

GNSS-Antennenkalibrationen in der Vermessungspraxis

GNSS-Antennenkalibrationen sind relevant für den Vermessungsalltag. Nur wenn die Kalibrationen korrekt berücksichtigt werden, lassen sich Genauigkeiten im Zentimeter- oder Millimeterbereich erzielen. Auch bei der Benutzung des swipos-Dienstes des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo sind Antennenkalibrationen zu berücksichtigen. Dieser Artikel versteht sich als Einführung in die Thematik der Antennenkalibration. Daneben werden auch praxisrelevante Aspekte behandelt und das System der ETH Zürich zur Antennenkalibration vorgestellt.

D. Willi, S. Lutz

1. Einleitung

Die Antennen sind ein Schlüsselement bei der Vermessung mit Globalen Navigations satellitensystemen (GNSS) wie z. B. GPS. Sie bilden die Schnittstelle vom Signal der Satelliten hin zum Empfänger. Wie jeder andere Sensor muss auch eine GNSS-Antenne kalibriert werden, um genaue Messungen zu liefern. Die Verwendung von geodätischen GNSS-Antennen ohne jegliche Korrektur führt zu

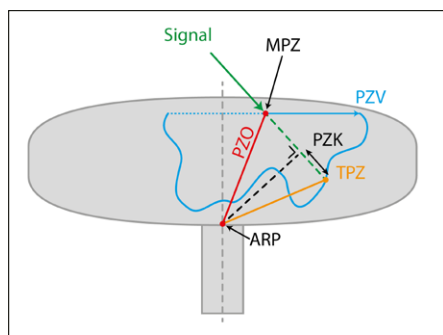


Abb. 1: GNSS-Antenne mit den relevanten Grössen. Die Korrektur, die auf eine Messung angebracht wird, ist die Projektion des Vektors vom ARP zum TPZ auf den Richtungsvektor zum Satelliten.

Fehlern von mehreren Zentimetern, insbesondere in der Höhe. Um dennoch genaue Resultate mittels GNSS zu erhalten, werden Empfangsantennen im Feldverfahren oder in einer echolosen Kammer im Labor kalibriert. Diese Kalibration wird anschliessend direkt im Empfänger, zum Beispiel bei Real-Time-Kinematic (RTK)-Messungen, oder im Postprocessing berücksichtigt. Weil die verschiedenen GNSS-Systeme, wie GPS und Galileo, teilweise auf unterschiedlichen Frequenzen senden, braucht es auch entsprechende Kalibrationen.

2. Mathematisches Modell

Die Koordinate, die mithilfe von GNSS bestimmt wird, bezieht sich immer auf den Antennenreferenzpunkt (ARP). Bei fast allen geodätischen Antennen liegt der ARP im Schnittpunkt der vertikalen Achse der Antenne mit deren Unterseite¹. Das mittlere Phasenzentrum (MPZ) einer Antenne ist ein virtueller Punkt, der Phasenzentrumsoffset (PZO) ein 3D-Vektor, der den Bezug vom ARP zum MPZ herstellt (siehe Abb. 1). Die Phasenzentrumsvariation (PZV) ist abhängig vom Azimut und vom Elevationswinkel des eintreffenden Signals und wird auf das MPZ addiert. Die eigentliche Messung erfolgt im tatsächlichen Phasen-

zentrum (TPZ). Die Projektion des Vektors vom ARP zum TPZ auf den Richtungsvektor zum Satelliten führt zur gesamten Phasenzentrumskorrektur (PZK). Das ist der Wert, der schliesslich einer Messung angerechnet werden muss.

Antennenkalibrationen sind frequenzabhängig. Durch die Modernisierung der Satellitensysteme sind heute eine Vielzahl von verschiedenen Frequenzen verfügbar. GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou senden allesamt auf drei oder mehr Frequenzen (siehe Abb. 2). Demensprechend wird für jede einzelne Frequenz eine Kalibration benötigt, wobei gewisse Systeme auf derselben Frequenz senden (z. B. senden GPS, Galileo, SBAS, BeiDou, QZSS und IRNSS allesamt auf 1176 MHz). Die einzelnen Frequenzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Antennenkalibrationen werden üblicherweise im ANTEX²-Format zur Verfügung gestellt. Ein ANTEX-File enthält einen Eintrag pro Antenne und pro Frequenz. Es enthält unter anderem Informationen zum PZO. Anschliessend folgt eine Tabelle mit Korrekturwerten in einem Azimut- und Elevationsgitter.

2.1 Individuelle Kalibrationen versus «Type-Mean»-Kalibrationen

Bei so genannten «Type-Mean»-Kalibrationen ist eine einzige Kalibration für alle Antennen des gleichen Typs verfügbar. «Type-Mean»-Kalibrationen entstehen aus dem Mittelwert mehrerer individueller Kalibrationen. Sie werden zum Beispiel vom International GNSS Service (IGS) zur Verfügung gestellt; der IGS unterhält ein ANTEX-File mit konsistenten Antennen-Kalibrationen für alle GNSS-Satelliten sowie für alle GNSS-Antennen innerhalb des IGS-Netzwerks³.

Bei der Individual-Kalibration wird jede Antenne separat kalibriert. Dadurch lassen sich auch kleinste Unterschiede innerhalb einer Baureihe korrigieren. Mehrere Anbieter führen auf Anfrage kommerzielle Antennen-Kalibrationen durch. Marktführer ist die deutsche Firma Geo++ ® GmbH⁴, aber auch das Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover⁵ und die Berliner Senatsverwal-

¹ Der International GNSS Service (IGS) unterhält eine Liste mit Skizzen zur Beschreibung des ARP für alle gängigen Antennen. Die Liste ist erhältlich unter <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/antenna.gra>.

² Antenna Exchange Format. Eine genaue Beschreibung des ANTEX-Formats findet sich unter <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>.

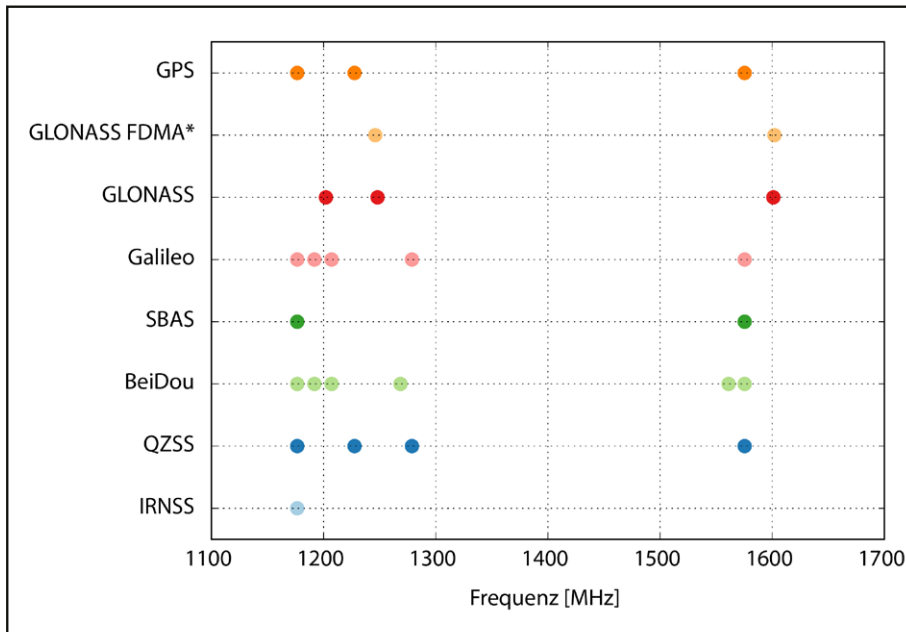


Abb. 2: Heute verfügbare Satelliten-Navigationssysteme und deren Frequenzen. Das indische IRNSS sendet zusätzlich auf einer Frequenz von ca. 2500 MHz (nicht gezeigt). *Die russischen Satelliten alter Baureihe senden ein so genanntes «Frequency Division Multiple Access» (FDMA)-Signal; Die Frequenz der einzelnen Satelliten unterscheidet sich um maximal 8 MHz. Die Grafik zeigt die Zentrumsfrequenz.

tung für Stadtentwicklung und Wohnen⁶ führen solche Feld-Kalibrationen durch. Kalibrationen im Laborverfahren werden von der Universität Bonn⁷ zusammen mit der Bezirksregierung Köln – Abteilung 7⁸ angeboten.

3. Kalibrationsmethoden

3.1 Kalibration in der echolosen Kammer

Bei Kalibrationen in einer echolosen Kammer wird die zu kalibrierende GNSS-Antenne in einem speziellen Labor gegenüber einem Sender aufgestellt. Der Sender generiert ein künstliches Sinus-Signal mit der gewünschten Frequenz. Anschlies-

send wird entweder der Sender bewegt oder die Antenne wird rotiert, um die ganze Antenne abzutasten. Gleichzeitig wird die Phasenverschiebung gemessen, um die Kalibrationsparameter zu bestimmen.

Messungen in echolosen Kammern haben den Vorteil, dass sie unabhängig von Wettereinflüssen und unter Laborbedingungen durchgeführt werden können. Die kurze Distanz zwischen dem Sender und dem Empfänger, verglichen mit der Distanz zwischen einem Satelliten und einem Empfänger auf der Erde, kann jedoch problematisch sein. Zudem ist die benötigte Infrastruktur nicht unerheblich.

³ Das aktuelle ANTEX-File mit allen Antennen des IGS-Netzwerks findet sich unter: <ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>

⁴ www.geopp.de

⁵ <https://www.ife.uni-hannover.de/de/dienstleistungen/gnss-antenna-calibration>

⁶ <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/landesvermessung/landeskalibriereinrichtung>

⁷ <https://www.gib.uni-bonn.de/research/antennenmesskammer>

⁸ https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis

3.2 Feldkalibrationen

Im Gegensatz zum Laborverfahren wird bei der so genannten Feldkalibration ein tatsächliches GNSS-Signal gemessen. Bei früheren Verfahren wurde die zu kalibrierende Antenne in wenigen Metern Entfernung zu einer Referenzantenne aufgestellt und nach Norden orientiert. Die zu kalibrierende Antenne wird nach 24 h oder mehr manuell um 180° rotiert und somit nach Süden orientiert. Aus der Analyse dieser Daten lässt sich eine so genannte relative Kalibration berechnen. Relativ, weil das Resultat von der gewählten Referenzantenne abhängig ist. Relative Kalibrationen werden grundsätzlich nicht mehr eingesetzt.

Heutzutage nutzen die meisten Verfahren einen Industrieroboter mit fünf oder sechs Achsen. Durch den Industrieroboter können Rotationen in drei Dimensionen ausgeführt werden und nicht nur einzig um die Antennenhochachse. Diese zusätzlichen Rotationen erlauben die Dekorrelation der Kalibration der zu kalibrierenden Antenne von der Kalibration der Referenzantenne. Das Resultat ist eine so genannte absolute Kalibration. Diese absolute Kalibration ist unabhängig von der eingesetzten Referenzantenne. Die Referenzantenne dient nur noch dazu, die Troposphäre, die Ionosphäre, die Satellitenbahnfehler und die Satelliten- und Empfängeruhrfehler bei der Datenanalyse zu korrigieren.

3.3 Antennenkalibration an der ETH Zürich

Seit 2017 wird am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich ein Kalibrationssystem für GNSS-Antennen entwickelt. Dessen Hauptkomponenten sind in Abbildung 3 dargestellt. Das System besteht aus einem 6-Achsen-Industrieroboter, der Steuerelektronik für den Roboter, einem Computer für die Steuerung, einer Referenzstation und zwei Multi-GNSS-Empfängern.

Der Roboter bringt die zu kalibrierende GNSS-Antenne in eine vordefinierte Abfolge von Orientierungen. Das Zentrum der Rotationen befindet sich im MPZ. Das hat den Vorteil, dass sich das MPZ wäh-

System	Land	Signal	Frequenz [MHz]
GPS	USA	L1	1575.42
		L2	1227.6
		L5	1176.45
GLONASS	Russland	G1 *	1602
		G2 *	1246
		G3	1202.025
		G1a	1600.995
		G2a	1248.06
Galileo	Europa**	E1	1575.42
		E5a	1176.45
		E5b	1207.14
		E5 (E5a+E5b)	1191.795
		E6	1278.75
SBAS	Verschiedene***	L1	1575.42
		L5	1176.45
BeiDou	China	B1	1575.42
		B1-2	1561.098
		B2a	1176.45
		B3	1268.52
		B2b	1207.14
QZSS	Japan	B2 (B2a+B2b)	1191.795
		L1	1575.42
		L2	1227.6
		L5	1176.45
		L6	1278.75
IRNSS	Indien	L5	1176.45
		S	2492.028

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen Systeme und Signale. *Diese Signale sind so genannte «Frequency Division Multiple Access» (FDMA)-Signale: Jeder Satellit sendet auf einer geringfügig unterschiedlichen Frequenz. In Zukunft werden diese Signale abgelöst. **Galileo ist ein Projekt der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) mit Beteiligung weiterer Staaten. Die Schweiz ist Mitglied der ESA und auch am Galileo-Projekt beteiligt. ***Verschiedene Staaten unterhalten Satellite Based Augmentation System (SBAS)-Satelliten, unter anderem die USA, und Europa. SBAS-Satelliten senden Korrekturdaten. SBAS-Satelliten können nicht alleine zur Navigation benutzt werden.

rend der ganzen Kalibration nicht bewegt. Die ETH Zürich bietet keine kommerziellen Kalibrationen an. Das System dient der Forschung und der Lehre. Die Kalibration von so genannten «low-cost»-Antennen ist aktuell ein Forschungsschwerpunkt. «low-cost»-Antennen werden zum Beispiel in Fahrzeugen eingesetzt und unterscheiden sich durch ihren niedrigen Preis und ihrer kleinen Masse von geodätischen Antennen. Die PZV von solchen Antennen wurden aber noch kaum untersucht.

Abbildung 4 zeigt ein Resultat einer Kalibration mit dem System der ETH Zürich für eine geodätische Antenne der Marke

JAVAD. Die starke Abhängigkeit vom Elevationswinkel des eintreffenden Signals ist klar erkennbar. Die vier Erhebungen bei tiefen Zenitwinkeln lassen auf eine viereckige Struktur der Antennen-Grundplatte schliessen.

4. Grössenordnung der Korrekturen und Anwendung in der Praxis

Der PZO beträgt bei gängigen geodätischen Antennen in der Höhe einige Zentimeter, in der Lage weniger als 1 mm. Der

PZO ist abhängig von der Antennenkonstruktion. Er spiegelt hauptsächlich die Lage des mechanischen Referenzpunktes, des ARP, wider.

Die PZV betragen typischerweise weniger als 1 cm. Die PZV sind hauptsächlich abhängig von der Elevation und weisen nur eine geringe azimutale Variation auf.

In der Praxis sind Antennenkalibrationen immer zu berücksichtigen. Die meisten Instrumenten- und Softwarehersteller bringen Antennenkalibrationen bestehend aus PZO und elevationsabhängiger Korrektur automatisch an. Werden die Antennenkalibrationen nicht berücksichtigt, kann der Koordinatenfehler in der Lage mehrere Millimeter betragen. In der Höhe sind Abweichungen von mehreren Zentimetern möglich.

Bei der Benutzung eines Echtzeit-Positionierungsdienstes wie swipos ist darauf zu achten, dass im Empfänger der richtige Antennentyp ausgewählt ist (Rover-Antenne). Antennentypen mit ähnlichen Namen haben zum Teil sehr unterschiedliche PZO, was zu entsprechenden



Abb. 3: KUKA 6-Achsen Industrieroboter auf dem Dach des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich auf dem Hönggerberg. Im Hintergrund ist die Referenzantenne zu sehen.

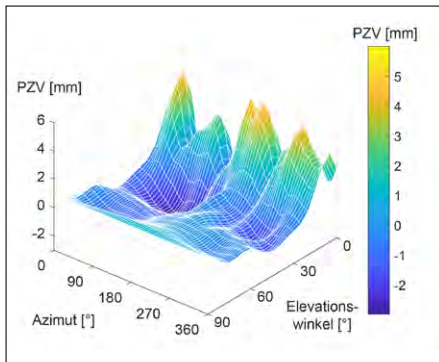


Abb. 4: Resultat einer Kalibration der ETH Zürich für eine GNSS-Antenne der Marke JAVAD.

Fehlern führt, wiederum hauptsächlich in der Höhe. Um die Antennenkalibrationen auf den Permanentstationen muss sich der Anwender nicht kümmern. In den Real-Time-Kinematic-Einstellungen des Rovers muss als Referenzantenne «ADVNULLANTENNA» ausgewählt werden (einige moderne Empfänger unterstützen auch die Einstellung «automatisch erkennen»). Der swipos-Server bringt die Antennenkalibrationen an den Permanentstationen an und berechnet eine virtuelle Referenzstation mit einer Antenne des Typs «ADVNULLANTENNA», wodurch die Konsistenz sichergestellt ist.

Für Hochgenauigkeitsanwendungen sind elevations- und azimutabhängige Antennenkalibrationen zu verwenden.

5. Schlussfolgerungen

Die Antennen spielen bei der Positionierung mit GNSS eine Schlüsselrolle. Um

genaue Messungen zu liefern, müssen Antennen kalibriert werden. Antennenkalibrationen können entweder im Feldverfahren oder im Labor durchgeführt werden.

Die Phasenzentrumsvariationen betragen für geodätische Antennen bis zu 10 mm. Der Phasenzentrumsoffset hängt hauptsächlich von der Bauform der Antenne ab und kann mehrere Zentimeter betragen. Für Standardanwendungen werden üblicherweise so genannte «Type-Mean»-Kalibrationen verwendet. Dabei handelt es sich um einen Mittelwert über mehrere Antennen des gleichen Typs. Für Präzisionsanwendungen werden individuelle Kalibrationen verwendet. In jedem Fall sind die Antennen aber nach Norden auszurichten, damit die Korrekturen richtig angebracht werden und der richtige Antennentyp ist im Empfänger auszuwählen.

Literaturhinweise:

Weiterführende Hinweise zu Antennenkorrekturen finden sich im Merkblatt der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement:

Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen, DVW-Merkblatt 1-2018. https://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2019/01_DVW-Merkblatt_Antennenkorrekturen-GNSS_2018_v3.pdf

Eine Einführung in GNSS findet sich in folgenden Werken:

Bauer M (2018) Vermessung und Ortung mit Satelliten. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Deutschland. ISBN 978-3-87907-634-5.

Piéplu J-M (2006) GPS et Galileo; systèmes de navigation par satellites. Eyrolles, Paris, Frankreich. ISBN 978-2-212-11947-3.

Für wissenschaftlich interessierte Leserinnen und Leser bietet sich das «Springer Handbook of GNSS» an. Es ist sehr umfangreich und gilt als Referenzwerk in Sachen GNSS: Teunissen PJG, Montenbruck O (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, Deutschland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>

Zum Thema Antennenkalibration ist an der ETH Zürich eine Doktorarbeit entstanden:

Willi D (2019) GNSS receiver synchronisation and antenna calibration. Doktorarbeit, ETH Zürich, Schweiz. <https://doi.org/20.500.11850/308750>

Dr. Daniel Willi
 Leiter Geodätische Landesvermessung
 Dr. Simon Lutz
 Entwicklungsingenieur/Geodät
 Geodäsie und Eidgenössische
 Vermessungsdirektion
 Bundesamt für Landestopografie
 swisstopo
 Seftigenstrasse 264
 3084 Wabern
 daniel.willi@swisstopo.ch
 simon.lutz@swisstopo.ch