
Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen (Neubearbeitung)

Fachautoren der Neuauflage 1-2018:

**Barbara Görres, Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Tobias Kersten, Leibniz Universität Hannover
Steffen Schön, Leibniz Universität Hannover
Florian Zimmermann, Universität Bonn
Lambert Wanninger, TU Dresden**

Beteiligte der Neuauflage 1-2018:

**Matthias Becker, TU Darmstadt
Arturo Villiger, Universität Bern (Chair IGS Antenna Working Group)
Michael Mayer, KIT
Heiner Kuhlmann, Universität Bonn**

weitere Beteiligte:

**DVW-Arbeitskreise:
Messmethoden und Systeme (AK 3)
Ingenieurgeodäsie (AK 4)
Experimentelle, Angewandte und Theoretische Geodäsie (AK 7)**

Fachautoren der Auflage 1-2011 vom 9.9.2011:

**Philipp Zeimet, Universität Bonn
Matthias Becker, TU Darmstadt
Heiner Kuhlmann, Universität Bonn
Steffen Schön, Universität Hannover
Lambert Wanninger, TU Dresden**

**Beschlussfassung: Beschlossen vom DVW Arbeitskreis 3 am 19.10.2018
Verabschiedet vom Präsidium des DVW am 19.10.2018**

**Dokumentenstatus:
verabschiedet**

1. Warum wurde das DVW-Merkblatt „GNSS-Antennen“ verfasst?

GNSS-Empfangsantennen (GNSS: globales Satellitennavigationssystem) sind die eigentlichen Sensoren bei der Koordinatenbestimmung mit GNSS-Verfahren. Bei der auf Trägerphasenmessungen basierenden Positionsbestimmung führen richtungsabhängige Variationen des Phasenzentrums der Antenne zu systematischen Phasenabweichungen, die aufgrund ihrer Größenordnung zusammen mit Mehrwege-, Nahfeld- und Atmosphäreneinflüssen zu den dominierenden Störgrößen gehören. Da die Antenneneigenschaften als zeitlich konstant angesehen werden können, sind eine Kalibrierung der Antennen und eine rechnerische Korrektur der GNSS-Beobachtungen möglich

Dieses Merkblatt will zum Verständnis des Nutzers für die Zusammenhänge der Antennenkalibrierung beitragen und für die zugrundeliegenden Entwicklungen sensibilisieren. Die Inhalte orientieren sich am heutigen Stand der Wissenschaft. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Erzeugung und der Verwendung von Kalibrierwerten, die dazu dienen, die Einflüsse der Antenneneigenschaften auf die Positionsbestimmung zu korrigieren.

Für viele Standardanwendungen sind die Parameter von den Herstellern softwareseits berücksichtigt. In diesen Fällen dient das Merkblatt dazu, dem Nutzer die nötigen Hintergrundinformationen zu bieten. Einen Einblick in die Genauigkeit seines Gesamtsystems im Zusammenspiel aller Einflussfaktoren erhält der Nutzer beispielsweise durch den Einsatz geeigneter Feldprüfverfahren.

2. Welche Fragen werden in diesem Merkblatt beantwortet?

In Tabelle 1 sind die in diesem Merkblatt behandelten Thematiken in Form einer Gliederung aufgeführt.

Tabelle 1: Gliederung des Merkblatts

Behandelter Aspekt	Seite
1. Warum wurde das DVW-Merkblatt „GNSS-Antennen“ verfasst?	2
2. Welche Fragen werden in diesem Merkblatt beantwortet?	2
3. Was sind Antennenkorrekturen?	3
4. Wie wirkt sich die Verwendung der Antennenkorrekturen auf die Positionsbestimmung aus?	4
5. Welchen Standard gibt es?	4
6. Wie ist das Antennenbezugssystem definiert?	5
7. Wie groß sind Antennenkorrekturen?	5
8. Bei welchen Arten der GNSS-Positionsbestimmung sind Antennenkorrekturen zu berücksichtigen und wie sind sie auszuwählen?	6
9. Wie werden GNSS-Antennen kalibriert?	7
10. Wie genau sind Antennenkorrekturen?	8
11. In welchem Format werden die Antennenkorrekturen bereitgestellt?	8
12. Welche Quellen für Antennenkorrekturen gibt es?	9
13. Welche GNSS-Antennenkalibrierungseinrichtungen gibt es in Deutschland?	10
14. Welche Antennenbezeichnungen müssen ich verwenden werden?	10
15. Muss die Antenne neu kalibriert werden, wenn nachträglich ein Radom aufgesetzt wird?	10
16. Für welche GNSS-Signale sind Korrekturen erhältlich?	11
17. Sollten immer nur Antennenkorrekturen einer Institution verwendet werden?	12
18. Kann jede GNSS-Software Antennenkorrekturen verarbeiten?	12
19. Muss ich meine Antenne individuell kalibrieren lassen?	12
20. Sollte die Kalibrierung in bestimmten Zeitabständen wiederholt werden?	13
21. Was ist bei der Messung zu beachten, wenn Korrekturwerte angebracht werden sollen?	13
22. Was ist bei der Nutzung von SAPOS® bzgl. Antennenkorrekturen zu beachten?	14
23. Welche weiterführende Literatur gibt es?	15

3. Was sind Antennenkorrekturen?

Bei der Bestimmung von Koordinaten bzw. Koordinatenunterschieden mit GNSS-Verfahren wird im funktionalen Modell der Ausgleichung angenommen, dass sich die Beobachtung, d.h. die Trägerphasenmessung, auf einen festen, geometrisch bekannten Bezugspunkt bezieht, den sogenannten **Antennenreferenzpunkt (ARP)**. Tatsächlich variiert die Position des Bezugspunkts der Phasenmessung in Abhängigkeit von der Einstrahlrichtung, die in einem antennenfesten Bezugssystem angegeben wird. Im Antennenmodell wird der Einfluss (aus rein historischen Gründen) durch zwei Komponenten beschrieben, die stets zusammenhängend zu betrachten sind: Die Lage des mittleren Phasenzentrums E bezüglich des ARP wird durch den **Phasenzentrumsoffset (PZO)** beschrieben. Die richtungsabhängigen Variationen werden als **Phasenzentrumsvariationen (PZV)** bezeichnet. Die geometrischen Zusammenhänge zwischen den PZV, dem ARP und dem PZO sind in Abbildung 1 dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass PZV als Abweichungen von einer Kugelfläche um E beschrieben werden.

Richtungsunabhängige Anteile werden in der Absoluten Punktbestimmung durch die Bestimmung des Empfängeruhrenfehlers eliminiert, gleichartige Anteile in der Relativen Punktbestimmung durch die Bildung von Doppeldifferenzen.

(Anm.: In der Abbildung sowie in der nachfolgenden Formel wird der PZO aufgrund von Konventionen für die Darstellung von Vektoren in Kleinbuchstaben und in Fettschrift dargestellt).

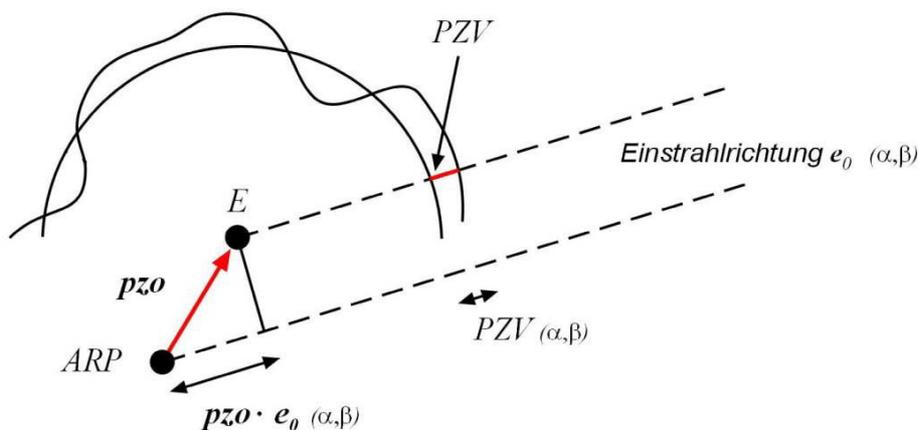


Abbildung 1: Modell der richtungsabhängigen Phasenvariationen

Der Gesamteinfluss Δr wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta r [m] = pzo \cdot e_0(\alpha, \beta) + PZV(\alpha, \beta)$$

Soll die Phasenmessung auf den ARP bezogen werden, ist sie um die Einflüsse von PZO und PZV, die vom Azimut α und der Elevation β der Einstrahlrichtung abhängen, zu korrigieren. Der Einfluss des PZO auf die Phasenmessung wird durch das Produkt des PZO mit dem normierten Richtungsvektor $e_0(\alpha, \beta)$ zum jeweiligen Satelliten berechnet und zur Phasenmessung addiert. Die PZV werden anschließend von der Phasenmessung subtrahiert. Informationen zur Vorzeichenkonvention sind in Rothacher und Schmid (2010) gegeben.

Zur vollständigen Beschreibung des Antennenmodells sind somit stets beide Anteile (PZO und PZV) aufeinander abgestimmt zu berücksichtigen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass das Empfangsverhalten von GNSS-Antennen frequenzabhängig ist und somit für jede Frequenz eigene Korrekturen anzubringen sind.

4. Wie wirkt sich die Verwendung der Antennenkorrekturen auf die Positionsbestimmung aus?

Systematische Abweichungen in den Kalibrierergebnissen wirken sich unmittelbar auf die Positionsbestimmung aus. Meist kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von verbleibenden Kalibrierabweichungen auf die Koordinaten bei den GPS-Frequenzen L1 und L2 Werte von 1 bis 2 mm nicht übersteigt, wenn antennenspezifische Korrekturen verwendet werden. Bei der Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination kann dieser Einfluss entsprechend der Multiplikatoren der Einzelfrequenzen ansteigen (ca. Faktor 3). Die Auswirkung der Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung steigt zudem, wenn bei der Auswertung Troposphärenparameter geschätzt werden, so dass auch bei der Verwendung individuell kalibrierter Antennen – insbesondere bei der Höhenkomponente – deutliche Abweichungen im Bereich vieler Millimeter auftreten können.

5. Welchen Standard gibt es?

Weltweit akzeptiert ist seit Mitte der 1990er Jahre der Standard des International GNSS Service (IGS) zur Darstellung von Antennenkorrekturen. Er wird repräsentiert durch

- Namenskonvention verfügbarer GNSS-Empfänger, -Antennen und Radome (rcv_ant.tab)
- Skizzen zur Festlegung des Antennenreferenzpunktes und der definierten Nordrichtung an der Antenne (antenna.gra)
- Zusammenstellung verfügbarer Antennenkorrekturen im Format ANTEX

Alle genannten Dateien sind auf den Internetseiten des IGS zu finden:

<ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/>

In der Datei antenna_README.pdf sind die wichtigsten Informationen zum IGS-Standard zusammengefasst.

Im Jahr 2006 wurde vom IGS der absolute Antennenstandard eingeführt. Die Verwendung der in der Vergangenheit üblichen relativen Korrekturen ist zu vermeiden. Sie dürfen keinesfalls mit absoluten Korrekturen kombiniert werden.

6. Wie ist das Antennenbezugsystem definiert?

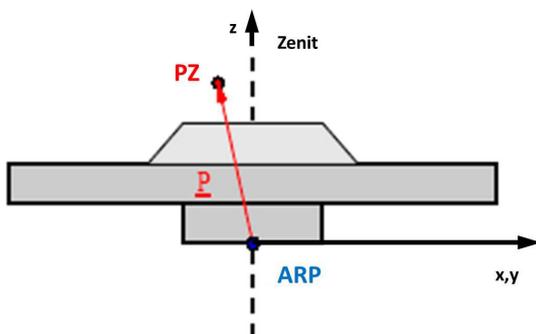


Abbildung 2: Modell der richtungsabhängigen Phasenvariationen

Das Bezugssystem zur Definition von PZO und PZV ist durch ein linkshändiges Körperkoordinatensystem (x_a, y_a, z_a) definiert. Der Ursprung des Antennenkoordinatensystems fällt mit dem Antennenreferenzpunkt (ARP) zusammen (Abbildung 2). Der ARP ist nach dem IGS-Standard durch den Schnittpunkt der Auflagefläche der Antenne mit der vertikalen Symmetrieachse der Zentriervorrichtung der Antenne definiert. Für einzelne Antennentypen, z.B. Antennen mit integriertem Empfänger gibt es Abweichungen hiervon.

Die z-Achse ist die vertikale Symmetrieachse der lotrecht aufgestellten Antenne. Die rechtwinklig dazu verlaufende x-Achse des Antennenkoordinatensystems zeigt in die Nordrichtung. Die y-Achse vervollständigt das Koordinatensystem.

Die Nordorientierung folgt bevorzugt der Richtung der HF-Buchse des Antennenanschlusses oder einer definierten Nordmarkierung an der Antenne.

Skizzen zur Visualisierung der Bezugspunktdefinition marktüblicher Antennen sind beim IGS zusammen mit Angaben zur Definition der Nordrichtung und den Antennendimensionen in der Datei antenna.gra angegeben.

Die vertikale Komponente des ARP dient als Bezugspunkt für Antennenhöhenmessungen. Werden Antennenhöhen zu einem anderen Bezugspunkt an der Antenne gemessen, müssen sie auf den ARP reduziert werden.

Wird eine Antenne nicht nach Norden ausgerichtet oder wird sie geneigt verwendet, muss dies durch externe Sensorik bestimmt und berücksichtigt werden.

7. Wie groß sind Antennenkorrekturen?

Der Abstand des mittleren Phasenzentrums vom ARP variiert in Abhängigkeit vom Antennentyp. Zudem sind die Werte frequenzabhängig. In Tabelle 2 sind für einige Antennentypen Angaben zum Abstand des mittleren Phasenzentrums vom ARP sowie die Größenordnung der PZV exemplarisch für die GPS-Frequenzen L1 und L2 dargestellt. Die PZV sind bei geodätischen Antennen meist kleiner als 1 Zentimeter. Dabei treten häufig starke elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen auf, während azimutale Variationen deutlich geringer ausfallen. Auch die PZV sind für verschiedene Antennentypen unterschiedlich.

Die viele Zentimeter großen Werte der vertikalen PZO-Komponenten werden durch die Festlegung des ARP verursacht und spiegeln im Wesentlichen den geometrischen Aufbau der Antenne wider.

Tabelle 2: Darstellung typischer Größenordnungen von PZO und PZV am Beispiel ausgewählter Antennen für die Frequenzen L1 und L2. Je nach Methode zur Trennung der PZO- und PZV-Komponenten können abweichende Ergebnisse resultieren.

Antennentyp (IGS-Bezeichnung)	vertikale PZO L1 / L2 [mm]	horizontale PZO L1 / L2 [mm]	maximale PZV L1 / L2 [mm]
Choke-Ring-Antennen			
JAV_RINGANT_G3T	49 / 55	2 / 7	9 / 9
LEIAR25.R3	162 / 159	<1 / <1	5 / 9
TPSCR.G3	88 / 119	<1 / <1	16 / 8
Große Grundplatten			
ASH700228A	58 / 65	3 / 4	13 / 11
TRM41249.00	55 / 57	<1 / <1	7 / 7
Kleine Grundplatten (Rover-Antennen)			
LEIAX1203+GNSS	59 / 55	2 / 3	2 / 2
TRMR8 GNSS3	84 / 72	1 / 1	4 / 6

8. Bei welchen Arten der GNSS-Positionsbestimmung sind Antennenkorrekturen berücksichtigen und wie sind sie auszuwählen?

Solange die GNSS-Positionslösung primär auf den ungenaueren Code-Messungen basiert und somit nur Genauigkeiten auf dem Meterniveau erzielt werden können, ist eine Berücksichtigung von Antennenkorrekturen für die Trägerphasen nicht notwendig. Dies gilt auch, wenn die Trägerphasenmessungen unterstützend, z.B. zur Code-Glättung, verwendet werden.

Erzielt man durch weitere Verfeinerung der Code-Auswertung Genauigkeiten auf dem Dezimeter-Niveau dann sollten zumindest die vertikalen Komponenten der PZO Berücksichtigung finden.

Stützt sich die GNSS-Positionslösung primär auf die Trägerphasenmessungen und produziert Koordinatengenauigkeiten von wenigen cm und besser, so sind Antennenkorrekturen zwingend notwendig. Dies gilt für absolute Verfahren, wie z.B. das Precise Point Positioning (PPP), wie auch für alle Arten relativer Positionsbestimmung, wie z.B. RTK, Basislinien- oder Netzauswertung im Postprocessing.

Nach Herstellerangaben sind einige Rover-Antennen als rotationssymmetrisch anzusehen. Dies gilt zwar nicht im strengen Sinne, kann jedoch im Rahmen einer Positionsgenauigkeit von wenigen Zentimetern angenommen werden, so dass in diesen Fällen auf eine Ausrichtung der Antennen und damit auf die azimuthalen Korrekturen verzichtet werden kann.

Bei höheren Genauigkeitsvorstellungen werden vollständige Antennenkorrekturen und die korrekte Antennenausrichtung benötigt.

Zu beachten ist, dass immer alle beteiligten Antennen korrigiert werden müssen. Bei relativen Verfahren gilt dies für Referenzstations- und Roverantennen. Beim absoluten Verfahren PPP wird vorausgesetzt, dass die Orbit- und Satellitenuhrkorrekturen mit korrigierten Messungen erzeugt

worden sind.

Eine Ausnahme von diesen Grundregeln ist denkbar: wenn baugleiche Antennen bei der relativen Positionsbestimmung eingesetzt werden, dann können Antennenkorrekturen vernachlässigt werden. Die beteiligten Antennen müssen azimutmäßig gleich (nach Norden) ausgerichtet und der Stationsabstand nicht größer als 100 km sein. Da bei diesen Basislinien die Einstrahlrichtung des Satellitensignals bei beiden Antennen nahezu identisch ist, werden bei der relativen Positionsbestimmung mittlere antennentypspezifische Effekte eliminiert. Es wirken sich auf die Positionsbestimmung somit – auch beim vollständigen Verzicht auf die Anbringung von Korrekturwerten – lediglich die baulichen Unterschiede zwischen den Antennen aus.

Analog zu Korrektionsmodellen für Empfangsantennen spielt das Antennenmodell von GNSS-Satelliten bei der Positionsbestimmung eine signifikante Rolle. Werden sehr lange Basislinien (> 100 km) ausgewertet, muss darauf geachtet werden, dass auch die Korrekturen an die Satellitenantennen angebracht werden. Diese sind in den Dateien des IGS ebenfalls enthalten.

9. Wie werden GNSS-Antennen kalibriert?

Die heute verfügbaren Kalibrierverfahren lassen sich wie in Abbildung 3 dargestellt, zunächst in Feld- und Laborverfahren gliedern.

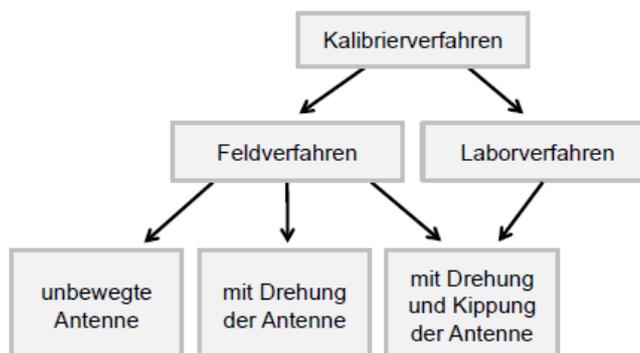


Abbildung 3: Kategorisierung der Kalibrierverfahren für GNSS-Antennen

Laborverfahren unterscheiden sich grundlegend von den Feldverfahren, da keine Satellitensignale benötigt werden, sondern ein im Labor erzeugtes Testsignal zur Bestimmung der richtungsabhängigen PZV genutzt wird. Dabei wird die Änderung der Einstrahlrichtung durch die Drehung und Kippung der zu kalibrierenden Antenne realisiert. Da dieses Verfahren nicht auf „echte“ Satellitensignale angewiesen ist, können Kalibrierungen auch für zukünftige Signalfrequenzen durchgeführt werden. Eine Kalibrierung von Antennen mit integriertem Empfänger ist nicht möglich, da diese Antennen im Allgemeinen keinen Ausgang für das empfangene Hochfrequenzsignal haben. Eine Referenzantenne ist bei diesem Verfahren nicht erforderlich, so dass die PZO und PZV als Absolutwerte erhalten werden.

Alle **Feldverfahren** werten die Trägerphasenmessungen relativ zu einer lokalen Referenzstation aus.

Beim **Feldverfahren mit horizontaler Drehung und Kippung** der („Roboter-Kalibrierung“) wird durch diese Bewegung der zu kalibrierenden Antenne ein vom Empfangsverhalten der Referenzantenne unabhängiges Kalibrierergebnis erzielt. Diese Unabhängigkeit von der Referenzantenne wird in der Literatur als „absolut“ bezeichnet.

Die **Feldkalibrierung mit Antennendrehung** ermöglicht durch schnelle Rotationen der Antenne neben der Verringerung der Kalibrierdauer auch die Reduktion von Mehrwegeeffekten. Hierbei wird ausgenutzt, dass Mehrwegeeffekte bei geringen Epochenabständen als nahezu konstant angesehen werden können, während sich der Einfluss von PZO und PZV aufgrund der Antennendrehung ändert. Die beiden Lageoffsets werden als Absolutwerte erhalten, alle anderen Korrekturen bezogen auf eine Referenzantenne.

Das **Feldverfahren mit unbewegter Antenne** ist heute nur noch von untergeordneter Bedeutung. Es werden Basislinienmessungen zwischen Referenz- und Testantenne durchgeführt, wobei sich der PZO aus der Differenz der ermittelten Koordinaten zu vorgegebenen Sollkoordinaten und die PZV aus den Residuen der Basislinienauswertung ergeben. Das Kalibrierergebnis bezieht sich stets auf eine Referenzantenne, für die absolute Kalibrierdaten zur Verfügung stehen müssen, um mit diesem relativen Kalibrierverfahren absolute Kalibrierdaten abzuleiten.

10. Wie genau sind Antennenkorrekturen?

Durch Ringversuche wurde nachgewiesen, dass die Feldverfahren „mit Drehung“ und „mit Drehung und Kippung“ sowie das Laborverfahren vergleichbare Kalibrierergebnisse liefern. Die Ergebnisse unterscheiden sich in der Regel um 1 bis 2 Millimeter (PZO + PZV bei L1 bzw. L2), wobei bei niedrigen Elevationen auch größere Abweichungen auftreten. Die Ursache der Differenzen zwischen den Ergebnissen der Kalibriereinrichtungen ist vor allem im jeweiligen Antennen-Nahfeld zu suchen.

Eine Bewertung der Antennenkorrekturen bezüglich ihrer Richtigkeit, also der Abweichungen zu einem wahren Wert, ist bei keinem Kalibrierverfahren möglich, da Sollwerte für Antennenkalibrierparameter nicht bestimmt werden können.

11. In welchem Format werden die Antennenkorrekturen bereitgestellt?

Als Austauschformat für Antennenkorrekturdaten hat sich das ANTEX-Format (Antenna Exchange Format – aktuelle Version 1.4) durchgesetzt. Eine ANTEX-Formatbeschreibung befindet sich auf der Homepage des IGS (International GNSS Service, <http://www.igs.org>). Dieses Format wird von allen kommerziellen und wissenschaftlichen Softwarepaketen akzeptiert.

In den Dateien (ASCII) werden zunächst in einem Informationsteil unter anderem der IGS-Antennenname, die Kalibriereinrichtung und Kalibriermethode, die Auflösung der kalibrierten Azimut- und Elevationswinkel, sowie die Anzahl der kalibrierten Frequenzen benannt.

Im eigentlichen Datenteil werden für jede kalibrierte Frequenz die PZO- und PCV-Werte in der Einheit Millimeter angegeben. Die unterschiedlichen Frequenzen werden hierbei durch entsprechende Abkürzungen bezeichnet (bspw. G01 entspricht GPS-L1, R01 entspricht GLONASS-L1). Nach der Frequenzbezeichnung folgt das PZO bezogen auf den Antennenreferenzpunkt. Die PCV-Werte werden dann zunächst azimutunabhängig (bezeichnet durch NOAZI) für jeden kalibrierten Elevationswinkel im Bereich von 0-90 Grad angegeben. Darauf folgen die azimutabhängigen PCV-Werte für jeden kalibrierten Azimutwinkel im Bereich von 0-360 Grad.

Parallel hierzu sind weitere Formate in Verwendung (z.B. NGS, ANT/Geo++), deren Bedeutung jedoch abnimmt. Bei der Umrechnung der Formate sind neben unterschiedlichen Einheiten (z.B. mm und m) auch unterschiedliche Vorzeichenkonventionen zu berücksichtigen.

12. Welche Quellen für Antennenkorrekturen gibt es?

Ist aufgrund der Genauigkeitsanforderungen bei einer GNSS-Anwendung eine individuelle Antennenkalibrierung nicht notwendig, sondern reichen Typkorrekturen aus, so kann auf international anerkannte Bezugsquellen für absolute Korrekturen von GNSS-Antennen (Satelliten und Empfangsantennen) kostenfrei zurückgegriffen werden.

Weltweit relevanter Verteiler ist hierbei der IGS, der eine Datenbank von Korrekturen für die GNSS Satelliten- und Empfangsantennen unter <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/> als ANTEX-Datei im Modell IGSYY.atx (aktuell igs14.atx) konsistent mit dem entsprechend gültigem Internationalen Referenzrahmen ITRFYY (aktuell ITRF14) regelmäßig veröffentlicht (siehe Tabelle 3). Der IGS-Datensatz besteht überwiegend aus vollständigen Korrekturdatensätzen von Roboterkalibrierungen und beinhaltet für Empfangsantennen nur Typmittel, insbesondere für ältere Antennen sind noch Korrekturdatensätze aus dem Feldverfahren mit unbewegter Antenne des NGS enthalten (nur elevationsabhängige PZV, relative Korrekturen), die auf ein absolutes Niveau transformiert wurden. Die Werte des IGS umfassen augenblicklich nur die L1- und L2-Frequenzen von GPS und GLONASS.

Eine weitere Bezugsquelle ist der National Geodetic Survey (NGS) der USA der Typkorrekturen aus eigenen Feldkalibrierungen unter <https://alt.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> zur Verfügung stellt. Der augenblickliche Name dieser ANTEX-Datei lautet ngs14.atx. NGS-Kalibrierungen beziehen sich nur auf GPS L1 und L2.

Im Europäischen Permanentnetz EPN und der dort veröffentlichten Datenbank EPNYY.atx sind zusätzlich zu den Typmitteln auch vereinzelt individuelle Feld- als auch Laborkalibrierungen veröffentlicht.

Für SAPOS®-Stationen liegen individuelle Korrekturen vor. Die Veröffentlichung der Korrekturwerte erfolgt individuell je Bundesland. Sie sind entweder auf Anfrage oder im Rahmen der OpenData-Initiative der Bundesregierung zur Verfügung gestellt. Teilweise müssen sie in Verbindung mit den bestellten SAPOS®-Daten gekauft werden.

Es gibt keine öffentliche Quelle für Antennentypkorrekturen, die durch Laborkalibrierungen gewonnen wurden und somit augenblicklich auch keine Quelle für Korrekturen, die für andere Frequenzen als GPS/GLONASS L1/L2 geeignet sind.

Parallel hierzu haben sich einige Hersteller ebenfalls dazu entschieden eine Zusammenstellung von Typmittelwerten kalibrierter Antennen frei im Internet zur Verfügung zu stellen.

Tabelle 3: Bezugsquellen für Korrekturen von Sende- und/oder Empfangsantennen.

Institution	Bezugsquelle	Nutzungsart
IGS	ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx	wissenschaftlich/kostenfrei
EPN	http://www.epncb.oma.be/ftp/station/general/	wissenschaftlich/kostenfrei
NGS	https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/	wissenschaftlich/kostenfrei
SAPOS®	Föderativ, landesspezifische Regelung	wissenschaftlich/wirtschaftlich
Hersteller		
Trimble	https://trimbletools.com/Antenna_Info	wirtschaftlich/kostenfrei
Geo++ GmbH	http://www.geopp.de/de/gnpscvdb/	wirtschaftlich/nicht kostenfrei

13. Welche GNSS-Antennenkalibriereinrichtungen gibt es in Deutschland?

Folgend ist eine Liste der bisher vom IGS anerkannten Kalibriereinrichtungen zusammengestellt, die sich derzeit alle in Deutschland befinden. Die Einrichtungen bieten unterschiedliche Leistungen an. Spezielle Anfragen sind mit den Einrichtungen individuell zu klären.

Laborverfahren:

- Antennenmesskammer Bonn, Kooperationseinrichtung:
 - Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
 - Bezirksregierung Köln, GEObasis.nrw

Feldverfahren mit Drehung und Kippung:

- Leibniz Universität Hannover, Institut für Erdmessung
- Geo++ GmbH, Garbsen
- Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung

Einige Stellen bieten einen kommerziellen Kalibrierdienst an, andere betreiben die Kalibriereinrichtung für Aufgaben im Bereich der deutschen Landesvermessung oder für wissenschaftliche Untersuchungen.

14. Welche Antennenbezeichnung müssen verwendet werden?

Eine Zusammenstellung von Antennenbezeichnungen, die sowohl von wissenschaftlichen Einrichtungen als auch Herstellern eindeutig verwendet werden, ist auf den Seiten des IGS zu finden und wird fortlaufend aktualisiert:

ftp://igs.org/pub/station/general/rcvr_ant.tab

Die Bezeichnungen korrespondieren mit den in den ANTEX-Dateien des IGS verwendeten Antennennamen und werden auch von kommerzieller Auswertesoftware zur konsistenten Datenverarbeitung verwendet.

Werden von den Antennenherstellern Änderungen an einer bestehenden Antennenkonstruktion vorgenommen (z.B. Austausch von Elektronikkomponenten, Material, Hardware-Filtern), wird die Antennentypbezeichnung häufig beibehalten, aber die Revisionsnummer geändert. In diesen Fällen liegt ein anderes Produkt mit veränderten Empfangseigenschaften vor, das die Verwendung eines neuen Korrekturdatensatzes erfordert. Die Angabe von vollständiger Typenbezeichnung inklusive Revisionsnummer ist daher unbedingt notwendig.

Einige Hersteller geben allerdings im Vergleich zu den international vereinbarten Konventionen keine eindeutigen Bezeichnungen an. In diesen wenigen Fällen ist die Dokumentation der einzelnen Produkte aufmerksam zu lesen oder der entsprechende Support anzusprechen.

15. Muss die Antenne neu kalibriert werden, wenn nachträglich ein Radom aufgesetzt wird?

Radome zur Abdeckung von Antennen gegen Witterungseinflüsse verändern die Empfangseigenschaften der Antenne. Eine Kalibrierung der Antenne zusammen mit Wetterschutzhauben und Radomen, bzw. die Verwendung eines existierenden Datensatzes für die jeweilige Kombination, ist daher zwingend notwendig.

Dies gilt analog auch für abnehmbare Grundplatten und sonstiges mit der Antenne fest verbundenes Zubehör.

16. Für welche GNSS-Signale sind Korrekturen erhältlich?

Antenneneigenschaften sind frequenzabhängig. Dies bedeutet, dass Empfangsantennen auf jeder Signalfrequenz separat zu kalibrieren sind (siehe Tabelle 4). Dies ist bei Laborkalibrierungen leicht möglich, da mit künstlichen Signalen gearbeitet wird.

Bei allen Feldkalibrierverfahren ist man jedoch auf Satellitensignale angewiesen, so dass Feldverfahren erst dann Kalibrierergebnisse zur Verfügung stellen können, sofern sie Teil des übertragenen GNSS-Signals sind und mit einer entsprechend guten Überdeckung von Satelliten an der sichtbaren Hemisphäre zur Verfügung stehen. Eine vollständige Satellitenkonstellation ist nicht notwendig und kann durch verlängerte Kalibrierdauer kompensiert werden.

Zusätzlich gilt: Senden mehrere GNSS auf identischen Frequenzen, können alle diese Signale bei der Kalibrierung zusammengefasst werden, um einen Korrektdatensatz für diese Frequenz zu erzeugen.

Tabelle 4: Frequenzen und Bezeichnungen aktueller GNSS-Signale.

Zentralfrequenz [MHz]	Satellitensystem						
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou-2	NavIC	QZSS	SBAS
1176.45	L5/G05		E5a/E05		L5/I05	L5/J05	L5/S05
1191.795			E5/E08				
1202.025		G3/R03					
1207.14			E5b/E07	B2/C07			
1227.60	L2/G02					L2/J02	
1246.00		G2/R02 (k=0)					
1268.52				B3/C06			
1278.75			E6/E06			LEX/J06	
1561.098				B1/C02			
1575.42	L1/G01		E1/E01			L1/J01	L1/S01
1602.00		G1/R01 (k=0)					
2492.028					S/I09		

Der IGS-Datensatz enthält derzeit für alle Empfangsantennen Korrekturen für die GPS-Frequenzen L1 und L2 (Bezeichnung im Datensatz G01 und G02). Für einen Teil der Antennen sind zusätzlich für die GLONASS-Frequenzen G1 und G2 (R01 und R02) Korrekturen verfügbar. Die Frequenzen von Galileo und BeiDou sowie GPS-L5 sind noch nicht enthalten, da einerseits aus Feldkalibrierungen bisher noch keine Datensätze für diese Frequenzen vorliegen und andererseits im IGS Vorbehalte hinsichtlich der Nutzung der Werte der Laborkalibrierung bestehen.

Die Verwendung von GPS-Korrekturen für Signale anderer GNSS mit exakt gleicher Frequenz wird als unproblematisch betrachtet. Dagegen kann die Verwendung von Korrekturen für benachbarte

Frequenzen nur als Näherungslösung betrachtet werden. Die Größe der daraus resultierenden Fehler ist stark vom Antennentyp abhängig. Zurzeit können noch keine allgemein gültigen Aussagen über den möglichen Genauigkeitsverlust getroffen werden.

Von der IGS Antenna Working Group wird zwar empfohlen, bei der Prozessierung von E1/E5 (Galileo) die GPS L1/L2 Werte zu verwenden, aber gleichzeitig darauf hingewiesen, dass es dadurch insbesondere bei der Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination zu Abweichungen kommt.

17. Sollten immer nur Antennenkorrekturen einer Institution verwendet werden?

Grundsätzlich wird empfohlen, immer einen konsistenten Satz von Antennenkorrekturen einer einzigen Quelle zur Auswertung zu verwenden. PZO- und PZV-Werte einer Antenne dürfen nicht aus verschiedenen Quellen gemischt, sondern immer nur zusammenhängend verwendet werden.

In Ausnahmefällen, die nur für den sachkundigen Nutzer zu empfehlen sind, können jedoch auch zusammenhängende PZO- und PZV-Werte aus anderen Quellen hinzugefügt werden, wenn beispielweise Werte für einzelne Antennen ergänzt werden müssen und sichergestellt werden kann, dass sie hinsichtlich des verwendeten Modells kompatibel sind.

18. Kann jede GNSS-Software Antennenkorrekturen verarbeiten?

Die Berücksichtigung von Antennenkorrekturen ist heute in fast allen geodätischen GNSS-Auswerteprogrammen möglich. Teilweise enthalten diese Programme bereits eine relativ umfangreiche Datenbank an Korrekturdaten für Sende- und Empfangsantennen. Hierbei handelt es sich meist um Typmittelkalibrierungen. Nähere Informationen sind durch die Handbücher dokumentiert

Bei den verwendeten Software-Paketen ist darauf zu achten, woher die Kalibrierdaten stammen und ob sie vollständigen Sätze aus elevations- und azimutabhängigen PZV oder nur Teile hiervon verwenden. Letzteres kann zu Irritationen in den Ergebnissen der Positionsbestimmung führen, wenn Resteffekte in den Messdaten verbleiben. Zusätzlich hierzu bieten ausgesuchte Software-Pakete die Nachführung der PZV/PZO-Werte im Rahmen von kinematischen Anwendungen an.

19. Muss ich meine Antenne individuell kalibrieren lassen?

Neben den bauarttypischen Charakteristika, treten immer auch antennenspezifische Variationen auf (Serienstreuung), die je nach Genauigkeitsanforderung die individuelle Kalibrierung von GNSS-Antennen notwendig machen können.

Eine bestmögliche Elimination der Antenneneinflüsse wird durch die Verwendung antennenspezifischer Korrekturen erreicht. Die hierzu erforderliche individuelle Kalibrierung von Antennen ist dann zu empfehlen, wenn hochgenaue Positionen angestrebt werden.

Baugleiche Antennen weisen im Allgemeinen vergleichbare Empfangscharakteristika auf, so dass durch die Verwendung von Antennentypkorrekturdaten bereits ein großer Teil der Antenneneinflüsse eliminiert werden kann. Die Verwendung von Antennentypkorrekturdaten wird folglich empfohlen, wenn eine individuelle Kalibrierung nicht möglich ist bzw. das geforderte Genauigkeitsniveau es erlaubt.

Inwieweit das Typmittel dann repräsentativ für eine individuelle Antenne ist, hängt stark vom verwendeten Antennentyp ab. Bei modernen Antennen sind Abweichungen von mehr als 3 mm (PZO und PZV) selten. Da sich insbesondere die PZO-Variationen bei der Anwendung unmittelbar als systematische Koordinatenverschiebungen in alle drei Raumrichtungen auswirken und vereinzelt auch größere Abweichungen auftreten, ist es ratsam, die Gültigkeit der Typkalibrierdaten für eine spezielle Antenne durch einfache Testmessungen (z.B. auf SAPOS®-Testfeldern) zu validieren, so dass sichergestellt ist, dass keine größeren Abweichungen aus der Verwendung des Typmittels resultieren.

Die Antennen des Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS® oder anderer Referenznetzbetreiber sind in aller Regel absolut und individuell kalibriert. Nutzer müssen lediglich die korrekte Bezeichnung ihrer Rover-Antenne nach der Namenskonvention des IGS eingeben, so dass bei der Auswertung auf die Typmittel zurückgegriffen werden kann. Hilfestellungen geben hierbei die Anbieter.

Im IGS-Netz werden auch weiterhin ausschließlich Typkalibrierungen verwendet, da eine Verbesserung durch die Nutzung der individuellen Werte aus Sicht der IGS Antenne Working Group (AWG) bisher nicht nachgewiesen wurde.

20. Sollte die Kalibrierung in bestimmten Zeitabständen wiederholt werden?

Nach heutigem Erkenntnisstand sind die PZV/PZO Korrekturen der GNSS-Antennen grundsätzlich zeitlich stabil. Die Stabilität fällt jedoch unterschiedlich aus. So wurde aus umfangreichen Zeitreihenanalysen (Wübbena et al. 2003) verifiziert, dass PZV/PZOs geodätischer Antennen ein stabileres Verhalten aufweisen als Korrekturen von Roverantennen.

Kalibrierungen sind definitiv zu wiederholen, sofern die Antenne in ihrem Aufbau grundsätzlich verändert wird (Umbau mit Groundplane etc.). Wiederholt werden sollte eine Antennenkalibrierung, wenn durch Sturz oder Reparatur der Antenne eine Veränderung zu erwarten wäre.

21. Was ist bei der Messung zu beachten, wenn Korrekturwerte angebracht werden sollen?

Um den Einfluss des PZOs sowie der PZV korrekt berücksichtigen zu können, müssen die Antennen während der Messung horizontalisiert und mit der Nordmarke (hilfsweise dem Antennenanschluss) nach Norden ausgerichtet sein.

Soll die Positionsbestimmung in Echtzeit erfolgen, so ist zu Beginn der Messung der im Empfänger gespeicherte richtige Antennentyp zu wählen. In diesem Fall werden automatisch durch den Empfänger azimutunabhängige Antennenkorrekturen angebracht.

Bei kinematischen Messung im Stop&Go Modus, wie bspw. RTK-Messungen, wird die Antenne zwar horizontalisiert, aber häufig auf eine Nordausrichtung der Antenne verzichtet. In diesem Fall können sinnvollerweise azimutabhängige Antennenkorrekturen wegen fehlenden Bezugs nicht angebracht werden. Azimutabhängige Antennenvariationen verbleiben als Messabweichungen in den GNSS-Beobachtungen und können zu Positionsabweichungen von einigen Millimetern führen. Generell weisen nach Aussagen der Hersteller Rover-Antennen sehr geringe Azimutvariationen auf, so dass die Orientierung der Antenne keine nennenswerten Einflüsse aufweist. Im Gegensatz dazu wären Verkippungen der Antenne gesondert zu berücksichtigen. Einzelne moderne RTK-Ausrüstungen sind

bereits mit entsprechender Sensorik zur Erfassung der Neigung ausgestattet.

Theoretisch kann statt der Ausrichtung der Antenne auch der Winkel zwischen Antennennord und der Nordrichtung eingeführt und zur rechnerischen Korrektur verwendet werden. Dieses Vorgehen wird jedoch von den meisten kommerziellen Auswerteprogrammen nicht unterstützt.

22. Was ist bei der Nutzung von SAPOS® bzgl. Antennenkorrekturen zu beachten?

Werden GPS-Beobachtungen oder Korrekturdaten von Dritten zur Verfügung gestellt (hier exemplarisch vom Satellitenpositionierungsdienst SAPOS®), so ist zu überprüfen, ob bereits Antenneneinflüsse korrigiert worden sind. In diesem Fall dürfen die Antennenkorrekturen nicht erneut angebracht werden.

Im Hinblick auf Antennenkorrekturen ist bei der Nutzung von SAPOS® grundsätzlich zwischen dem hochpräzisen Echtzeit Positionierungs-Service (HEPS) und dem geodätischen Postprocessing Positionierungs-Service (GPPS) zu unterscheiden.

Bei HEPS werden dem Nutzer Beobachtungen bzw. Beobachtungskorrekturen im RTCM-Format übertragen. Hierbei sind die gesendeten Beobachtungen bereits um Antenneneinflüsse korrigiert und beziehen sich auf den Antennenreferenzpunkt der VRS. Folglich muss im Rover als Referenzantenne eine fiktive Antenne mit dem Namen ‚Nullantenne‘ („GPPNULLANTENNA NONE“) angegeben werden (Schmitz et al. 2005), während für den Rover selbst der verwendete Antennentyp auszuwählen ist. Somit werden die Beobachtungen der VRS ohne Korrekturen verwendet und nur die Beobachtungen der Roverantenne korrigiert.

Bei GPPS, also der Nutzung von VRS-Daten im Postprocessing, werden unkorrigierte Beobachtungen im RINEX-Format bereitgestellt. Im Header der RINEX-Dateien ist gemäß den IGS-Standards der Antennentyp und die Seriennummer der Antenne der nächstgelegenen Referenzstation angegeben. Zusätzlich zu VRS-RINEX-Dateien werden durch SAPOS® daher auch Antennenkalibrierparameter aus individueller Kalibrierung der Referenzstationsantennen im ANTEX-Format zum Download bereitgestellt. Folglich sind im Postprocessing sowohl die Daten der eigenen Antenne, als auch die Beobachtungen der VRS, mit den jeweiligen Kalibrierwerten zu korrigieren.

Die unterschiedliche Herangehensweise bei der Verwendung von Antennenkorrekturen bei HEPS und GPPS ist bundesweit gültig. Nähere Informationen können den Produktinformationen von SAPOS® entnommen werden (www.sapos.de/files/SAPOS-Produktdefinition_2017.pdf).

Werden andere Dienste als das amtliche SAPOS® in Anspruch genommen, deren Services einem ständigen Wandel unterworfen sind, müssen analoge Informationen beim jeweiligen Anbieter erfragt werden.

23. Welche weiterführende Literatur gibt es?

Eine Beschreibung des Antennenmodells sowie generelle Ausführungen zur Antennenproblematik findet sich in Geiger (1998) und Campbell et al. (2004). Das Verfahren der relativen Kalibrierung ohne automatisierte Antennendrehung wird in Wanninger (2002) beschrieben. In Frevert et al. (2003) wird das relative Verfahren mit schneller Antennendrehung erläutert. Das Funktionsprinzip des absoluten Feldverfahrens ist in Menge (2003) und in Wübbena et al. (2000) dokumentiert. In Zeimetz (2010) wird das Laborverfahren beschrieben. In Görres (2010) werden die verschiedenen Kalibrierverfahren gegenübergestellt und auf stationsabhängige Effekte und die Nahfeldproblematik eingegangen. Ausführliche Untersuchungen zum Einfluss des Antennennahfelds auf die Positionsbestimmung und das Empfangsverhalten der GNSS-Antenne finden sich in Dilßner (2007) und Wanninger et al. (2006).

Validierung von Antennenkorrekturen verschiedener Verfahren sind bei Kallio et al. (2018) beschrieben. Untersuchungen zu Group Delay Variationen der Codemessung sind in bei Kersten (2014) dargelegt.

Breuer, B., Campbell, J., Görres, B., Hawig, J., Wohlleben, R. (1995): *Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen*. SPN, S. 49-59.

Campbell, J.; B. Görres; M. Siemes; J. Wirsch; M. Becker (2004): *Zur Genauigkeit der GPS-Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren*. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN, 1/2004, S. 2-11.

Dilßner, F. (2007): *Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung*. In: Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 271, 2007.

Frevert, V.; A. Nuckelt; D. Stöcker (2003): *Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS Antennen*. In: DGON-Symposium POSNAV 2003, Schriftenreihe des Geodätisches Instituts der TU Dresden, Heft 3, S. 353-359.

Geiger, A. (1988): *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*. In: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 43, Zürich, 1988.

Görres, B. (2010): *Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst?* In: Zeitschrift für Vermessungswesen zfv, 4/2010, S. 256-267.

Kallio, U., Koivula, H., Lahtinen, S., Nikkonen, V., Poutanen, M. (2018): *Validating and comparing GNSS antenna calibrations*, Journal of Geodesy, published online March 2018, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1134-2>

Kersten (2014): *Bestimmung von Codephasen-Variationen bei GNSS-Empfangsantennen und deren Einfluss auf die Positionierung, Navigation und Zeitübertragung*, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 740, ISSN 0065-5325 (identisch mit: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 315, ISSN 0174-1454) Link ISBN: 978-3-7696-5152-2

Menge, F. (2003): *Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 247, 2003.

Rothacher, M.; R. Schmid (2010): *ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4*. Quelle: <ftp://www.igs.org/pub/station/general/antex14.txt>.

Schmitz, M., Böttcher, G., Wübbena, G. (2005): *Konzept und Handhabung der NULLANTENNA in GNSS-Anwendungen*, Geo++@ White Paper, 15. Dezember 2005, Garbsen.

Schmolke, A., Wanninger, L., Frevert, V.: *Erste GNSS-Antennenkalibrierungen im Feldverfahren auf neuen Signalfrequenzen*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), Heft 5/2015, 140:283-289, DOI 10.12902/zfv-0083-2015

Wanninger, L. (2002): *Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung*. In: Zeitschrift für Vermessungswesen zfv, 1/2002, S.51-58.

Wanninger, L.; C. Rost; G. Hartlieb; M. Köhr (2006): *Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen*. In: Zeitschrift für Vermessungswesen zfv, 4/2006, S. 171-175.

Wübbena, G.; M. Schmitz; F. Menge; V. Böder; G. Seeber (2000): *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in real-Time*. In: Proceedings ION GPS 2000, Sep., Salt Lake City, USA.

Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher G. (2003): *Analyse umfangreicher Messreihen von GPS Antennen PCV aus absoluten Roboter-Feldkalibrierungen seit Januar 2000*, In: 5. GPS-Antennen Workshop, 3. November, Frankfurt/Main.

Zeimetz, P. (2010): *Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor*. Dissertation Universität Bonn, 2010.

Impressum

Herausgeber

DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V.

Geschäftsstelle

D-79235 Vogtsburg-Oberrotweil

Telefon: +49 7662/949287

Fax: +49 7662 / 949288

E-Mail: geschaeftsstelle@dvw.de