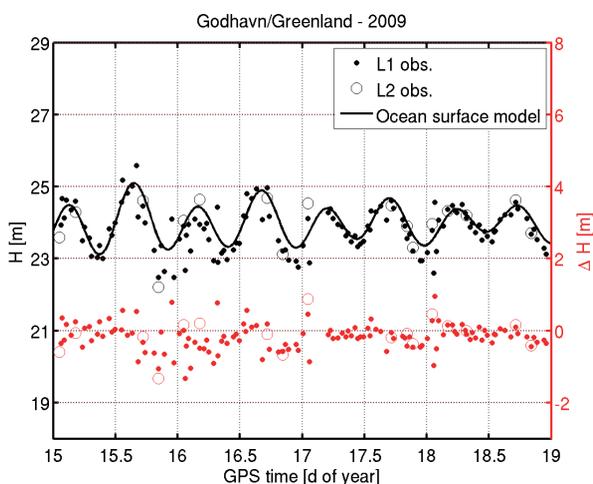


Abb. 4 | Zeitverlauf der Meeresoberflächenhöhe  $H$  in der Disko-Bucht (Grönland) zwischen dem 15. und 19. Januar 2009. Kleine Punkte bzw. größere Kreise stellen die Messungen für L1 bzw. L2 dar. Daten eines Ozeanoberflächenmodells sind zum Vergleich dargestellt (schwarze Line); es berücksichtigt die Geoidundulation und die Meeresgezeiten /Semmling 2012/

J. Wickert, M. Semmling, J. Beckheinrich, G. Beyerle, S. Vey, H. Schuh – Innovative Satellitengeodäsie am GFZ – Fernerkundung mit reflektierten GNSS-Signalen

# GNSS präzise bei Daten- ausfall

# GNSS UNLIMITED

SmartLink Korrekturen erlauben die Überbrückung von Unterbrechungen des RTK-Signals.

- bis zu 10 Minuten
- +/- 5 cm rms
- Empfang über Satellitenantenne

Leica Geosystems  
Tel. 089/14 98 10 0

**Leica**  
Geosystems

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen erste GFZ-Ergebnisse der Bodenfeuchtebestimmung mittels GNSS-Reflektometrie in der Nähe von geodätischen GNSS-Stationen. Im Rahmen einer Fallstudie für Sutherland, Südafrika, wurden Daten einer permanenten GNSS-Station (Abb. 5) von Januar bis Juli 2013 ausgewertet (Abb. 6). Die Analyse basiert auf der Auswertung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) der GNSS-Signale /Larson et al. 2010/. Aus den Interferenzmustern im SNR, die durch Überlagerung von direktem und reflektiertem Signal entstehen, kann die Eindringtiefe der GNSS-Signale in den Boden abgeleitet werden /Vey et al. 2013/. Diese Eindringtiefe ist abhängig von der Feuchte an der Erdoberfläche und lässt sich somit in Bodenfeuchtevariationen umrechnen /Chew et al. 2012/.

Die GNSS-basierten Bodenfeuchtemessungen geben sehr gut die Niederschlagsereignisse und die nachfolgende Verdunstung wieder (Abb. 6). Im Vergleich zu In-situ-Messungen weisen die GNSS-Ergebnisse leicht unterschiedliche absolute Werte auf. Diese Unter-



Abb. 5 | Vordergrund: Geodätische GNSS-Station in Sutherland, Südafrika. Hintergrund (rechts): In-situ-Bodenfeuchtesensoren (Quelle: GFZ)

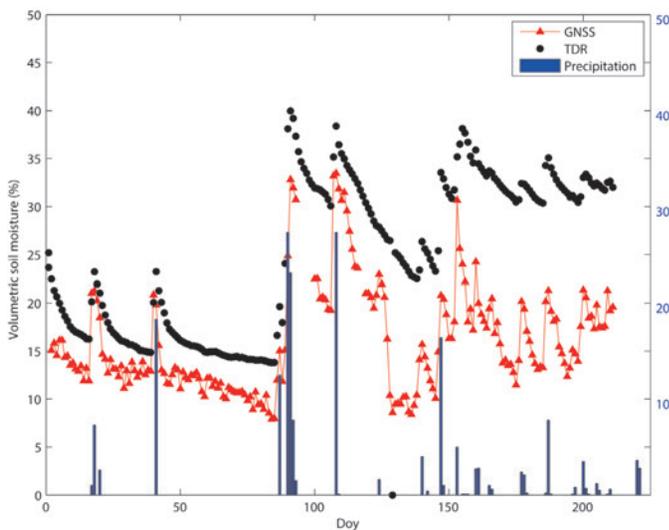


Abb. 6 | Variation der Bodenfeuchte in Sutherland, Südafrika, abgeleitet aus GNSS-Daten (rot) und TDR-Sensoren (schwarz). Blaue Linien markieren Niederschlagsereignisse /Vey et al. 2013/

schiede sind zum einen auf verschiedene Verfahren der Kalibrierung beider Methoden zurückzuführen. Zum anderen messen die beiden Verfahren in unterschiedlichen Bodentiefen. Während die TDR-Sensoren (Time-Domain-Reflectometry) einen integralen Feuchtewert über die ersten 15 cm des Bodens aufzeichnen, sind die GNSS-Signale nur in den obersten 5 cm auf Feuchte sensitiv. Die Variationen der Bodenfeuchte zeigen jedoch eine äußerst gute Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren. GNSS-Beobachtungen haben damit das Potenzial, an den vielen weltweit verteilten GNSS-Stationen das globale Beobachtungsnetz für Bodenfeuchte zu verdichten.

Zur methodischen Erweiterung der bodengestützten Altimetrie- und Bodenfeuchtemessungen und auch zur Erhöhung der räumlichen Auflösung wurden spezifische Flugexperimente mit einem Luftschiff (Zeppelin) und mit dem neuen deutschen Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and LOng range research aircraft) durchgeführt /Semmling et al. 2013, 2014/. Die Flüge des Forschungsflugzeugs im Rahmen der GEOHALO-Kampagne erfolgten zwischen dem 6. und 12. Juni 2012 über der italienischen Halbinsel und dem umgebenden Mittelmeer. Die durchschnittliche Flughöhe und -geschwindigkeit lagen bei ca. 3500 m über dem Meeresspiegel und 425 km/h (mehr Details siehe /Semmling et al. 2014/). Die Bodenspuren der spiegelnden Reflektionspunkte, die für die altimetrische Datenauswertung genutzt wurden, sind in Abb. 7 dargestellt. Sie verlaufen meist parallel zur Flugtrajektorie. Die Höhe der mittleren Meeresoberfläche (MSS) wurde entlang dieser Spuren abgeleitet.

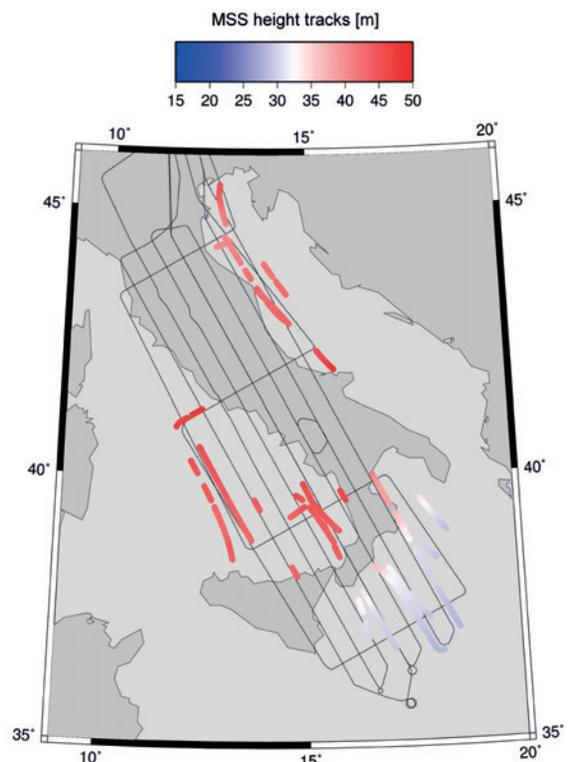
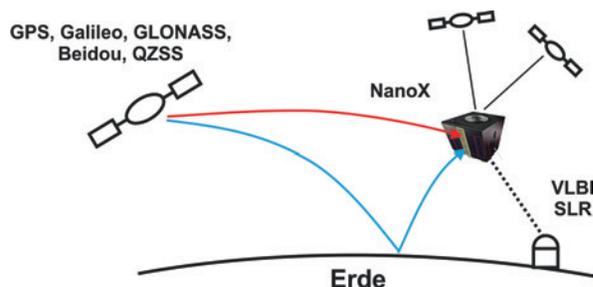


Abb. 7 | Bodenspuren der spiegelnden GNSS-Reflektionen, die während der GEOHALO-Flugkampagne über dem Mittelmeer im Bereich der italienischen Halbinsel zwischen dem 6. und 12. Juni 2012 aufgezeichnet wurden. Die Farbe zeigt die entsprechenden Höhenanomalien der Meeresoberfläche. Die Bodenspuren der HALO-Flugtrajektorie sind mit dünnen schwarzen Linien gekennzeichnet

Exemplarische Ergebnisse sind ebenfalls in *Abb. 7* dargestellt. Deutlich erkennbar ist der große MSS-Gradient südöstlich der Halbinsel.

Für eine globale Erdbeobachtung mit GNSS-R sind Satellitenmessungen erforderlich. Aus diesem Grund wurden vom GFZ seit 2009 verschiedene Kleinsatellitenstudien in Kooperation mit Firmen der Region Berlin-Brandenburg initiiert: NanoX, NanoGEM und MicroGEM /Buhl et al. 2012/, /Wickert et al. 2011a/, /Brieß et al. 2009/. Hauptnutzlasten dieser geplanten Satelliten sind jeweils spezifische GNSS-Empfänger zur Erdbeobachtung. Die Kleinsatelliten selbst sollen als sekundäre Nutzlast größerer Satelliten gestartet werden und könnten als Vorreiter kosteneffizienter Konstellation zur GNSS-basierter Erdbeobachtung dienen. Ein Anwendungsbeispiel ist die Nutzung von GNSS-R für zukünftige, satellitengestützte Tsunami-Frühwarnsysteme /Stosius et al. 2011/.

Eine Vorreitermission dazu, mit nur einem Kleinsatelliten, könnte auch mit anderen innovativen Experimenten kombiniert werden, z. B. der geodätischen Ko-Lokation im Weltraum /Nothnagel et al. 2013/, /Plank et al. 2013/, /Bar-Sever et al. 2012/, /Schuh 2008/. Für dieses Missionsziel müssen drei unterschiedliche weltraumgeodätische Techniken (GNSS, Satellite Laser Ranging (SLR) und Very Long Baseline Interferometry (VLBI)) parallel auf der Satellitenplattform angewendet werden, um den dynamischen Referenzrahmen im Weltraum mit dem globalen terrestrischen Referenzrahmen (ITRF) und dem quasi-inertialen raumfesten Referenzrahmen (International Celestial Reference Frame, ICRF) extraterrestrischer Radioquellen zu verbinden (*Abb. 8*).

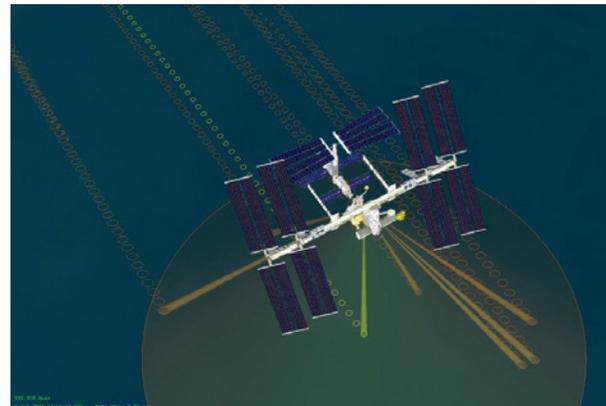


**Abb.8** | Schematische Übersicht über satellitengestützte Erdbeobachtung mit GNSS-Radiokkulturation und kohärenter Reflektometrie, ergänzt durch geodätische Ko-Lokation mit GNSS, VLBI und SLR an Bord von Kleinsatelliten, exemplarisch hier für NanoX (siehe Text) (Quelle: GFZ)

Eine weitere Aktivität der satellitengestützten GNSS-R ist die GEROS-ISS-Mission (GEROS hiernach). Die Abkürzung steht für GNSS Reflectometrie, Radio Okkultation und Scatterometrie an Bord der ISS (Internationale Weltraumstation) und bezeichnet ein wissenschaftliches Experiment, das durch ein internationales Wissenschaftlerteam unter Leitung des GFZ /Wickert et al. 2011/ der Europäischen Weltraumbehörde ESA vorgeschlagen wurde (*Abb. 9*). GEROS basiert auf der Nutzung reflektierter GNSS-Signale zur Fernerkundung des Erdsystems und zur Charakterisierung des globalen Wandels. Der GEROS-Vorschlag wurde von der ESA nach einem komplexen Bewertungsprozess für weiterführende Studien (zunächst Phase A) ausgewählt.

Die wichtigsten Missionsziele von GEROS sind: (1) Altimetrische Bestimmung des Meeresspiegels (SSH, Sea Surface Height) und (2) Ableitung der Meeresoberflächenrauigkeit (Mean Square Slope),

die mit Windgeschwindigkeit und -richtung korreliert werden kann. Sekundäre Missionsziele sind: (1) Einsatz der GNSS-Radiokkultation mit neuen Aspekten im Vergleich zu bisherigen Missionen und (2) Anwendung der GNSS-Reflektometrie zur Fernerkundung von Landoberflächen, speziell zur Ableitung von Parametern wie Bodenfeuchte, Vegetationsindex und in mittleren Breiten von Schnee- und Eisoberflächen zum besseren Verständnis des anthropogen verursachten Klimawandels.



**Abb.9** | Schematische Darstellung der geplanten GNSS-Reflektometrie-Messungen an Bord der Internationalen Weltraumstation ISS innerhalb des GEROS-Experiments (siehe Text). Die Kreise symbolisieren die Reflexionspunkte. Für diese Simulation wurden acht Reflexionen parallel aufgezeichnet (Dank an S. D'Addio, ESA)

### 3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aktuelle GFZ-Forschungsaktivitäten zur GNSS-Reflektometrie wurden vorgestellt. Im Gegensatz zur bereits etablierten GNSS-Atmosphärensondierung ist bei der GNSS-Reflektometrie noch ein verstärkter internationaler Forschungsaufwand zu leisten, um die vielfältigen Möglichkeiten dieser innovativen Fernerkundungsmethode möglichst vollständig auszuschöpfen und auch operationelle Anwendungen zu ermöglichen.

Bodengestützte Experimente zum Monitoring von Meeresoberflächen im Küstenbereich und zur Bestimmung der Bodenfeuchte im nahen Umkreis geodätischer GNSS-Stationen liefern vielversprechende Ergebnisse. Diese werden derzeit weiter ausgebaut, um noch höhere Genauigkeiten zu erreichen und einen operationellen Einsatz zum Monitoring geophysikalischer Oberflächenparameter zu ermöglichen.

Mit den Flugexperimenten an Bord eines Zeppelins und des deutschen Forschungsflugzeuges HALO konnte die Erhöhung der räumlichen Abdeckung der GNSS-R-Messungen erfolgreich demonstriert werden. Diese Experimente sind auch ein wichtiger methodischer Zwischenschritt für die Anwendung der GNSS-R an Bord von Satelliten. Derzeit sind derartige Satellitenmissionen in Vorbereitung. Neben der U.S.-Mission CYGNSS (CYclone GNSS /Ruf et al. 2012/) sind derzeit auch Studien für ein GNSS-R-Experiment an Bord der Internationalen Weltraumstation ISS in Vorbereitung, an denen GFZ-Wissenschaftler führend beteiligt sind.

## LITERATUR

- Bar-Sever, Y.; Nerem, R. S. and the GRASP Team (2012): The Geodetic Reference Antenna in Space (GRASP): A Mission to Enhance Space-based Geodesy. [http://www.igs.org/assets/pdf/Poland\\_2012\\_-\\_P09\\_Bar-Sever\\_PR51.pdf](http://www.igs.org/assets/pdf/Poland_2012_-_P09_Bar-Sever_PR51.pdf), Presentation at IGS workshop Poland 2012.
- Bender, M.; Dick, G.; Ge, M.; Deng, Z.; Wickert, J.; Kahle, H.-G.; Raabe A.; Tetzlaff, G. (2011): Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. In: *Advances in Space Research*, 47(2011)10, 1704–1720.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T.; Rocken, C.; Anthes, R.; Ware, R.H. (1992): GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. In: *J. Geophys. Res.*, 97(1992), 15787–15801.
- Brieß, K.; Kornemann, G.; Wickert, J. (2009): MicroGEM: Microsatellites for GNSS Earth Monitoring. Final Report, Phase 0/A, S. 244.
- Buhl, M.; Segert, T.; Wickert, J. (2012): Machbarkeitsuntersuchung Nano-X. Final Report, Phase 0, GFZ-TN03, S. 121.
- Chew, C.; Small, E.; Larson, K.; Zavorotny, V.U. (2012): Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil. In: *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sens.*, doi: 10.1109/TGRS.2013.2242332.
- Fabra, F.; Cardellach, E.; Rius, A.; Ribó, S.; Oliveras, S.; Belmonte, M.; Semmling, M.; D'Addio, S. (2011): Phase altimetry with dual polarization GNSS-R over sea ice, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50(6), 2112–2121, doi:10.1109/TGRS.2011.2172797.
- Gendt, G.; Dick, G.; Reigber, Ch.; Tomassini, M.; Liu, Y.; Ramatschi, M. (2004): Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. In: *J. Met. Soc. Japan*, 82(2004)1B, 361–370.
- Helm, A.; Montenbruck, O.; Ashjaee, J.; Yudanov, S.; Beyerle, G.; Stosius, R.; Rothacher, M. (2007): GORS – A GNSS Occultation, Reflectometry and Scatterometry space receiver. Proc. ION-GNSS-2007 Conf., 26–28 Sep., Fort Worth, Texas, S.11.
- Helm, A. (2008): Ground-based GPS altimetry with the L1 OpenGPS receiver using carrier phase-delay observations of reflected GPS signals. GFZ Scientific Technical Report, STR 08/10.
- Katzberg, S.; Garrison, J. (1996): Utilizing GPS to Determine Ionospheric Delay Over the Ocean. NASA TM, 4750.
- Komjathy, A.; Zavorotny, V. U.; Axelrad, P.; Born, G. H.; Garrison, J. L. (2000): GPS signal scattering from sea surface: Wind speed retrieval using experimental data and theoretical model. In: *Remote Sens. Environ.*, 73(2000), 162–174.
- Kursinski, E. R.; Hajj, G. A.; Schofield, J. T.; Linfield, R. P.; Hardy, K. R. (1997): Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using Global Positioning System. In: *J. Geophys. Res.*, 102(1997), 23 429–23 465.
- Larson, K.; Braun, J.; Small, E.; Zavorotny, V. U.; Gutman, E. D.; Bilich, A. L. (2010): GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. In: *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 3(2010)1, 91–99.
- Li, X.; Dick, G.; Ge, M.; Heise, S.; Wickert, J.; Bender, M. (2014): Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock and phase delay corrections. *Geophysical Research Letters*, 41, 10, 3615–3621, doi: 10.1002/2013GL058721.
- Martin-Neira, M. (1993): A passive reflectometry and interferometry system PARIS: Application to ocean altimetry. In: *ESA Journal*, 17(1993), 331–355.
- Nothnagel, A.; Charlot, P.; Dehant, V.; Fienga, A.; Hase, H.; Plank, L.; Schuh, H. (2013): Short Report of IVS Working Group 5 (WG5) on Space Science Applications – An IVS Perspective. [http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg5/IVS\\_WG5\\_Report\\_130528\\_A4.pdf](http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg5/IVS_WG5_Report_130528_A4.pdf).
- Plank, L.; Böhm, J.; Krásria, H.; Schuh, H. (2013): VLBI satellite tracking for precise coordinate determination - a simulation study. In: Zubko, N.; Poutanen, M. (Hrsg.): Proc. 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 105–109.
- Reigber, C.; Lühr, H.; Schwintzer, P.; Wickert, J. (Hrsg.) (2005): Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2005.
- Rocken, C.; Anthes, R.; Exner, M.; Hunt, D.; Sokolovskiy, S.; Ware, R.; Gorbunov, M.; Schreiner, W.; Feng, D.; Herman, B.; Kuo, Y.-H.; Zou, X. (1997): Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. In: *J. Geophys. Res.*, 102(1997), 29 849–29 866.
- Ruf, C. S.; Gleason, S.; Jelenak, Z.; Katzberg, S.; Ridley, A.; Rose, R.; Scherrer, J.; Zavorotny, V. (2012): The CYGNSS nanosatellite constellation hurricane mission. Proc. 2012 Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, 23–27 July 2012, 214 – 216. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351600.
- Schmidt, T.; Wickert, J.; Faber, A. (2010): Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures. In: *Advances in Space Research*, 46(2010)2, 150–161. doi:10.1016/j.asr.2010.01.021.
- Schuh, H. (2008): Interaction of celestial and terrestrial reference frames. In: *Journal of Geodesy*, 82(2008)11, 744–745.
- Semmling, A. M. (2012): Altimetric Monitoring of Disko Bay using Interferometric GNSS Observations on L1 and L2 Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, 2012, Scientific Technical Report STR12/04.
- Semmling, A. M.; Wickert, J.; Schön, S.; Stosius, R.; Markgraf, M.; Gerber, T.; Ge, M.; Beyerle, G. (2013): A Zeppelin experiment to study airborne altimetry using specular Global Navigation Satellite System reflections. In: *Radio Science*, 48(2013), 427–440.
- Semmling, A. M.; Beckheinrich, J.; Wickert, J.; Beyerle, G.; Schön, S.; Fabra, F.; Pflug, H.; He, K.; Schwabe, J.; Scheinert, M. (2014): Sea surface topography retrieved from GNSS-R phase data of the GEOHALO flight mission. In: *Geophysical Research Letters*, 41(2014), 954–960.
- Stosius, R.; Beyerle, G.; Hoehner, A.; Wickert, J.; Lauterjung, J. (2011): The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with Glonass and Galileo on GNSS-Reflectometry tsunami detection from space. In: *Advances in Space Research*, 47(2011)5, 843–853.
- Vey, S.; Larson, K.; Wickert, J.; Güntner, A.; Ramatschi, M.; Blume, T. (2013): Derivation of near-surface soil moisture from the GNSS site Sutherland, South Africa. Presentation at Workshop on GNSS-Reflectometry, 4–5. November 2013, Brest, Frankreich.
- Wickert, J.; Gendt, G. (2006): Fernerkundung der Erdatmosphäre mit GPS. In: *Promet: meteorologische Fortbildung*, 32(2006)3/4, 176–184.
- Wickert, J.; Reigber, C.; Beyerle, G.; König, R.; Schmidt, T.; Grunwaldt, L.; Galas, R.; Meehan, T.; Melbourne, W.G.; Hocke, K. (2001): Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First Results from CHAMP. In: *Geophysical Research Letters*, 28(2001)17, 3263–3266.
- Wickert, J.; Michalak, G.; Schmidt, T.; Beyerle, G.; Cheng, C. Z.; Healy, S. B.; Heise, S.; Huang, C.-Y.; Jakowski, N.; Köhler, W.; Mayer, C.; Offiler, D.; Ozawa, E.; Pavelyev, A. G.; Rothacher, M.; Tapley, B.; Arras, C. (2009): GPS radio occultation: Results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. In: *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20(2009)1, 35–50.
- Wickert, J. (2010): Near-real-time provision and usage of global atmospheric data from CHAMP and GRACE (NRT-RO): Motivation and Introduction. In: Flechtner et al. (Hrsg.): *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*. Berlin/Heidelberg/New York, 429–432.
- Wickert, J.; Rothacher, M.; Brieß, K.; Wahnschaffe, G.; Pilz, N. (2011a): NanoGEM: Phase A. Final Report, S. 144.

Wickert, J.; Beyerle, G.; Cardellach, E.; Förste, C.; Gruber, T.; Helm, A.; Hess, M. P.; Høeg, P.; Jakowski, N.; Montenbruck, O.; Rius, A.; Rothacher, M.; Shum C. K. (2011b): GNSS Reflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard ISS for long-term monitoring of climate observables using innovative space geodetic techniques on-board the International Space Station (GEROS-ISS). Proposal in response to ESA Research Announcement for ISS Experiments relevant to study of Global Climate Change.

**Dr. Jens Wickert**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam,  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,  
 Sektion GPS/Galileo-Erdbeobachtung



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 wickert@gfz-potsdam.de

**Dr. Maximilian Semmling**  
 HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM,  
 DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM,  
 SEK. 1.1, GPS/GALILEO-ERDBEOBACHTUNG



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 maxsem@gfz-potsdam.de

**Dipl.-Ing. Jamila Beckheinrich**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam,  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,  
 Sektion GPS/Galileo-Erdbeobachtung



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 jamila@gfz-potsdam.de

**Dr. Georg Beyerle**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam,  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,  
 Sektion GPS/Galileo-Erdbeobachtung



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 gbeyerle@gfz-potsdam.de

**Dr. Sibylle Vey**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam,  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,  
 Sektion GPS/Galileo-Erdbeobachtung



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 vey@gfz-potsdam.de

**Prof. Dr. Harald Schuh**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam,  
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,  
 Sektion GPS/Galileo-Erdbeobachtung



Telegrafenberg | 14473 Potsdam  
 schuh@gfz-potsdam.de

# GNSS sicher mit wenigen Satelliten

# GNSS



# UNLIMITED

Mit der neuesten Software von Leica ist die Anzahl erforderlicher Satelliten minimiert.

- 3 x GPS + 2 x Glonass
- 2 x GPS + 3 x Glonass
- 2 x GPS + 2 x Glonass + 2 BeiDou
- 4 x Glonass ohne GPS