

Erste GNSS-Antennenkalibrierungen im Feldverfahren auf neuen Signalfrequenzen

Annemarie Schmolke, Lambert Wanninger und Volker Frevert

Zusammenfassung

Für eine hochgenaue Positionsbestimmung müssen GNSS-Empfangsantennen kalibriert sein. Feldkalibrierverfahren sind im Gegensatz zum Laborkalibrierverfahren auf die von Satelliten ausgesendeten Signale angewiesen. Beim augenblicklichen Übergang auf zusätzliche Satellitensysteme und neue Frequenzen ergibt sich das Problem, dass Feldkalibrierungen mit unvollständigen Satellitenkonstellationen durchgeführt werden müssen. Wir zeigen anhand von Testkalibrierungen, dass dieser Mangel durch eine Verlängerung der Kalibrierdauer kompensiert werden kann.

Summary

Precise GNSS positioning requires the calibration of the receiving antennas. Antenna field calibrations, in contrast to lab calibrations, use the signals transmitted by GNSS satellites. With the present transition to additional GNSS and new frequencies we encounter the problem that field calibrations have to be performed with incomplete satellite constellations. Based on test calibrations we are able to demonstrate that this obstacle can be overcome by the extension of the calibration duration.

Schlüsselwörter: GNSS, Antennenkalibrierung, Galileo, BeiDou

1 Einleitung

GNSS-Antennen, die zur Positionsbestimmung auf Zentimeter- bis Millimeterniveau verwendet werden sollen, müssen kalibriert werden, um die Differenzen zwischen geometrischem Antennenreferenzpunkt (ARP) und dem wirksamen elektrischen Phasenzentrum korrigieren zu können. Dafür wird für jede Signalfrequenz ein dreidimensionaler Vektor für den mittleren Phasenzentrumsoffset (PZO) und die richtungsabhängige Phasenzentrumsvariation (PZV) bestimmt. Einführungen in die GNSS-Antennenkalibrierungen geben z. B. Menge (2003), Zeimetz et al. (2011), Zeimetz (2012).

Für die GNSS-Antennenkalibrierung stehen heute im Wesentlichen drei Verfahren zur Verfügung. Bei der Laborkalibrierung werden in einem Prüflabor die Antennenempfangseigenschaften mit Hilfe von dort erzeugten Signalen ausgemessen (Zeimetz 2012). Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass Kalibrierungen auch für Signalfrequenzen vorgenommen werden können, die von Satelliten noch gar nicht ausgestrahlt werden. Genauigkeitsbeschränkungen treten aufgrund von Mehrwegeeffekten

auf, die trotz aller Bemühungen zu ihrer Vermeidung und Minderung immer noch in begrenztem Umfang vorhanden sind (Zeimetz und Kuhlmann 2006). In diesem Beitrag werden Ergebnisse des Bonner Labors verwendet, das im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn und der Bezirksregierung Köln betrieben wird.

Bei den anderen beiden Verfahren handelt es sich um Feldkalibrierverfahren, die auf die momentan ausgesendeten Frequenzen der Satelliten angewiesen sind. Bei der sogenannten Roboterkalibrierung wird die Prüfantenne kontrolliert gedreht und gekippt, um Mehrwegeeffekte zu eliminieren (Wübbena et al. 1996). Gleichzeitig liefert dieses Verfahren dadurch absolute Kalibrierwerte, die unabhängig von der Referenzantenne sind (Wübbena et al. 1996, 2000). Ein ähnliches Kalibrierverfahren mit Drehung und Kippung haben auch Bilich und Mader (2010) vorgestellt.

An der TU Dresden wurde ein einfacheres Feldkalibrierverfahren entwickelt, bei dem die Prüfantenne kontrolliert gedreht, aber nicht gekippt wird. Dieses wird seit vielen Jahren eingesetzt. Die Messungen erfolgen sequenziell in vier Ausrichtungen pro Minute (Nord, Süd, West, Ost), die durch eine automatische Dreheinrichtung (DRB2) eingestellt werden (Wanninger 2002a, Frevert et al. 2003, 2006). Man ist bei der Datenauswertung auf absolute Kalibrierwerte für die Referenzantenne angewiesen. Dieses Verfahren ermöglicht eine Mehrwegeeliminierung in den horizontalen Komponenten, aber nur eine Mehrwegedämpfung in der vertikalen Komponente. Die Mehrwegerestmessungen wirken sich in der praktischen Anwendung der Kalibrierwerte aber kaum aus, da sie fast immer von den stärkeren Mehrwegeeffekten am Beobachtungsort überdeckt werden (Wanninger 2002b).

Mit der Weiterentwicklung der bisherigen GNSS (GPS, GLONASS) und dem Aufbau zusätzlicher GNSS (Galileo, BeiDou) stehen schon heute Satellitensignale auf weiteren Frequenzen zur Verfügung, für welche die Antennen kalibriert werden müssen. Bisher waren solche Kalibrierungen nur im Labor möglich. Wir zeigen hier die ersten Ergebnisse aus Feldkalibrierungen und vergleichen sie mit Laborkalibrierergebnissen.

Die Kalibriermessungen mit dem DRB2 des Geodätischen Instituts der TU Dresden wurden ebenso wie eine erste Datenanalyse von der Erstautorin dieses Beitrags im Rahmen ihrer Masterarbeit durchgeführt. Ergänzend wurden noch weitere Analysen vorgenommen, die in diesen Artikel eingeflossen sind.

2 Alte und neue GNSS-Frequenzen

Im Folgenden werden die einzelnen Frequenzen entsprechend der beim RINEX-Format (RINEX 2013) üblichen Konvention bezeichnet. Sie gilt auch für das ANTEX-Format (Rothacher und Schmid 2010), also für das Format, in dem heutzutage Kalibrierergebnisse dargestellt und verteilt werden.

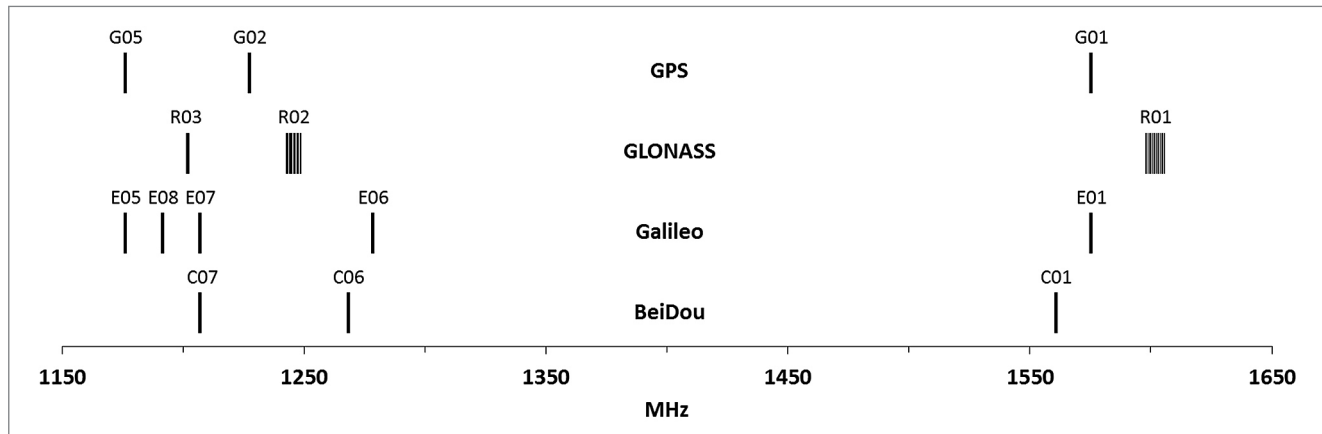


Abb. 1: GNSS-Sendefrequenzen, Frequenzbezeichnungen entsprechend RINEX 3.02-Formatbeschreibung

Die beiden existierenden und voll ausgebauten Systeme GPS und GLONASS besitzen jeweils zwei Signalfrequenzen, für die geodätische GNSS-Antennen bisher schon kalibriert wurden. Dabei handelt es sich bei GLONASS um zwei Frequenzbereiche R01 und R02 mit jeweils 14 Einzelfrequenzen. GLONASS-Kalibrierergebnisse beziehen sich jeweils auf die Frequenz mit der Frequenznummer $k = 0$, die fast exakt in der Mitte der Einzelfrequenzen liegt.

Augenblicklich wird bei beiden Systemen jeweils eine dritte Frequenz (G05 bzw. R03, Abb. 1) hinzugefügt. Im Zeitraum der Kalibriermessungen waren sechs GPS-Satelliten aktiv, die Signale auf der G05-Frequenz aussandten. Für die GLONASS R03-Frequenz gibt es auch Anfang 2015 noch keinen aussendenden Satelliten, sodass eine Feldkalibrierung hier noch nicht möglich war.

Das im Aufbau befindliche Galileo-System sendet Signale auf vier Trägerfrequenzen aus. Die beiden eng beieinander liegenden Frequenzen E05 (auch als E5a bezeichnet, Galileo ICD 2014) und E07 (E5b) werden von Empfängern zum Teil auch gemeinsam ausgemessen, sodass von einer weiteren Trägerfrequenz E08 (E5) ausgegangen werden kann. Zur Zeit der Kalibriermessungen standen drei aktive Galileo-Satelliten zur Verfügung, die diese Frequenzen aussenden.

Die Satelliten des chinesischen BeiDou senden auf drei Frequenzen C01, C06 und C07. Bei den Kalibriermessungen standen fünf Satelliten auf mittelhohen Orbits (MEO) und drei Satelliten auf geneigten geosynchronen Bahnen (IGSO) zur Verfügung. Signale der geostationären Satelliten (GEO) wurden für die Kalibrierung nicht genutzt.

Zum Teil existieren zwischen den verschiedenen GNSS Frequenzübereinstimmungen, bei denen von identischem

Antennenverhalten für die Phasenbeobachtungen der unterschiedlichen GNSS ausgegangen werden kann. Wie aus Abb. 1 erkennbar, liegen Übereinstimmungen vor für G01/E01, G05/E05 sowie E07/C07.

Insgesamt ergeben sich sieben neue Frequenzen (C01, E06, C06, C07/E07, R03, E08, G05/E05), für die die Antennen zusätzlich zu den bisherigen vier Frequenzen bzw. Frequenzbändern (G01, G02, R01, R02) kalibriert werden

müssen. Wie schon erwähnt, gibt es noch keine Signale auf GLONASS R03, sodass hier noch keine Feldkalibrierung möglich ist.

Beim BeiDou-System werden in der nächsten Satellitengeneration teilweise neue Frequenzen verwendet werden. Die erste BeiDou-Frequenz wird dann mit G01/E01 übereinstimmen. Auch die zweite BeiDou-Frequenz wird sich an GPS/Galileo anpassen und dann mit den Frequenzen G05/E05, E07 und E08 (Galileo E5a, E5b und E5) zusammenfallen (Lu und Yao 2014). Die jetzt erzielten Ergebnisse für C01 werden dann ohne Bedeutung sein.

Für die Kalibriermessungen standen uns zwei Empfänger vom Typ JAVAD TRE_G3T SIGMA zur Verfügung, die nicht alle der genannten Frequenzen unterstützen. So war keine Kalibrierung auf den Frequenzen E06, C06 und E08 möglich. Unsere Ergebnisse beziehen sich neben den bisherigen vier Frequenzen also auf die neuen Frequenzen C01, C07/E07 und G05/E05.

3 Satellitenüberdeckung

Zur Abschätzung des Messzeitraums für die Kalibrierung der neuen Frequenzen wurde die Satellitenüberdeckung der Hemisphäre für vier unterschiedliche Zeiträume verglichen (Abb. 2). Damit ist eine erste Einschätzung der notwendigen Kalibriermessdauer möglich.

Abb. 2 zeigt die Überdeckung der Hemisphäre mit Satellitensignalen für eine Feldkalibrierung mit vier Antennenausrichtungen (Nord, Süd, West, Ost), wie sie bei unserer Kalibrierung angewendet wird. Vergleichend werden die Überdeckungen bei acht Stunden sowie bei

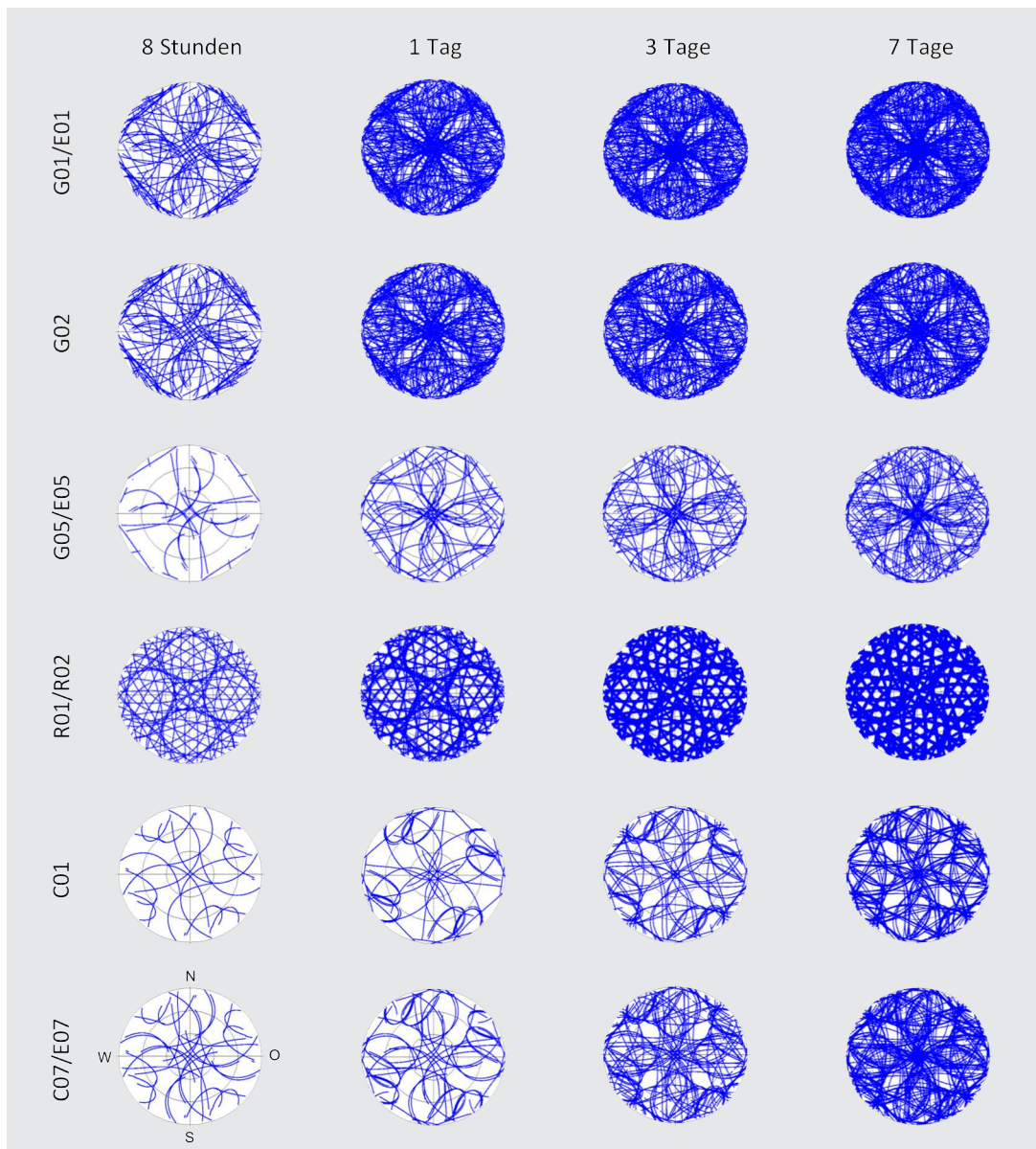


Abb. 2:
Überdeckung der
Hemisphäre mit
Satellitensignalen
bei der Feldkali-
brierung mit vier
Antennenausrich-
tungen

einem, drei und sieben Tagen für alle aufgezeichneten Frequenzen dargestellt. Deutlich zeigt sich, dass die Abdeckung der Hemisphäre für die alten Frequenzen G01, G02 von GPS und R01, R02 von GLONASS zu jedem Zeitintervall am besten ausfällt. Dies liegt an der hohen Anzahl von mindestens 24 aktiven Satelliten je System, die diese Frequenzen aussenden. Bereits nach acht Stunden ist die Hemisphäre dicht und gleichmäßig überdeckt und eine Kalibrierungsauswertung kann durchgeführt werden.

Bei den neu zu kalibrierenden Frequenzen G05/E05, C01 und C07/E07 war die Überdeckung der Hemisphäre nach acht Stunden noch sehr lückenhaft. Mit der Steigerung des Messzeitraums konnte jedoch eine deutlich bessere Überdeckung erzielt werden. Nach drei Tagen erreicht die Überdeckung der Hemisphäre bei den neuen Frequenzen ungefähr das gleiche Niveau wie die Überdeckung bei den alten Frequenzen nach acht Stunden.

Als Besonderheit sei bei GPS auf die Wiederholung der gesamten Satellitenkonstellation nach circa 23 Stunden und 56 Minuten (Hofmann-Wellenhof et al. 2008) hin-

gewiesen, die sich aus der bei GPS gewählten Orbithöhe ergibt. Das heißt, dass die GPS-Satelliten jeden Tag auf identischen Spuren ziehen. Dies ist deutlich in Abb. 2 bei der Frequenz G02 von GPS zu sehen. Die Spuren der Satelliten sind für einen Tag, drei Tage und sieben Tage identisch. Somit werden nach einem Tag keine neuen Bereiche der Hemisphäre abgedeckt und es ergeben sich keine neuen Informationen für die Auswertung der Kalibrierung. Bei den anderen GNSS ist dies aufgrund der unterschiedlichen Umlaufperioden anders. Hier kommen bei einer Verlängerung der Beobachtungsdauer über einen Tag hinaus neue Informationen hinzu. Nur aufgrund der anders als bei GPS gewählten Umlaufperioden verbessern sich bei GLONASS, Galileo und BeiDou die Kalibrierergebnisse bei Beobachtungszeiträumen von über einem Tag deutlich.

4 Durchführung der Messung und Datenauswertung

Als Referenzantenne für die Kalibriermessungen im Feldverfahren kam eine JAVRINGANT_DM JVDM zum Einsatz. Für diese lagen absolute Antennenkalibrierwerte für alle ausgestrahlten Frequenzen aus ihrer Laborkalibrierung in Bonn vor. Vier Prüfantennen wurden ver-

ler Drehung kalibriert (Frevert et al. 2006, Frevert et al. 2003). Der DRB2 dreht den Prüfling azimuthal alle 15 Sekunden, sodass Messungen in den vier Ausrichtungen Nord, Süd, West und Ost vorliegen (Beobachtungsintervall 15 Sekunden, Elevationsmaske 0 Grad). Mit diesem Verfahren gelingt es, die Mehrwegeeffekte, die auf die horizontalen Koordinatenkomponenten wirken, zu eliminieren.

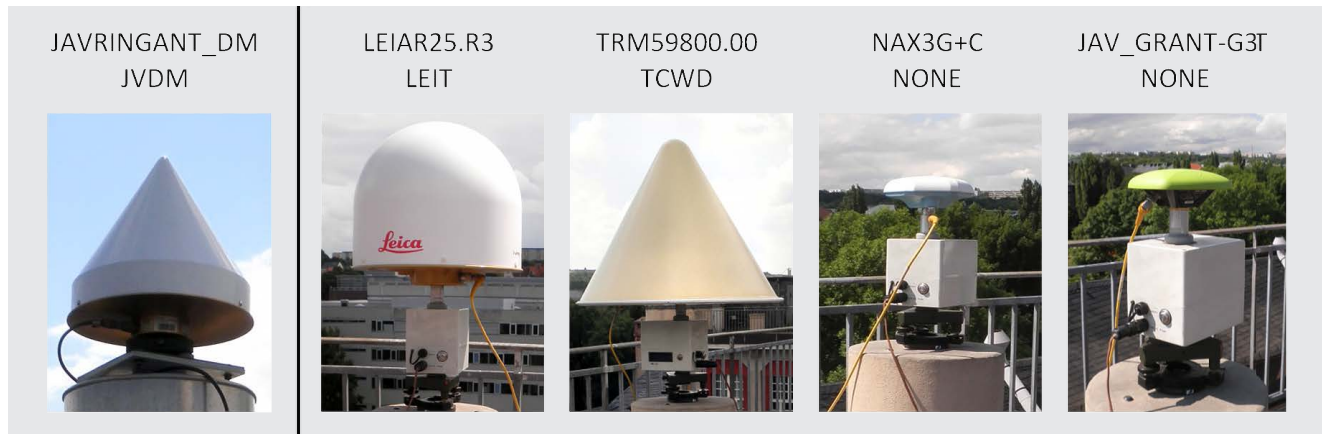


Abb. 3: Referenzantenne JAVRINGANT_DM JVDM und die vier Prüfantennen jeweils auf dem DRB2

wendet: zwei Chokering-Antennen mit aufgesetzten Radoms der Firmen Leica und Trimble (LEIAR25.R3 LEIT, TRM59800.00 TCWD) sowie die kleineren Antennen NAX3G+C der Firma NavXperience und JAV GRANT G3T der Firma Javad (Abb. 3). Im weiteren Text verwenden wir die Antennenkurzbezeichnungen der Tab. 1.

Auch die vier Prüfantennen waren im Bonner Labor kalibriert worden. Abb. 4 zeigt exemplarisch die Kalibrierwerte der ersten Frequenz (G01/E01) aller vier Antennen. Deutlich sind die unterschiedlichen Antennencharakteristika erkennbar. Die horizontalen Phasenzentrums-offsets (PZO) fallen mit maximal 1 bis 2 mm gering aus. Die vertikalen PZO sind konstruktionsbedingt viel größer. Die baulich großen Antennen weisen starke elevationsabhängige Variationen auf, die das 10 mm-Niveau erreichen können. Die Phasenzentrumsvariationen der baulich kleinen Antennen sind deutlich geringer. Die azimuthalen Variationen sind bei allen Antennen recht klein.

Alle Prüfantennen wurden mit dem Verfahren der relativen Feldkalibrierung mit automatischer horizonta-

Die Antennen wurden nacheinander auf demselben Messpfeiler aufgebaut. Durch denselben Standort aller Prüfantennen können die Umgebungsbedingungen als sehr ähnlich angesehen werden. Aufgrund der geringeren Anzahl von Satelliten, welche die neuen Frequenzen aussenden, wurde entschieden, Messdaten von mindestens einer Woche Dauer je Prüfantenne aufzuzeichnen. Da der Messablauf voll automatisch abläuft, ist der damit verbundene Arbeitsaufwand gering. Wie schon erwähnt, wurden die Messungen mit Empfängern des Typs JAVAD TRE_G3T SIGMA durchgeführt, die nur für einen Teil der neuen Frequenzen Messungen liefern. Die Ergebnisse beschränken sich dementsprechend auf die Frequenzen G01/E01, G02, G05/E05, R01, R02, C01 und C07/E07.

Die erhaltenen Messdaten wurden mit der Auswertesoftware Wa2/Wa2Ant ausgewertet und mit dem Softwaremodul CCANTEX mit den Antennenkalibrierergebnissen aus der Laborkalibrierung in Bonn verglichen.

Wa2/Wa2Ant berechnet die Multi-GNSS-Basislinie zwischen Referenzantenne und Prüfantenne inklusive Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten auf ihre wahren Werte. Aus den somit erhaltenen Phasenresiduen werden mittlere PZO und mit Hilfe von Kugelfunktionen die PZV-Werte geschätzt.

CCANTEX berechnet Differenzen zwischen Antennenkorrekturdatensätzen und zugehörigen statistischen Kennziffern in einem mehrschrittigen Verfahren:

1. Einrechnung der PZO-Werte in die PZVs bei beiden Datensätzen ohne Veränderung von deren Korrekturwirkung,
2. Differenzbildung zwischen beiden so erhaltenen PZV-Datensätzen,

Tab. 1: Im Feldverfahren kalibrierte Antennen mit ihren Kurzbezeichnungen

Antennentyp	Antennennummer	Kurzbezeichnung
LEIAR25.R3	LEIT	09460008
TRM59800.00	TCWD	5316354659
NAX3G+C	NONE	NA0221
JAV_GRANT-G3T	NONE	04550

3. Schätzung von Differenz-PZO-Werten (dPZO) aus den Differenz-PZV, vgl. Tab. 2 und 3,
4. Darstellung oder statistische Auswertung der verbleibenden Differenz-PZV-Anteile, z. B. durch Berechnung ihrer quadratischen Mittelwerte, vgl. Tab. 2 und 3.

5 Kalibrierergebnisse

Alle vier Prüfantennen wurden für einen Zeitraum von einer Woche im Feldverfahren kalibriert. Die Auswertung erfolgte nicht nur für den Gesamtzeitraum, sondern auch für kürzere Zeitabschnitte von drei Tagen, einem Tag und acht Stunden.

Aus den Wochenergebnissen werden in Abb. 5 die G01/E01-Ergebnisse exemplarisch dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit mit Abb. 4 zu gewährleisten, wurden die Höhenoffsets der Antennen an die der Bonner Kalibrierergebnisse angepasst, d. h. die Differenzen der Höhenoffsets wurden in die Phasenzentrumsvariationen eingerechnet. Bei den Dresdener Ergebnissen sieht man leichte Deformationen der konzentrischen Phasenzentrumsvariationen, die sich durch die vier Ausrichtungen der Prüfantennen ergeben. Eine größere Anzahl der Ausrichtungen würde zwar optisch die Ergebnisse besser aussehen lassen, die Qualität aber nicht erhöhen.

Im Vergleich zu den Bonner Kalibrierergebnissen derselben individuellen Antennen zeigten sich in den

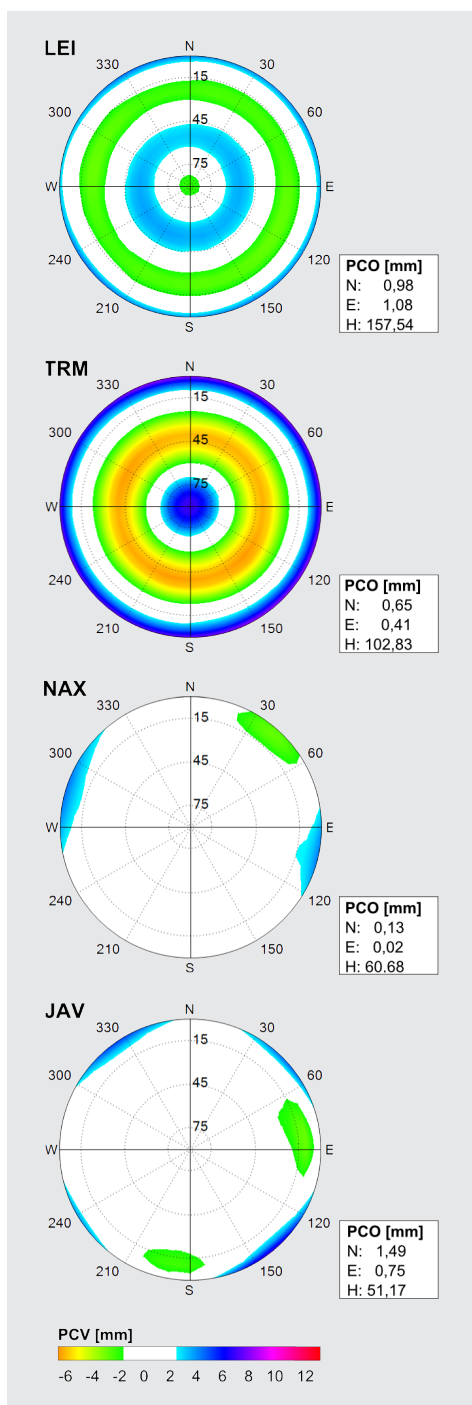


Abb. 4: Die Kalibrierergebnisse der vier Prüfantennen aus der Laborkalibrierung in Bonn, hier beispielhaft für Frequenz G01/E01

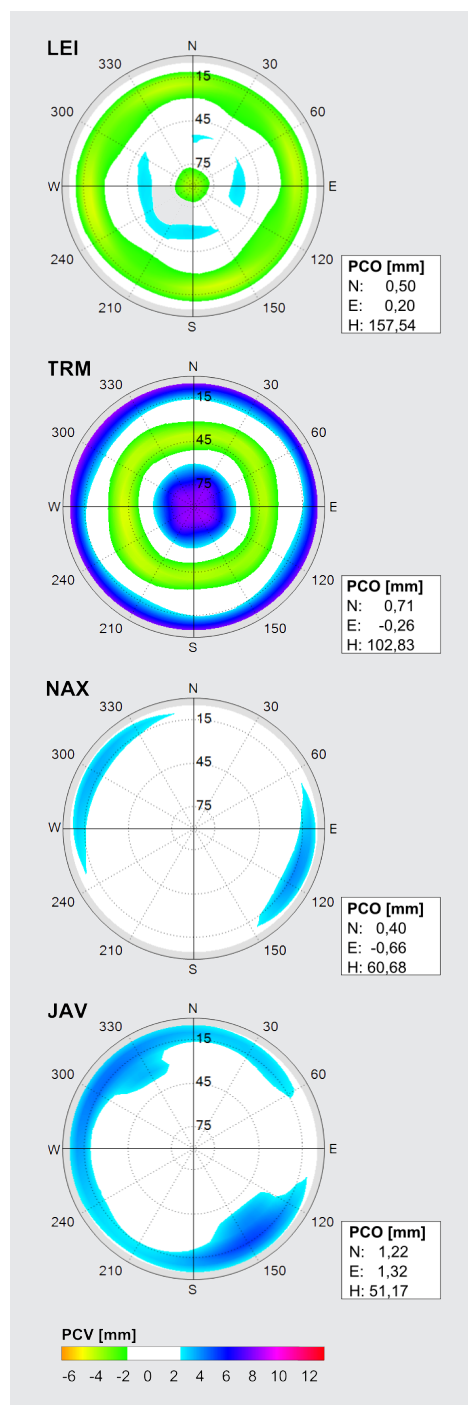


Abb. 5: Ergebnisse der DRB2-Kalibrierung der vier Prüfantennen, hier beispielhaft für Frequenz G01/E01. Zur besseren Vergleichbarkeit der PZV mit Abb. 4 wurden die Höhenoffsets der Antennen an die der Bonner Kalibrierergebnisse angepasst.

Tab. 2: Differenzen zwischen Wochenlösungen der Feldkalibrierung und den Laborkalibrierergebnissen, jeweils vier Werte pro Antenne und Frequenz: dPZO in Nord/Ost/Höhe, quadratisches Mittel der PZV-Differenzen, alle Angaben in mm

Frequenz	LEI	TRM	NAX	JAV
G01/E01	-0,5/-0,9/ 0,1 0,6	0,1/-0,9/-0,4 0,8	0,2/-0,4/ 2,0 0,8	-0,5/0,5/ 6,0 0,9
G02	-1,0/-1,4/ 0,9 1,1	0,3/-0,8/ 2,1 1,1	1,1/-0,7/-0,9 1,1	0,2/1,0/-7,1 1,7
G05/E05	-0,8/-1,4/ 2,3 1,0	0,5/ 0,1/ 0,9 1,0	0,7/-0,5/ 1,9 2,0	-0,2/0,9/-5,5 2,6
R01	-0,5/-1,0/-2,1 1,0	0,5/-0,5/-1,0 0,8	0,3/-0,4/-0,5 0,7	-0,5/0,1/ 3,7 1,1
R02	-0,6/-1,2/ 1,3 0,8	0,5/-0,6/ 1,7 0,6	1,1/-0,6/ 1,1 1,2	-0,7/1,8/-3,5 2,0
C01	-0,8/-0,9/ 1,9 1,0	0,1/-1,1/ 2,1 1,2	0,2/-0,4/ 3,1 1,5	-0,7/0,7/ 9,3 1,3
C07/E07	-0,7/-0,9/ 1,9 0,8	0,1/ 0,0/ 3,0 1,1	1,2/-0,6/ 1,4 1,4	0,6/1,0/-5,8 2,0

horizontalen PZO-Komponenten kleine systematische Differenzen von meistens kleiner 1 mm, die bei allen Zeiträumen ähnlich auftraten (Tab. 2). Die systematischen Abweichungen in der Höhenkomponente fielen bei den Antennen dagegen sehr unterschiedlich aus. Sie erreichen bei einzelnen Frequenzen bis zu 3 mm bei den Antennen LEI, TRM und NAX, bei der JAV-Antenne aber sogar bis über 9 mm. Hier zeigen sich Mehrwegereffekte unserer Feldkalibrierung und insbesondere die Mehrwegeempfindlichkeit der einzelnen Antennen. Die Schlussfolgerungen sind, dass die Antennentypen LEI, TRM und NAX eine ähnlich geringe Mehrwegeempfindlichkeit aufweisen während die JAV-Antenne besonders mehrwegeempfindlich ist. Von daher sollte die letztgenannte Antenne nicht für Positionsgenauigkeiten von 1 cm oder besser eingesetzt werden.

Zu den PZO-Unterschieden kommen noch Differenzen in den PZV hinzu. Sie sind in Tab. 2 jeweils pro Antenne und Frequenz zu quadratischen Mittelwerten zusammengefasst. Diese Werte liegen meist um 1 mm, aber insbesondere bei der JAV-Antenne zum Teil auch höher.

Beschränkt man die Kalibrierdauer auf kürzere Zeiträume, so treten weitere Abweichungen auf. Diese zu-

sätzlichen Abweichungen zwischen Kalibrierergebnissen kürzerer Beobachtungsdauer und der Wochenlösung unterscheiden sich bei den vier Prüfantennen nur recht wenig, wobei aber zu erwähnen ist, dass die JAV-Antenne etwas größere Variationen zeigt als die anderen drei Antennen. Trotzdem werden hier mittlere Ergebnisse über alle Prüfantennen gezeigt (Tab. 3), um akzeptable Stichprobengrößen zu erreichen. Die Darstellung erfolgt in der Form von quadratischen Mittelwerten über PZO- und PZV-Abweichungen. Bei einer Kalibrierdauer von acht Stunden und einem Tag kam es bei den neuen Frequenzen in Einzelfällen zu einer so schlechten Bestimmung der Kalibrierwerte, dass eine solche Beobachtungsdauer nicht empfohlen werden kann. Für die neuen Frequenzen sind also nur Ergebnisse der dreitägigen Kalibrierdauer angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verkürzung der Kalibrierdauer bei den neuen Frequenzen auf drei Tage in etwa so viele zusätzliche Variationen in den Kalibrierwerten erzeugt wie eine Verkürzung der Kalibrierdauer auf acht Stunden bei den alten Frequenzen mit ihrer sehr viel besseren Signalverfügbarkeit. Daraus lässt sich schließen, dass Antennenkalibrierungen im Feldverfahren

schon jetzt für neue GNSS-Frequenzen mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden können, solange die Messdauer nur entsprechend ausgedehnt wird, um die noch schwache Satellitenüberdeckung zu kompensieren.

Zum Abschluss der Analyse der Kalibrierergebnisse sei noch auf einen weiteren Vergleich von Kalibrierverfahren hingewiesen, der von Bilich et al. (2012) veröffentlicht wurde. Auch hier wurden

Tab. 3: Abweichungen der kurzzeitigeren Lösungen von den Wochenlösungen, jeweils vier Werte pro Frequenz und Beobachtungsdauer: quadratische Mittel der PZO-Abweichungen in Nord/Ost/Höhe, quadratisches Mittel der PZV-Differenzen, alle Angaben in mm

Frequenz	3 Tage, n = 8	1 Tag, n = 28	8 Stunden, n = 84
G01/E01	0,0/0,0/0,3 0,1	0,0/0,0/0,5 0,1	0,1/0,0/1,0 0,4
G02	0,0/0,0/0,1 0,1	0,0/0,0/0,2 0,1	0,1/0,1/0,6 0,6
G05/E05	0,0/0,1/0,6 0,6	-	-
R01	0,0/0,0/0,4 0,1	0,0/0,0/0,7 0,3	0,1/0,0/1,1 0,5
R02	0,0/0,0/0,3 0,2	0,1/0,0/0,4 0,3	0,1/0,1/1,0 0,6
C01	0,1/0,0/0,7 0,6	-	-
C07/E07	0,1/0,0/0,7 0,6	-	-

individuelle Antennen mit verschiedenen Verfahren kalibriert und die Ergebnisse verglichen. Er stellt Ergebnisse des Bonner Laborkalibrierverfahrens und der Roboterkalibrierungen durch die Firma Geo++ und durch den National Geodetic Service (NGS) gegenüber. Dieser Vergleich umfasste aber nur die Frequenzen G01 und G02, weil die NGS-Kalibrierungen darauf beschränkt sind.

Bei den höherwertigen Antennen traten hier Abweichungen zwischen den einzelnen horizontalen PZO von bis zu 1,5 mm, in der Vertikalen von bis zu 2 mm auf und die quadratischen Mittelwerte der PZV-Differenzen lagen z.T. über 1 mm. Bei der einfacheren, kleinen Antenne lagen die Unterschiede des vertikalen PZO bei bis zu 4 mm und die quadratischen Mittelwerte der PZV-Differenzen erreichten bis zu 2 mm. Es traten hier also ähnliche Differenzen zwischen höherwertigen Antennen und einer einfacheren Antenne auf, wie bei dem hier präsentierten Vergleich. Weiterhin waren die Unterschiede zwischen den Kalibrierergebnissen auf ähnlichem Niveau wie zwischen Bonner und Dresdener Ergebnissen.

6 Schlussfolgerungen

Auch bei noch sehr begrenzter Satellitenanzahl können schon heute Feldkalibrierungen von GNSS-Antennen auf neuen Frequenzen mit guter Qualität durchgeführt werden. Die geringe Überdeckung der Hemisphäre mit Satellitensignalen kann mit verlängerter Beobachtungsdauer kompensiert werden. Hier ist von besonderem Vorteil, dass sich die Satellitenspuren nur bei GPS im Tagesrhythmus wiederholen, bei allen anderen GNSS aber erst mit größerem zeitlichen Abstand.

Dank

Unser Dank gilt dem Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen in Dresden und dem Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation in Erfurt für die Ausleihe von GNSS-Antennen sowie der Bezirksregierung Köln – Abteilung 7 (Geobasis NRW) in Bonn und dem Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn für Antennenkalibrierungen in ihrem Labor.

Literatur

- Bilich, A., Mader, G.L.: GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. Proc. ION GNSS 2010, S. 1369–1377, 2010. www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Bilich-and-Mader_ION2010.pdf, letzter Zugriff 07/2015.
- Bilich, A., Schmitz, M., Görres, B., Zeimetz, P., Mader, G.L., Wübbena, G.: Three-Method Absolute Antenna Calibration Comparison. IGS Workshop, Olsztyn, Poland, 2012. <http://igsb.jpl.nasa.gov/assets/pdf/Poland2012-P09BilichPR59.pdf>, letzter Zugriff 07/2015.

- Breuer, B., Campbell, J., Görres, B., Hawig, J., Wohlleben, R.: Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. SPN – Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation 2, S. 49–59, 1995.
- Frevert, V., Blumenbach, T., Wanninger, L.: Beschleunigung der Antennen-Feldkalibrierung durch automatisierte Drehung, 6. GPS-Antennenworkshop, Bonn, 2006. www.gib.uni-bonn.de/forschung/gnss/antennen-workshops, letzter Zugriff 07/2015.
- Frevert, V., Stöcker, D., Nuckelt, A.: Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen, Proc. POSNAV 2003, S. 353–359, 2003.
- Galileo ICD: European GNSS (Galileo) Open Service, Signal in Space Interface Control Document (OS SIS ICD), Ausgabe 1.2, 2014. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/pubconsult-2/files/galileo_os_sis_icd_v1-2-3_short_version270614_en.pdf, letzter Zugriff 05/2015.
- Hofmann-Wellenhopf, B., Lichtenegger, H., Wasle, E.: GNSS – Global Navigation Satellite Systems/GPS, GLONASS, Galileo and more, Springer Verlag, Wien, NewYork, 2008.
- Lu, M., Yao, Z.: New Signal Structures for BeiDou Navigation Satellite System. Stanford's 2014 PNT Symposium, 2014. http://scpn.stanford.edu/pnt/PNT14/2014_Presentation_Files/10.LuMQ_GNSS_Signal_Design.pdf, letzter Zugriff 05/2015.
- Menge, F.: Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung, Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 247, 2003.
- RINEX: RINEX – The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.02. International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104), 3. April 2013. <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>, letzter Zugriff 05/2015.
- Rothacher, M., Schmid, R.: ANTEX – The Antenna Exchange Format, Version 1.4, 2010. <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/antex14.txt>, letzter Zugriff 05/2015.
- Wanninger, L.: Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung, zfv 127: 51–58, 2002a.
- Wanninger, L.: Qualitätskontrolle relativer Antennenkalibrierung, 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 2002b. www.gib.uni-bonn.de/forschung/gnss/antennen-workshops, letzter Zugriff 07/2015.
- Wübbena, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber, G., Völksen, C.: A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations, Proc. ION-GPS 96, S. 1205–1214, 1996.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V., Seeber, G.: Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time, Proc. ION-GPS 2000, S. 2512–2522, 2000.
- Zeimetz, P.: Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Band C 682, 2012.
- Zeimetz, P., Becker, M., Kuhlmann, H., Schön, S., Wanninger, L.: Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen, DVW-Merkblatt 1-2011, 2011. www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2012/01_DVW-Merkblatt_Antennenkalibrierung_09_09_2011.pdf, letzter Zugriff 07/2015.
- Zeimetz, P., Kuhlmann, H.: Systematic Effects in Absolute Chamber Calibration of GPS Antennas. Geomatica, 60, S. 267–274, 2006.

Anschrift der Autoren

M. Sc. Annemarie Schmolke | Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger | Dr.-Ing. Volker Frevert
TU Dresden – Geodätisches Institut
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
annemarie@geoid.xyz | lambert.wanninger@tu-dresden.de | volker.frevert@tu-dresden.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.