

Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst?*

Barbara Görres

Zusammenfassung

Verfolgt man das Ziel, mit GNSS Höhen oder Höhenunterschiede auf dem Niveau von besser als 1 cm zu bestimmen, ist die Berücksichtigung von Kalibrierwerten der Antenne heute eine Selbstverständlichkeit. Mehrere Verfahren zur Antennenkalibrierung sind als Standardverfahren etabliert. Neu ist die Bonner Messkammer, die erstmals Laborkalibrierungen im Routinebetrieb erlaubt und in der bereits heute die neu hinzukommenden Frequenzen der GPS- und GLONASS-Modernisierung sowie von GALILEO analysiert werden können. Die Einbeziehung globaler Fragestellungen führt in der Diskussion um Relativ- oder Absolutstandards zur Kalibrierung der Sendeantennen auf den Satelliten. Inzwischen hat sich auch die Erkenntnis durchgesetzt, dass das Antennenproblem nicht isoliert vom Problemfeld der Mehrwegeinflüsse gesehen werden kann.

So ist das Antennenproblem immer wieder als quasi gelöst betrachtet worden, während gleichzeitig ungelöste Fragen auftauchen, die vor einer Genauigkeitssteigerung in den mm-Bereich beantwortet werden müssen. Gegenstand der Forschung sind heute die stationsabhängigen Effekte in ihrer Gesamtheit und die Entwicklung von Methoden, die die Isolierung der Antennenkalibrierung von Mehrwege-Einflüssen des Nahfeldes und der weiteren Umgebung der Antenne erlauben.

Summary

Nowadays it is common practise to include antenna calibration data when heights or height differences from GNSS observations are to be determined at the level of 1 cm or better. Several calibration methods have been established as standard procedures. Since recently, antennas can be routinely calibrated in Bonn in a new anechoic chamber in Bonn, where even the newly established frequencies from the GPS- and GLONASS-modernization as well as the GALILEO frequencies can be analyzed in addition to the common ones. When taking into account processing of global GNSS data in the discussion about relative or absolute antenna standards, the calibration of satellite antennas is a necessity. In the meantime it is well accepted that antenna calibration has to be seen in close conjunction with multipath effects.

1 Einleitung

Die Berücksichtigung von Antennen-Kalibrierwerten ist heute für alle diejenigen GNSS-Nutzer zu einer Selbstverständlichkeit geworden, die Messungen und Auswertungen mit einem hohen Genauigkeitsanspruch im Zentimeter- oder gar Millimeterbereich ausführen. Vor allem bei der Höhenbestimmung sind Kalibrierwerte unverzicht-

bar, die die Lage des Antennenphasenzentrums, also des Bezugspunktes der Trägerphasenmessung angeben. Sie können eine Größenordnung bis zu wenigen Zentimetern erreichen. Einzig im Falle von GNSS-Beobachtungen mit Antennen gleichen Typs und gleicher Ausrichtung auf kurzen Basislinien kann aufgrund der Eliminierung gleicher Fehleranteile durch die Differenzbildung darauf verzichtet werden.

Zunächst dachte man, die Frage der Antennenkalibrierung sei mit der Festlegung eines Bezugspunktes an der Antenne beantwortet, bis man erkannte, dass zur vollständigen Erfassung weitere Parameter hinzuzufügen sind (Kap. 2). Im Folgenden stellten sich die verschiedenen Kalibrierverfahren einer kritischen Analyse ihres Prinzips und ihrer Genauigkeit in verschiedenen Ringversuchen (Kap. 3.3 und 3.4). Als Konsequenz aus der Diskussion um absolute oder relative Kalibrierverfahren und -standards kam man durch die globalen Fragestellungen des International GNSS Service (IGS) zur Kalibrierung der Sendeantennen an den Satelliten (Kap. 4). Gegenstand der Forschung sind heute die Kalibrierung der Antennen für die neuen GNSS-Frequenzen (Kap. 5) und der Zusammenhang der Antennenparameter mit weiteren stationsabhängigen Effekten wie den Mehrwegeeffekten aus dem Antennennahfeld und ihrer Umgebung, um eine weitere Genauigkeitssteigerung in den mm-Bereich zu ermöglichen (Kap. 6).

Im deutschen Sprachraum wurde die Problematik der Antennenkalibrierung aus mehreren Gründen besonders früh wahrgenommen. So wurden bereits zu Beginn der 1990er-Jahre erste Antennenkalibrierungen durchgeführt und veröffentlicht (Kap. 3.1). Hinzu kamen die beiden bahnbrechenden technischen Entwicklungen zur absoluten Antennenkalibrierung (Kap. 3.2). Sowohl die Roboterkalibrierung als auch die Routinekalibrierung im Labor können bis heute ausschließlich an wenigen deutschen Standorten durchgeführt werden.

Der Austausch der Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung an Universitäten, mit Herstellern und Kalibrierdiensten sowie der Dialog mit Verwaltung und Nutzern, war von Anfang an ein Ziel der Antennenworkshops. Der erste GPS-Antennen-Workshop wurde 1999 auf Initiative der Universität Bonn und der nordrhein-westfälischen Landesvermessung (heute Bezirksregierung Köln, GEObasis.nrw) durchgeführt (Campbell und Görres 1999). Der Erfolg der Veranstaltung zeigte sich

* Stark überarbeitete Fassung des Vortrages »Aktueller Stand der GNSS-Antennenkalibrierung« beim 83. DVW-Seminar »GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen« am 18. und 19. März 2009 in Dresden. Die Seminarbeiträge sind als Band 57 in der Schriftenreihe des DVW erschienen.

auch dadurch, dass weitere Workshops im Wechsel zwischen Bonn und Hannover und zuletzt 2009 als 7. GNSS-Antennen-Workshop in Dresden durchgeführt wurden. Sie dienten nicht nur zur Standortbestimmung, sondern auch der Definition von Arbeitszielen, sodass jedem Antennenworkshop ein Entwicklungsschub vorausging und gelöste und ungelöste Fragestellungen bilanziert werden konnten. Dieser Aufsatz stellt den heutigen Stand der Antennenkalibrierung dar. Er beleuchtet zum einen die Entwicklungsschritte, die bis hierher geführt haben, und zeigt zum anderen offene Fragen auf.

2 Das Antennenmodell

Zu Beginn der GPS-Messungen ging man davon aus, dass alle gemessenen Distanzen im sogenannten elektrischen Antennenphasenzentrum (PZ) zusammentreffen (Abb. 1).

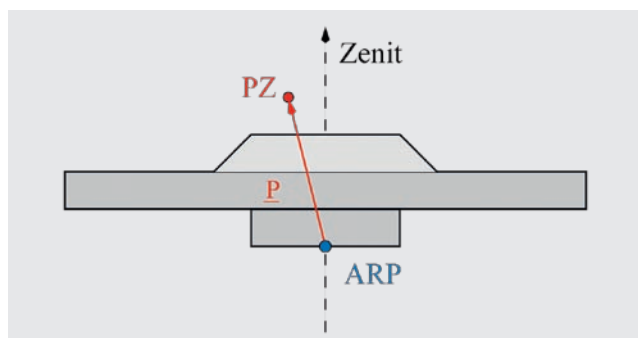


Abb. 1: Geometrische Definition des Antennenphasenzentrums einer GPS-Antenne (PZ = elektrisches Phasenzentrum, ARP = Antennenreferenzpunkt, P = Antennenoffset)

Erste Hinweise auf die Abhängigkeit der genauen Lage des Bezugspunktes von der Einstrahlrichtung des Satellitensignals ergaben sich eher zufällig in den frühen 1990er Jahren bei Auswertungen zur Bestimmung von Höhenunterschieden mit unterschiedlichen Antennentypen (Springer und Gurtner 1992). Ursächlich für diese Abhängigkeit sind elektromagnetische und geometrische Eigenschaften der Antennenbauteile (Dipol, Microstrip, ...) und des jeweiligen Zubehörs, die zu einer Verformung des elektrischen Feldes und somit zu einer Verbiegung der im Idealfall sphärischen Phasenfront führen.

Nach der Distanzfehlerfunktion von Geiger (1988) werden nicht die Bewegung des Phasenentrums selbst modelliert, sondern Korrekturen an die Distanzmessung für jede Frequenz formuliert. Die vollständige Beschreibung des Antennenmodells erfolgt dann durch den Antennenoffset genannten Vektor P zum mittleren Phasenzentrum PZ (PCO = phase center offset) zuzüglich der richtungsabhängigen Korrekturwerte (PCV = phase center variations). Das mittlere Phasenzentrum wird als Mittelwert eines ausgleichenden Kugelsegments über ein definiertes Himmelssegment angegeben, die PCVs nach Elevations-

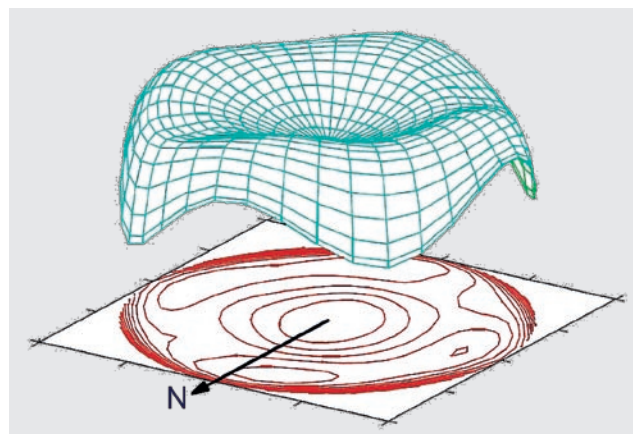


Abb. 2: Elevations- und azimutabhängige PCVs

und Azimutabhängigkeit tabelliert (Abb. 2), wobei die Letztgenannten im Regelfall mindestens eine Größenordnung kleiner ausfallen. Alle Werte werden relativ zum mechanischen Referenzpunkt der Antenne (ARP = Antenna Reference Point) angegeben, der durch Konvention des IGS im Schnittpunkt von vertikaler Symmetrieachse der Antenne mit der Auflagefläche definiert ist.

3 Verfahren zur Antennenkalibrierung

Ursprünglich wurden Antennen-Kalibrierverfahren in Feld- und Laborverfahren unterteilt, heute unterscheidet man Verfahren zur Bestimmung von absoluten oder relativen Kalibrierwerten, wobei letztere die Festlegung einer Referenzantenne erfordern (Tab. 1).

Erste Ergebnisse für PCOs und PCVs lagen aus frühen Versuchen von Schupler und Clark (1991) mit absoluten Laborkalibrierungen vor. Das Verfahren war allerdings nicht für den Routinebetrieb geeignet. Letztlich wurden für den von 1996 bis 2006 geltenden »relativen IGS-Standard« konstante PCOs für eine Referenzantenne vom Typ Dorne Margolin aus Herstellerangaben verwendet und alle PCVs willkürlich zu Null gesetzt. Für alle anderen Antennen wurden die Ergebnisse aus Relativkalibrierungen zur Referenzantenne kombiniert und relativ zu dieser angegeben.

Tab. 1: Gebräuchliche Verfahren zur Antennenkalibrierung

	Lageoffset	Höhenoffset	PCV
Feldmessung »in einer Lage«	relativ	relativ	relativ, nur Elevationsabhängigkeit
Feldmessung mit Antennendrehung	absolut	relativ	relativ
Feldmessung mit Messroboter	absolut	absolut	absolut
Labor	absolut	absolut	absolut

3.1 Relative Kalibrierverfahren

Die **Antennenkalibrierung im Feld** auf einer Kurzbasis war das gebräuchlichste, mit vergleichsweise geringem Aufwand durchzuführenden Verfahren (Breuer et al. 1995). In Gebrauchslage werden GPS-Trägerphasenbeobachtungen durchgeführt und die Parameter der zu testenden Antennen relativ zur Referenzantenne geschätzt. Freie Sicht bis nahe zum Horizont und eine Umgebung möglichst ohne Mehrwegeefflüsse müssen gewährleistet sein. Ebenso müssen Sollkoordinaten mindestens für die Höhenkomponente vorhanden sein. Die Auflösung azimutabhängiger Variationen ist wegen des »Nordlochs«, dem Himmelsausschnitt, aus dem keinerlei Signale empfangen werden, nur dann sinnvoll, wenn die Antennen gedreht werden. Das eröffnet außerdem die Möglichkeit, die beiden Lageoffsets absolut zu erhalten. Hier existieren Varianten des Verfahrens. Beispielsweise wurde zur Beschleunigung und im Hinblick auf die Eliminierung von Mehrwegeeffekten an der TU Dresden eine automatische Dreheinrichtung entwickelt, die Messungen in mehreren azimutalen Ausrichtungen pro Minute ermöglicht (Abb. 3, Frevert et al. 2006). Die Bedeutung der relativen Feldverfahren geht allerdings durch die Entwicklung der beiden absoluten Kalibrierverfahren mehr und mehr zurück.



Abb. 3:
Beschleunigung der Feldkalibrierung durch die Dreheinrichtung DRB2 an der TU Dresden (Frevert et al. 2006)

3.2 Absolute Kalibrierverfahren

Allen Verfahren zur direkten Bestimmung absoluter Antennenparameter ist gemein, dass der Prüfling relativ zur Sendeantenne (Satellit oder künstlich) gedreht und/oder gekippt wird, um eine komplette und homogene Überdeckung der oberen Hemisphäre der Testantennen zu erreichen.

3.2.1 Absolute Kalibrierung mit dem Messroboter

Der entscheidende Durchbruch zur absoluten Kalibrierung wurde mit der Entwicklung des Hannoverschen Verfahrens erzielt. Die Firma Geo++ entwickelte in Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover einen Messroboter zur absoluten Feldkalibrierung (Wübbena et al. 1997, vgl. Abb. 17). Ein Industrieroboter wird nach einem optimierten Messprogramm so gesteuert, dass die Hemisphäre der Antenne durch Drehung um das genäherete Phasenzentrum des Prüflings und seine Kippung vor den als quasi-feste Signalquellen genutzten Satelliten in

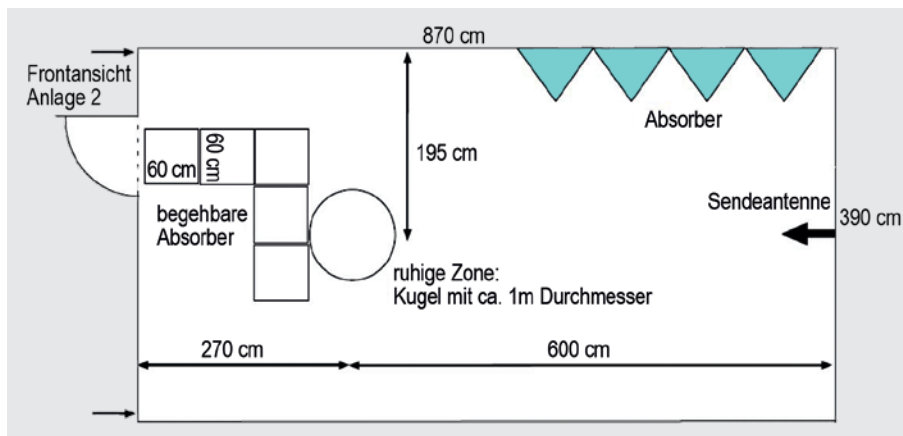
möglichst kurzer Zeit vollständig abgetastet wird und ein homogener Satz von GNSS-Beobachtungen entsteht. Die Messanordnung ermöglicht außerdem eine Trennung der beiden stationsabhängigen Fehlerkomponenten Antennenparameter (insb. PCV) und Mehrwegeeffekte (Multipath), wobei letztere sowohl eliminiert als auch bestimmt werden können. Alle Antennenparameter werden absolut erhalten, ohne dass Informationen über eine Referenzantenne einfließen. Die richtungsabhängigen PCVs werden durch Modellierung von Kugelflächenfunktionen gewonnen. Der Ansatz zur Eliminierung der Mehrwegeeffekte basierte zunächst auf dem Gedanken der Differenzbildung aus Wiederholungsmessungen bei sich täglich wiederholender GPS-Konstellation und entsprechender Wiederholung der Mehrwegeefflüsse unter ansonsten gleichen Umgebungsbedingungen. Die lange Beobachtungsdauer von mehreren Tagen sowie die Tatsache, dass sich bei GLONASS und GALILEO die Konstellation erst nach mehreren Sterntagen wiederholt, führten zur Entwicklung der sogenannten Echtzeitkalibrierung. Basierend auf der Annahme, dass der Multipath-Effekt zwischen zeitlich dicht folgenden Beobachtungsepochen modellierbar ist, werden durch schnelle Orientierungsänderungen der zu kalibrierenden Antenne durch den Roboter Messungen von mehreren 1000 Orientierungen der Antenne innerhalb weniger Stunden durchgeführt und Mehrwegeeffekte von den gesuchten Antennenparametern getrennt (Böder et al. 2001).

3.2.2 Absolute Kalibrierung im Antennenlabor

Im **Antennenlabor** erhält man absolute Kalibrierwerte durch Drehung der Antenne vor einem fest montierten Sender, der die GNSS-Nominalfrequenz sendet. Die weltweit einzige Messkammer, die speziell für die GNSS-Antennenkalibrierung konzipiert wurde, hat im Februar 2009 den Routinebetrieb aufgenommen. Sie wurde im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und der Bezirksregierung Köln, GEObasis.nrw (ehemals Landesvermessungsamt NRW) gebaut und wird gemeinsam betrieben. Die Bonner Antennenmesskammer zur Laborkalibrierung ist vollständig mit Dämmmaterialien ausgekleidet, die die Mikrowellen des GNSS-Spektrums absorbieren. Ein neu konstruierter Drehstand dreht die Testantennen in wählbaren Schrittweiten von Elevations- und Azimutrichtungen vor dem Sender nach einem voll automatisierten Messprogramm. Ein kompletter Durchlauf, der sämtliche GNSS-Frequenzen abdeckt (vgl. Kap. 5), dauert etwa 40 Minuten (Zeimet et al. 2008).

Untersuchungen in der Konzeptionierungsphase haben ergeben, dass die Entfernung zwischen Sender und Testantenne ohne Qualitätsverlust auf 6 m reduziert werden kann, d. h. dass eine Länge der Kammer von 8 m ausreichend ist (Abb. 4, Zeimet et al. 2008).

Die Grundlagen für das Bonner Verfahren zur Laborkalibrierung wurden in einer Absorberkammer am Max-



◀ Abb. 4:
Die neue
Bonner Mess-
kammer (nach
Zeimetz et al.
2008)



▶ Abb. 5:
Bonner
Montierung

Planck-Institut für Radioastronomie entwickelt, die sich jedoch aufgrund ihrer geringen Größe und der dort verwendeten Absorberauskleidung nur bedingt als geeignet erwiesen hatte (Breuer et al. 1995). Das hohe Potenzial für Detailuntersuchungen systematischer Effekte resultiert aus dem geringen Rauschniveau der Labormessung und der Tatsache, dass die Phasen im Gegensatz zu allen Feldverfahren direkt abgegriffen werden. Eine Approximation durch eine Funktion ist nicht erforderlich. Die absoluten Parameter der Testantenne werden direkt erhalten.

In der Absorberhalle des EMV-Testzentrums der Bundeswehr in Greding, der größten in Europa, die durch eine Kooperation zwischen der Universität Bonn, TU Darmstadt und UniBW München genutzt werden konnte, konnte ein größerer Abstand zwischen Sende- und Testantenne von 18 m realisiert werden, die erste voll automatisierte Montierung entwickelt (Abb. 5) und ein eigener Network Analyser in Betrieb genommen werden, der das Sendesignal erzeugt und anschließend die Phase des ausgehenden mit dem von der Testantenne gemessenen eingehenden vergleicht (Görres et al. 2006).

Der oft vorgebrachte Einwand, die im Vergleich zu den originären GNSS-Signalen hohe Signalstärke des künstlichen Signals könne die Phaseninformation beeinträchtigen, kann ausgeräumt werden, indem für jede Testantenne diejenige kritische Signalstärke bestimmt wird, unterhalb derer keine Signaländerung mehr eintritt (Abb. 6, Zeimetz et al. 2006).

Trotz allem wurden die absoluten Kalibrierergebnisse aufgrund eines globalen Maßstabsproblems im Falle ihrer Verwendung zunächst mit großer Skepsis betrachtet, sind

aber seit November 2006 Bestandteil des IGS-Standards (vgl. Kap. 3.4 und 4).

3.3 Genauigkeit der Kalibrierverfahren

Alle Kalibrierverfahren sind von Restsystematiken und dabei insbesondere von Mehrwegeinflüssen betroffen. Relative Kalibrierwerte sind außerdem durch systematische Fehler aus der Kalibrierung der Referenzantenne beeinflusst. Beim Verfahren der Antennenkalibrierung im Feld wirkt sich überdies die ungleichmäßige Überdeckung der oberen Hemisphäre der Testantenne insbesondere am Horizont und im Zenit nachteilig aus.

Die Genauigkeit der Kalibrierverfahren wird in mehreren Kategorien angegeben.

- Reproduzierbarkeit:** Vergleich von Wiederholungsmessungen derselben Antenne und unter identischen Umgebungsbedingungen,
- Genauigkeit des Verfahrens:** Vergleich von Mehrfachmessungen derselben Antenne mit dem gleichen Verfahren, aber bei geänderten Umgebungsbedingungen,
- Validierung:** Kalibrierung derselben Antenne mit unterschiedlichen Verfahren.

In Tab. 2 sind Zahlenwerte der beiden ersten Vergleichsschritte für die Bonner Feldkalibrierung (Görres 2001), die Hannoversche Roboterkalibrierung (Wübbena et al. 2000) und das Laborverfahren (Zeimetz et al. 2008) gegenübergestellt.

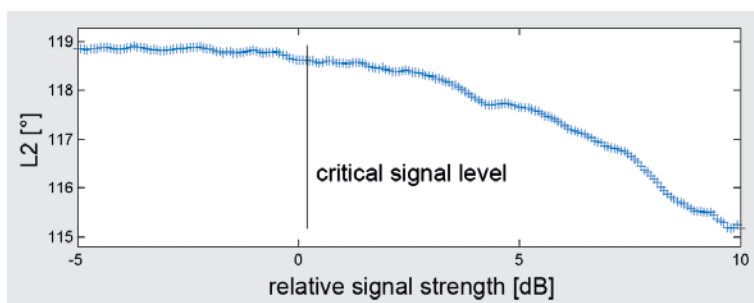


Abb. 6: Einfluss der Signalstärke auf die gemessene Phase (Zeimetz et al. 2006)

Exemplarisch wird die Reproduzierbarkeit einer im Labor kalibrierten Antenne Leica AX 1202GG in Abb. 7a gezeigt. Alle systematischen Fehlerquellen bleiben konstant und somit unsichtbar. Bei geändertem Setup, beispielsweise durch Änderung der Höhe der Testantenne oder Variation des Abstandes zu den Wänden, sinken die Genauigkeiten deutlich (Abb. 7b). Für andere Antennentypen können die Differenzen je nach Güte der Abschirmung der Antenne mit bis zu etwa 2 mm auch etwas größer ausfallen. Als Ursache veränderter systematischer

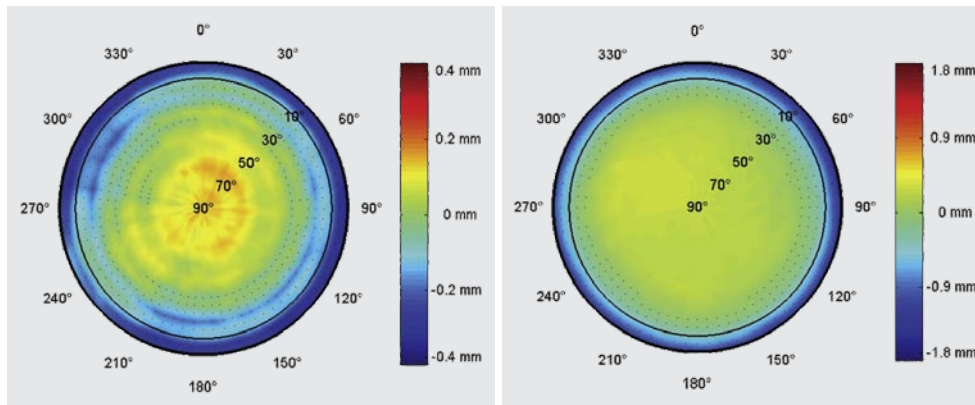


Abb. 7a (links): PCV-Differenzen von zwei Laborkalibrierungen derselben Leica AX 1202GG-Antenne in unveränderter Umgebung. Abb. 7b (rechts): PCV-Differenzen von zwei Laborkalibrierungen derselben Leica AX 1202GG-Antenne bei veränderten Umgebungsbedingungen

Tab. 2: Genauigkeiten der drei wichtigsten Antennen-Kalibrierverfahren (Gradangaben bezeichnen Elevationen oberhalb des Antennenhorizonts)

	Reproduzierbarkeit	Genauigkeit des Verfahrens
Relatives Feldverfahren	< 1 mm (10°–90°)	< 1 mm (15°–90°)
Roboterkalibrierung	0.2–0.3 mm (5°–90°) 0.4 mm (< 5°)	0.5 mm (10°–90°) 1–2 mm (< 10°)
Laborkalibrierung	0.2 mm (10°–90°) 0.3 mm (< 10°)	0.3 mm (15°–90°) 1.0 mm (5–15°) 1.5 mm (< 5°)

Einflüsse kommen Restreflexionen im Absorberraum in Betracht, die trotz aufwändiger Dämmung vorhanden sind. Untersuchungen von Nahfeldeinflüssen werden in Kap. 6 im Detail thematisiert. Jedoch lassen bereits diese wenigen Beispiele zu Reproduzierbarkeit und Genauigkeitsuntersuchung des Verfahrens auf ein Grundrauschen der Kalibrierung von etwa 1 mm schließen.

3.4 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Kalibrierverfahren

Leider steht zur Beurteilung der Genauigkeit der Kalibrierverfahren keine Referenzlösung aus Ergebnissen übergeordneter Verfahren zur Verfügung, sodass zur Überprüfung der Genauigkeit auf die Methode des Ringversuchs zurückgegriffen wird. Identische Antennen werden mit verschiedenen Verfahren von verschiedenen Arbeitsgruppen kalibriert. Die Gegenüberstellung macht das äußere Genauigkeitsniveau der eingesetzten Verfah-

ren sichtbar. Sie wird nach oben angegebener Kategorisierung auch Validierung genannt (Tab. 3).

Im Ringversuch 2001 wurden auf Initiative der LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) fünf ausgewählte Antennen an fünf Institutionen kalibriert (Feldmann-Westendorff und Sorge 2002). An zwei Stellen wurden absolute Roboterkalibrierungen, an drei Stellen relativen Feldverfahren durchgeführt. Der Laborvergleich fehlte, da im Sommer 2002 noch kein Antennenlabor zur Verfügung stand. Der auf die Elevationsabhängigkeit der PCVs beschränkte Vergleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Roboterergebnisse auf dem 1 mm-Level über den gesamten Elevationsbereich sowie größere Variationen von 2 mm zum gemittelten Kurvenverlauf für L1 bzw. 4 mm für L2 für die Standardfeldverfahren (Schmid und Rothacher 2002).

Voraussetzung für die Umstellung des IGS-Standards war aber der Vergleich absoluter Kalibrierdaten aus den beiden Absolutverfahren, der im Sommer 2002 nachgeholt wurde, und deren gegenseitige Bestätigung. Beide Verfahren können in jeder Hinsicht als unabhängig voneinander angesehen werden, u. a. auch aufgrund der Tatsache, dass im Feld die echten GNSS-Signale, im Labor aber eine künstliche singuläre Frequenz verwendet werden.

Daher wurden im Sommer 2002 fünf geodätische Antennen sowohl im Labor (Greding) als auch mit dem Roboter der Firma Geo++ kalibriert. Der Vergleich elevationsabhängiger Variationen zeigt auch hier eine sehr gute Übereinstimmung auf dem Niveau von 1 mm für den gesamten Elevationsbereich (Abb. 8, Görres et al. 2006). Er zeigt aber vor allem das extrem hohe Potenzial des Laborverfahrens für Detailstudien durch den außergewöhnlich glatten Kurvenverlauf aus direkt abgegriffenen, unbearbeiteten Messwerten. Roboterergebnisse hingegen

Tab. 3 : Größenordnung der PCV-Differenzen aus den Ringversuchen 2001 und 2009 sowie dem Absolutvergleich 2002

	Ringversuch 2001 (elevationsabhängige PCV)			Absolutvergleich 2002		Ringversuch 2009 (GPS + GLONASS)		
Relatives Feldverfahren	X		2 mm (L1)			X		
Roboterkalibrierung	X	1 mm	4 mm (L2)	X		X		
Laborkalibrierung				X	1 mm	X	1 – 3 mm	2 – 4 mm

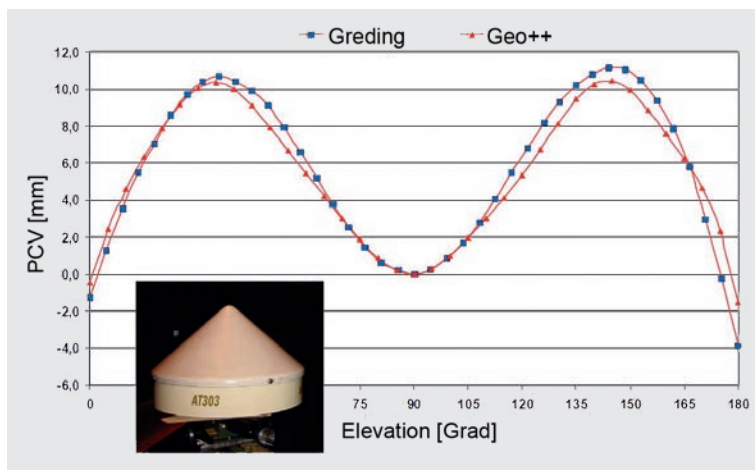


Abb. 8: Vergleich der elevationsabhängigen PCVs aus Labor- und absoluter Feldkalibrierung auf dem Roboter für dieselbe Leica AT303 (L1) (Görres et al. 2006)

erfordern eine Approximation der Daten durch eine Kugelflächenfunktion.

Die Validierung der absoluten Ergebnisse beider Verfahren über den gesamten Bereich der oberen Hemisphäre der Antenne gelingt ebenfalls auf dem 1-mm-Level: Typisches Beispiel für eine geodätische Antenne ist die Trimble Zephyr Geodetic, deren Kalibrierung mit beiden Verfahren zu PCV-Differenzen von ± 0.5 mm im Elevationsbereich vom Zenit bis 20° , ± 1 mm bis 10° und maximalen Differenzen von 1.8 mm am Horizont führt (Abb. 9,

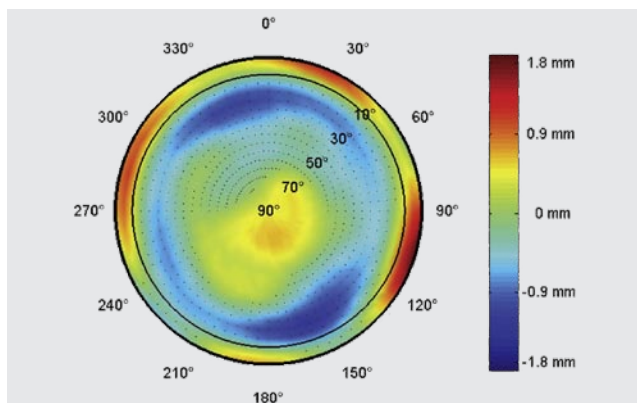


Abb. 9: PCV-Differenzen von zwei Kalibrierungen derselben Trimble Zephyr Geodetic-Antenne im Labor bzw. auf dem Geo++-Roboter (L1) (Zeimetz et al. 2008)

Zeimetz et al. 2008). Je nach Antennentyp und untersuchter Frequenz sieht man zuweilen auch Unterschiede bis zu 3 bis 4 mm. Die Ursache der Differenzen liegen vor allem im jeweiligen Antennen-Nahfeld der eingesetzten Kalibrierverfahren. Seine Wirkungsweise ist vor der Möglichkeit zu Steigerungen der Verfahrensgenauigkeit näher zu untersuchen (vgl. Kap. 6).

Im aktuellen Ringversuch 2009 wurde die Fragestellung erweitert. Vier geodätische Antennen wurden an vier Institutionen mit allen drei Verfahren kalibriert (Zeimetz et al. 2009). Erstmals wurden neben den GPS- auch die GLONASS-Frequenzen in die Untersuchungen einbe-

zogen. Der Vergleich der PCV-Werte des kompletten Antennenmodells zeigt ein ähnliches Genauigkeitsniveau wie im Ringversuch 2001. Besonders interessant ist aber der ebenfalls neue Vergleich der Ergebnisse im Positionsraum bei der Verwendung der verschiedenen Kalibrierdatensätze. Die ermittelten Koordinatenunterschiede der beiden Lagekomponenten sind vernachlässigbar, nicht jedoch diejenigen der Höhenkomponente. Die Höhe variiert für eine GPS-L1-Lösung nur innerhalb von 1 mm, für eine L2-Lösung ändert sich das Ergebnis je nach verwendetem Kalibrierdatensatz aber bereits um bis zu 4 mm. Werden GLONASS-Beobachtungen ausgewertet, weichen die Ergebnisse in beiden Frequenzbereichen sogar um bis zu 5 mm voneinander ab. Auch hier wird die Ursache für die Differenzen nicht mehr in den Kalibrierverfahren selbst, sondern in Nahfeldeinflüssen (vgl. Kap. 6) oder sogar der Empfängertechnologie vermutet.

4 Absolute oder relative Antennenkalibrierung und PCVs von Satellitenantennen

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse der Absolutkalibrierung wurde innerhalb des IGS der seit dem 30. Juni 1996 verwendete Relativstandard beibehalten und für globale Lösungen verwendet. Die Verwendung der absoluten Werte führte im globalen Netz zu einem signifikanten Maßstabsunterschied im Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Weltraumverfahren (VLBI, SLR) (Rothacher 2001). Der Skalenfehler von etwa 15 ppb korrespondiert mit einer inakzeptabel großen Höhenänderung der globalen Stationen von etwa 10 cm und hatte Zweifel an der Gültigkeit der absoluten Kalibrierwerte aufkommen lassen.

Als Ursache des Problems wurden aber die bis dato nur unzureichend modellierten Antennenparameter der Sendeantennen auf den Satelliten identifiziert (Abb. 10),

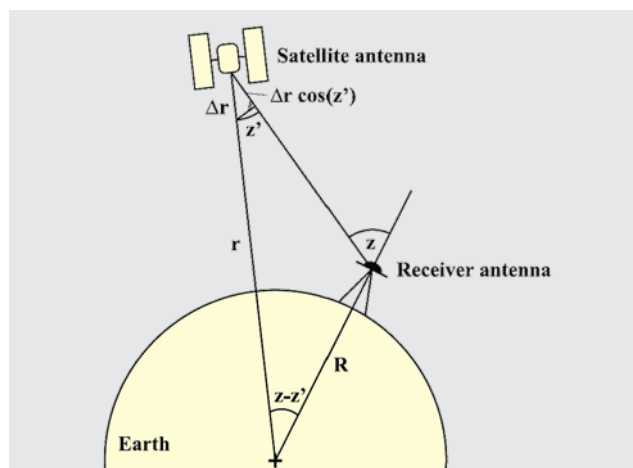


Abb. 10: Interaktion zwischen Phasenzentrumsvariationen von Satelliten- und Empfangsantennen (Rothacher 2001)

Tab. 4: Relativer und absoluter IGS-Standard

	Empfangs- antennen	Satelliten- antennen
Relativ: 30.6.1996 bis 5.11.2006	3 Offsetkomponenten elevationsabhängige PCV (10°–90°) Referenzantenne AOA_D/M_T mit PCV=0 Radom: vernachlässigt	nur blockspezifische z-Offsets
Absolut: seit 5.11.2006	3 Offsetkomponenten elevations- und azimutabhängige PCVs (0°–90°) Berücksichtigung der Radome	blockspezifische nadirabhängige PCVs, satellitenspezifische z-Offsets

die mit denjenigen der Empfangsantennen korreliert sind, von denen man zuvor nur genäherte Offsets in Nadirrichtung kannte.

Am GFZ Potsdam sowie der TU München wurde aus der Prozessierung von mehr als zehn Jahren GPS-Beobachtungsdaten seit 1994 basierend auf Absolutwerten für die Empfangsantennen aus Roboterkalibrierungen jeweils

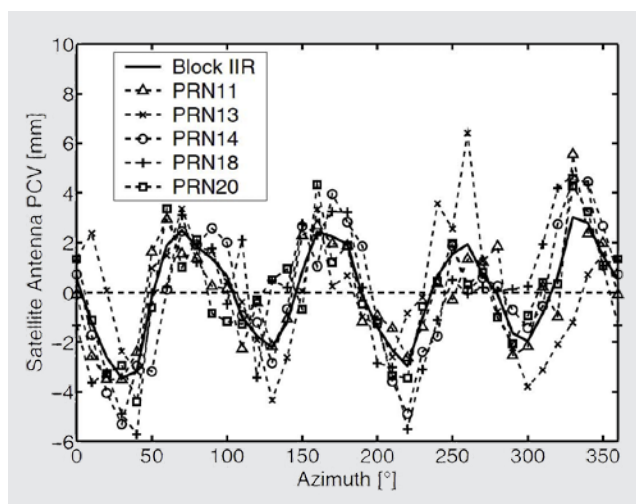


Abb. 11: Azimutale PCVs für Block IIR-Satelliten (Nadirwinkel 14°) (Schmid et al. 2005)

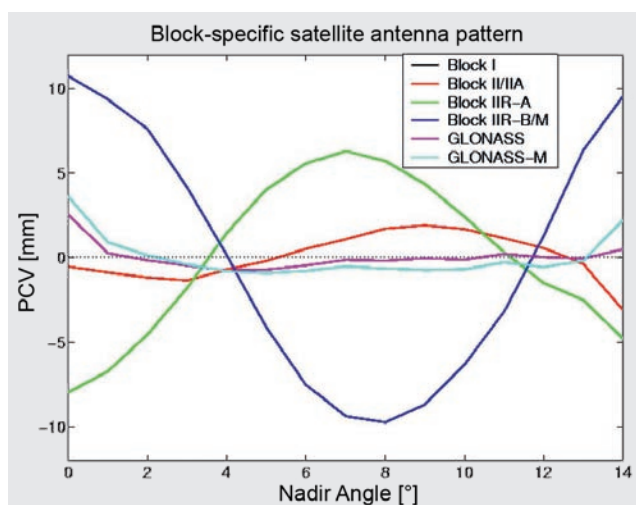


Abb. 12: Nadirwinkelabhängiges Pattern der Satellitenantennen für GPS- und GLONASS-Satelliten (Gäde et al. 2006)

ein konsistenter Satz von konstanten Offsets und nadirabhängigen PCVs für die Satellitenantennen rechnerisch bestimmt (Schmid et al. 2007). Die Übereinstimmung zwischen den Berechnungen der beiden Arbeitsgruppen beträgt weniger als 1 mm für die PCVs und etwa 4 cm für den z-Offset.

Azimutvariationen, die testweise durch Verarbeitung von Daten weniger Tage bestimmt wurden, koinzidierten deutlich mit

der Anordnung der Satellitenantennen (Abb. 11, Schmid et al. 2005). Mit ihrer Größenordnung von ± 3 bis 4 mm wären sie für hochpräzise Positionsbestimmung ebenfalls zu berücksichtigen.

Ausgewählt wurden für den seit November 2006 geltenden absoluten IGS-Standard (vgl. Tab. 4) aus dem Parametersatz des Antennenmodells für die Sendeantennen vorerst aber nur die in Richtung zur Erde weisenden z-Offsets und die nadirabhängigen PCVs. Die PCVs wurden für die z-Offsets individuell und als Funktion des Nadirwinkels blockspezifisch geschätzt (Abb. 12). Die x- und y-Komponenten sind aus Herstellerangaben ergänzt, die Einführung der Azimutvariationen wird weiterhin diskutiert.

Das IGS-Reprocessing wurde am Center of Orbit Determination in Europe in Bern (CODE) durch Analyse von zunächst 15 Monaten Beobachtungsdaten um die Antennenparameter für die GLONASS-Satelliten ergänzt (Abb. 12, Gäde et al. 2006). Kalibrierwerte neu gestarteter Satelliten werden laufend ergänzt. Allerdings gelingt die Bestimmung mit der erforderlichen Genauigkeit nur durch die Analyse längerer Beobachtungsdatensätze (Dach et al. 2009). Eine vielversprechende Alternative bietet auch hier die Kalibrierung auf dem Roboter, die von Schmitz et al. (2008a) erstmals für eine GPS-Sendeantenne (Block II/IIA) vor dem Satellitenstart durchgeführt wurde (Abb. 13). Vergleiche mit den IGS-Werten findet man beispielsweise bei Schmid und Steigenberger (2008).

Da somit die eingangs genannte Maßstabsdifferenz heute als geklärt betrachtet wird, gilt der Absolutstandard im operationellen Betrieb des IGS seit dem 5. November 2006, an dem gleichzeitig auf ITRF2005 umgestellt wurde. Für die meisten Empfangsantennen existieren Absolutwerte aus Roboterkalibrierungen,

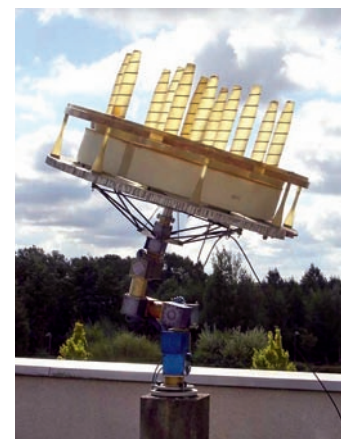


Abb. 13: Kalibrierung einer Sendeantenne (Block II/IIA-Satellit) auf dem Roboter (Schmitz et al. 2008a)

für die übrigen zunächst nur auf Absolutniveau umgerechnete Relativwerte aus Feldkalibrierungen, die noch ersetzt werden müssen. In nationalen und regionalen Netzen führt die Einführung des absoluten Standards anstelle des relativen, die für die Empfangsantennen des SAPOS-Dienstes schon vorweggenommen worden war, letztlich nicht zu signifikanten Unterschieden im Koordinatenergebnis. Ebenso ist auch die Verwendung des neuen Modells für die Satellitenantennen nur bei größeren Punktentfernungen und hohen Genauigkeitsansprüchen zwingend erforderlich.

5 Analyse neuer und zukünftiger GNSS-Frequenzen

Im Labor wird zur Kalibrierung der Antennen im Gegensatz zu den Feldverfahren kein operables GNSS benötigt. Daher wird in der Bonner Antennenmesskammer schon

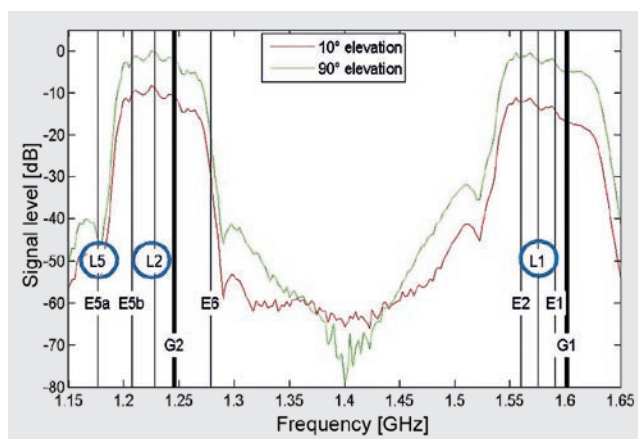


Abb. 14: Durchlasscharakteristik einer Leica AX 1202GG (Zeimet et al. 2008): GPS: L1, L2, L5 (blau umrandet), GLONASS: G1, G2, GALILEO: E1, E2, E5a, E5b, E6

heute das gesamte Spektrum bestehender und zukünftiger Frequenzen aus der GPS- und GLONASS-Modernisierung sowie der GALILEO-Frequenzbereich vollständig analysiert. Zwischen 1.15 GHz und 1.65 GHz werden PCV-Werte für etwa 200 Frequenzen pro Antennenausrichtung aufgenommen. Voraussetzung hierfür ist natürlich die grundsätzliche Empfangsbereitschaft der zu testenden Antenne im zu untersuchenden Frequenzbereich, die anhand einer Durchlasscharakteristik angegeben werden kann (Zeimet et al. 2008). In Abb. 14 kann man am Signalpegel der untersuchten Leica AX 1202GG erkennen, dass sie sowohl in den beiden GPS- als auch GLONASS-Frequenzbereichen empfangsbereit ist, nicht jedoch beispielsweise für die neue GPS-Frequenz L5.

6 Stationsabhängige Effekte

Ursprünglich hatte man angenommen, mit einer optimierten Antennenkalibrierung alle Antennenparameter unabhängig von anderen Fehlerquellen erfassen zu können. Inzwischen wurde allerdings erkannt, dass sie nur unzulänglich von den stationsabhängigen Effekten dS, insbesondere von den Mehrwegeeffekten MP (MP = Multipath) des Fern- und Nahfeldes, getrennt werden können.

Im Positionsraum überlagern sich Restfehler der Antennenkalibrierung und Mehrwegeeffekte. Modellfehler beispielsweise der Troposphärenmodellierung, der größten verbleibenden Fehlerquelle aus dem Bereich der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse dE, kommen hinzu. In einer typischen Auswertung mit Ansatz der ionosphärenfreien Linearkombination und Schätzung von Troposphärenparametern können sich so im ungünstigen Fall Fehler in der Höhenkomponente bis zu wenigen Zentimetern summieren. In Anlehnung an Wübbena et al. (2006) können die verbleibenden Effekte auf die Distanzmessung dD in folgender vereinfachten Formulierung angegeben werden:

$$dD = dS + dE \quad \text{mit} \quad dS = PCV + MP_{\text{Nahfeld}} + MP_{\text{Fernfeld}} \quad (1)$$

Der Übergang zwischen Nahfeld und Fernfeld ist letztendlich fließend, man trennt im allgemeinen das direkte Zubehör der Antenne wie Radom, Grundplatte, Kabel, Adaptierung und Stativ- oder Pfeilerkopf von den Gegenständen und Oberflächen in der Umgebung.

Objekte im Fernfeld der Antenne verursachen kurzperiodische Mehrwegeeffekte; sie sind während der Kalibrierung immer andere als an den Beobachtungsstationen. Im Labor werden Mehrwegeeffekte durch aufwändige Dämmung minimiert, um die PCVs isoliert zu bestimmen. Im Verfahren der Roboterkalibrierung werden Mehrwegeeffekte erfasst, um die eigentlichen PCVs getrennt von diesen zu erhalten. Für den Beobachtungsfall wurden vielfältige Konzepte zur Verringerung von Mehrwegeeffekten entworfen. Neben Maßnahmen zur Abschirmung der Antenne durch Grundplatten, ihre Material-Wahl, spezielle Empfangstechnologien zur Verminderung von Mehrwegeeffekten oder ihre Vermeidung durch entsprechende Punktauswahl, geht man davon aus, dass bei genügend langer Beobachtungsdauer ein Mittelungseffekt eintritt, der ihre Auswirkung in den Positionsraum nahezu eliminiert. Dies gilt natürlich nicht bei Kurzzeitanwendungen wie beispielsweise im RTK-Bereich, wodurch letztendlich eine Stationskalibrierung erforderlich wird.

Aufgrund von zusätzlichen Nahfeldeffekten, deren Abschirmung, Erfassung und Trennung von den PCV nicht gelingt, kann die Mehrwegeproblematik ebenfalls nicht einfach gelöst werden. Das direkt an der Antenne befindliche Antennenzubehör verursacht Reflexion und Beugung von Satellitensignalen und führt zu langperiodischen Mehrwegeeffekten, für die auch bei langer Beobachtungsdauer kein Mittelungseffekt eintritt. Sig-

Tab. 5: Stationsabhängige Effekte, ihre Charakteristiken und Erfassungsmöglichkeiten (erweitert nach Wübbena et al. 2006)

Einfluss (Ursache): Charakteristik	Erfassung		
Antenne (Eigenschaften Antenne): systematischer Koordinateneinfluss	Antennenkalibrierung (Antenne allein): PCO + PCV	Antennenkalibrierung (Antenne mit Zubehör)	Stationskalibrierung
Nahfeld-Multipath (Antennenzubehör): langperiodisches Rauschen in den Residuen	Differenz aus zwei Kalibrierungen		
Fernfeld-Multipath (Antennenumgebung): kurzperiodisches Rauschen in den Residuen	Lange Beobachtungszeit: Mittelungseffekt Kurze Beobachtungszeit: Differenz aus zwei Kalibrierungen		

nifikante Änderungen der PCOs und PCVs während der Kalibrierprozeduren sind die Folge (Dilßner et al. 2008). Nahfeldeffekte bleiben natürlich unverändert, solange die nähere Antennenumgebung unverändert ist. Werden aber zwischen Kalibrierung und eigentlicher Messung Zubehör oder Montierung modifiziert, ändern sie sich, verändern die Beobachtungen und beeinflussen das Koordinatenergebnis, da die Kalibrierwerte im veränderten Setup streng genommen nicht mehr gelten. Diesen Einfluss beobachtet man typischerweise bei Antennenwechseln auf Referenzstationen, wenn es trotz aufwändig kalibrierter Antennen zu unerklärbaren Koordinatensprüngen bis zu mehreren Zentimetern in der Höhe kommt. Insbesondere, wenn Antennen deutlich unterschiedlicher Dimensionen ausgetauscht werden (z. B. Antenne mit/ohne chokerings) oder der Unterbau und damit auch die Höhe der Antennen verändert werden, kommt es zu Änderungen der Mehrwegeeffekte und im Nahfeld, die sich überlagern. Einen Lösungsansatz bietet die sogenannte Nahfeldkalibrierung.

Tab. 5 gibt eine Übersicht über die stationsabhängigen Effekte und die verschiedenen Stufen der Kalibrierung von der einfachen Antennenkalibrierung, der Nahfeld- und der Stationskalibrierung (erweitert nach Wübbena et al. 2006).

6.1 Kalibrierung des Antennen-Nahfelds

Messtechnisch quantifiziert werden auftretende Nahfeldeinflüsse von Dilßner et al. (2008), indem Antennen zunächst ohne, dann zusammen mit ihren Unterbauten kalibriert werden. Unterschiedliche Stativköpfe und Adaptierungen führen in seinen Untersuchungen zu Änderungen der PCV von ± 4 mm für L1 und L2, nahe dem Horizont auch mehr. Schon die sehr kleine Veränderung des Setups beispielsweise an der Kabelführung zwischen zwei

Wiederholungsmessungen (Abb. 15) führt bei Zeimetz et al. (2008) zu Unterschieden in den PCV bis 1 mm für L1 und 1.2 mm für L2 in allen Elevationsbereichen. Dies ist etwa um einen Faktor 3 größer als bei Wiederholungsmessungen ohne Veränderung. Für hohe Elevationen sind die Differenzen wegen der besseren Abschirmung der Antenne kleiner.

Werden die beiden PCV-Ergebnisse am Beispiel der Auswertung einer Zero-Baseline eingeführt, um den Einfluss des Effektes auf die Höhenbestimmung zu visualisieren (Abb. 16), zeigt die Zeitreihe Variationen von ± 1 mm, die im einzelnen durch Änderung der Satellitenkonstellation verursacht sind.

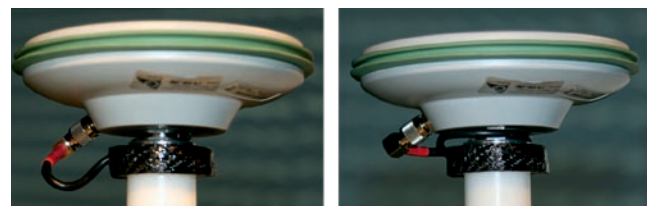


Abb. 15: Unterschiede in der Kabelführung zwischen zwei Wiederholungsmessungen (Zeimetz et al. 2008): links Schlinge, rechts Windung des Kabels um die Achse

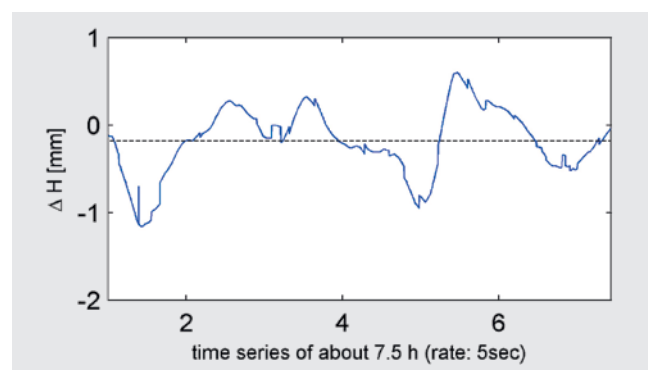


Abb. 16: Effekt veränderter Kabelführung auf die Höhenkomponente bei einer Zero-Baseline

Weitreichendere Änderungen im Nahfeld rufen größere Effekte hervor. Aber schon durch diesen kleinen Effekt könnte, neben den Restfehlern der Antennenkalibrierung selbst, ein Großteil der Differenzen zwischen den Ergebnissen der beiden Absolutverfahren (vgl. Abb. 9) erklärt werden, in denen immerhin ein komplett anderes Setup vorliegt. Im internationalen Standard wird dem Nahfeldeinfluss bisher nur dadurch Rechnung getragen, dass für den Fall der Verwendung von Grundplatten oder Radomen als Antennenzubehör gesonderte Kalibrierdatensätze angegeben werden.

Vor der GNSS-Kampagne DHHN2006-2011 (Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes) wurde, um den oben genannten Fehlereinflüssen durch veränderte Nahfeldeffekte vorzubeugen und die Genauigkeit der Höhenkomponente zu garantieren, ein standardisierter Antennenaufbau definiert (Feldmann-Westendorff 2009). Die



Abb. 17: Kalibrierung einer Antenne zusammen mit ihrem Unterbau für die GNSS-Kampagne DHHN 2008 (Schmitz et al. 2008b)

Antennen wurden zusammen mit dem Unterbau bestehend aus Dreifuß und Stativkopf auf dem Roboter kalibriert (Abb. 17). So wird der Einfluss der veränderten Nahfeldeinflüsse zwischen Kalibrierung und Messung minimiert. Bei einem solchen Ansatz der Kalibrierung von Antennen zusammen mit ihrem Nahfeld ist allein die Belastbarkeit des Roboters mit zusätzlichem Gewicht begrenzend.

Kaum umfassend quantifizierbar dürften jedoch witterungsbedingte Effekte sein, z.B. der Belag von Schnee oder Eis auf der Antenne.

Einzelne Versuche, bei denen die Testantenne während der Kalibrierprozedur kontrolliert beregnet wurde, ergaben Veränderungen in den PCV bis zu 1 cm (Schmitz et al. 2008a).

Nahfeldkalibrierungen stoßen also immer dann an ihre Grenzen, wenn die Beschaffenheit des Nahfeldes unwägbare, also wegen zeitlicher oder räumlicher Veränderungen nicht einwandfrei zu definieren ist. Ebenso stößt man an Grenzen, wenn entschieden wird, Bauteile noch dem Nahfeld zuzuordnen, um sie zusammen mit der Antenne zu kalibrieren, oder ob sie beispielsweise wegen Überschreitung der mechanischen Belastbarkeit der Kalibrierereinrichtung dem Fernfeld zuzurechnen sind, um sie dann in einer Stationskalibrierung zu erfassen.

6.2 Stationskalibrierung

Unter dem Begriff der Stationskalibrierung sind Lösungsansätze entwickelt worden, deren Ziel es ist, alle stationsabhängigen Einflüsse dS zu erfassen und durch

Kombination mit Antennen- und Nahfeldkalibrierung einzelne Effekte zu isolieren (Tab. 5). Es liegt also kein Antennenproblem im strengen Sinne mehr vor, da die Kalibrierung der Antenne selbst im Zusammenhang der Stationskalibrierung als gelöst betrachtet wird. Die Praxis zeigt jedoch, dass die Antennenkalibrierung nur dann zu einer Genauigkeitssteigerung führt, wenn auch die Mehrwegeeffekte geeignet erfasst werden.

Die Messanordnung des Ansatzes der **absoluten in-situ Stationskalibrierung** sieht vor, dass auf der zu untersuchenden Station neben der Testantenne T , für die Zeit der Kalibrierung eine Referenzantenne R betrieben wird, deren Beobachtungen durch geeignete Maßnahmen als frei von Mehrwegeeffekten angenommen werden (Böder et al. 2001). Nach der oben eingeführten Formulierung erhält man für die beiden Antennen:

$$\begin{aligned} dD_T &= PCV_T + MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T} + dE_T, \\ dD_R &= PCV_R + dE_R. \end{aligned} \quad (2)$$

Entfernungsabhängige Fehler dE werden durch die Bildung von Einfachdifferenzen ΔdD eliminiert. Der Empfängeruhrenfehler wird durch den Anschluss beider Empfänger an ein externes Frequenznormal weitgehend eliminiert.

$$\Delta dD = \Delta dS = (PCV_T + MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T}) - PCV_R. \quad (3)$$

Wurden beide Antennen vorab kalibriert, sind also absolute PCV bekannt, können die Mehrwegeeffekte als verbleibende Komponente der stationsabhängigen Einflüsse auf die Streckenmessung isoliert werden:

$$\Delta dS = MP_{Nahfeld,T} + MP_{Fernfeld,T}. \quad (4)$$

Wurde für die Testantenne eine Nahfeldkalibrierung (Antenne mit Zubehör und Unterbau) durchgeführt, verbleiben nur noch die Mehrwegeeffekte des Fernfeldes:

$$\Delta dS = MP_{Fernfeld,T}. \quad (5)$$

Im Hannoverschen Verfahren zur Absoluten Stationskalibrierung, das am Institut für Erdmessung in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++ u. a. zur Kalibrierung der niedersächsischen SAPOS-Stationen entwickelt wurde, wird der Roboter in der Nähe der zu kalibrierenden Station aufgestellt. Der Roboter wird wie in Kap. 3.2 beschrieben so gesteuert, dass seine Beobachtungen durch das Verfahren der Multipath-Dekorrelation (Böder et al. 2001) praktisch mehrwegfrei sind. In einem von Granström (2006) vorgestellten schwedischen Ansatz wird als Referenzantenne eine Choking-Antenne verwendet, die in Bodennähe aufgestellt wird und durch Absorbermaterial so von unten abgeschirmt wird, dass Mehrwegfreiheit angenommen wird.

Ein alternativer Ansatz zur oben beschriebenen in-situ-Kalibrierung ist die statistische Stationskalibrie-

rung, die von derselben Arbeitsgruppe zur Untersuchung der schwedischen SWEPOS-Stationen eingesetzt wurde. Post-fit-Residuen von Precise Point Positioning-Auswertungen (PPP) mehrjähriger Messreihen, die neben den stationsabhängigen zunächst natürlich alle nicht-modellierten Einflüsse enthalten, werden auf Systematiken untersucht. Bei genügend langer Beobachtungsdauer tritt für alle zeitlich veränderlichen Einflüsse (hier auch die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse) ein Mittelungseffekt ein und stationsabhängige Fehler werden als Systematiken in den Residuen sichtbar. Auch hier wird ein mehrstufiger Ansatz in der Kombination mit der Antennenkalibrierung vorgenommen. So zeigte eine erste von Haas et al. (2001) vorgenommene Untersuchung der PPP-Residuen, dass aus den elevationsabhängigen Phasenresiduen der PPP-Analyse prinzipiell PCVs bestimmt werden können (Abb. 18), die im Bereich bis wenige Zentimeter den größten Anteil der stationsabhängigen Einflüsse

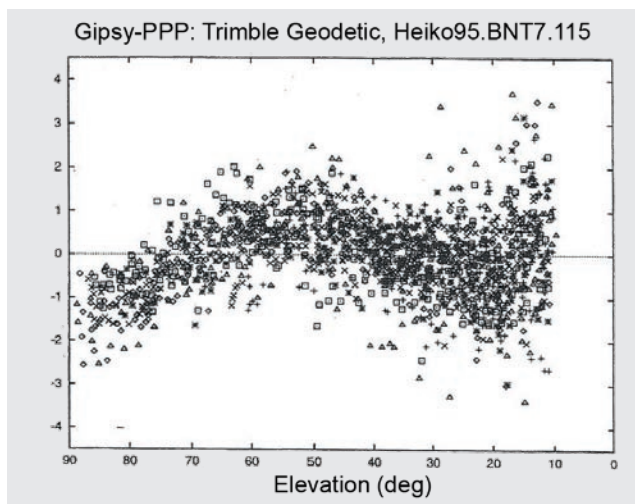


Abb. 18: Post-fit-Residuen einer PPP-Analyse, in der für die beobachtenden Antennen keine PCVs angebracht wurden (Haas et al. 2001).

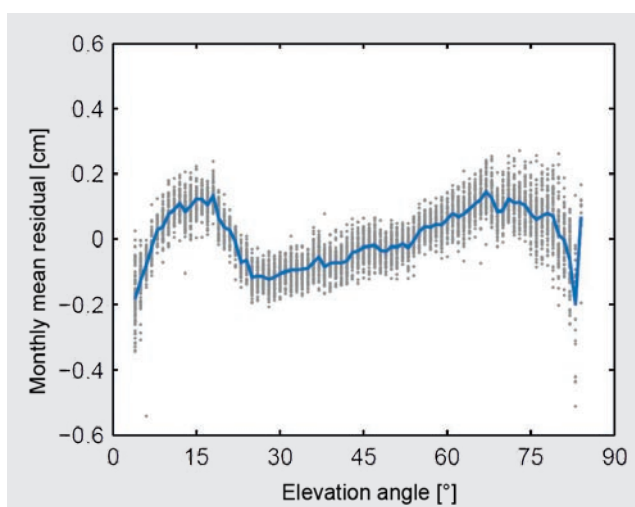


Abb. 19: Post-fit-Residuen einer PPP-Analyse nach der Anbringung von PCVs zeigen systematische Mehrwegeeffekte an der untersuchten Station (Granström et al. 2006).

ausmachen. Werden aus einer Antennenkalibrierung bekannte PCVs in der Auswertung angebracht, verbleiben als stationsabhängige Einflüsse die Mehrwegeeffekte in den Residuen, die jetzt typischerweise mehrere Millimeter groß sind (Granström et al. 2006, Abb. 19). Hier zeigt sich die von der Montierung und Pfeilerkonstruktion herrührende typische Residuen-Struktur der SWEPOS-Stationen. Werden die Residuen nach Elevation und Azimut sortiert, kann man darüber hinaus stationsindividuelle Strukturen durch Mehrwegeeffekte aus der lokalen Umgebung identifizieren. Denkbar ist auch hier die Kombination mit einer Nahfeldkalibrierung, um die genannten typischen Strukturen von den stationsindividuellen trennen zu können.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Bestimmung von Höhen oder Höhenunterschieden mit GNSS mit einer Genauigkeit von 1 cm oder besser stellt auch heute noch eine Herausforderung dar, obwohl das Problem der Kalibrierung der Antenne selbst als gelöst betrachtet werden kann. So ist die Verwendung absoluter Kalibrierwerte heute ein Standardverfahren. Ergebnisse können durch Vergleich der beiden unabhängigen Kalibrierverfahren auf dem Roboter und im Labor im Bereich von besser als 1 mm für den Elevationsbereich vom Zenit bis 10° verifiziert werden. Jedoch kommt es trotz der aufwändig kalibrierten Antennen bei Antennenwechseln immer wieder zu deutlichen Koordinatensprüngen. Als Ursache vermutet man Störungen aus dem unmittelbaren Nahfeld der Antenne, deren Einfluss von den eigentlichen Antennenwerten bisher nur unbefriedigend getrennt werden kann. Interessante Ansätze ergeben sich aus Versuchen zur Kalibrierung von Antennen zusammen mit ihrem Unterbau.

Der Zusammenhang zwischen den Antennenparametern der Empfangs- und Sendeantennen auf den Satelliten wird durch eine Schätzung der Werte für die Sendeantennen aus Beobachtungsdaten hergestellt. Erste Kalibrierungen von Sendeantennen auf dem Roboter wurden durchgeführt, jedoch steht die Verifizierung der Ergebnisse durch eine In-Orbit-Analyse noch aus. Auf internationaler Ebene werden in der seit Beginn 2008 bestehenden IGS Antenna Working Group weitergehende Fragen, wie beispielsweise zur Weiterentwicklung von Standards, Formaten, zur Namensdefinition und dem Umgang mit neuen Empfängern und Satelliten geführt (Schmid 2009).

Mit der im Frühjahr 2009 fertiggestellten Bonner Messkammer besteht die Möglichkeit sowohl für Detailuntersuchungen als auch für Routinekalibrierungen. Hier können Antennen für alle GNSS-Frequenzen kalibriert werden, d.h. auch für die neuen Frequenzen der GPS-Modernisierung sowie diejenigen des zukünftigen GALILEO-Systems.

Gegenstand der Forschung ist heute die Erfassung der Mehrwegeeffekte des Nah- und des Fernfeldes, da das Antennenproblem nicht isoliert vom Problemfeld der Mehrwegeeffekte betrachtet werden kann. Verschiedene Ansätze der Stationskalibrierungen erlauben in Kombination mit der Antennen- und Nahfeldkalibrierung eine Trennung der einzelnen Effekte. Gelingt dies, könnte ein weiterer Ringversuch organisiert werden, bei dem dann Nahfeld- und Fernfeldeinflüsse soweit erfasst sind, dass der Vergleich auf Koordinatenebene für alle Frequenzen im gewünschten Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern gelingt. Wenn dies möglich ist, kann auch die Detektion von Stationsbewegungen aus langjährigen Beobachtungen erfolgreich durchgeführt werden, die in der Praxis häufig durch Antennenwechsel beeinträchtigt ist.

Die Publikationen aller Antennenworkshops findet man auf der Homepage des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn:

www.gib.uni-bonn.de → forschung → gnss.

Literatur

- Böder, V.; Menge, F.; Seeber, G.; Wübbena, G.; Schmitz, M.: How to Deal With Station Dependent Errors-New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. Proc of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS, Salt Lake City, Utah, Sep 11–14, 2001.
- Breuer, B.; Campbell, J.; Görres, B.; Hawig, J.; Wohlleben, R.: Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. SPN, S. 49–59, 1995.
- Campbell, J.; Görres, B. (Herausgeber): Workshop zur Festlegung des Antennenphasenzentrums von GPS-Antennen. Geodätisches Institut der Universität Bonn, 28. April 1999.
- Dach, R.; Jäggi, A.; Bock, H.; Lutz, S.; Meindl, M.; Ostini, L.; Prange, L.; Steigenberger, P.; Steinbach, A.; Schaer, S.; Thaller, D.; Walser, P.; Beutler, G.: Kalibrierung von Satellitenantennen: aktuelle Arbeiten am AIUB (Vortragsfolien). 7. GNSS-Antennenworkshop Dresden, 19.–20. März 2009.
- Dillner, F.; Seeber, G.; Wübbena, G.; Schmitz, M.: Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution. International Technical Meeting, ION GNSS Savannah, Georgia, Sep 16–1, 2008.
- Feldmann-Westendorff, U.; Sorge, B.: Vergleichstest von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen (Vortragsfolien). 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 21. Mai 2002.
- Feldmann-Westendorff, U.: Von der See bis zu den Alpen: Die GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006–2011. GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen, DVW-Schriftenreihe Bd. 57, S. 95–112, Wißner-Verlag, Augsburg, 2009.
- Frevert, V.; Blumenbach, Th.; Wanninger, L.: Beschleunigung der Antennen-Feldkalibrierung durch automatisierte Drehung. Vortragsfolien in: B. Görres; H. Kuhlmann: 6. GPS-Antennenworkshop. Bonn, 21.9.2006.
- Gäde, A.; Dach, R.; Hugentobler, U.; Schaer, S.: GLONASS-Satelliten-Antennenphasenzentrumsvariationen. Vortragsfolien in: B. Görres; H. Kuhlmann: 6. GPS-Antennenworkshop. Bonn, 21.9.2006.
- Geiger, A.: Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen. Mitteilungen d. Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich Nr. 43, 1988.
- Görres, B.: Kalibrierung von GPS-Antennen. In: GPS-Referenzstationsdienste. VDV-Schriftenreihe Bd. 19, S. 31–46, 2001.
- Görres, B.; Campbell, J.; Becker, M.; Siemes, M.: Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. GPS Sol 10(2): 136–145 DOI: 10.1007/s10291-005-0015-3, 2006.
- Granström, C.: Site-Dependent Effects in High-Accuracy Applications of GNSS, Chalmers University of Technology, Göteborg/Schweden, 2006.
- Granström, C.; Johansson, J.; Görres, B.: Untersuchung stationsabhängiger Effekte an GNSS Permanentstationen und Statistische Stationskalibrierung. Vortragsfolien in: B. Görres; H. Kuhlmann: 6. GPS-Antennenworkshop. Bonn, 21.9.2006.
- Haas, R.; Görres, B.; Campbell, J.: Elevationsabhängige Phasenvariationen aus Einzelpunktbestimmung mit dem »Precise Point Positioning«-Verfahren. Vortragsfolien in: J. Campbell; B. Görres: 3. GPS-Antennenworkshop. Geodätisches Institut der Universität Bonn, 11. Mai 2001.
- Rothacher, M.: Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. GPS Solutions 4, S. 55–60, 2001.
- Schmid, R.; Rothacher, M.: Ergebnisse und Analyse des Vergleichstests von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen. 4. GPS-Antennenworkshop (Vortragsfolien), Hannover, 21. Mai 2002.
- Schmid, R.; Rothacher, M.; Thaller, D.; Steigenberger, P.: Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. Impact on GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna. GPS Solutions, 9, 4, S. 283–293, 2005.
- Schmid, R.; Steigenberger, P.; Gendt, G.; Ge, M.; Rothacher, M.: Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. Journal of Geodesy, 81, 12, 781–798, 2007.
- Schmid, R.; Steigenberger, P.: First activities of the IGS Antenna Working Group – Comparison of ground- and space-based satellite antenna maps (Vortragsfolien). IGS Workshop Miami Beach, June 2–6, 2008.
- Schmid, R.: Aktuelle Aktivitäten der IGS Antenna Working Group (Vortragsfolien). 7. GNSS-Antennenworkshop Dresden, 19.–20. März 2009.
- Schmitz, M.; Wübbena, G.; Propp, M.: Absolute Robot-Based GNSS Antenna Calibration – Features and Findings (Vortragsfolien). International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Nov 11–14, 2008a.
- Schmitz, M.; Propp, M.: Definitionen zur Antennenkalibrierung LEIAT504GG+SFD NONE und TRM29659.00+SFD NONE für die GNSS-Kampagne im DHHN 2006–2011. Internes Papier, 7.3.2008b.
- Schupler, B.R.; Clark, T.A.: How different antennas affect the GPS observable. GPS World, 32–36, Nov/Dez 1991.
- Springer, T.; Gurtner, W.: Trimble antenna phase center problem. Note circulated at the start of the IGS campaign, June 21, 1992.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Menge, F.; Seeber, G.; Völkens, C.: A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. NAVIGATION: Journal of The Institut of Navigation, Vol. 44, No. 2, 1997.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Menge, F.; Böder, V.; Seeber, G.: Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. In: Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS. Salt Lake City, Utah, USA, Sep 19–22, 2001.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Boettcher, G.: Near-field Effects on GNSS Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections. Proceedings of the IGS Workshop 2006 Perspectives and Visions for 2010 and beyond, ESOC, Darmstadt, Germany, May 8–12, 2006.
- Zeimet, P.; Kuhlmann, H.: Systematic effects in absolute chamber calibration of GPS antennas. Geomatica, 60/3, 267–274, Ottawa, Canadian Institut of Geomatics, 2006.
- Zeimet, P.; Kuhlmann, H.: On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. FIG Working Week, Stockholm/Schweden, 14–19 Juni 2008.
- Zeimet, P.; Kuhlmann, H.; Wanninger, L.; Frevert, V.; Schön, S.; Strauch, K.: Ringversuch 2009 (Vortragsfolien). 7. GNSS-Antennenworkshop Dresden, 19.–20. März 2009.

Anschrift der Autorin

Dr.-Ing. Barbara Görres
Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn
Nussallee 17, 53115 Bonn
Tel.: +49 288 73-3034, Fax: -2988
goerres@uni-bonn.de