



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 682

Philipp Zeimet

**Zur Entwicklung und Bewertung
der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor**

München 2012

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5094-5

**Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn
ISSN 1864-1113, Nr. 21, Bonn 2011**



Zur Entwicklung und Bewertung
der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor

Inaugural-Dissertation zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität
zu Bonn

vorgelegt am 01.04.2010 von

Philipp Zeimetz

aus Euskirchen

München 2012

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5094-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn
ISSN 1864-1113, Nr. 21, Bonn 2011

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

Korreferenten: Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. James Campbell

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 20.05.2010

© 2012 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5094-5

Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor

Zusammenfassung

Bei der relativen Positionsbestimmung mit GNSS-Verfahren stellen die Antenneneinflüsse, die sich durch eine richtungsabhängige Empfangscharakteristik auszeichnen, einen der die Genauigkeit begrenzenden Faktoren dar. Durch die Kalibrierung der Antennen ist die Korrektur der Antenneneinflüsse möglich. Neben der Kalibrierung mit relativen und absoluten Feldverfahren besteht auch die Möglichkeit der absoluten Kalibrierung im Hochfrequenzlabor.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde, aufbauend auf bereits bekannten Methoden der Laborkalibrierung, eine vollständig automatisierte, zunächst mobile Kalibriereinrichtung entwickelt. In den Jahren 2008 und 2009 folgte der Aufbau eines speziell für die Kalibrierung von GNSS-Antennen konzipierten Messlabors. Neben der Bewertung des Kalibrierverfahrens sind Untersuchungen zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der Antennenphasenvariationen sowie zur Bestimmung der richtungsabhängigen Sensitivität von GNSS-Antennen Gegenstand dieser Arbeit.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der Bewertung des Laborverfahrens und der Validierung der Kalibrierergebnisse. Hierzu werden die Einflüsse verschiedener Komponenten des Kalibriersetups auf die Bestimmung der richtungsabhängigen Variationen analysiert. Dabei zeigt sich, dass eine innere Genauigkeit erreicht wird, welche die zuvor abgeleiteten Kalibrieranforderungen erfüllt und dass die äußere Genauigkeit des Laborverfahrens insbesondere durch Nahfeldeinflüsse begrenzt wird. Während die Wiederholgenauigkeit mit einer Standardabweichung von $\approx 0.1\text{mm}$ angegeben werden kann, muss bei der Quantifizierung der Richtigkeit berücksichtigt werden, dass insbesondere systematische Messungsunsicherheiten das Ergebnis beeinflussen und die Ergebnisse zudem vom Antennentyp abhängig sind.

Zur Validierung der mit dem Laborverfahren erzielten Kalibrierergebnisse werden zum einen Vergleiche mit unabhängigen Feldverfahren herangezogen. Zum anderen erfolgt die Validierung durch die Anwendung der Kalibrierergebnisse bei der Auswertung von GNSS-Messungen. Die dabei erreichte Genauigkeit der ermittelten Höhendifferenzen kann mit einer Standardabweichung von $\approx 1\text{mm}$ beschrieben werden. Diese Messungen bestätigen somit die hohe Kalibriergenauigkeit.

Die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse wird jedoch durch Nahfeldeffekte eingeschränkt. Allerdings sind Nahfeldeffekte kein spezielles Problem der Antennenkalibrierung. Sie treten stattdessen immer bei der Abstrahlung und dem Empfang elektromagnetischer Wellen auf. Dementsprechend ist eine optimale Kalibrierung ohne die Berücksichtigung der konkreten Messbedingungen nicht möglich. Allerdings ist in der Praxis, insbesondere bei Antennen, die für unterschiedliche Anwendungen in unterschiedlichen Nahfeldsituationen eingesetzt werden, eine vollständige Berücksichtigung der Nahfeldeffekte häufig nicht möglich. Umso wichtiger sind Untersuchungen, die die Effekte aufzeigen und infolgedessen zur richtigen Beurteilung dieser Effekte beitragen. Hierzu ist das Laborverfahren aufgrund der hohen Wiederholgenauigkeit und der kurzen Kalibrierzeiten geeignet.

On further improvements and the validation of the absolute GNSS-antenna calibration in HF-laboratories

Abstract

In relative GNSS positioning, the antenna effects are among the most important accuracy limiting factors. In order to eliminate these effects it is possible to calibrate the antennas using relative or absolute field procedures or an absolute method, which can be ideally performed in a high-frequency laboratory.

Within the scope of this thesis a fully automatic calibration facility has been implemented, using well known standard techniques for a first realisation. In addition, a new antenna calibration lab especived for the antenna calibration of GNSS-antennas was designed and built in 2008 and 2009. These developments were the basis for further investigations such as the validation of the calibration procedure, the analysis of the frequency dependence of the antenna pattern and the determination of the GNSS-antenna-gain.

The main focus of this thesis is the validation of the laboratory calibration method. In a first step, the effect of different components of the setup on the calibration results was analysed. Based on these investigations it became obvious that there are considerable systematic effects, whereas random deviations could be neglected. As a consequence, excellent repeatability of the phase center variations ($\approx 0.1mm$ standard deviation for L1, L2) is a typical characteristic of the laboratory method, while the correctness of the results is limited by the systematic effects. Here, the near-field effects produced the largest deviations. The total accuracy of the calibration method depends on the antenna type and is less than one millimetre (L1 and L2).

For the validation of the calibration results two different ways were used. The first one is based on the comparison between the laboratory method and independent field procedures. A second way is to validate the calibration results by GPS-measurements at GPS test sites. Especially the field tests confirm that the near-field effects limit the calibration accuracy.

The near-field effects are not a special problem of antenna calibration only. These effects always occur when transmitting or receiving electromagnetic signals. In case of GPS the effects become obvious when changing the near-field conditions. Thus, for an „ideal“ calibration the measurement conditions have to be considered by calibrating the antenna with mounted near-field components (e.g. tribrach, radome). In practical realisation this approach often fails because the antennas are often used in different environments. Besides, a positive effect can only be expected if all involved antennas (at least two) are calibrated together with the relevant near-field components. Therefore, experiments showing the effect of the near-field on the behaviour of GNSS-antennas are necessary to evaluate the robustness of the final results. Because of the excellent repeatability and the short calibration time of less than one hour, the laboratory method is ideally suited for such experiments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Antenneneigenschaften	3
3	GNSS: Aspekte der Entfernungsmessung	7
3.1	Grundlagen zur Entfernungsmessung	7
3.2	Abschätzung der Kalibrieranforderungen auf Basis der GNSS-Genauigkeit	8
3.3	Einfluss von Troposphäre und Ionosphäre auf die Entfernungsmessung	13
3.4	Einfluss der Kalibrierunsicherheiten auf die 3D-Position	14
4	Relevanz der Antennenproblematik für GNSS-Anwendungen	16
4.1	Höhenbestimmung mit GPS auf kurzen Basislinien	16
4.2	Auswirkung eines Antennenwechsels in regionalen und globalen Netzen	17
5	Kalibrierverfahren	19
5.1	Kategorisierung der Kalibrierverfahren	19
5.2	Relative Feldkalibrierung	20
5.3	Absolute Feldkalibrierung	21
6	Absolute GNSS-Antennenkalibrierung im Hochfrequenzlabor	25
6.1	Grundprinzip und Kalibriersetup der Laborkalibrierung	25
6.2	Antennenmesskammer Bonn	27
6.3	Messablauf	29
6.4	Bestimmung der Modellparameter (PCO und PCV)	31
6.5	Kernaufgaben dieser Arbeit	34
7	Elektrodynamische Aspekte für die GNSS-Antennenkalibrierung	36
7.1	Das elektromagnetische Feld	36
7.2	Wellenablösung am Beispiel eines Halbwellen-Dipols	37
7.3	Polarisation elektromagnetischer Wellen	39
7.4	Die Helixantenne	41
7.5	Reflexion und Absorption elektromagnetischer Wellen	44
7.6	Funktionsweise von Pyramidenabsorbern	46

8	Analyse der Kalibrierunsicherheiten anhand spezieller Testmessungen	48
8.1	Beschreibung des generellen Vorgehens	48
8.2	Temperatureinfluss auf die Phasenmessung	49
8.3	Einfluss der Signalstärke auf die Phasenmessung	54
8.4	Das stochastische Modell des Kalibriersetups	57
8.4.1	Analyse des Phasenmessrauschens des Netzwerkanalysators	58
8.4.2	Einfluss der Kabel auf die Phasenmessgenauigkeit	59
8.4.3	Analyse der Phasenmessgenauigkeit des gesamten Systems	61
8.5	Einfluss der Positioniergenauigkeit des Drehstandes auf die Kalibrierung	64
8.5.1	Genauigkeit der Positionierung	64
8.5.2	Auswirkung der relativen Positioniergenauigkeit auf die ermittelte Phasenlage	66
8.5.3	Auswirkung der absoluten Positioniergenauigkeit auf die ermittelte Phasenlage	68
8.6	Einfluss der Kabelbewegung auf die Phasenmessung	71
8.7	Untersuchungen zur Richtigkeit der Phasenmessung	73
8.7.1	Bestimmung der Richtigkeit der Phasenmessung durch Rotation der Antenne	73
8.7.2	Bestimmung der Richtigkeit der Phasenmessung durch Änderung der Messentfernung	77
9	Einfluss verbleibender Systematiken auf das Kalibrierergebnis	80
9.1	Wiederholgenauigkeit des Kalibrierverfahrens	80
9.2	Kriterien zur Beurteilung systematischer Kalibrierunsicherheiten	82
9.2.1	Klassifizierte maximale Abweichungen zur Bewertung von Kalibrierdifferenzen	82
9.2.2	Einfluss des Phasenpatterns auf die Positionsgenauigkeit	83
9.3	Einfluss der Sendeantenne auf das Kalibrierergebnis	85
9.4	Einfluss des Messabstands auf das Kalibrierergebnis	87
9.4.1	Begriffsdefinitionen: Fernfeld	88
9.4.2	Theoretische Ableitung der minimalen Messdistanz	88
9.4.3	Empirische Tests zum Einfluss kurzer Messstrecken auf die Antennenkalibrierung	89
9.5	Vorläufiges Ergebnis der Analyse des Budgets der Messungsunsicherheiten	91
10	Nahfeldeffekte	92
10.1	Schwierigkeit bei der Lösung der Nahfeldproblematik	92
10.2	Kalibrierungen zur Untersuchung des Nahfeldeinflusses	93

11 Validierung der Kalibrierergebnisse	99
11.1 Vergleich verschiedener Kalibrierverfahren - Ringversuch 2009	99
11.2 Anwendung der Kalibrierergebnisse bei der präzisen Höhenbestimmung	105
12 Weitere Anwendungsbereiche des Laborverfahrens	113
12.1 Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit des Phasenpatterns	113
12.2 Erfassung der richtungsabhängigen Sensitivität von GNSS-Antennen	118
13 Schlussfolgerungen und Ausblick	121
A Zum Vergleich zweier Kalibrierergebnisse	123
Abbildungsverzeichnis	124
Tabellenverzeichnis	128
Literaturverzeichnis	129

1 Einleitung

Nach traditioneller Definition beschäftigt sich die Geodäsie mit der Vermessung und Abbildung der Erdoberfläche. Bereits diese Sichtweise lässt den hohen Stellenwert der Koordinierung von Objekten erkennen. Nach heutigem Verständnis umfasst die Geodäsie ein weitaus breiteres Aufgabenspektrum. Gleichwohl ist die zentrale Rolle der Koordinatenbestimmung geblieben.

Seit den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde die Koordinatenbestimmung durch das US-amerikanische NAVSTAR GPS (NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System) revolutioniert. Das System basiert auf einer hochgenauen Streckenmessung zwischen einem Empfängersystem und mindestens vier Satelliten, wobei sich die Position des Empfängers als Schnittpunkt der gemessenen Strecken ergibt (z.B. LEICK 1995). Die so ermittelte Position wird durch eine 3D-Koordinate beschrieben und ist somit ein Punkt im mathematischen Sinne. Bei relativen GPS-Positionierungsverfahren, bei denen durch simultane Beobachtungen von identischen Satelliten Koordinatenunterschiede zwischen zwei Positionen bestimmt werden, ist das Ergebnis der Messung ein Raumvektor, der die Lage beider Punkte zueinander beschreibt. Aus den Empfangseigenschaften von GPS-Antennen folgen in diesem Zusammenhang zwei wesentliche Probleme der Positionsbestimmung mit GPS.

Die im Empfänger zur Streckenbestimmung gemessene Phasenlage bezieht sich zunächst auf ein elektrisches Phasenzentrum, dessen Lage bezogen auf einen definierten und mechanisch realisierten Antennenreferenzpunkt (ARP) nicht exakt bekannt ist. Der ARP entspricht in der Regel dem Durchstoßpunkt der Symmetrieachse der Antenne (Stehachse) durch die Ebene, die durch die Antennenunterseite des Antennenkörpers definiert ist. Die räumliche Abweichung des elektrischen Phasenzentrums vom ARP, der auch den Höhenbezugspunkt der Antenne definiert, wird als Phasenzentrumsoffset (PCO) bezeichnet und erreicht bei geodätischen Antennen Größenordnungen bis zu 15 Zentimetern (s.a. GEIGER 1988).

Zudem sind die Empfangseigenschaften von GPS-Antennen richtungsabhängig. Daraus resultiert unter anderem, dass das Phasenzentrum einer GPS-Antenne für verschiedene Einstrahlrichtungen variiert und nicht als punktförmig angesehen werden kann. Die Streckenmessung zu einem Satelliten ist somit von der Einstrahlrichtung des Signals bzw. der Position des Satelliten abhängig. Um die Antenne dennoch als punktförmigen Positionssensor betrachten zu können, wird ein mittleres elektrisches Phasenzentrum eingeführt. Die Abweichungen zu diesem Phasenzentrum werden durch die sogenannten Phasenzentrumsvariationen (PCV) beschrieben. Die PCV haben bei den in der Geodäsie typischerweise verwendeten Antennen eine Größenordnung von wenigen Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern (z.B. SCHUPLER et al. 1994).

Beide Probleme, die Herstellung des geometrischen Bezuges zwischen Phasenzentrum und ARP sowie die Erfassung der Richtungsabhängigkeit, also die Bestimmung von PCO und PCV, sind Aufgabe der Antennenkalibrierung. Erst durch die Berücksichtigung der Antennenkorrekturdaten beziehen sich alle Entfernungsmessungen auf ein gemeinsames mittleres Phasenzentrum, dessen Lage bezogen auf den ARP bekannt ist. Aufgrund der Größenordnung der Effekte gehören die Antenneneinflüsse bei der hochpräzisen Positionsbestimmung mit satellitengestützten Verfahren zusammen mit den Mehrwege-, Nahfeld- und Troposphäreninflüssen zu den genauigkeitsbeschränkenden Faktoren (s. WÜBBENA et al. 1996).

In dieser Arbeit wird zunächst die Antennenproblematik ausführlicher erläutert. Dabei wird insbesondere auf die Auswirkung der Empfangscharakteristik auf die Streckenmessung sowie die Positionsbestimmung eingegangen. Weiterhin werden Lösungsansätze zur Kalibrierung von Antennen skizziert und der Stand der Forschung dargelegt. Das am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn verwendete und im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Laborverfahren zur absoluten Antennenkalibrierung

wird anschließend ausführlich präsentiert. Schwerpunkte dieser Arbeit sind die Beurteilung der bei der Kalibrierung auftretenden Messungsunsicherheiten und die Validierung der Kalibrierergebnisse für den Einsatz bei realen GPS-Positionsbestimmungen. Weiterhin werden Untersuchungen zur Nahfeldproblematik, zur richtungsabhängigen Sensitivität der Antennen und zur Frequenzabhängigkeit des Antennenpatterns vorgestellt.

Neben dem NAVSTAR GPS existiert mit GLONASS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema) ein weiteres globales Positionierungssystem, welches von der Russischen Föderation betrieben wird. Zudem werden zur Zeit ein europäisches (Galileo) und ein chinesisches System (Compass) entwickelt und aufgebaut. Die verschiedenen globalen Positionierungssysteme werden heute unter dem Begriff „globale satellitengestützte Navigationssysteme“ (GNSS - Global Navigation Satellite System) zusammengefasst. Die Antennenproblematik sowie deren Lösungsansätze sind für alle Systeme nahezu identisch. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird daher der übergeordnete Begriff GNSS verwendet. Die Ergebnisse gelten für alle genannten Systeme, wenn nicht explizit auf Unterschiede hingewiesen wird.

2 Antenneneigenschaften

Für die Bestimmung von absoluten Koordinaten bzw. Koordinatenunterschieden mit GNSS-Verfahren werden stets die Satellitensignale von mindestens vier Satelliten benötigt. Die bei der hochpräzisen relativen Positionsbestimmung aus Phasenmessungen abgeleiteten Streckeninformationen (siehe Kapitel 3) würden sich bei „idealen“ Antennen auf ein elektrisches Phasenzentrum E_0 (engl. electrical phase center) beziehen, dessen Position ortsfest und für alle Satelliten identisch wäre. Das Ergebnis der Positionsbestimmung würde sich im Falle solcher Antennen auf dieses Phasenzentrum beziehen. Für die Übertragung der gemessenen Position vom Phasenzentrum auf ein Messobjekt, beispielsweise einen Messpfiler, müsste nur der Bezug zwischen dem Phasenzentrum E_0 und dem Antennenreferenzpunkt ARP hergestellt werden. Letzterer wird meist als Ursprung eines antennenfesten Bezugssystems mit der z-Achse als Symmetrieachse des Antennenkörpers nach oben, der x-Achse in Richtung der Nordmarkierung und der y-Achse Richtung Antennen-Ost definiert (CAMPBELL et al. 2004). Die noch freie Translation in z-Richtung wird in der Regel durch die Auflagefläche der Antennenunterseite (entspricht meist der Unterseite des Antennengewindes) festgelegt.

Der Vektor, der den räumlichen Bezug zwischen dem ARP und dem elektr. Phasenzentrum E_0 beschreibt, wird als Phasenzentrumsoffset PCO (engl. phase center offset) bezeichnet. In Abbildung 2.1 ist dieser Zusammenhang für eine „ideale“ Antenne dargestellt¹. Das dargestellte Modell gilt theoretisch für alle Antennentypen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei stark gerichteten Antennen (z.B. Hornstrahler, s. WOHLLEBEN 1968) eine messtechnische Erfassung der Phasenvariationen außerhalb der Hauptstrahlungsrichtung nur eingeschränkt möglich ist. Da GNSS-Antennen einen omnidirektionalen Empfang ermöglichen, ist diese Einschränkung hier ohne Relevanz.

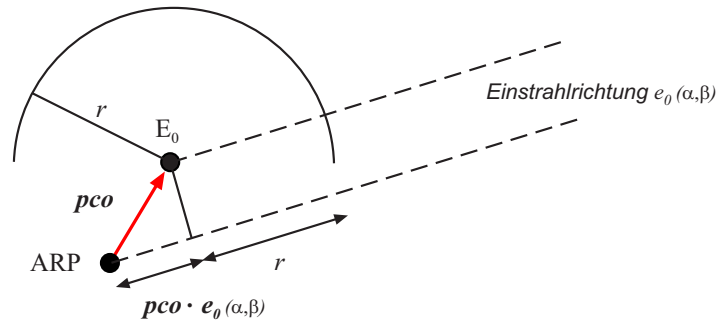


Abb. 2.1: Antennenmodell für den Fall einer idealen Antenne (nach CAMPBELL et al. 2004).

In dem dargestellten Modell beschreibt e_0 als Einheitsvektor die Einstrahlrichtung des Satellitensignals in Abhängigkeit von Azimut α und Elevation β . Der Kreis veranschaulicht die Richtungsunabhängigkeit des Phasenzentrums E_0 , wobei der Radius r als die gemessene Phasenlage angesehen werden kann. Eine gemessene Phase kann bei bekanntem PCO durch einen richtungsabhängigen Term unmittelbar auf den ARP bezogen werden:

$$r_{ARP} = r + \mathbf{pco} \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) \quad . \quad (2.1)$$

¹ Die Abkürzung PCO wird üblicherweise in Großbuchstaben geschrieben, weshalb diese Schreibweise auch in dieser Arbeit verwendet wird. In Formeln und Abbildungen wird jedoch zur besseren Unterscheidung von Vektoren und Matrizen an der üblichen Kleinschreibung (fett) von Vektoren festgehalten.

Eine Voraussetzung für die Existenz einer solchen Richtungsunabhängigkeit ist ein kugelsymmetrisches elektromagnetisches Feld der Antenne. Die auf dem Antennenelement durch Wechselwirkungen mit dem elektromagnetischen Feld des Senders induzierte Spannung, die als Messsignal über eine Koaxialverbindung an den GNSS-Empfänger geleitet wird, ist im Falle idealer Antennen phasengleich für alle Einstrahlrichtungen.

Im Falle realer Antennen liegt kein kugelsymmetrisches Feld vor. Entsprechend der räumlichen Variationen innerhalb dieses Feldes variiert auch die resultierende Phasenlage des induzierten elektrischen Signals für verschiedene Einstrahlrichtungen. Bezogen auf ein mittleres ortsfestes Phasenzentrum E lässt sich das beschriebene Empfangsverhalten durch richtungsabhängige Phasenzentrumsvariationen (PCV) beschreiben. Die Zusammenhänge von ARP, PCO und PCV sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

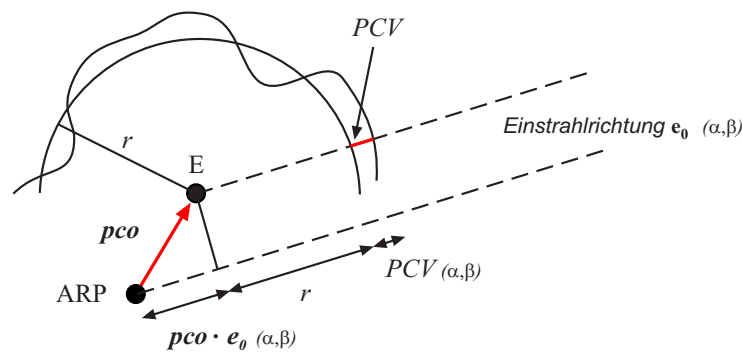


Abb. 2.2: Antennenmodell für den Fall einer realen Antenne (nach CAMPBELL et al. 2004).

In der Grafik sind die PCV aus Anschauungsgründen in einem konstanten Abstand r , der als unbeeinflusste Phasenlage angesehen werden kann, vom mittleren Phasenzentrum aufgetragen. Die auf den ARP bezogene Phasenverschiebung r_{ARP} lässt sich durch Gleichung 2.2 vollständig beschreiben. Ähnliche Modell finden sich bereits in den frühen Arbeiten zu diesem Thema (z.B. GEIGER 1988):

$$r_{ARP} = r + \mathbf{pco} \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV(\alpha, \beta) \quad (2.2)$$

Die PCV werden üblicherweise in einem Elevation-Azimut-Raster (meist 5° Schrittweite) unter Verwendung einer metrischen Einheit angegeben. Die Wahl einer metrischen Einheit dient der Anschauung, führt aber dazu, dass für eine Korrektur der gemessenen GNSS-Phasenmessungen in ein Winkelmaß zurückgerechnet werden muss.

In den Abbildungen 2.3 bis 2.5 sind zur exemplarischen Darstellung von Größe und Form der Phasenzentrumsvariationen drei Beispiele angegeben. Zu beachten ist hier, dass eine Trennung von PCO und PCV nicht möglich ist. Zu jedem beliebig wählbaren Phasenzentrum existieren Phasenzentrumsvariationen, die eine korrekte Beschreibung des Empfangsverhaltens ermöglichen. Die hier dargestellten PCV beziehen sich auf einen PCO, der eine Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate zur Folge hat. Das Vorgehen wird in Abschnitt 6.4 erläutert.

In den Abbildungen sind jeweils links die PCV und rechts die zugehörigen Antennen dargestellt. Am äußeren Rand der Figur befinden sich die Werte für 0° Elevation, während der Korrekturwert für die Zenitrichtung in der Figurenmitte dargestellt ist. Die azimuthale Zuordnung ist über die eingefügten Gradzahlen gegeben.

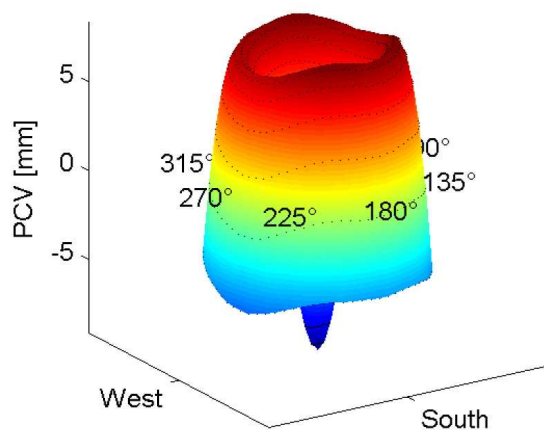


Abb. 2.3: PCV und Foto einer Leica AT504 Choke-Ring-Antenne.

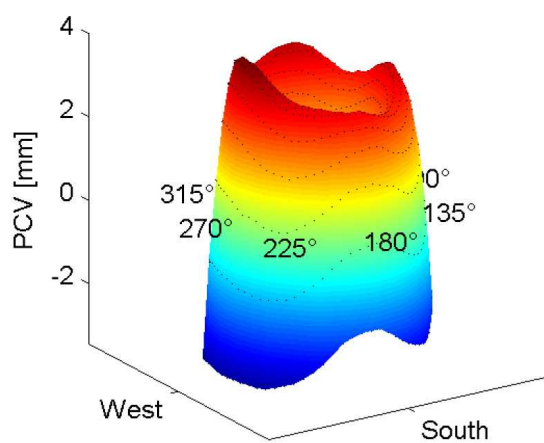


Abb. 2.4: PCV und Foto einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne.

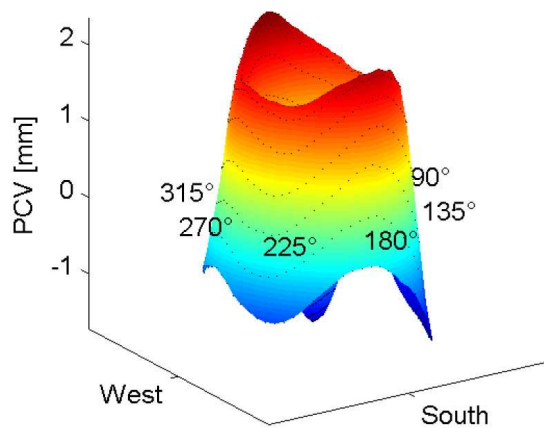


Abb. 2.5: PCV und Foto einer Leica AX1202GG Antenne.

Die Größenordnung der PCV kann an der Hochachse abgelesen werden. Da die Größenordnung der PCV stark vom Antennentyp abhängig ist, sind die Hochachsen unterschiedlich skaliert. Der Farbverlauf korrespondiert mit den PCV-Werten, ist aber hier aufgrund der fehlenden Farb-Werte-Zuordnung informationsfrei. Die Unterscheidung zwischen Vorder- und Rückseite der PCV-Figur wird jedoch durch diesen Verlauf erleichtert.

Alle Antennen zeigen ein für geodätische Antennen typisches Bild. Die elevationsabhängigen Variationen sind vergleichsweise groß, die azimuthalen Variationen hingegen klein. Größenordnung und Form der PCV stellen kein Qualitätskriterium dar. Wichtiger ist, dass die PCV möglichst unabhängig von äußeren Einflüssen sind, so dass sich z.B. Nahfeldeffekte nur geringfügig auswirken. Hierauf wird in Kapitel 10 näher eingegangen. Im Folgenden werden zunächst einige Aspekte der Entfernungsmessung zwischen Satellit und Empfängerantenne behandelt. Aus der Entfernungsmessgenauigkeit wird zudem die geforderte Kalibrierengenauigkeit abgeleitet.

3 GNSS: Aspekte der Entfernungsmessung

Eine vollständige Beschreibung der Grundprinzipien der Positionsbestimmung mit GNSS erfolgt an dieser Stelle nicht. Diese Grundlagen werden bereits in zahlreichen Lehrbüchern ausführlich dargestellt (z.B. SEEGER 2003, LEICK 1995, HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001). Da sich die Antenneneinflüsse unmittelbar auf die Entfernungsmessung auswirken und somit auch deren Genauigkeit beeinflussen, werden in diesem Kapitel ausschließlich Aspekte der Entfernungsmessung behandelt. In diesem Zusammenhang wird auch die geforderte Kalibrierengenauigkeit aus der Entfernungsmessengenauigkeit hergeleitet (Abschnitt 3.2). Dabei entspricht hier die Kalibrierengenauigkeit der Genauigkeit mit der die Lage des richtungsabhängigen Phasenzentrums relativ zu einem definierten ARP bestimmt werden kann. Das entsprechende Antennenmodell ist durch Gleichung 2.2 beschrieben. Auf dieses Modell wird in Kapitel 6 erneut eingegangen.

3.1 Grundlagen zur Entfernungsmessung

Bei der Entfernungsmessung kommen bei den in der Einleitung genannten GNSS-Systemen zwei Verfahren, die Code- und die Phasenmessung, zum Einsatz. Die Satelliten senden kontinuierlich codierte Signale aus, wobei je nach Verfahren entweder der auf den Träger aufmodellerte Code oder die Phasenlage des Trägersignals zur Ableitung der Entfernung verwendet wird. In Tabelle 3.1 sind die Code- bzw. Trägerwellenlängen des GPS-Systems dargestellt (beschränkt auf die 2009 nutzbaren Signale).

Parameter	C/A-Code	Y(P)-Code	L1-Träger	L2-Träger
Frequenz	1.023 Mbps	10.23 Mbps	1.575.42 MHz	1227.6 MHz
(Chip/Wellen) Länge	293.05m	29.305 m	0.1905 m	0.2445 m
Genauigkeit (1σ)	$\approx 3m$	$\approx 0.3m$	$\approx 1.9mm$	$\approx 2.4 mm$

Tab. 3.1: GPS: Codesignale und Trägerwellen (Auszug aus EISSFELLER 1997).

Bei der Codemessung wird das Satellitensignal mit receiverinternen Referenzsignalen verglichen. Aus der ermittelten Codeverschiebung kann auf die Laufzeit und über die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf die Entfernung geschlossen werden, wobei die Messung u.a. durch Atmosphäreneinflüsse sowie Satelliten- und Receiveruhrenabweichungen beeinflusst ist. Zudem ist das Messergebnis zunächst nicht eindeutig, da die Entfernungen zu den Satelliten länger als die verwendeten Code-Perioden sind, so dass die ganzzahlige Anzahl von Codezyklen gesondert ermittelt werden muss (s. HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001). Bei der Phasenmessung, die vor allem bei präzisen relativen GNSS-Messungen verwendet wird, erschwert sich aufgrund der im Vergleich zur Codelänge kurzen Trägerwellenlänge die Lösung der Mehrdeutigkeiten. Ein Überblick über verschiedene Methoden zur Mehrdeutigkeitslösung wird z.B. in KIM u. LANGLEY 2000 gegeben.

Die Phasenverschiebung zweier Signale ist bei guter Signalqualität (gutes Signal-Rausch-Verhältnis) und bei statischen Signalen mit einer Genauigkeit von $\sigma \approx 10^{-5}$ der Wellenlänge möglich (siehe z.B. JOECKEL u. STÖBER 1999). Bei GNSS-Messungen ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, signal-to-noise ratio) wegen des Signalweges durch die Atmosphäre stark abgeschwächt. Zudem ändert sich der Abstand zwischen Empfänger und Satellit permanent, so dass kein statisches Signal vorliegt. Eine Genauigkeit von $\sigma \approx 10^{-5}$ der Wellenlänge ist somit im Falle von GNSS nicht erreichbar. Zur Abschätzung der Phasenmessengenauigkeit kann stattdessen von ca. 1% der Wellenlänge ausgegangen werden (EISSFELLER 1997).

Dieser Abschätzung folgend resultieren für die Codemessung Genauigkeiten von etwa $\sigma = 0.3m$ bis $\sigma = 3m$. Aufgrund der in Kapitel 2 genannten Größenordnung der Antenneneinflüsse kann bereits festgehalten werden,

dass die PCV bei der Codemessung vernachlässigt werden können. Da hingegen eine Vernachlässigung des PCOs zu einer rein systematischen Punktverschiebung führt, und der PCO bei einigen Antennentypen sehr groß ist, kann die Berücksichtigung des PCOs auch bei Codemessungen erforderlich sein.

Für die Phasenmessgenauigkeit resultieren bei gleichem Ansatz $\sigma_{L1} = 1.9\text{mm}$ bzw. $\sigma_{L2} = 2.4\text{mm}$. Diese Werte stellen grobe Anhaltswerte dar. Dennoch wird aufgrund der Größenordnung der Antenneneinflüsse die Notwendigkeit der Berücksichtigung von PCO und PCV deutlich. Im Folgenden wird die Phasenmessgenauigkeit moderner Empfänger detaillierter betrachtet und die geforderte Kalibrierengenauigkeit abgeleitet.

3.2 Abschätzung der Kalibrieranforderungen auf Basis der GNSS-Genauigkeit

Soll die bei einer GNSS-Messung ermittelte Phasenlage r auf den Antennenreferenzpunkt (ARP) bezogen werden, so müssen die Einflüsse von PCO und PCV berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2, Gleichung 2.2):

$$r_{ARP} = r + \mathbf{pco} \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV(\alpha, \beta) . \quad (3.1)$$

Die Kalibrierengenauigkeit σ_K setzt sich dann aus zwei Anteilen $\sigma_{\mathbf{pco}}$ und σ_{PCV} zusammen. Da die Lage des PCOs beliebig festgelegt werden kann (vgl. Kapitel 2), ist der PCO als varianzfrei anzunehmen ($\sigma_{\mathbf{pco}} = 0$). Stattdessen ist die Lage des Antennenreferenzpunktes (ARP) bezüglich des Rotationspunktes (POR) der Antennendreheinrichtung zu bestimmen (vgl. Abschnitt 6.4). Kann dieser Raumvektor $\mathbf{a}$ mit einer Genauigkeit $\sigma_{\mathbf{a}}$ bestimmt werden, so setzt sich die Kalibrierunsicherheit aus $\sigma_{\mathbf{a}}$ und der Genauigkeit der Phasenmessung der Kalibriereinrichtung (hier definiert als σ_{PCV}) zusammen (Gleichung 3.2). Unter σ_{PCV} sind dabei zahlreiche Störeinflüsse, die in den Kapiteln 6, 8 und 9 diskutiert werden, zusammengefasst. Die Gleichung ist in dieser Form vollständig, wenn $\mathbf{e}_0$ als varianzfrei angenommen wird (z.B. weil die Einstellung mit dem Drehstand sehr genau ist) oder wenn die Auswirkung der Richtungsunsicherheit durch eine Phasenmessabweichung ausgedrückt und somit σ_{PCV} zugeordnet werden kann. Letztere Variante wurde hier gewählt (vgl. Abschnitt 8.5).

$$\sigma_K^2 = (\sigma_{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{e}_0)^2 + \sigma_{PCV}^2 \quad (3.2)$$

Bei der Abschätzung der benötigten Kalibrierengenauigkeit lassen sich zwei Ansätze verfolgen. Zum einen kann aus den Anforderungen an die Positionsgenauigkeit eine Kalibrierengenauigkeit abgeleitet werden. Voraussetzung ist, dass der Einfluss der Kalibrierunsicherheit auf die resultierende GNSS-Position bekannt ist. Zum anderen kann die Kalibrierengenauigkeit auch den übrigen bei GNSS-Messungen auftretenden Messungsunsicherheiten gegenübergestellt werden. So kann abgeleitet werden, ab welcher Grenze andere Messunsicherheiten so dominant sind, dass eine Steigerung der Kalibrierengenauigkeit zu keiner weiteren signifikanten Verbesserung der Position führt. Im Folgenden wird zunächst letzterem Ansatz nachgegangen. In Abschnitt 3.4 schließen sich dann Überlegungen zur Auswirkung der Kalibrierunsicherheit auf die Position an.

Bei der Beurteilung der Entfernungsmessgenauigkeit muss zwischen der Phasenmessgenauigkeit und der Genauigkeit der abgeleiteten Entfernung unterschieden werden. Die Phasenmessgenauigkeit ist insbesondere von der Signalqualität und der eingesetzten Empfängertechnologie abhängig. Die Genauigkeit der abgeleiteten Entfernung ist zusätzlich von systematischen Einflüssen wie Refraktion, Antennencharakteristik und Mehrwegeeffekten beeinflusst. Von daher wird zuerst die Phasenmessgenauigkeit analysiert, bevor im Anschluss auf die Genauigkeit der abgeleiteten Entfernung übergegangen wird. Dabei wird jeweils die Größenordnung der Unsicherheiten abgeschätzt. Detailliertere Untersuchungen finden sich u.a. in HOWIND 2005.

Erste Richtwerte für die Phasenmessgenauigkeit finden sich in Tabelle 3.1. Dort wurde auf eine elevationsabhängige Differenzierung verzichtet. Der Einfluss der Elevation resultiert zum einen aus dem für niedrige Elevationen längerem Signalweg und der damit verbundenen Amplitudenabschwächung und zum anderen

daraus, dass die Sensitivität (Antennengewinn) bei geodätischen Antennen zum Horizont hin abnimmt (s. Abschnitt 12.2). Zudem führen auch Signalbeugung, Nahfeld- und Mehrwegeeffekte insbesondere bei niedrigen Elevationen zu einer Verschlechterung der Signalqualität bzw. des SNRs (BILICH et al. 2008).

Zur empirischen Analyse der Phasenmessgenauigkeit auf der Basis von Doppeldifferenzen wurde eine Nullbasislinie gemessen, wobei zwei baugleiche Receiver (Leica GX1230GG) über einen Antennensplitter an eine Antenne (Leica AT504GG) angeschlossen worden sind. Stationsabhängige Systematiken (z.B. Antennen-, Mehrwege-, und Nahfeldeffekte) werden bei diesem Ansatz durch Bildung von Doppeldifferenzen vollständig eliminiert. Einflüsse des Antennensplitters können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Allerdings eliminieren sich konstante Anteile, während systematische Effekte in den Zeitreihen sichtbar würden. Lediglich eine durch die Verwendung eines Antennensplitters verursachte Anhebung des Rauschniveaus kann nicht erkannt werden. Im Vergleich zu Analysen auf kurzen Basislinien (s.u.) ist das ermittelte Rauschniveau jedoch so gering, dass der Einfluss des Splitters derzeit vernachlässigt werden kann. Bei dem eingesetzten GPS-Equipment handelt es sich um eine hochwertige geodätische Ausrüstung, die den aktuellen Technologiestand repräsentiert. Somit besitzen die folgenden Analysen eine gewisse allgemeingültige Aussagekraft. Bei der Analyse der Beobachtungen wurden zunächst Doppeldifferenzen (DD) aus den Beobachtungen l zwischen den beiden Empfängern $Rec1$ und $Rec2$ und jeweils zwei Satelliten $Sat1$ und $Sat2$ gebildet (Gleichung 3.3).

$$DD = (l_{Rec1,Sat1} - l_{Rec1,Sat2}) - (l_{Rec2,Sat1} - l_{Rec2,Sat2}) \quad (3.3)$$

In Abb. 3.1 sind diese für zwei Satelliten in blau dargestellt (Frequenz: GPS-L1). Die Größe der DD kann anhand der linken Hochachse abgeleitet werden. Zudem sind die Elevationswinkel der Satelliten dargestellt (rote Linien, rechte Hochachse). Die vertikalen Linien kennzeichnen die Stellen an denen der niedrigere Satellit (hier Sat. 10) in einer Elevation von 10° (untere horizontale Linie) oder Vielfachen von 10° zu sehen ist. Dies ermöglicht eine elevationsabhängige Klassifizierung der DD . Für diese Elevationsbereiche ist jeweils die Standardabweichung der DD eingetragen (0.4 mm bis 1.3 mm).

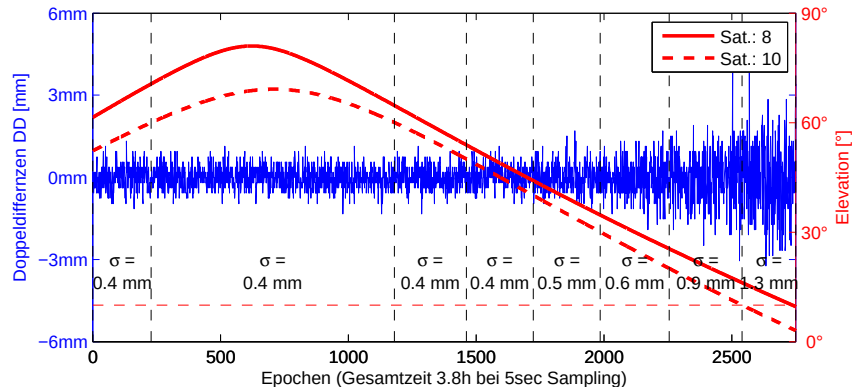


Abb. 3.1: Messrauschen im Falle großer Elevationen (Nullbasislinie, L1).

Für die höheren Elevationen kann ein etwa konstantes Messrauschen angenommen werden ($\sigma_{DD} \approx 0.4\text{ mm}$). Im Bereich von 10° bis 40° Elevation wird hingegen ein Zusammenhang zwischen Messrauschen und Elevation sichtbar. Bei der Ableitung der Phasenmessgenauigkeit muss berücksichtigt werden, dass die DD aus vier Einzelmessungen (2 Empfänger, 2 Satelliten) resultieren. Da bei einer Nullbasislinie und der Verwendung baugleicher Empfänger für einen Satelliten an beiden Receivern eine identische Genauigkeit angenommen werden kann, ergibt sich hier für die Varianz der DD unter der Annahme unkorrelierter Beobachtung:

$$\sigma_{DD}^2 = 2 \cdot \sigma_{Sat8}^2 + 2 \cdot \sigma_{Sat10}^2 \quad (3.4)$$

Da im Bereich der hohen Elevationen keine elevationsabhängigen Variationen sichtbar sind, wird hier für beide Satelliten eine identische Phasenmessgenauigkeit angenommen. Die Standardabweichung einer Einzelmessung ergibt sich dann für Elevationen über 40° zu $\sigma_{L1} \approx 0.4\text{mm}/\sqrt{4} = 0.2\text{mm}$. Für die niedrigen Elevationen kann dieser Ansatz so nicht verfolgt werden, da die Messgenauigkeit wegen elevationsabhängiger Effekte nicht für beide Satelliten identisch ist. Wird jedoch eine Satellitenkonstellation gewählt, bei der sich nur ein Satellit unterhalb von 40° Elevation befindet, so lassen sich mit der nun bekannten Phasenmessgenauigkeit für hohe Elevationen von $\sigma_{L1} \approx 0.2\text{mm}$ auch die Werte für die niedrigen Elevationen ableiten. Eine geeignete Konstellation ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Für Satellit 8 treten Elevationen größer 60° auf. Somit ist für diesen Satellit wieder eine Phasenmessgenauigkeit von $\sigma_{L1} \approx 0.2\text{mm}$ anzusetzen. Der niedrige Satellit steht zunächst unter einem Elevationswinkel von etwa 3.6° und steigt im gewählten Ausschnitt bis 45° Elevation auf. Gleichzeitig steigt die Standardabweichung der DD von $\sigma_{DD} \approx 1.0\text{mm}$ auf $\sigma_{DD} \approx 0.4\text{mm}$ an. Es gilt vergleichbar zu Gleichung 3.4

$$\sigma_{Sat28}^2 = 0.5 \cdot (\sigma_{DD}^2 - 2 \cdot \sigma_{Sat8}^2) = 0.5 \cdot (\sigma_{DD}^2 - 2 \cdot (0.2\text{mm})^2) \quad , \quad (3.5)$$

wodurch sich die Phasenmessgenauigkeit auch für die niedrigen Elevationen β ableiten lässt (Ergebnisse siehe Tabelle 3.2). Bei der Analyse der L2-Frequenz wurde analog vorgegangen. Deutlich sichtbar ist, dass der erwartete elevationsabhängige Verlauf für L2 im Vergleich zu L1 deutlich stärker ausfällt (Abb. 3.3).

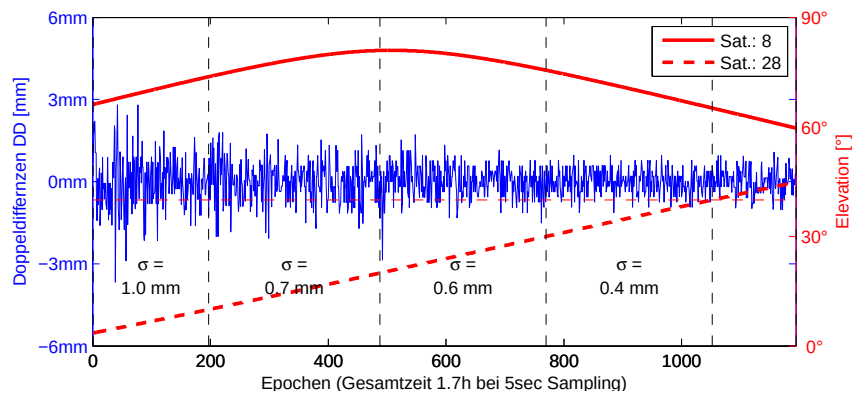


Abb. 3.2: Messrauschen im Falle niedriger Elevationen (Nullbasislinie, L1).

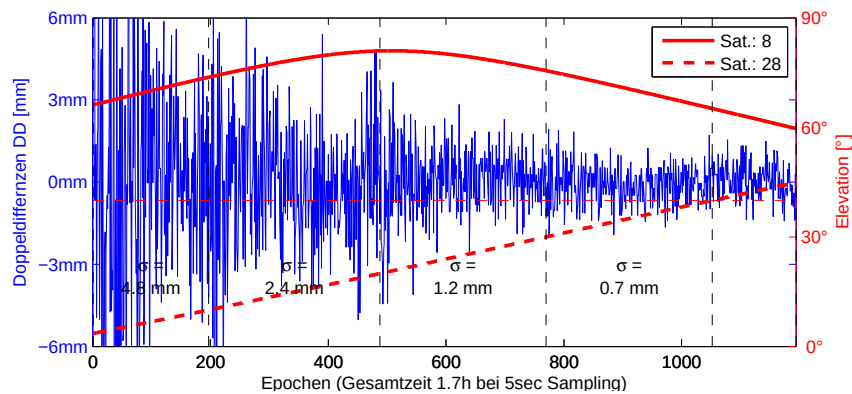


Abb. 3.3: Messrauschen im Falle niedriger Elevationen (Zero-Baseline, L2).

Elevation	σ_{90-50}	σ_{50-40}	σ_{40-30}	σ_{30-20}	σ_{20-10}	σ_{10-00}
L1	0.2mm	0.2mm	0.2mm	0.4mm	0.5mm	0.7mm
L2	0.2mm	0.3mm	0.4mm	0.8mm	1.7mm	3.4mm

Tab. 3.2: GPS Phasenmessgenauigkeit.

Ausgehend von der Phasenmessgenauigkeit σ_P kann die Kalibrierengenauigkeit σ_K abgeleitet werden. Diese wird zunächst auf ein Drittel der Phasenmessgenauigkeit festgesetzt.

$$\sigma_K \approx \frac{1}{3} \sigma_P \quad (3.6)$$

Daraus folgt, dass aus der Unsicherheit der Antennenkalibrierung im Vergleich zu einer idealen Berücksichtigung der Antenneneinflüsse ein Genauigkeitsverlust von nur etwa 5 Prozent resultiert. Die resultierende Kalibrierengenauigkeit von $\sigma_K = 0.07mm$ bis $\sigma_K = 0.2mm$ (L1) wird derzeit von keinem der vorhandenen Kalibrierverfahren erreicht, sollte jedoch als zukünftiges Ziel angestrebt werden.

Im Falle echter Basislinien wirken zusätzliche Störeinflüsse, so dass die tatsächliche Entfernungsmessgenauigkeit deutlich geringer als die reine Phasenmessgenauigkeit ist. Für die empirische Untersuchung der Entfernungsmessgenauigkeit wurde das bereits für die Nullbasislinie verwendete Equipment eingesetzt, wobei eine zweite Leica AT504GG Antenne zum Einsatz kam. Die Länge der Basislinie beträgt 2.3m. Die Antennen wurden vor der Messung mit dem Laborverfahren kalibriert. Die Kalibrierunsicherheiten können hier weitestgehend vernachlässigt werden, da die zufälligen Kalibrierunsicherheiten gering und die systematischen Einflüsse für beide Antennen aufgrund gleicher Bauart nahezu identisch sind (s. Kapitel 8, 9 und 10). Der Einfluss des Nahfeldes ist hingegen auf beiden Stationen unterschiedlich, wobei durch die Realisierung eines möglichst gleichen Antennenaufbaus auch dieser Effekt minimiert wurde. Die Auswirkungen von Mehrwegeeffekten sind in den Ergebnissen allerdings vollständig enthalten. Insgesamt sind die Bedingungen jedoch sehr gut (kurze Basislinie, individuell kalibrierte Choke Ring Antennen, gleicher Aufbau), so dass eine hohe Genauigkeit erreicht wurde. Dies führt letztendlich zu sehr hohen Anforderungen an die Kalibrierengenauigkeit.

Da die Doppeldifferenzen (DD) bei der Analyse „echter“ Basislinien mit endlicher Länge auch die durch Erdrotation und Satellitenbewegung verursachte Geometrieänderung widerspiegeln, kann eine direkte Betrachtung der DD nicht zur Genauigkeitsanalyse herangezogen werden. Stattdessen ist es sinnvoll, eine GPS-Auswertung durchzuführen und die Doppeldifferenzresiduen auszuwerten. Die zugrunde liegende Auswertung wurde mit der Bernese 5.0 Software durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 3.4 dargestellt, wobei ein Ausschnitt mit Satelliten oberhalb von 50° Elevation (horizontale gestrichelte Linie) gewählt wurde.

Im Bereich über 60° Elevation (Elevationsbereiche 2,3 und 4) kann das Messrauschen optimistisch² durch eine Standardabweichung von etwa $\sigma = 1mm$ bis $\sigma = 1.2mm$ charakterisiert werden. Unter der Annahme unkorrelierter und gleich genauer Messungen (für beide Receiver und beide Satelliten), resultiert für die einzelnen Doppeldifferenzen eine Genauigkeit von $\sigma = 0.5mm$ bis $\sigma = 0.6mm$. Die vorhandenen systematischen Anteile müssen hier nicht berücksichtigt werden. Zum einen sind die Effekte gering und zum anderen führt die Vernachlässigung systematischer Effekte allenfalls zu strengeren Kalibrieranforderungen.

² Es wird eine zu optimistische Annahme gewählt, da daraus eine strengere Festlegung der Kalibrierengenauigkeit resultiert.

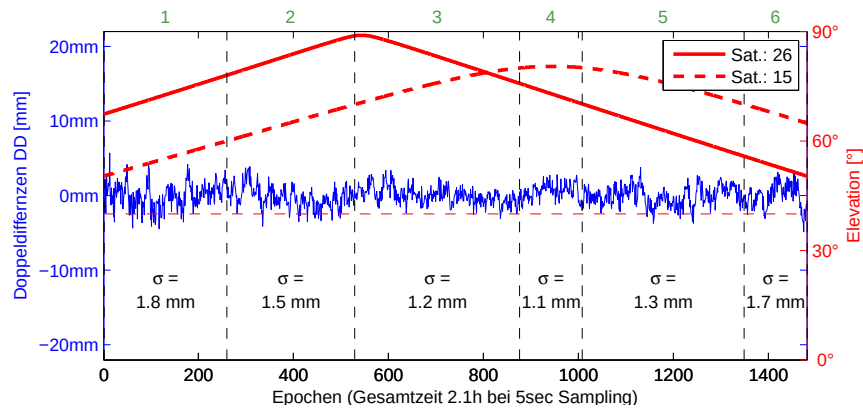


Abb. 3.4: Doppeldifferenzresiduen im Falle einer kurzen Basislinie (L1).

Das in der Abbildung 3.5 dargestellte Beispiel zeigt exemplarisch das Messrauschen, das für horizontnahe Beobachtungen typisch ist³. Hier ist erneut ein Satellit (30) mit Elevationen größer 60° gewählt worden, so dass diesem Satellit ein Messrauschen von etwa $\sigma = 0.5\text{mm}$ zugeschrieben werden kann. Die übrigen Messungsunsicherheiten sind somit in erster Linie dem zweiten Satellit (31) zuzuordnen.

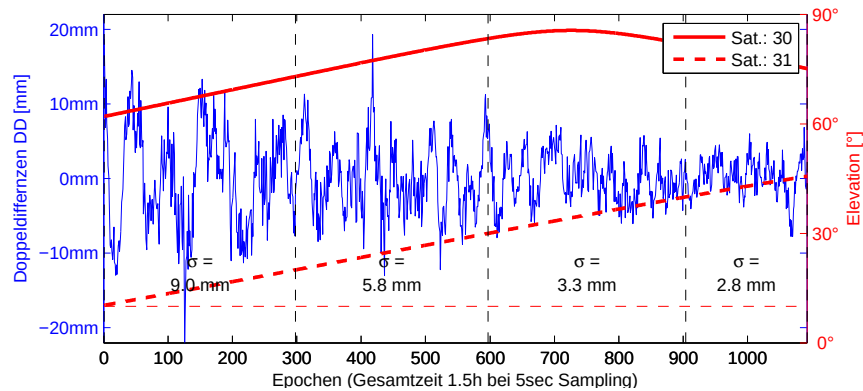


Abb. 3.5: Doppeldifferenzresiduen im Falle einer kurzen Basislinie (L1).

Die deutlichen periodischen Anteile sind ein typisches Anzeichen für Mehrwegeeffekte (BILICH et al. 2008). Sie stellen insbesondere bei kurzen Basislinien eine dominierende Einflussgröße dar. Da Mehrwegeeffekte stationsabhängig sind, ist es nicht möglich, allgemeingültige Aussagen über die in der Praxis erreichbare Entfernungsmessgenauigkeit anzugeben. Bei der Ableitung der Kalibrierengenauigkeit muss zudem berücksichtigt werden, dass die hier sichtbaren Mehrwegeeffekte mit verschiedenen Verfahren minimiert werden können (s.a. WANNINGER und MAY 2000, BILICH et al. 2008) und sich der Einfluss zudem bei längeren Beobachtungszeiten teilweise herausmittelt. Eine allgemeingültige Aussage über die Qualität der Verfahren bzw. den verbleibenden Mehrwegeanteil ist nicht möglich. Für die Ableitung der notwendigen Kalibrierengenauigkeit kann somit ebenfalls keine eindeutige Aussage für den Bereich der niedrigen Elevationen getroffen werden. Deutlich wird jedoch, dass sich diese nicht an der reinen Phasenmessgenauigkeit (Tab. 3.2) orientieren darf.

³ Es sei angemerkt, dass die in der Abbildung angegebenen Standardabweichungen aufgrund der vorhandenen Systematiken die Messungsunsicherheiten nicht korrekt beschreiben.

In einigen GNSS-Softwareprogrammen wird die elevationsabhängige Genauigkeit über

$$\sigma(\beta) = \frac{1}{\sin(\beta)} \cdot \sigma_{90^\circ} \quad (3.7)$$

beschrieben (z.B. HOWIND 2005). Gleichung 3.7 folgend ergeben sich aus der oben abgeleiteten Entfernungsmessgenauigkeit in Zenitrichtung von $\sigma_{90^\circ} = 0.5\text{mm}$ die in der Tabelle 3.3 dargestellten Genauigkeiten.

Insgesamt sind die in der Tabelle genannten Genauigkeiten σ_S für die niedrigen Elevationen sehr optimistisch. Aufgrund der zudem sehr guten Testbedingungen resultieren zu hohe Kalibrieranforderungen σ_K . Im Falle längerer Basislinien nehmen die von der Basislinienlänge abhängigen Einflussgrößen (z.B. Troposphären- und Ionosphäreneinfluss) weiter zu, wohingegen die Kalibrierunsicherheiten konstant bleiben. Der Anteil des Antenneneinflusses sinkt somit relativ zu den anderen Größen.

Elevation β	Streckenmessgenauigkeit σ_S	Kalibrierengenauigkeit σ_K
90 – 30°	0.5mm - 1.0mm	0.2mm - 0.3mm
30 – 20°	1.0mm - 1.5mm	0.3mm - 0.5mm
20 – 10°	1.5mm - 3.0mm	0.5mm - 1.0mm
< 10°	> 3.0mm	1.0mm

Tab. 3.3: Entfernungsmessgenauigkeit und geforderte Kalibrierengenauigkeit (L1).

Die in Tabelle 3.3 dargestellten Kalibrieranforderungen werden im Folgenden auch für die GPS-Frequenz L2 sowie die Frequenzen der übrigen Systeme angesetzt. Dies ist sinnvoll, da sich die systematischen Einflüsse bei L1 und L2 in etwa der identischen Größenordnung auswirken. Die Anforderungen berücksichtigen den aktuellen Stand der Technik und müssen gegebenenfalls in Zukunft überprüft werden.

3.3 Einfluss von Troposphäre und Ionosphäre auf die Entfernungsmessung

Die gemessene Entfernung entspricht im ungestörten Fall der Distanz zwischen den Phasenzentren von Satellit und GNSS-Empfangsantenne. Aufgrund der Atmosphäreneinflüsse (im Wesentlichen bestehend aus Troposphären- und Ionosphäreneinfluss) weicht die gemessene Entfernung von der räumlichen Distanz ab, wobei der Einfluss auf die relative Positionsbestimmung mit zunehmender Basislinienlänge größer wird. Zudem ist der Atmosphäreneinfluss elevationsabhängig, da bei niedrigen Elevationen der Signalweg durch die Atmosphäre länger wird.

Der Troposphäreneinfluss kann durch Troposphärenmodelle korrigiert werden. Verbleibende Anteile können bei der GNSS-Auswertung als zusätzliche Parameter geschätzt werden (z.B. SEEGER 2003).

Der Einfluss der Ionosphäre kann hingegen durch 2-Frequenzmessungen eliminiert bzw. vermindert werden. Der Einfluss der Ionosphäre δs_{Ion} auf die gemessene Entfernung s ergibt sich in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz f zu (s. LEICK 1995)

$$\delta s_{Ion} \approx -\frac{40.3}{f^2} \int_s n_e \cdot ds = -\frac{40.3}{f^2} \cdot TEC \quad , \quad (3.8)$$

wobei n_e der Elektronengehalt entlang des Signalweges ist (TEC = total electron content). Da der Einfluss der Ionosphäre dispersiv ist, kann durch eine Linearkombination (Gleichung 3.9)

$$s = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (s_{f1} \cdot f_1^2 - s_{f2} \cdot f_2^2) . \quad (3.9)$$

zweier Frequenzen eine nicht durch die Ionosphäre beeinflusste Lösung berechnet werden. Im Falle der GPS-Frequenzen L1 und L2 wird die ionosphärenfreie Linearkombination $L0$ entsprechend Gleichung 3.10

$$s = 2.5457 \cdot s_{f1} - 1.5457 \cdot s_{f2} \quad \text{bzw.} \quad L0 = 2.5457 \cdot L1 - 1.5457 \cdot L2 \quad (3.10)$$

berechnet. Diese Linearkombination wird in der Literatur häufig auch mit LC oder $L3$ abgekürzt.

Die Qualität der ionosphärenfreien Lösung hängt vom Frequenzabstand der verwendeten Frequenzen, der Ionosphärenaktivität sowie der Basislinienlänge ab. Eine generelle Anwendung der 2-Frequenzmessung kann nicht empfohlen werden, da sich die Messgenauigkeit entsprechend des Varianzfortpflanzungsgesetzes verschlechtert. Wird für L1 und L2 eine identische Genauigkeit angesetzt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2), so resultiert für die ionosphärenfreie Linearkombination bei Vernachlässigung sämtlicher Korrelationen und systematischer Messungsunsicherheiten, eine um Faktor 3 verringerte Messgenauigkeit (s. LEICK 1995):

$$\sigma_{s,L0} = \sqrt{2.5457^2 - 1.5457^2} \cdot \sigma_{s,L1,L2} \approx 3 \cdot \sigma_{s,L1,L2} . \quad (3.11)$$

Dies bedeutet, dass bei der relativen Positionsbestimmung und der Verwendung von 2-Frequenzmessungen zur Verringerung des Ionosphäreinflusses auch der Antenneneinfluss ansteigt.

3.4 Einfluss der Kalibrierunsicherheiten auf die 3D-Position

Die Genauigkeit eines zu schätzenden Parameters oder mehrerer zu schätzenden Parameter hängt neben der Genauigkeit der Eingangsgrößen auch von der Kondition des Systems ab. Letztere ist im Falle der satelliten-gestützten Positionsbestimmung im Wesentlichen durch die Empfänger-Satelliten-Geometrie beeinflusst. Näherungsweise lässt sich dieser Zusammenhang durch

$$\sigma_P = \sigma_S \cdot PDOP \quad (3.12)$$

beschreiben (s. TORGE 2002), wobei σ_S die Entfernungsmessgenauigkeit und der PDOP (DOP = Dilution of Precision) den Einfluss der Geometrie auf die 3D-Position beschreibt. Der PDOP ist proportional zur Wurzel aus der Spur der Kovarianzmatrix Σ und ermöglicht bei gegebenen σ_S eine a priori Genauigkeitsabschätzung der Stationsparameter

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_{north}^2 + \sigma_{east}^2 + \sigma_{up}^2} = \sigma_S \cdot PDOP . \quad (3.13)$$

Für diese a priori Abschätzung werden unkorrelierte Beobachtungen gleicher Genauigkeit angenommen, so dass der PDOP den Geometrieanteil beschreibt, welcher hier indirekt proportional zum Volumen des durch die Raumstrecken aufgespannten Tetraeders ist.

Für eine exakte Genauigkeitsabschätzung kann Gleichung 3.12 meist nicht verwendet werden, da die Annahme unkorrelierter und gleichgenauer Beobachtungen in der Regel nicht zulässig ist (s.a. Abschnitt 3.2). Für die Abschätzung der Auswirkung der Antenneneinflüsse bzw. der Kalibrierunsicherheiten ermöglicht

dieser Ansatz jedoch eine Abschätzung der Größenordnung der zu erwartenden Einflüsse. Hierzu wird in Gleichung 3.12 die Kalibrierengenauigkeit σ_K anstelle der Entfernungsmessengenauigkeit σ_S eingesetzt (vgl. z.B. MENGE 2003).

$$\sigma_P = \sigma_K \cdot PDOP \quad (3.14)$$

In der Tabelle 3.3 sind die so abgeleiteten Einflüsse der Kalibrierengenauigkeit auf die 3D-Position dargestellt. Dabei wurde eine Kalibrierengenauigkeit von $\sigma_K = 0.5mm$ angesetzt. Diese Annahme resultiert aus der in Abschnitt 3.2 geforderten Genauigkeit ($\sigma_K < 0.5mm$ für Elevationen $> 20^\circ$). In Abhängigkeit von üblichen PDOP-Werten (Spalte 1) ist der Einfluss auf die 3D-Position (2 Spalte) und der um den Faktor $\sqrt{2}$ größere Einfluss auf eine Basislinie dargestellt (Spalte 3). Wird statt einer Frequenz die ionosphärenfreie Linear-kombination L0 verwendet, so steigt der Wert entsprechend Gleichung 3.11 um Faktor 3 an (Spalte 4).

PDOP	σ_{Pos}	$\sigma_{BL,L1}$	$\sigma_{BL,L0}$
1	0.5 mm	0.7 mm	2.1 mm
2	1.0 mm	1.4 mm	4.2 mm
3	1.5 mm	2.1 mm	6.3 mm

Tab. 3.4: Einfluss der Kalibrierengenauigkeit ($\sigma_K = 0.5mm$) auf die Positionsbestimmung.

Diese Werte gelten abgesehen von den bereits genannten Einschränkungen nur dann, wenn es sich bei den Kalibrierabweichungen um rein zufällige Anteile handelt. Systematische Kalibrierabweichungen führen dazu, dass auch die in Tabelle 3.4 dargestellten Ergebnisse als systematische Einflüsse zu interpretieren sind. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Effekt bei der L0-Lösung deutlich verstärkt wird, wenn bei der Auswertung Troposphärenparameter mitgeschätzt werden (s. Kapitel 4). Eine empirische Methode zur Abschätzung des Einflusses der Kalibrierabweichung auf die Position wird in Abschnitt 9.2.2 erläutert.

Wie aus den vorherigen Ausführungen deutlich wird, können die Einflüsse von PCO und PCV vernachlässigt werden, wenn eine Kalibrierung der Antenne mit einer Genauigkeit von $\sigma_K = 0.2mm$ bis $\sigma_K = 0.5mm$ möglich ist (s. Tabelle 3.3). Im folgenden Kapitel wird zunächst noch einmal anhand von einigen Beispielen die Problematik des Antenneneinflusses auf die hochpräzise Positionsbestimmung aufgezeigt. Anhand dieser Beispiele wird auch deutlich, dass die genannten Kalibrieranforderungen derzeit nicht immer erfüllt werden.

4 Relevanz der Antennenproblematik für GNSS-Anwendungen

Die Bestimmung des Empfangsverhaltens von Antennen gehörte bereits Jahrzehnte vor der Entwicklung von GPS zu den Kernaufgaben der Antennentechnik. Die Relevanz für die hochpräzise Positionsbestimmung mit GPS wurde u.a. von SIMS 1985 bereits wenige Jahre nach der offiziellen Inbetriebnahme von GPS diskutiert. Die prinzipielle Problematik des Antenneneinflusses ist seit dieser Zeit bekannt (SIMS 1985; SCHUPLER und CLARK 1991; MEERTENS et al. 1996), weshalb an dieser Stelle nicht auf die generelle Bedeutung der Antennenkalibrierung eingegangen werden soll. Stattdessen wird im Folgenden anhand von Beispielen dargestellt, weshalb diese Thematik nach über 25 Jahren Forschungstätigkeit in diesem Bereich und der Entwicklung mehrerer Kalibrierverfahren (s. Kapitel 5) weiterhin von Interesse ist und welche Probleme heute noch zu lösen sind.

4.1 Höhenbestimmung mit GPS auf kurzen Basislinien

Im Rahmen eines Ringversuches wurden in den Jahren 2002 und 2003 zur Validierung von Kalibrierergebnissen Testmessungen in einem GNSS-Testfeld mit kurzen Basislinien (wenige Meter) durchgeführt, wobei drei unterschiedliche geodätische Antennen (TRM33429.20+GP, LEIAT303 LEIC, NOV503 NOKE) zum Einsatz kamen (WANNINGER et al. 2006). Die GPS-Pfeiler wurden mit unterschiedlichen Antennenkonstellationen (stets mit identischer Montierung) für jeweils mindestens 24 Stunden besetzt. Die Pfeilerhöhen wurden nivelliert. Aufgrund der geringen Netzausdehnung können die nivellierten Höhenunterschiede als Sollergebnisse angesehen werden.

Bei den Ergebnissen zeigen sich bei Verwendung der Frequenzen L1 und L2 im Mittel Höhenunterschiede zu den nivellierten Höhen von 1 - 2 mm, wobei die L1-Lösungen tendenziell noch etwas besser sind. Bei der Auswertung mit der ionosphärenfreien Linearkombination L0 und gleichzeitiger Schätzung der Troposphärenparameter (L0T) erreichen die Abweichungen hingegen cm-Niveau. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst (R = Roboterkalibrierung, F = Feldkalibrierung mit Antennendrehung):

Quelle der Antennenkorrekturen	Art	L1	L2	L0	L0T
Geo++ GmbH, Garbsen	R	0.8	1.8	2.8	9.1
Institut für Erdmessung, Universität Hannover	R	1.5	1.9	3.2	9.0
Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen	F	0.9	1.1	2.2	5.7
Geodätisches Institut, TU Dresden	F	0.9	0.6	1.9	5.1

Tab. 4.1: Quadratisches Mittel in mm über jeweils 24 Abweichungen der GPS-Höhendifferenzen von den Sollhöhendifferenzen aus Nivellement für vier versch. Lösungsarten (nach WANNINGER et al. 2006).

Auffällig sind die geringeren Abweichungen im Falle der relativen Kalibrierung. WANNINGER et al. 2006 nennen als mögliche Ursache, dass bei den relativen Verfahren die Antennenumgebungen den im Testfeld verwendeten Umgebungen (jeweils Pfeiler) ähnlicher sind, als dies bei der Roboterkalibrierung der Fall ist. Nahfeldeffekte wirken sich dann weniger stark aus. Die sichtbaren Abweichungen sind somit auf Kalibrierabweichungen und Nahfeldeinflüsse zurückzuführen. Letztere fallen im Allgemeinen bei L1 etwas geringer als bei L2 aus und verstärken sich bei der Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination deutlich. Während hier für L2 keine signifikant schlechtere Genauigkeit festgestellt werden kann (allenfalls für die Geo++-Lösung), ist die Verstärkung bei L0 und L0T deutlich (Tabelle 4.1).

Es wird sichtbar, dass neben zufälligen Messunsicherheiten auch systematische Anteile wirken, da sich zufällige Anteile bei langen Beobachtungszeiten herausmitteln würden. Der deutliche Anstieg der Abweichungen im Falle der L0-Lösung mit Troposphärenschätzung weist auch auf die Existenz von systematischen Anteilen hin, wobei, wie oben bereits erläutert wurde, insbesondere Nahfeldeinflüsse als Ursache in Betracht gezogen werden müssen. Aus diesem Grund wurde, in Anlehnung an den hier gezeigten Test, eine Messkampagne durchgeführt, bei der neben der Validierung des Laborverfahrens auch einige Aspekte der Nahfeldproblematik näher untersucht wurden (Abschnitt 11.2).

Prinzipiell ist festgehalten, dass insbesondere im Falle der L0T-Lösung, die in regionalen und globalen GNSS-Netzen üblicherweise zum Einsatz kommt, starke mit der Antenne im Zusammenhang stehende Effekte auftreten. Dies führt auch beim Austausch von Antennen in Permanentstationsnetzen zu großen Problemen, wie am folgenden Beispiel erläutert wird.

4.2 Auswirkung eines Antennenwechsels in regionalen und globalen Netzen

Anhand der in Abschnitt 4.1 erläuterten Ergebnisse wird deutlich, dass die Positionsbestimmung trotz der Verwendung absoluter und individueller Antennenkalibrierungen durch verbleibende systematische Abweichungen beeinflusst ist. Die Existenz systematischer Effekte wird auch beim Austausch von Antennen in GNSS-Referenzstationsnetzen beobachtet. In KLEIN u. KLETTE 2005 und WANNINGER u. FETKE 2008 finden sich hierzu eine Vielzahl von Beispielen aus dem SAPOS-Referenzstationsnetz (SAPOS = Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung). Diese Beispiele belegen, dass trotz der Verwendung absolut kalibrierter Antennen scheinbare Koordinatenänderungen nach dem Austausch von Antennen und einem Wechsel des Antennentyps auftreten. Variationen der Höhenkomponente von 20mm im Fall der L0T-Lösung sind dabei nicht selten. So wurden im SAPOS-Netz an 17 Referenzstationen TRM23903.00 TCWD Antennen gegen TRM41249.00 TZGD Antennen ausgetauscht. Im Mittel war bei der L0T-Lösung eine Höhenänderung von -13.9mm zu beobachten (s. Abb. 4.1). Als Ursache sind u.a. Nahfeldeffekte, die sich in Kombination mit der Schätzung der Troposphärenparameter besonders stark auswirken, möglich (WANNINGER et al. 2006).

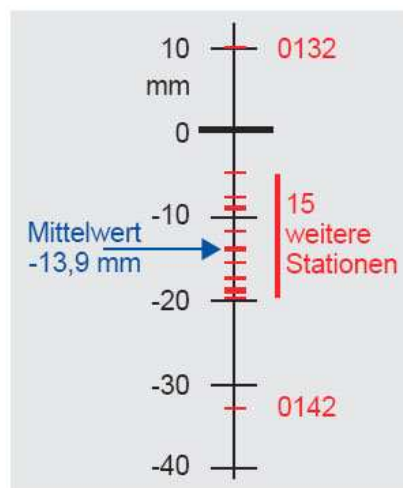


Abb. 4.1: Änderungen der Höhenkoordinate nach dem Wechsel des Antennentyps (WANNINGER et al. 2006).

Auch anhand der in KLEIN u. KLETTE 2005 gezeigten Beispiele (s.o.) wird deutlich, dass die beobachteten Höhensprünge häufig stationsabhängig sind, so dass an unterschiedlichen Stationen beim Wechsel zwischen

gleichen Antennentypen (z.B. jeweils von LEIAT303 nach TRM41249) unterschiedliche Höhenänderungen auftreten können. Die Höhenänderungen treten dabei häufig auch dann auf, wenn die Antennenkorrekturdaten einer Kalibriereinrichtung verwendet werden. Dies zeigt, dass antennenspezifische systematische Kalibrierabweichungen nicht (die einzige) Ursache für diese Abweichungen sein können. Stattdessen weist auch dies darauf hin, dass auch das lokale an den GNSS-Stationen vorliegende Nahfeld beim Antennenwechsel deutliche Höhenänderungen verursacht.

Die in den vorangegangenen Beispielen dargestellten Probleme treten in der gezeigten Größenordnung nur in Verbindung mit der Schätzung von Troposphärenparametern auf. Die Korrelationen zwischen der Troposphärenmodellierung und den verbleibenden Antenneneinflüssen lassen sich dadurch erklären, dass beide Effekte elevationsabhängig sind (z.B. GÖRRES 1996). Dies wurde in globalen Netzen auch dadurch sichtbar, dass durch den Wechsel von relativen zu absoluten Antennenparametern eine signifikante Verbesserung der aus den GPS-Daten geschätzten Troposphärenparametern erreicht wurde, was durch den Vergleich mit unabhängigen VLBI-Berechnungen (VLBI: very long baseline interferometrie) belegt werden konnte (SCHMID et al. 2005). Gleichzeitig wurden durch den Wechsel der Antennenparameter deutliche Änderungen der Höhenkomponente festgestellt (STEIGENBERGER et al. 2009).

Weitere Probleme ergeben sich aus dem Einfluss der Antennenumgebung auf das Empfangsverhalten der Antenne. Werden Änderungen am Antennenumfeld vorgenommen, so ändert sich die Empfangscharakteristik der Antenne, wodurch die Gültigkeit der Kalibrierkorrekturen einschränkt wird (z.B. durch den Einfluss der Montierung oder eines Radoms). Umfangreiche Versuche hierzu sind in HATANAKA et al. 2001a und HATANAKA et al. 2001b dargestellt. Spezielle Untersuchungen zum Einfluss von Radomen auf die Höhenbestimmung in regionalen GPS-Netzwerken finden sich in (KANIUTH u. STUBER 2002). Die Änderung der Antennenumgebung sind in ihrer Auswirkung dem Wechsel des Antennentyps ähnlich.

Die Nahfeldproblematik war und ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (z.B. DILSSNER 2007), ohne dass bislang eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte, so dass in diesem Bereich weitere Forschungsaktivitäten notwendig sind. Es sei bereits angemerkt, dass diese Probleme im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise aufgegriffen werden, durch die Weiterentwicklung des Laborverfahrens und den Aufbau der Antennenmesskammer nun aber hervorragende Bedingungen für weitere Arbeit in diesem Bereich vorliegen. In den folgenden zwei Kapiteln werden die verschiedenen Kalibrierverfahren vorgestellt. Dabei werden auch Vorteile des Laborverfahrens sichtbar, welche neben den genannten Problemen die Weiterentwicklung speziell des Laborverfahrens begründen.

5 Kalibrierverfahren

Bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden erste Arbeiten zum Antenneneinfluss auf die hochpräzise Positionsbestimmung publiziert (z.B. GEIGER 1988) und erste Experimente in mit mikrowellenabsorbierenden Materialien ausgekleideten Antennenmesskammern durchgeführt (z.B. SIMS 1985). Früh wurde festgestellt, dass die Antenneneinflüsse bei konstanter Antennenumgebung als konstant angesehen werden können, womit eine wesentliche Voraussetzung für die Möglichkeit der Antennenkalibrierung erfüllt ist. Seitdem wurden neben dem Laborverfahren verschiedene Feldverfahren entwickelt (s. GÖRRES 2009). Die verschiedenen Verfahren werden im Folgenden kategorisiert. Anschließend werden die Grundprinzipien der Feldverfahren erläutert. Das absolute Laborverfahren wird in Kapitel 6 beschrieben.

5.1 Kategorisierung der Kalibrierverfahren

Bei den Kalibrierverfahren wird zwischen *relativen* und *absoluten* Verfahren unterschieden. Bei der relativen Kalibrierung werden die Antennenparameter (PCO und PCV) relativ zu einer Referenzantenne bestimmt. Bei der absoluten Kalibrierung sind die Ergebnisse unabhängig von einer Referenzantenne, weshalb sich zur begrifflichen Unterscheidung die Bezeichnung „absolute Kalibrierung“ durchgesetzt hat. Allerdings werden bei allen Verfahren stets nur richtungsabhängige Änderungen des Antenneneinflusses in Relation zu einer Vergleichsrichtung abgeleitet. Ein absoluter Bezug ist nicht gegeben (s. Abschnitte 5.3 und 6.3). Den obigen Definitionen folgend, lassen sich die Kalibrierverfahren entsprechend Abbildung 5.1 gliedern:

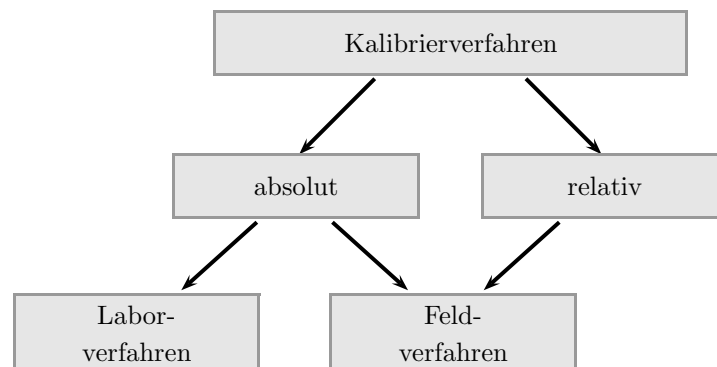


Abb. 5.1: Kategorisierung der Kalibrierverfahren.

Die Entwicklung der Feldverfahren wurde vorangetrieben, da das Laborverfahren aufgrund der damals noch relativ hohen Kosten für die Nutzung geeigneter Absorberhallen und des sehr hohen Messaufwands, der aus der geringen Automation des Verfahrens resultierte, nur eingeschränkt verfügbar war. Zudem wurde die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse angezweifelt. Mit dem Laborverfahren wurden zwar sehr hohe innere Genauigkeiten erreicht, umfassende Untersuchungen zur Richtigkeit wurden jedoch nicht durchgeführt oder zumindest nicht entsprechend publiziert. In Frage gestellt wurde in erster Linie, ob die Kalibrierergebnisse für reale GPS-Signale gültig sind. Insbesondere die höhere Signalstärke sowie der geringe Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne sind stets als Kritikpunkte an der Laborkalibrierung genannt worden.

Durch die Entwicklung des relativen und des absoluten Feldverfahrens stehen heute insgesamt drei Verfahren mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Erste Vergleiche haben gezeigt, dass alle Verfahren zu vergleichbaren Ergebnissen führen (ROTHACHER 2001). Bevor auf die Validierung des Laborverfahrens eingegangen wird, werden in den folgenden Abschnitten die Grundprinzipien der Feldverfahren vorgestellt.

5.2 Relative Feldkalibrierung

Grundprinzip: Bei der *relativen Feldkalibrierung* werden die Empfangseigenschaften einer Testantenne bezüglich einer Referenzantenne festgestellt (BREUER et al. 1995, ROTHACHER et al. 1995, MADER 1999). Im einfachsten Fall wird auf einer sehr kurzen Basislinie eine statische Messung durchgeführt. Aufgrund der geringen Basislinienlänge können die Satellitenorbitabweichungen sowie die Atmosphäreinflüsse vernachlässigt werden. Sind die Koordinaten der beiden Stationen als varianzfreie Sollwerte vorgegeben, ergibt sich der PCO als Koordinatendifferenz zwischen den Soll- und Ist-Koordinaten. Die Phasenzentrumsvariationen (PCV) ergeben sich aus den Residuen auf Beobachtungsebene. Aufgrund des starken Messrauschens und der ungleichen Verteilung der Beobachtungen über die Antennenhemisphäre ist die Approximation der Ergebnisse z. B. mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen (ROTHACHER et al. 1995) notwendig.

Verbesserungen des relativen Verfahrens: Basierend auf diesem Grundkonzept lassen sich durch Änderungen des Messkonzeptes einige Nachteile eliminieren. So kann durch den Standpunktwechsel von Referenz- und Testantenne auf die Vorgabe von Sollkoordinaten verzichtet werden. Alternativ kann zumindest auf die Einführung bekannter Lagekoordinaten verzichtet werden, wenn bei veränderter azimuthaler Ausrichtung beider Antennen zusätzliche Beobachtungen durchgeführt werden, da sich durch die Drehung (z.B. händisch Einstellung von 4 Ausrichtungen) auch die horizontale Lage des mittleren Phasenzentrums ändert. Die resultierende Koordinatenänderung entspricht dem Einfluss der Lagekomponenten des PCO, so dass diese dann absolut abgeleitet werden können. Der Höhenunterschied zwischen Referenzantenne und Testantenne muss aber für die Ableitung des vertikalen Offsets weiterhin vorgegeben werden. Die Messung ist mit geringem Aufwand mit Submillimetergenauigkeit möglich (z.B. nivellitisch). Ein weiterer Vorteil der Antennendrehung besteht darin, dass eine vollständige Abdeckung der Antennenhemisphäre erreicht wird, da ein je nach Lage der Kalibriereinrichtung eventuell vorhandenes „Nord- oder Südloch“ die Antennenabdeckung nicht einschränkt. Die Mehrwegeeffekte, welche die Phasenzentrumsvariationen überlagern, werden durch lange Beobachtungszeiten von möglichst 24 Stunden pro Ausrichtung (meist Norden, Süden, Westen, Osten) reduziert, wobei näherungsweise identische mittlere Mehrwegeefflüsse an allen Beobachtungstagen angenommen werden. Diese Annahme setzt allerdings eine gleichbleibende Antennenumgebung voraus (WANNINGER 2002).

Technische Weiterentwicklungen: Das bislang beschriebene Verfahren zeichnet sich insbesondere durch einen minimalen technischen und einen hohen zeitlichen Aufwand aus. Die Ausrüstung besteht im Wesentlichen aus den GNSS-Receiver und einer Referenzantenne. Die Nachteile dieses Ansatzes sind der hohe zeitliche Aufwand von bis zu 4x24 Stunden und die eingeschränkte Reduktion von Mehrwegeefflässen. Eine Optimierung dieser beiden Punkte lässt sich durch einen Auswertansatz, der auf der Bildung von Epochendifferenzen basiert, erreichen.

Bei diesem, an der TU Dresden eingesetzten und entwickelten Verfahren (WANNINGER 2002), wird ausgenutzt, dass Mehrwegeeffekte bei zeitlich nah beieinanderliegenden Epochen (derzeit 15 Sekunden Abstand) stark korreliert sind. Wird die Ausrichtung einer Antenne zwischen zwei Epochen geändert, so verbleibt nach Bildung der Epochendifferenzen der Antenneneinfluss, während der Mehrwegeeffluss eliminiert ist. Auf die Bildung von Tagesdifferenzen kann somit verzichtet werden.



Abb. 5.2: Kalibriermechanik DRB 2 für die Relativkalibrierung mit Antennendrehung (Foto: Geodätisches Institut - TU Dresden).

Die Kalibrierdauer verkürzt sich durch diesen Ansatz auf 6-24 Stunden, wobei nach 6 Stunden eine Steigerung der Messdauer nur noch zu minimalen Verbesserungen führt (FREVERT et al. 2003). Der kürzeren Kalibrierdauer steht wegen der automatisierten Drehung ein höherer technischer Aufwand gegenüber. In Abb. 5.2 ist die derzeit eingesetzte Kalibriermechanik DRB2 dargestellt.

Während die Lagekomponenten des PCOs mit diesem Verfahren absolut bestimmbar sind, können die Phasenzentrumsvariationen sowie der Höhenoffset zunächst nur relativ zur Referenzantenne ermittelt werden. Wird jedoch als Referenzantenne eine absolut kalibrierte Antenne eingesetzt, so ist die Referenzantenne nach Anbringung der Antennenkorrekturen frei von Phasenzentrumsvariationen, wodurch absolute Kalibrierdaten für die Testantenne abgeleitet werden können. Auf die Drehung der Referenzantenne kann dann ebenfalls verzichtet werden (WANNINGER 2002).

Ein Nachteil dieses relativen Kalibrierverfahrens besteht darin, dass die Kalibrierunsicherheiten bei niedrigen Elevationen aufgrund des schlechteren SNRs und der ausgeprägteren Mehrwegeeffekte größer sind. Dies gilt insbesondere für den Bereich unterhalb von 10° Elevation (s. Abschnitt 3.2). In der Praxis ist dies insbesondere bei der Höhenbestimmung relevant, da hier die niedrigen Elevationen für die Qualität der Lösung von großer Bedeutung sind. Anzumerken ist jedoch, dass die Kalibrierunsicherheit stets im Kontext der Qualität der GNSS-Beobachtungen beurteilt werden muss. Da diese bei realen Beobachtungen ebenfalls im Bereich der niedrigen Beobachtungen geringer ist, relativiert sich dieser Verfahrensnachteil.

Durch die zusätzliche Verkipfung der Antenne während der Kalibrierung ist es möglich, die Mehrwegeinflüsse auch bei niedrigen Elevationen zu verringern und zudem einen absoluten Bezug zu erhalten. Ein solches Vorgehen wird bei dem im Folgenden vorgestellten absoluten Feldverfahren angewendet.

5.3 Absolute Feldkalibrierung

Die Methode der absoluten Feldkalibrierung wurde am Institut für Erdmessung der Universität Hannover in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++[®] entwickelt. Das Grundprinzip ähnelt dem oben beschriebenen relativen Feldverfahren mit Antennendrehung. Für die Reduktion der störenden Mehrwegeeffekte wurde in einer ersten Entwicklungsstufe ausgenutzt, dass sich die Satellitengeometrie nach einem siderischen Tag wiederholt. Der wesentliche Nachteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die Annahme identischer Mehrwegeeffekte an aufeinanderfolgenden Tagen trotz identischer Satellitenkonstellationen nur näherungsweise gültig ist. Zudem resultiert aus diesem Ansatz auch eine mehrtägige Kalibrierdauer.

Aufgrund dieser Nachteile wurde in einer zweiten Entwicklungsstufe eine zweite Methode zur Elimination der Mehrwegeeffekte, die ebenfalls auf der Basis von Epochendifferenzen basiert, eingeführt. Während beim ersten Ansatz der Zeitabstand zwischen zwei Epochen einem siderischen Tag entsprechen muss, ist beim zweiten Ansatz der Epochenabstand zu minimieren. Durch kurze Zeitabstände wird erreicht, dass Mehrwegeeffekte als nahezu konstant angesehen werden können und durch die Bildung von Epochendifferenzen eliminiert werden. Wird die Antenne zwischen zwei Epochen gedreht und/oder verkippt, so ist in der Epochendifferenz die Differenz der für die beiden unterschiedlichen Einstrahlrichtungen wirksamen Antenneneinflüsse enthalten. Die Minimierung des Epochenabstandes bringt zwei bedeutende Vorteile mit sich. Zum einen sind große Änderungen der Mehrwegesituation (z.B. durch Schneefall) bei geringen zeitlichen Abständen nicht zu erwarten und zum anderen lässt sich das zeitliche Verhalten des Mehrwegeeffektes, wie auch bei den modernen Verfahren der relativen Kalibrierung, als stochastischer Prozess modellieren. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in MENGE 2003.

Wird die gesamte Antennenhemisphäre mit dem beschriebenen Verfahren abgetastet, so beschreibt das Ergebnis die „Topographie“ des Phasenpatterns ohne das absolute Niveau ableiten zu können, da stets nur die Änderungen des Antenneneinflusses infolge einer geänderten Einstrahlrichtungen erfasst werden. Zur Lösung dieses Datumsproblems wird im Falle der Roboterkalibrierung der Phasenkorrekturwert im Zenit zu Null gesetzt (WÜBBENA et al. 1996). Der aus dieser Festlegung resultierende Offset zum wahren Niveau wirkt sich bei der Positionsbestimmung auf alle Beobachtungen - unabhängig von der Einstrahlrichtung - gleichermaßen aus, weshalb das Fehlen eines absoluten Bezuges in der Praxis keine Relevanz hat (MENGE u. SEEGER 1999). Dieser Einfluss wird bei der relativen Positionsbestimmung bei der Bildung der Doppeldifferenzen eliminiert. Bei der absoluten Punktbestimmung ist der Einfluss mit dem Empfängeruhrenoffset oder der Signalverschiebung aufgrund der gemeinsamen Wegstrecke aller Signale von der Antenne zum Empfänger vergleichbar. Es sei angemerkt, dass diese „Problematik“ auch bei der absoluten⁴ Laborkalibrierung auftritt (siehe Kapitel 6).

Aus der Kippung der Antenne resultiert, dass eine vollständige Abtastung erreicht wird, ohne dass horizontnahe Satelliten verwendet werden müssen, woraus eine weitere Reduktion der Mehrwegeinflusses resultiert. Die bei der Kalibrierung verwendete dynamische Elevationsmaske beträgt zur Zeit mindestens 18° Elevation (WÜBBENA et al. 2000), die vorhandenen Mehrwegeeffekte sind entsprechend gering. Für die Bewegung (Drehung und Kippung) der Antenne wird der in Abbildung 5.3 dargestellte Roboterarm eingesetzt.

Durch Drehung und Kippung der Antenne wird eine vollständige Abdeckung der Antennenhemisphäre relativ schnell erreicht, wobei die Kalibrierdauer stark konstellationsabhängig ist. Je mehr Satelliten vorhanden sind, desto schneller ist auch die notwendige Abdeckung der Antennenhemisphäre erreicht. Insgesamt werden im Mittel zwischen 6000 und 8000 Orientierungen für die Berechnung der Kalibrierparameter verwendet. Die Kalibrierung von GPS-Antennen dauert dabei nur wenige Stunden (WÜBBENA et al. 2006). Eine Kalibrierung von Glonass-Antennen dauert aufgrund der zur Zeit geringeren Satellitenanzahl länger. Da das russische Glonass System wieder vollständig aufgebaut wird, wird dieser Nachteil in Zukunft nicht mehr relevant sein. Eine Kalibrierung individueller Glonass-Frequenzen ist derzeit nicht möglich. Die Kalibrierung von Galileo-Frequenzen wird erst möglich sein, wenn das Galileo-System operabel ist.

Ein prinzipieller Nachteil aller Feldverfahren resultiert aus dem im Vergleich zur Kammerkalibrierung starken Messrauschen, das die Anwendung von Approximationsverfahren notwendig macht (ZEIMETZ und KUHLMANN 2006). Trotz des hohen Messrauschens wird für das absolute Feldverfahren eine innere Genauigkeit von $\sigma = 0.2\text{mm}$ bis 0.4mm angegeben (WÜBBENA et al. 2000), wobei letzterer Wert für die niedrigen Elevationen (5°) gilt. Die hohe innere Genauigkeit zeigt die effiziente Beseitigung der zufälligen Anteile des Messrauschens mit Hilfe der Kugelflächenfunktionen.

Zur Ableitung der Wiederholgenauigkeit wurden Kalibrierungen mit unterschiedlichen Robotern an unterschiedlichen Standpunkten mit identischen Antennen durchgeführt. Dabei sind Abweichungen von 0.3 bis 0.5mm für den Bereich von 90° bis 10° Elevation aufgetreten. Unterhalb von 10° sind die Abweichun-



Abb. 5.3: Kalibrieraufbau des absoluten Feldverfahrens mit Roboter (aus: WÜBBENA et al. 2006).

⁴ Da die Kalibrierwerte unabhängig von einer Referenzantenne sind, hat sich der Begriff der absoluten Kalibrierung trotz fehlenden absoluten Bezuges durchgesetzt.

gen meist geringer als 1mm , wobei bei niedrigen Elevationen mitunter auch größerer Abweichungen auftreten, was auf die Empfindlichkeit der Antennen zurückgeführt wird. Ein Ergebnis einer solchen Testmessung ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Dort werden maximale Differenzen von etwa 2mm sichtbar.

In einer neueren Veröffentlichung (WÜBBENA et al. 2006) wurden Vergleiche zwischen den mittlerweile drei Kalibrierstandorten, die das Verfahren der absoluten Kalibrierung mit Roboter verwenden, publiziert. Die Ergebnisse eines solchen Vergleichs sind in Abb. 5.5 für L1 und L2 dargestellt, wobei eine hochwertige Ashtech Choke Ring Antenne (Typ: ASH700936D_M) verwendet wurde.

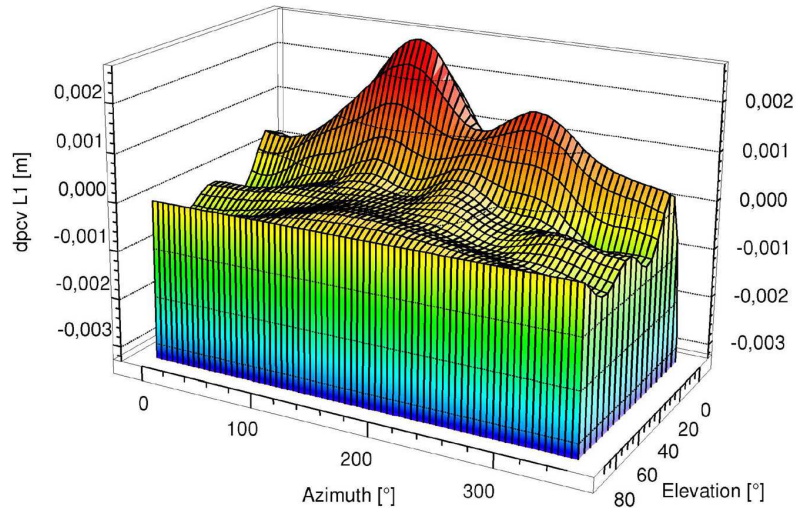


Abb. 5.4: Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen (aus: WÜBBENA et al. 2000).

Die Abweichungen zwischen den Kalibrierungen erreichen für L1 und L2 Werte von bis zu 1mm bei 0° Elevation. Bei höheren Elevationen sinken die Abweichungen insbesondere bei der L1-Frequenz sehr schnell (etwa ab 30°) auf vernachlässigbare Werte.

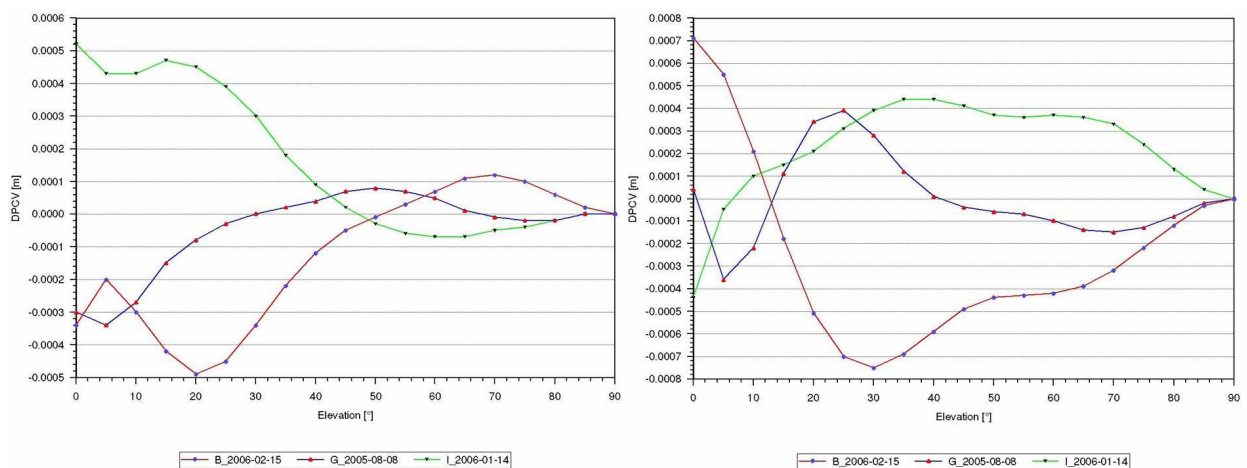


Abb. 5.5: Vergleich der Ergebnisse verschiedener Kalibriereinrichtungen (aus: WÜBBENA et al. 2006). Dargestellt sind die Ergebnisse für L1 (links) und L2 (rechts). Anhand der Legende können die Standorte (B=Berlin, G= Garbsen, I=Hannover) und das jeweilige Kalibrierdatum abgeleitet werden.

Anhand beider Abbildungen wird deutlich, dass es sich nicht um zufällige Abweichungen handelt. Benachbarte Messungen sind somit durch ähnliche systematische Messunsicherheiten gestört. Die Existenz weiterer Systematiken kann nicht ausgeschlossen werden, wenn diese in allen Lösungen vorhanden sind und somit bei der Differenzbildung nicht sichtbar werden. Solche systematischen Anteile sind hier nicht auszuschließen, da die Lösungen nicht als unabhängig angesehen werden können, auch wenn unterschiedliche Kalibrierungen verwendet wurden. Dieses generelle Problem verdeutlicht bereits die Problematik einer realistischen Genauigkeitsabschätzung und die große Bedeutung von Vergleichen zwischen unabhängigen Verfahren (Kammerkalibrierung vs. Feldkalibrierung). Das Prinzip der absoluten Kalibrierung im Laborverfahren wird im folgenden Kapitel erläutert.

6 Absolute GNSS-Antennenkalibrierung im Hochfrequenzlabor

Labormessungen zur Untersuchung von GPS-Antennen werden bereits seit den 1980er Jahren durchgeführt (z.B. SIMS 1985, TRANQUILLA und COLPITTS 1989, SCHUPLER und CLARK 1991, MEERTENS et al. 1996). Die Grundprinzipien der Antennenkalibrierung waren zu diesem Zeitpunkt bereits aus dem Bereich der Funk- und Radartechnik bekannt (siehe KRAUS 1950, HU 1961) und wurden u.a. im Bereich der Antennenentwicklung eingesetzt. Insbesondere die Forschergruppe um B.R. SCHUPLER hat an einer Optimierung des Kalibrierverfahrens unter Berücksichtigung der geodätischen Anforderungen gearbeitet (SCHUPLER und CLARK 1991, SCHUPLER 2001, SCHUPLER und CLARK 2001). Diese Arbeiten stellen gleichzeitig den aktuellen Stand der Forschung dar. Zudem wurden seit etwa 1995 auch an der Universität Bonn in Kooperation mit dem Max-Planck Institut für Radioastronomie Bonn und der Universität der Bundeswehr München erste Untersuchungen im Bereich der absoluten Antennenkalibrierung durchgeführt (s. BREUER et al. 1995, CAMPBELL et al. 2004, GÖRRES et al. 2006).

Trotz dieser langjährigen Forschungstätigkeiten konnten die in Kapitel 4 dargestellten Probleme (insbesondere die Nahfeldproblematik) bislang nicht vollständig gelöst werden. Werden Untersuchungen zur Nahfeldproblematik durchgeführt, so müssen sichtbare Effekte im Kontext der systematischen und zufälligen Messungsunsicherheiten des Kalibrierverfahrens betrachtet werden. Die Analyse des Budgets der Messungsunsicherheiten stellt somit zusammen mit Untersuchungen der Nahfeldproblematik den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. In Abschnitt 6.5 werden diese Aspekte etwas detaillierter erläutert. Im Folgenden wird zuvor das Grundprinzip des Laborverfahrens dargestellt.

6.1 Grundprinzip und Kalibriersetup der Laborkalibrierung

Kernaufgabe der Antennenkalibrierung ist die Bestimmung der Richtungsabhängigkeit der Phasenmessung. Zur Änderung der Einstrahlrichtung wird bei der Laborkalibrierung die Ausrichtung der zu testenden Antenne bezüglich einer festen Signalquelle variiert. Die resultierende Änderung der Einstrahlrichtung simuliert die Bewegung eines GNSS-Satelliten. Die Änderung der Einstrahlrichtung kann auch durch eine Bewegung des Senders realisiert werden. Hierzu ist jedoch ein sehr groß dimensioniertes halbkugelförmiges Positionierungssystem notwendig (Abb. 6.1).

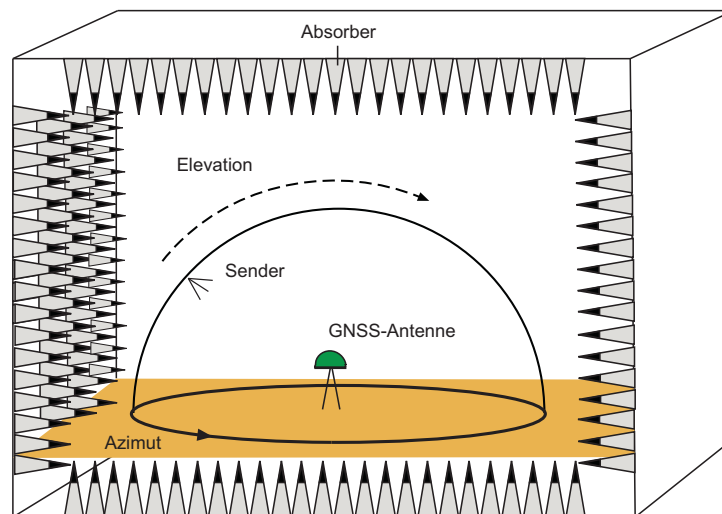


Abb. 6.1: Simulation der Satellitenbewegung durch Bewegung des Senders.

Eine solche Lösung ist aufgrund der benötigten Raummaße sowie der konstruktiven Herausforderung extrem aufwändig, wurde jedoch früher verwendet (z.B. HOLLIS et al. 1970). Allerdings treten bei dieser Realisierung einige messtechnische Nachteile auf (z.B. deutlich größere Kabellänge, stärkere Kabelbewegung, vertikaler Temperaturgradient). Zudem kann die Rotation der Testantenne um zwei Achsen (Elevation β und Azimut α) auch durch eine vergleichsweise einfache Drehapparatur realisiert werden (Prinzipskizze s. Abb. 6.7). Das zur Erfassung der resultierenden Phasenverschiebung benötigte Kalibriersetup besteht im Wesentlichen aus einem Netzwerkanalysator (NWA), der ortsfesten Sendeantenne an der einen Seite und der auf einem computergesteuerten Antennendrehstand befestigten Testantenne an der anderen Seite der Aufbau (Abb. 6.2). Der NWA dient zugleich als Signalgenerator für die GNSS-Trägerwellen (ohne Phasenmodulation) und als Empfangseinheit für die von der zu kalibrierenden Antenne empfangenen Signale. Da das vom NWA abgestrahlte Signal als konstant angesehen werden kann, werden richtungsabhängige Phasenänderungen vom NWA durch den Vergleich von Ausgangs- und Eingangssignal erfasst (vgl. Abschnitt 6.3). Die in Abb. 6.7 dargestellte 5- bzw. 12-Volt-Quelle dient zur Spannungsversorgung der GNSS-Antenne. Diese ist notwendig, da ansonsten der antenneninterne Verstärker nicht arbeiten würde. Für die Verbindung der HF-Komponenten wurden überwiegend Ecoflex® Kabel verwendet (vgl. Abschnitt 8.2). Der PC dient zur vollständigen Automation der Kalibrierung (Messwerterfassung und Antennendrehung). Als Sendeantenne kommt eine Helixantenne zum Einsatz (vgl. Abschnitte 7.4 und 9.3). Die derzeit verwendete Messkammer ist in Abschnitt 6.2 beschrieben.

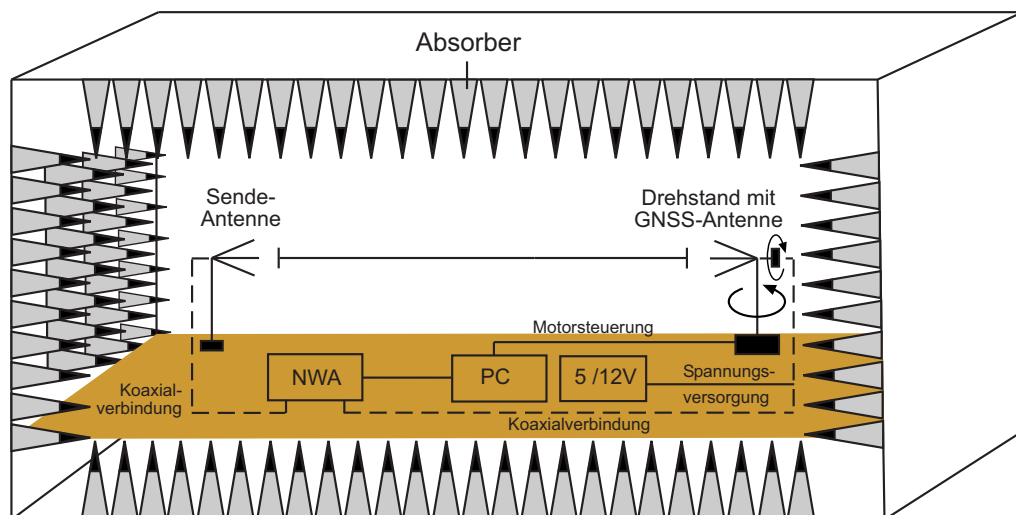


Abb. 6.2: Prinzipskizze einer Antennenmesskammer.

Zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten wird die Kalibrierung idealerweise in reflexionsarmen Räumen (auch echolose Räume oder Absorberräume genannt) durchgeführt. Diese Räume zeichnen sich durch eine an die verwendeten Frequenzen angepasste Absorberrückwand aus, die die Energie der elektromagnetischen Wellen in Wärmeenergie umwandelt. Das vorhandene Mehrwegfeld wird so auf ein Minimum reduziert und die erreichbare Phasenmessgenauigkeit gesteigert. Die Effektivität der Mehrwegeunterdrückung hängt insbesondere von der Absorbergröße und der Ausrichtung der Absorber zur Signalrichtung ab. Eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise und der Leistungsfähigkeit der Absorber findet sich in Abschnitt 7.6.

Als ein Nachteil der Antennenkalibrierung in Absorberräumen wurde früher häufig der enorme Kostenaufwand genannt, der aus der benötigten Absorberhalle und dem Messequipment resultierte. Heute werden Absorberhallen für viele Anwendungsbereiche benötigt. Insbesondere durch die Notwendigkeit von EMV-

Prüfungen (EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit), bei denen die Störemissionen und die Störfestigkeit elektronischer Bauteile geprüft wird, ist ein großer Markt entstanden, der zu einer deutlichen Verringerung der Kosten geführt hat. Diese Entwicklung war Voraussetzung dafür, dass vom Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn in Kooperation mit der Abteilung 7 - Geobasis.NRW - der Bezirksregierung Köln (ehemals Landesvermessungsamt NRW) in deren Räumen eine Antennenmesskammer eingerichtet werden konnte. Für die Konzeption der Messkammer waren zunächst Untersuchungen zur notwendigen Größe der Messkammer erforderlich, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 9.4). Die 2008 fertiggestellte Kalibriereinrichtung wird heute von der Universität Bonn für Forschungsarbeiten und von der Bezirksregierung für routinemäßige Kalibriermessungen verwendet.

6.2 Antennenmesskammer Bonn

Der Aufbau der Antennenmesskammer (AMK) stellt sicher einen Höhenpunkt der Arbeiten im Bereich der Antennenkalibrierung in Bonn dar. Durch die nun permanent verfügbare Kalibriereinrichtung sind hervorragende Voraussetzungen für zukünftige Untersuchungen geschaffen worden. In Zukunft können nun umfassende Untersuchungen bezüglich des Empfangsverhaltens von GNSS-Antennen durchgeführt werden. Die am IGG durchgeführten Forschungsarbeiten bezüglich des Kalibrierverfahrens selber sind hingegen - zumindest zu großen Teilen - bereits vor dem Aufbau der Antennenmesskammer abgeschlossen gewesen. Die aus diesen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse flossen bereits in die Konzeption der Antennenmesskammer ein.

Einen wesentlichen Punkt bei der Konzeption einer Antennenmesskammer stellt deren Dimensionierung dar. Im Allgemeinen führen große Hallenmaße zu einer guten Qualität (geringe Restreflektionen) der Messkammer, wobei die drei Seitenlängen aneinander anzupassen sind. Gleichzeitig sind jedoch entfernungsabhängige Einflüsse zu berücksichtigen (z.B. Temperatureinflüsse, s. Abschnitt 8.2), wodurch die maximale Länge begrenzt ist. Eine Mindestlänge wird hingegen durch die Fernfeldbedingung vorgegeben (siehe Abschnitt 9.4). Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass eine Vergrößerung der Teststrecke bei gleichbleibender Hallenhöhe und -breite zu einer Verschlechterung des Absorptionsverhaltens führt, da die Auftreffwinkel der Mikrowellen auf die Decken- und Bodenabsorber bei gleichbleibenden Raumhöhe spitzer werden, was zu stärkeren Reflexionen führt (s. Abschnitt 7.5).

In Abbildung 6.3 ist der Grundriss des in Bonn realisierten Konzeptes dargestellt. Neben den Hallenmaßen ist bei der Planung auch die Position der Testantenne (ruhige Zone) und des Senders, die Auswahl und Anordnung der Absorber sowie die Verwendung und Anordnung der begehbaren Absorber festzulegen. Die Auswahl und Anordnung der Absorber wurde ebenso wie deren Montage von der Fa. EMC-Technik (www.emc-technik.de) vorgenommen. Die Hallenmaße, die Positionierung der ruhigen Zone und die Anordnung der begehbaren Absorber konnten aufgrund der Erfahrungen aus Kalibrierungen in anderen Messkammern vorgegeben werden.

Im Allgemeinen wird die ruhige Zone vor der Stirnseite ohne Tür angeordnet, da die Türen häufig nicht ideal verkleidet werden können (Lücken in der Absorberauskleidung, kurze Absorber bei Schwingtüren). Im Falle der AMK Bonn wird jedoch anstelle einer normalen Tür eine auf einen Wagen montierte, mit Absorbieren bestückte Holzplatte zur Schließung der Türöffnung während der Kalibrierung verwendet. Durch diese Lösung kann eine nahezu ideale Auskleidung der Türöffnung erreicht werden. Durch die etwas untypische Anordnung der ruhigen Zone konnte die Anzahl der begehbaren Absorber, die ein etwas schlechteres Absorptionsverhalten haben, minimiert werden. Insgesamt konnten an einigen Stellen kleinere Optimierungen vorgenommen werden, die insbesondere dadurch möglich wurden, dass die Antennenmesskammer ausschließlich für die Kalibrierung von GNSS-Antennen genutzt wird.

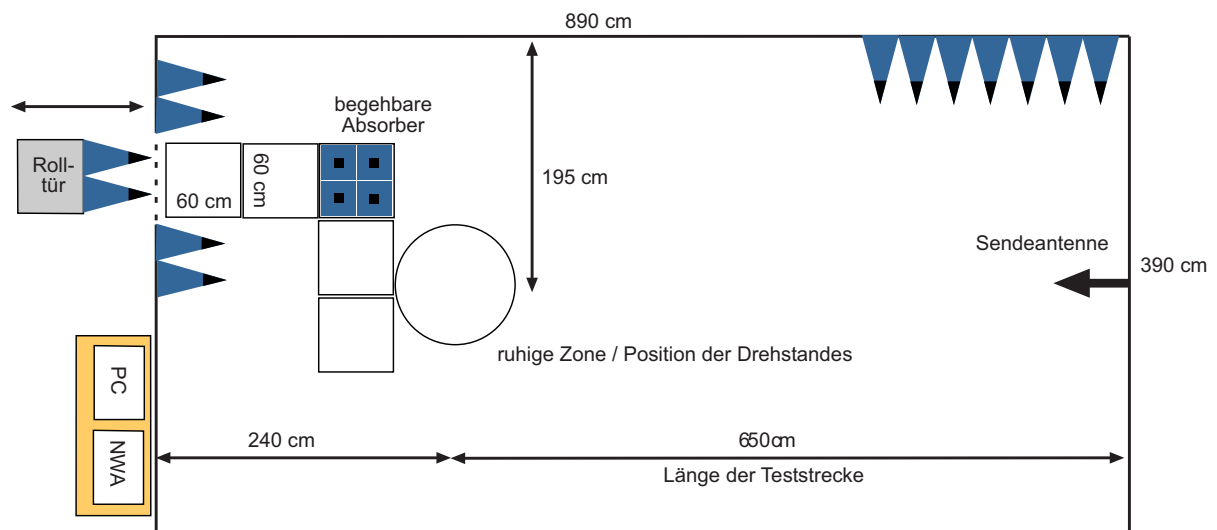


Abb. 6.3: Antennenmesskammer Bonn - Konzeption und Dimensionierung.

Abbildung 6.4 zeigt die im Oktober 2008 fertiggestellte Absorberkammer (ohne Antennendrehstand). Die roten Linien verdeutlichen die ungefähre Lage der Koaxialkabel. Die Kabel führen vom NWA (Vorraum) durch einen Durchlass in der Stirnseite zum Sender (rechtes Kabel) und von der ruhigen Zone zum NWA (linkes Kabel). Um temperaturabhängige Kabeleffekte zu reduzieren (s. Abschnitt 8.2), wurde die Kabellänge auf ein Minimum verkürzt und durch eine Verlegung der Kabel zwischen den Absorberelementen eine möglichst gute Isolierung angestrebt.

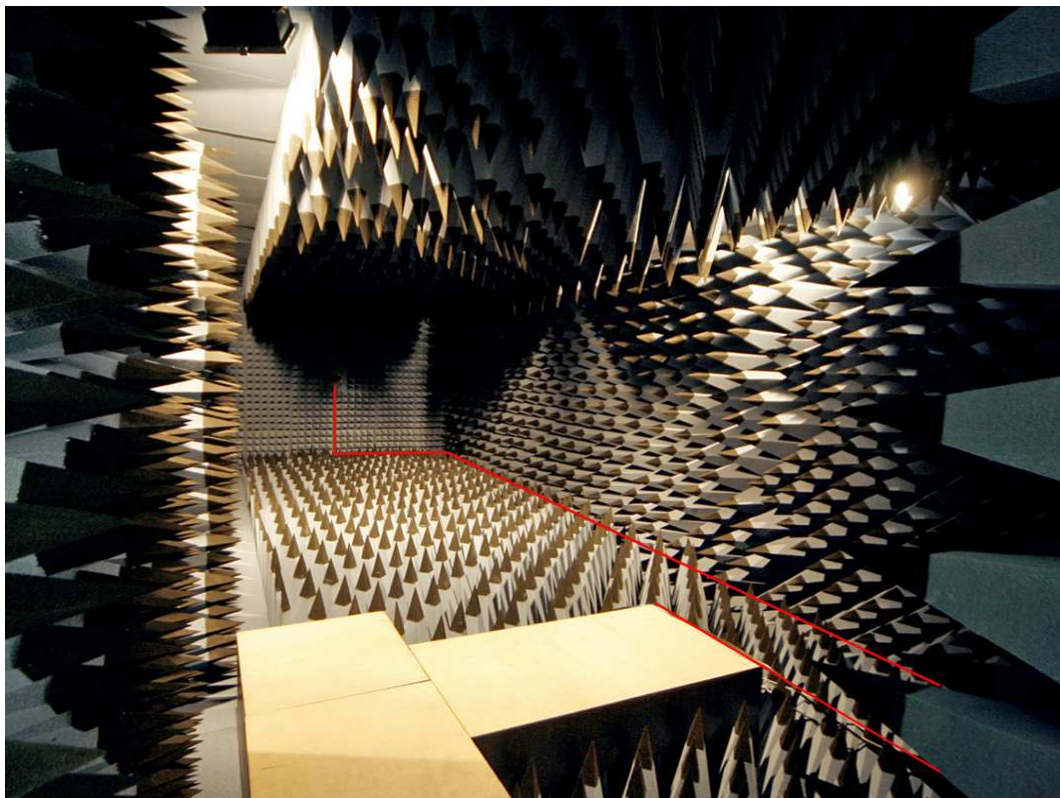


Abb. 6.4: Antennenmesskammer Bonn - Zustand nach Fertigstellung im Oktober 2008.

Das Messequipment (NWA, Drehstand, etc.) ist generell als transportable Messeinrichtung anzusehen und kann, wie in der Vergangenheit häufig geschehen, prinzipiell in jeder geeigneten Absorberhalle für GNSS-Antennenkalibrierungen verwendet werden, wobei dann eine Anpassung des Setups an die speziellen Anforderungen der GNSS-Antennenkalibrierung nur eingeschränkt möglich ist.

6.3 Messablauf

Zur Erzeugung eines HF-Signals (HF = Hochfrequenz) mit gewünschter Frequenz und vorgegebener Sendeleistung wird ein Netzwerkanalysator (hier: Agilent E5062A ENA) verwendet. Das erzeugte Signal wird über spezielle Koaxialkabel an den Sender geleitet und abgestrahlt. Dieses Signal wird von der Testantenne (AUT, antenna under test) empfangen und an den Netzwerkanalysator zurückgeleitet. Dort wird die Phasenverschiebung sowie das Verhältnis der Signalstärke von Sende- und Empfangssignal gemessen. Die gemessene Phasenverschiebung resultiert aus dem zurückgelegten Signalweg (Kabelweg, Freiraumausbreitung, innere Laufwege) sowie dem Einfluss von Sende- und Empfangsantenne.

Wird die AUT gedreht, so ändert sich der Einstrahlwinkel (α, β) des Testsignals. Die zu messende Phasenverschiebung resultiert unter der Annahme eines konstanten Signalweges aus dem Empfangsverhalten der AUT. Die Abtastung der Antennenhemisphäre wird derzeit in Schritten von 3.6° Elevation und $4.5^\circ/7.2^\circ$ Azimut durchgeführt, wobei auch negative Elevationen bis -7.2° berücksichtigt werden und einige Positionen zur Kontrolle mehrfach gemessen werden ($\Rightarrow$ ca. 2300 Positionen).

Zur Veranschaulichung des Ergebnisses einer solchen Kalibriermessung sind in den folgenden Abbildungen die gemessenen Phasenlagen am Beispiel einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne für die L1-Frequenz (1.57542 GHz ; Wellenlänge $\lambda \approx 19.05\text{ cm}$) dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit beschränkt sich Abbildung 6.5 auf die Darstellung der gemessenen Phasenlagen eines Elevationsscans (Veränderung der Elevation um jeweils 3.6° bei konstanter azimuthaler Ausrichtung).

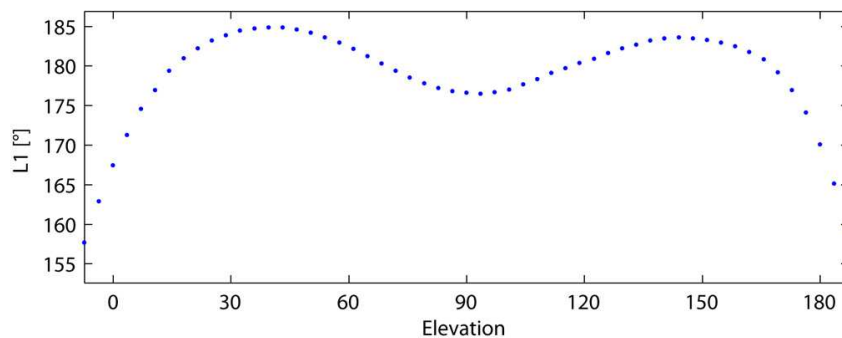


Abb. 6.5: L1-Messerwerte eines Elevationsscans (nicht geglättet) bei 0° Azimut ($1^\circ \approx 0.5\text{ mm}$).

Die Messergebnisse einer vollständigen Kalibrierung sind in Abbildung 6.6 als Polarkoordinaten dargestellt. Die Messwerte im Horizontbereich der Antenne werden durch den äußeren Rand des Antennenpatterns repräsentiert. Der Schnittpunkt der Elevationsscans entspricht dem Zenit der Antenne (Figurenmitte).

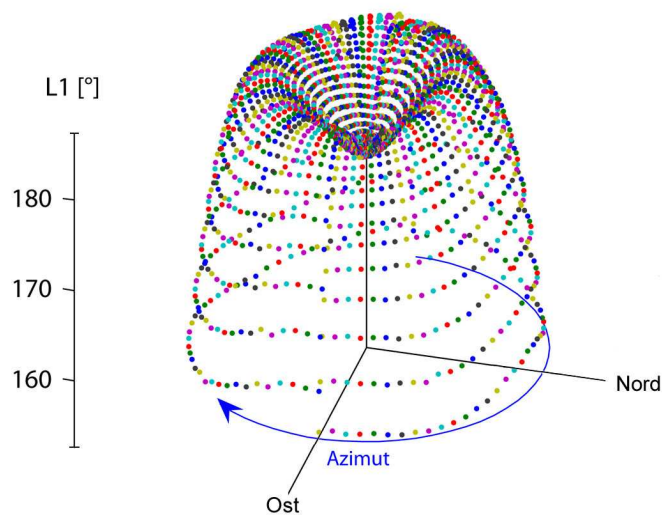


Abb. 6.6: Messergebnisse einer vollständigen Kalibrierung (nicht rechnerisch geglättet).

Bei beiden Grafiken handelt es sich um eine Visualisierung der Rohdaten, wobei in der unteren Abbildung aus Gründen einer besseren Darstellung der Phase-Wind-Up-Effekt (vgl. Abschnitt 7.3), der die Phasenänderung aufgrund der azimuthalen Drehung der Antenne beschreibt, eliminiert wurde. Eine nachträgliche rechnerische Glättung der Daten findet grundsätzlich nicht statt. Der glatte Verlauf der Messkurven weist bereits auf das sehr geringe Messrauschen hin, das in Kapitel 8 noch näher untersucht wird.

Die dargestellten Messungen repräsentieren die Änderung der Phasenlage in Abhängigkeit von der Einstrahlrichtung des Messsignals. Da von keiner Antennenposition das absolute Phasenniveau bekannt ist, lässt sich kein absoluter Bezug herstellen. Eine vollständige Abtastung der Antenne liefert als Konsequenz, wie dies auch beim absoluten Feldverfahren der Fall ist, eine relative Beschreibung der richtungsabhängigen Empfangseigenschaften der Antenne. Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, führt dies jedoch zu keiner Einschränkung bezüglich der Nutzbarkeit der Kalibrierergebnisse, da der Einfluss eines fehlenden Bezugs für alle Einstrahlrichtungen identisch ist. Die verschiedenen Varianten zur Festlegung des Phasenniveaus (anstelle eines absoluten Niveaus) werden in Abschnitt 6.4 erläutert, die Beschreibung des Vorgehens zur Umrechnung zwischen unterschiedlichen Festlegungen folgt in Anhang A.

Da heute mehrere GNSS-Systeme mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen zur Verfügung stehen, müssen auch bei der Kalibrierung verschiedene Frequenzen berücksichtigt werden. Derzeit wird die Kalibrierung in einem Frequenzband von 1.15GHz bis 1.65GHz durchgeführt, wobei je nach Anforderung und Fragestellung zwischen 201 und 1001 Frequenzen analysiert werden. Der so abgetastete Frequenzbereich ist in Abb. 12.1 dargestellt. Die gemessenen Frequenzen sind gleichabständig, so dass eine Abtastung in Schritten von 0.0025GHz bzw. 0.0005GHz resultiert. Die notwendigen Frequenzänderungen sind automatisiert und erhöhen die Kalibrierdauer nur minimal. Die Datenmenge steigert sich allerdings auf über 2 Millionen Phasenkorrekturwerte pro Kalibrierung. Eine Abtastung einzelner vorgegebener Frequenzen ist ebenfalls möglich, führt aber bei mehreren Frequenzen zu längeren Kalibrierzeiten (etwa Faktor 2). Voraussetzung für die effiziente Kalibrierung unterschiedlicher Frequenzen ist die Verwendung eines sehr breitbandigen Senders, da sonst mehrere Durchläufe mit verschiedenen Sendern notwendig wären. Auf die Eigenschaften des verwendeten Senders wird in Abschnitt 7.4 eingegangen. Die Kalibrierdauer liegt bei Standardkalibrierungen bei etwa 60 Minuten. Der Ablauf der Messung ist bis auf die Montage der Antenne vollständig automatisiert.

Bereits bei der Betrachtung des Aufbaus, des Messablaufs und der gezeigten Zwischenergebnisse werden folgende prinzipiellen Vorteile des Verfahrens ersichtlich:

- konstante Bedingungen,
- geringes Messrauschen,
- geringe Mehrwegeeinflüsse (aus dem Fernfeld),
- kurze Kalibrierzeiten und
- freie Frequenzwahl.

Insbesondere der letzte Punkt stellt gegenüber den Feldverfahren einen großen Vorteil dar. Während die Feldverfahren auf operable Systeme angewiesen sind, ist dies bei dem hier vorgestellten Verfahren nicht notwendig. So können heute bereits Frequenzen des zukünftigen Galileo-Systems berücksichtigt werden. Selbst bei der Einführung heute noch nicht bekannter Frequenzen können die mit dem Laborverfahren erfassten Kalibrierdaten neu prozessiert und entsprechende Korrekturdaten erzeugt werden. Dies ist insbesondere für GNSS-Permanentstationen wichtig, da so auf die Neukalibrierung aber vor allem auf eine Demontage von Antennen verzichtet werden kann.

Zudem ermöglichen die kurzen Kalibrierzeiten in Verbindung mit den konstanten Bedingungen die Durchführung von Untersuchungen (z.B. Nahfelduntersuchungen), die bislang nicht in dieser Komplexität möglich waren. So können effizient die Einflüsse verschiedener Dreifüße, Radome oder anderer Nahfeldkomponenten getestet werden (vgl. Kapitel 10).

6.4 Bestimmung der Modellparameter (PCO und PCV)

In Kapitel 2 wird der Zusammenhang zwischen den Antenneneigenschaften und der resultierenden Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Einstrahlrichtung des Signals erläutert. Die korrigierte Phasenlage im ARP kann durch

$$r_{ARP} = r + \mathbf{pco} \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV(\alpha, \beta) \quad (6.1)$$

ausgedrückt werden (= Gleichung 2.2). Diese Gleichung gilt, wenn sich der Antennenreferenzpunkt (ARP) im Rotationspunkt (POR, engl. point of rotation) der Dreheinrichtung befindet. Bei der Kalibrierung wird die Antenne allerdings so montiert, dass sich das mittlere Phasenzentrum E näherungsweise im POR befindet. Durch eine solche Anordnung kann die Änderung der Lage des mittleren Phasenzentrums im Raum während der Kalibrierung minimiert werden. Diese räumliche Einschränkung ist notwendig, wenn die Teststrecke (Entfernung Sender-Antenne) auf wenige Meter begrenzt werden soll, da mit abnehmender Länge der Teststrecke die Krümmung der an der Testantenne vorliegenden Wellenfront bzw. die Abweichung der tatsächlichen Wellenfront von einer gewünschten ebenen Wellenfront zunimmt (Abschnitt 9.4). Durch die Reduktion der Bewegung des Phasenzentrums wird der Einfluss der ortsabhängigen Phasenfront, der die gesuchte Antennencharakteristik überlagert, minimiert. Da die Lage des Phasenzentrums vor der Kalibrierung unbekannt ist, ist gegebenenfalls ein iteratives Vorgehen, bei dem das Phasenzentrum immer exakter in den POR geschoben wird, notwendig. Da die erste Kalibrierung in der Regel eine sehr gute Annäherung für die Position des mittleren Phasenzentrums liefert, sind selten mehr als zwei Kalibrierungen notwendig. Dieses Verfahren kann abgekürzt werden, wenn bereits Kalibrierungen für den jeweiligen Antennentyp vorliegen, da dann das Phasenzentrum eines Typmittels als Voreinstellung gewählt werden kann. Die aus der Lage des mittleren Phasenzentrums resultierenden geometrischen Zusammenhänge sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

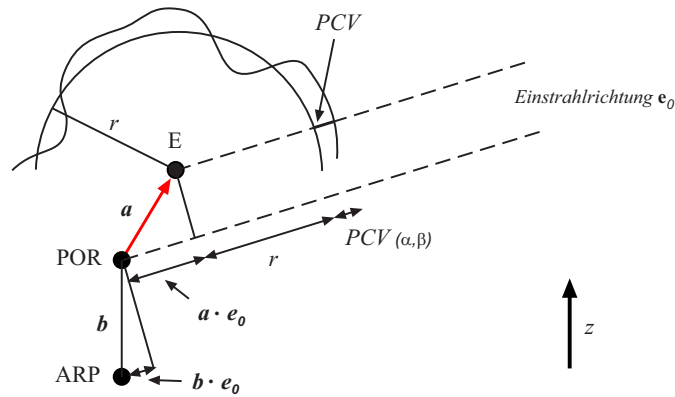


Abb. 6.7: Antennenmodell unter Berücksichtigung der Exzentrizität des ARP.

Aufgrund der Änderung des räumlichen Bezugs (ARP $\Rightarrow$ POR) muss das funktionale Modell geändert werden, so dass sich dieses entsprechend Gleichung 6.1 zu

$$r_{POR} = r + \mathbf{a} \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV(\alpha, \beta) \quad (6.2)$$

ergibt. Hierbei stellt $\mathbf{a}$ die Abweichung des POR (point of rotation) zum mittleren elektrischen Phasenzentrum E dar. Um den Bezug zum Antennenreferenzpunkt (ARP) herzustellen, muss der Verschiebevektor $\mathbf{b}$ zwischen ARP und Rotationsachse bestimmt werden. Bei der an der Universität Bonn eingesetzten Drehapparatur ist die Verschiebemöglichkeit der Antenne konstruktiv so eingeschränkt, dass die Anpassung des Phasenzentrums an den POR nur in z-Richtung der Antenne erfolgen kann. Auf die Verschiebung der Antenne in x- und y- Richtung kann verzichtet werden, da die Lageoffsets geodätischer Antennen meist sehr klein sind. Der zu erwartende Einfluss, der aus der gekrümmten Wellenfront resultiert, ist in Abb. 6.8 dargestellt und kann anhand von Gleichung 6.3 leicht abgeschätzt werden. Bei einem Messabstand von $6.5m$ (Abstand zwischen Sender und POR in der AMK Bonn) und einer maximal zulässigen Phasenabweichung von $\Delta r = 0.1mm$ resultiert eine maximal erlaubte seitliche Abweichung des Phasenzentrums vom POR von $35mm$.

$$\Delta r \approx \frac{\Delta x \Delta y^2}{2 \cdot s} \Leftrightarrow \Delta x \Delta y^2 = \Delta r \cdot 2 \cdot s \Leftrightarrow \Delta x \Delta y = 35mm \quad (6.3)$$

Da horizontale Lageoffsets von mehr als $1cm$ bei der Kalibrierung bislang nicht festgestellt wurden, liegen die resultierenden Phasenabweichung tatsächlich sogar unter $0.01mm$:

$$0.007mm = (0.01m)^2 / (2 \cdot 6.5m) \quad (6.4)$$

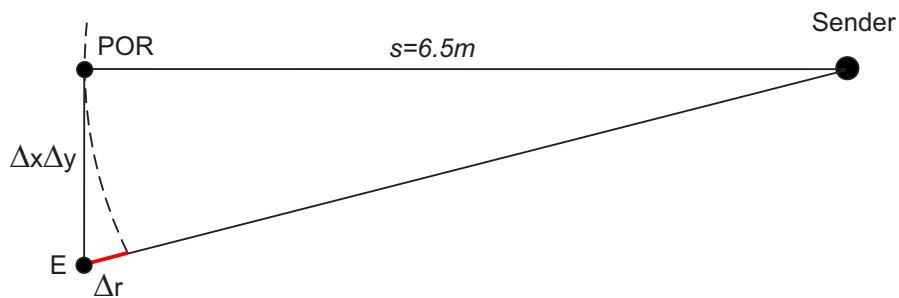


Abb. 6.8: Einfluss einer Exzentrizität der Lagekomponenten des PCOs auf die Phasenmessung.

Die bei der verwendeten Drehapparatur vorliegenden geometrischen Beziehungen sind in Abb. 6.9 dargestellt. Dabei ist die eingeschränkte Möglichkeit zur Verschiebung der Antenne berücksichtigt.

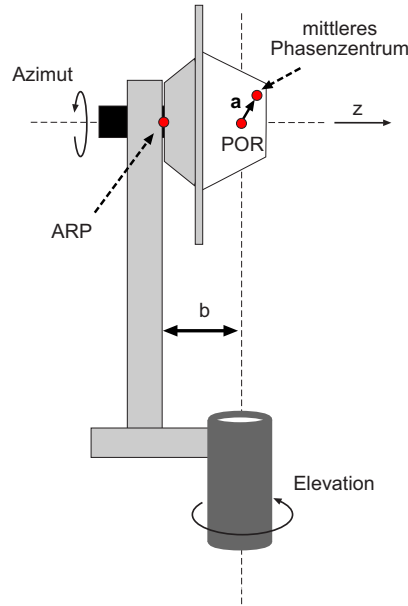


Abb. 6.9: Darstellung der geometrischen Beziehungen zwischen Antennenreferenzpunkt (ARP), Phasenzentrum und Rotationspunkt (POR) bei der eingesetzten Drehapparatur.

Das funktionale Modell des Antenneneinflusses ergibt sich zu

$$r_{ARP} = r_{POR} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_0 = r_{POR} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{e}_0 . \quad (6.5)$$

Bei der Einstellung und Messung des Verschiebebetrages werden derzeit zwei alternative Verfahren angewendet. Zum einen kann der obere Teil des Dreharms in z-Richtung verschoben werden. Die Erfassung des Verschiebebetrags erfolgt dann mit einem digitalen Messschieber. Beim alternativen Ansatz wird der Arm in einer festen Nullposition belassen. Für die Änderung der Antennenposition steht ein Satz hochpräzise gefertigter Distanzstücke bekannter Länge zur Verfügung, die zwischen Antenne und Dreharm montiert werden. Die Nullposition (Distanz ohne Distanzstücke) wurde einmalig mit einem Faro-Messarm⁵ sehr aufwändig eingemessen (Genauigkeit $\sigma < 0.05\text{mm}$). Dieser Ansatz ermöglicht eine höhere Genauigkeit, bietet aber nicht die Flexibilität des ersten Ansatzes. Die Messunsicherheit mit der die Bestimmung des Verschiebebetrages b behaftet ist, wirkt sich bei der Kalibrierung vollständig auf die z-Komponente der PCOs aus. Da die Abweichung für alle Frequenzen identisch ist, vergrößert sich dieser Einfluss bei der Bildung der Linearkombination L0 nicht (s. Gleichung 3.10). Bezüglich der Wirkung ist die Abweichung in b_z mit dem Einfluss der Messunsicherheit bei der Antennenhöhenbestimmung vergleichbar. Eine Verstärkung des Effekts tritt auch im Falle einer GPS-Auswertung mit Troposphärenschätzung nicht auf.

Im Grunde ist mit der Herstellung des Bezuges zum ARP die Antennencharakteristik vollständig beschrieben. Üblicherweise wird die Phasencharakteristik noch in die Anteile von PCO und PCV unterteilt, wobei eine

⁵ Messarme sind mehrgliedrige Gelenkarme, die 3D-Koordinaten mit hoher Präzision (0.1mm - 0.01mm) bestimmen können. Hierzu sind in den Gelenken zwischen den Armelementen Winkencoder montiert, so dass aufgrund bekannter Armlängen eine Koordinierung der Position eines am Messarm montierten Tasters möglich ist.

strenge Trennung der Einflüsse von PCO und PCV nicht möglich ist. Ein Weg zur Festlegung des Phasenzentrums liegt in der Minimierung der Quadratsumme der Phasenzentrumsvariationen. Dies bedeutet, dass der PCO als räumlicher Mittelpunkt des Antennenpatterns geschätzt wird. Das funktionale Modell ist dabei um das Phasenreststück r zu ergänzen. Der Parameter r kann als für alle Einstrahlrichtungen konstantes Phasenreststück betrachtet werden. Neben der unbekannten Wegstrecke des Signals enthält r somit auch das absolute Niveau des Antennenpatterns (s. Abschnitt 6.3). Da der fehlende absolute Bezug aufgrund der Bildung von Doppeldifferenzen keinen Einfluss auf die relative Positionsbestimmung hat (s. Abschnitt 5.3), ist auch r frei wählbar, so dass auch die Genauigkeit des Schätzwertes für r keine Relevanz für die Qualität der Kalibrierung hat. Das vollständige funktionale Modell ergibt sich zu

$$l_{\text{gemessen}}(\alpha, \beta) = \mathbf{pco} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) \\ \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) \\ \sin(\beta) \end{pmatrix} + r, \quad (6.6)$$

wobei l die vom Netzwerkanalysator erfasste Beobachtung ist. Die zugehörige Einstrahlrichtung wird durch den Azimut α und die Elevation β beschrieben. Die PCV entsprechen bei diesem Ansatz den Residuen der Parameterschätzung (CAMPBELL et al. 2004).

Eine andere, gleichwertige Möglichkeit zur Festlegung des PCOs, die unter anderem von Geo++[®] beim absoluten Feldverfahren angewendet wird, besteht darin, den Phasenzentrumskorrekturwert im Zenit Null zu setzen. Durch diese Festlegung wird eine vom Verfahren und der Messpunktdichte unabhängige Festlegung erreicht. Bei der Parameterschätzung kann diese Restriktion durch eine sehr hohe Gewichtung des Phasenkorrekturwertes in Zenitrichtung erreicht werden. Dies entspricht mathematisch nicht exakt einer vermittelnden Ausgleichung mit zusätzlicher Restriktion, führt aber in der Anwendung bis auf Rundungsunterschiede zum gleichen Ergebnis.

Der Methode zur Festlegung des PCOs sollte keine zu große Bedeutung zukommen, da stets die Summe aus PCO und PCV betrachtet werden muss. Beim Vergleich von Kalibrierergebnissen treten jedoch häufig Fehlinterpretationen auf, da teilweise fälschlicherweise nur die PCOs isoliert betrachtet werden. Die Unterschiede aus den verschiedenen Methoden der Festlegung können jedoch beliebig groß werden. Dies gilt sowohl für die Höhen- als auch für die Lagekomponenten.

Da bei der Kalibrierung sämtliche Messunsicherheiten als Antennencharakteristik interpretiert werden und sich letztendlich in den PCVs widerspiegeln, liegt ein Fokus dieser Arbeit auf der Analyse und der Beurteilung der Messungsunsicherheiten. Die Kernaufgaben dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel aufgeführt.

6.5 Kernaufgaben dieser Arbeit

Das Laborverfahren zur Kalibrierung geodätischer Antennen wird bereits seit den 1980er Jahren entwickelt und eingesetzt. Das prinzipielle Vorgehen ist in der Fachliteratur gut erläutert. An der Universität Bonn wurden die ersten Versuche zur Kalibrierung von GNSS-Antennen im Hochfrequenzlabor durch Prof. Campbell (Universität Bonn) in Kooperation mit Prof. Becker (TU Darmstadt und zuvor Universität der Bundeswehr München) initiiert und durchgeführt (s. BREUER et al. 1995, CAMPBELL et al. 2004, GÖRRES et al. 2006).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Kalibrierverfahren zunächst vollständig automatisiert und verschiedene Testkampagnen in Absorberhallen der Bundeswehr (WTD81: Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik, Greding) und der TU Darmstadt (Institut f. Hochfrequenztechnik) durchgeführt. Die Entwicklung des automatisierten Antennendrehstands ist in dieser Zeit in mehreren Stufen

vollzogen worden. Basierend auf diesen ersten Erfahrungen wurde die AMK Bonn konzipiert und aufgebaut. Neben diesen eher technischen Aspekten lassen sich als Forschungsarbeiten und somit als Kernaufgaben dieser Arbeit folgende Punkte hervorheben:

- Analyse der systematischen und zufälligen Kalibrierunsicherheiten
- Reduktion systematischer Messunsicherheiten
- Validierung der Kalibrierergebnisse
- Anpassung des Kalibrierverfahrens an neue Anforderungen (z.B. Frequenz-, Signalstärke- und Nahfelduntersuchungen)

Diese Punkte werden in dieser Arbeit ausführlich behandelt. Bevor jedoch auf diese Fragestellungen eingegangen werden kann, erfolgt im nächsten Kapitel eine kurze Einführung in die Grundlagen der Elektrodynamik. Die geschilderten Grundlagen sind u.a. für das Verständnis der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen, deren Wechselwirkung mit anderen Körpern und für die Auswahl geeigneter Sendeantennen hilfreich.

7 Elektrodynamische Aspekte für die GNSS-Antennenkalibrierung

Für das Verständnis der Antennenproblematik, des Verfahrens der absoluten Kammerkalibrierung, der Funktionsweise des Senders und der Mikrowellenabsorber sowie der in dieser Arbeit auch diskutierten Mehrwege- und Nahfeldeffekte sind einige Grundlagen aus dem Bereich der Elektrodynamik notwendig. Im Folgenden werden die notwendigen Zusammenhänge kurz dargestellt, wobei auf eine mathematische Beschreibung der Physik weitestgehend verzichtet werden kann.

7.1 Das elektromagnetische Feld

Elektrostatistisches Feld: Die Elektrostatik - ein Teilgebiet der Elektrodynamik - befasst sich mit ruhenden Ladungen, Ladungsverteilungen und den resultierenden elektrischen Feldern (s. z.B. JACKSON 1983). Die Kräfte, die zwischen zwei relativ zueinander ruhenden, verschieden geladenen Körpern wirken, können durch das COULOMB'sche Gesetz beschrieben werden. Danach baut sich zwischen zwei elektrisch verschieden geladenen Körpern stets ein elektrisches Feld auf. Die Stärke dieses elektrischen Feldes $\mathbf{E}$ hängt von dem Abstand und dem Spannungsunterschied zwischen den Körpern ab. Findet keine Ladungsänderung statt, so handelt es sich um ein elektrostatisches Feld. Zur Beschreibung des elektrischen Feldes nach Richtung und Stärke werden meist elektrische Feldlinien verwendet. Abbildung 7.1 (links) zeigt ein solches Feld am Beispiel eines Plattenkondensators.

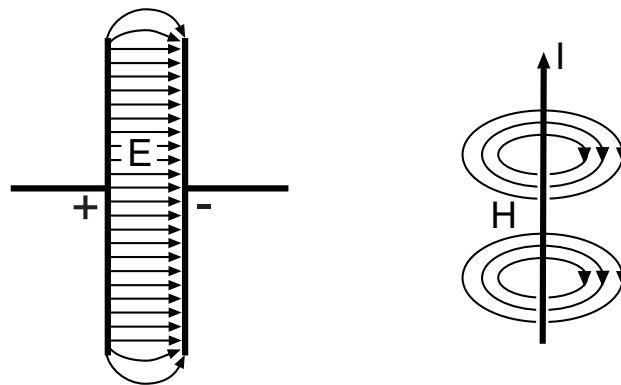


Abb. 7.1: Kondensator und stromdurchflossener gerader Leiter.

Magnetisches Feld und Ampère'sches Durchflutungsgesetz: Ein magnetisches Feld kann durch bewegte elektrische Ladungen verursacht werden. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um einen geraden stromdurchflossenen Leiter. Die magnetischen Feldlinien bilden sich dann als geschlossene konzentrische Kreise (Wirbel) um den Leiter (s. Abb. 7.1 rechts). Das daraus resultierende magnetische Feld ist quellenfrei, also frei von magnetischen Ladungen. Die magnetische Feldstärke $\mathbf{H}$ kann für konstante Ströme durch das AMPÈRE'sche Durchflutungsgesetz beschrieben werden.

JAMES CLERK MAXWELL erkannte aufgrund theoretischer Überlegungen, dass bei zeitlich veränderlichen Vorgängen der im AMPÈRE'sche Gesetz berücksichtigte Leitungsstrom um einen von MAXWELL als Verschiebestrom bezeichneten Anteil ergänzt werden muss. Der Verschiebestrom ist, anders als der Leitungsstrom, nicht an die Existenz eines elektrischen Leiters bzw. die Existenz elektrischer Ladungsträger gebunden und proportional zur Änderung des elektrischen Flusses. Ebenso wie bewegte elektrische Ladungen ein Magnetfeld erzeugen können, erzeugt auch der Verschiebestrom ein Magnetfeld (s. JACKSON 1983, SCHRÖDER 1968).

Das Phänomen des Verschiebestroms und dessen Wirkung auf das magnetische Feld sind Grundvoraussetzungen für die Antennentechnik, da ohne den Verschiebestrom keine leitungsungebundene Ausbreitung elektromagnetischer Wellen möglich wäre.

Elektromagnetische Induktion: Die elektromagnetische Induktion wurde von MICHAEL FARADAY entdeckt und mathematisch beschrieben. Als elektromagnetische Induktion wird die Erzeugung einer elektrischen Spannung entlang eines Leiters bzw. das Entstehen eines elektrischen Stroms im Fall geschlossener Kreise infolge einer Änderung des magnetischen Flusses bezeichnet.

Aus den bisherigen Überlegungen ergibt sich, dass zwischen elektrischen und magnetischen Feldern im nicht statischen Fall Wechselwirkungen auftreten. Während ein sich zeitlich ändernder magnetischer Fluss ein elektrisches Feld erzeugt, wird durch Änderungen im elektrischen Feld ein Magnetfeld hervorgerufen.

Die erläuterten Zusammenhänge werden durch die MAXWELLSchen Gesetze

1. Jedes zeitlich veränderliche elektrische Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld.
2. Jedes zeitlich veränderliche magnetische Feld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld.
3. Elektrische Ladungen sind Quellen elektrischer Felder.
4. Das magnetische Feld ist quellenfrei, d.h. es gibt keine magnetischen Ladungen. Zudem sind magnetische Felder stets Wirbelfelder.

zusammengefasst und durch die MAXWELLSchen Gleichungen auch quantitativ beschrieben.

Ausgehend von den MAXWELLSchen Gleichungen, die hier nicht im Einzelnen dargestellt werden, kann die **elektromagnetische Leistungsdichte $\mathbf{S}$** eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe des Kreuzprodukts

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (7.1)$$

berechnet werden, wobei $\mathbf{S}$ ein Maß für den Energietransport darstellt. Die obige Formulierung wird dem Physiker JOHN HENRY POYNTING, einem Schüler MAXWELLS, zugeschrieben. $\mathbf{S}$, auch als POYNTINGschen Vektor bezeichnet, beschreibt die wirkende Leistung pro Flächeneinheit (W/m^2) und steht senkrecht zu den Feldstärkevektoren $\mathbf{E}$ und $\mathbf{H}$ (z.B. SCHRÖDER 1968).

7.2 Wellenablösung am Beispiel eines Halbwellen-Dipols

Die von MAXWELL beschriebenen physikalischen Zusammenhänge sind Voraussetzung für die Erzeugung und die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Ausgehend von MAXWELLS Erkenntnissen wird im Folgenden die Erzeugung elektromagnetischer Strahlung am Beispiel des $\lambda/2$ -Dipols erläutert.

Ein geschlossener Schwingkreis (Abb. 7.2, a) besteht aus einem Kondensator und einer Spule. Wenn der Kondensator geladen ist, liegt maximale Spannung vor und die Energie ist im elektrischen Feld des Kondensators gespeichert. Da es sich um einen geschlossenen Stromkreis handelt, entlädt sich der Kondensator, das elektrische Feld verschwindet. Durch die Ladungsbewegung über die Spule wird um die Spule herum ein Magnetfeld erzeugt. Nachdem der Kondensator vollständig entladen ist, bricht aufgrund der nun nicht mehr stattfindenden Ladungsverschiebung das Magnetfeld zusammen. Durch die Änderung des Magnetfeldes finden nun als Folge der Induktion erneut Ladungsverschiebungen im Leiter statt, so dass sich der Kondensator nun mit umgekehrter Ladungsverteilung wieder auflädt. Der Vorgang beginnt nun in umgekehrter Richtung von neuem (ZELLER und FRANKE 1977).

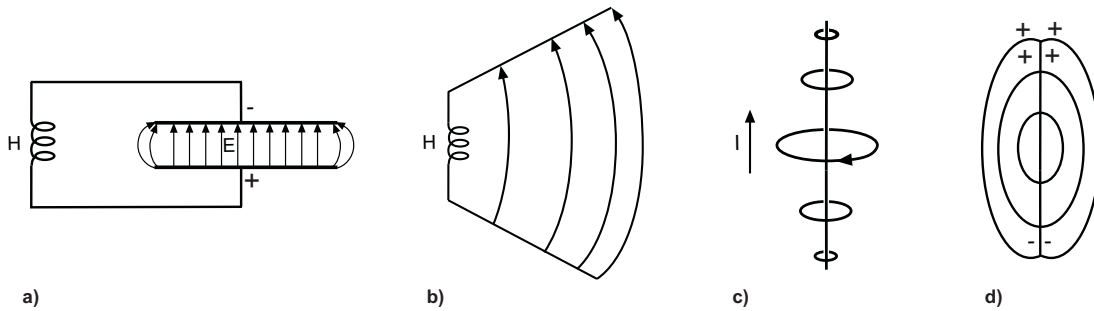


Abb. 7.2: Schwingkreis: Aufbau und Funktionsprinzip (nach SCHRÖDER 1968).

Wird der Schwingkreis aufgebogen (ähnlich Abb. 7.2b) oder durch Weglassen von Kondensator und Spule auf einen langen Leiter reduziert (Abb. 7.2c und 7.2d), so bleiben dennoch die Eigenschaften eines Schwingkreises mit dem Prinzip der wechselseitigen Erzeugung von magnetischen und elektrischen Feldern erhalten. Allerdings sind die Felder nicht an einzelnen Orten bzw. Bauteilen konzentriert. Statt in eng begrenzten Räumen (Spule, Kondensator) breiten sich bei solchen „offenen Schwingkreisen“ die elektrischen und magnetischen Feldlinien entlang der gesamten Leitung als Streufeldlinien auch in weite Teile des Außenraums aus.

Ebenso wie im geschlossenen Raum treten auch im offenen Schwingkreis die elektrischen und magnetischen Felder nicht gleichzeitig, sondern um eine Viertelperiode versetzt auf. Die beiden rechten Abbildungen in Abb. 7.2 zeigen den Leiter (Dipol) im Falle maximalen Stroms (7.2c) und eine viertel Periode später im Falle maximaler Spannung (7.2d). Es wird deutlich, dass die Feldlinien senkrecht aufeinander stehen. Somit ist neben der zeitlichen Verschiebung auch eine räumliche Verschiebung von 90° gegeben. Die Periodendauer hängt von der Länge des Dipols und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Elektronen im Dipol ab. Letztere ist abhängig von der relativen Permeabilität μ_r und der relativen Permittivität⁶ ϵ_r und lässt sich durch

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad (7.2)$$

berechnen, wobei c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist (s. SCHRÖDER 1968). Aufgrund der Leitungsverluste kommt der Schwingkreis in der praktischen Umsetzung nach wenigen Zyklen zum Erliegen. Um den Schwingkreis aufrecht zu halten, muss eine Wechselspannungsquelle in den Schwingkreis eingefügt werden, wobei die Frequenzen von Schwingkreis und Spannungsquelle aneinander anzupassen sind.

Nach der bisherigen Betrachtung würde keine Abstrahlung von Energie erfolgen. Feldlinien würden sich nur im sogenannten Nahfeld der Antenne nachweisen lassen. Es ist nur die sogenannte Blindenergie vorhanden, Wirk- oder Strahlungsenergie existiert keine. Dies wird auch anhand Gleichung 7.1 sichtbar. Das Produkt der Feldstärken ist im beschriebenen Fall aufgrund der Phasenverschiebung zwischen elektrischem und magnetischem Feld stets Null. Bei den bisherigen Betrachtungen wurde jedoch der durch MAXWELL entdeckte Verschiebestrom vernachlässigt.

Nach der Idee MAXWELLS entsteht aufgrund des Verschiebestroms, der auf den „Außenbahnen“ des elektrischen Feldes „fließt“, ein magnetisches Feld (Abb. 7.3a). Dieses Feld erzeugt wiederum ein elektrisches Feld. Aus diesen Wechselwirkungen entsteht ein fortlaufender Prozess (Abb. 7.3b), der eine Ausbreitung des Feldes bis ins Unendliche ermöglicht, wobei die elektronische Leistungsdichte (Gleichung 7.1) mit der Entfernung zum Sender abnimmt.

⁶ früher häufig als Dielektrizitätszahl bezeichnet

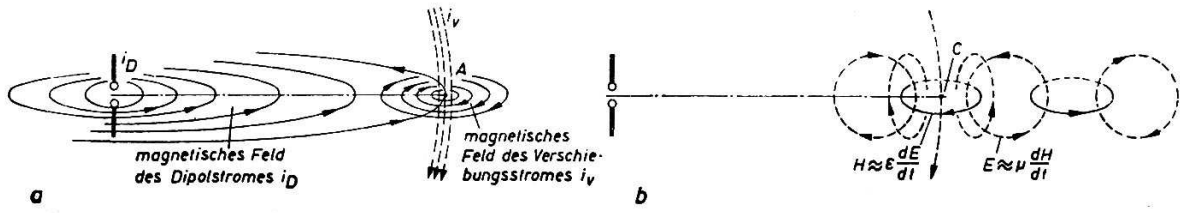


Abb. 7.3: Mitwirkung des Verschiebestromes am Aufbau des magnetischen Feldes (a) sowie Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes als Folge der Wechselwirkung zw. magnetischem und elektrischem Fluss (b), (SCHRÖDER 1968, aus Darstellungsgründen leicht überarbeitet).

Die Stärke des durch den Verschiebestrom verursachten elektromagnetischen Feldes hängt von der Stärke des Verschiebestroms, der im Falle des Dipols durch

$$I = f \cdot C \cdot U \quad (7.3)$$

gegeben ist, ab. Der Verschiebestrom ist von der Frequenz f abhängig und um so größer, je höher die Spannung U und die Kapazität C zwischen den Dipolstäben ist (siehe SCHRÖDER 1968).

Diese dargestellten Zusammenhänge sind Voraussetzung für die Abstrahlung elektromagnetischer Energie. Basierend auf der dargestellten Funktionsweise des Dipols wird im folgenden Abschnitt die Erzeugung polarisierter Signale erläutert.

7.3 Polarisation elektromagnetischer Wellen

Als Polarisation eines elektromagnetischen Signals wird die Ausrichtung des elektrischen Feldstärkevektors bezeichnet. Bei einer *linearen Polarisation* schwingt dieser in einer Ebene. Die Orientierung des Vektors bleibt gleich, während sich der Betrag periodisch ändert. Eine solche lineare Polarisation, die z.B. durch einen Dipol (Abschnitt 7.2) erzeugt wird, ist schematisch in Abb. 7.4a dargestellt. Der Feldstärkevektor schwingt in der y-z-Ebene, wobei y die Polarisationsrichtung und z die Ausbreitungsrichtung ist.

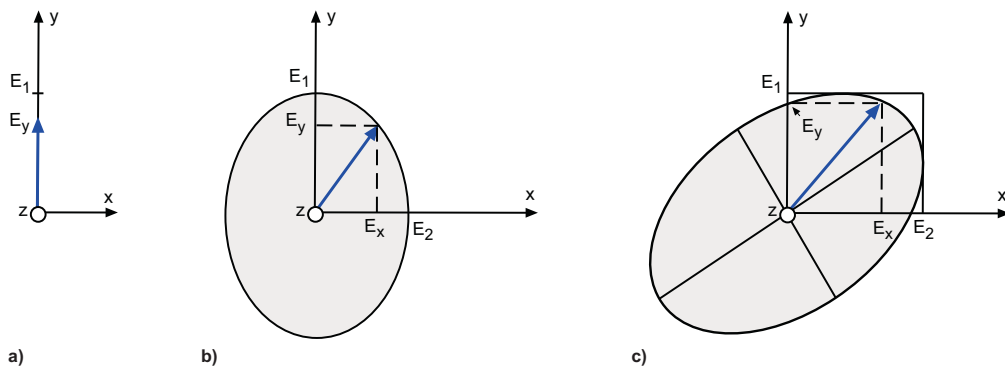


Abb. 7.4: Polarisation elektromagnetischer Wellen (nach KRAUS u. MARHEFKA 2003).

Die zeitliche Variation der Amplitude E_y kann in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω , der Zeit t und der maximalen Amplitude E_1 durch

$$E_y(t) = E_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (7.4)$$

beschrieben werden. Wird in die x-z-Ebene, z.B. durch die Verwendung eines zweiten Dipols, ein weiteres linear polarisiertes Signal hinzugefügt, so kann diese entsprechend durch

$$E_x(t) = E_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (7.5)$$

beschrieben werden, wobei δ die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen E_x und E_y darstellt. Für die Summe der beiden Feldanteile gilt

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{y}_0 \cdot E_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + \mathbf{x}_0 \cdot E_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (7.6)$$

Das Ergebnis entspricht allgemein einer elliptischen Polarisierung. Liegt keine Phasenverschiebung vor ($\delta = 0$), so beschreibt Gleichung 7.6 eine linear polarisierte Welle. Bei einer Phasenverschiebung von $\delta = \pm\pi/2$ und identischen Amplituden $E_1 = E_2$ ergibt sich als zweiter Extremfall eine zirkuläre Polarisierung (Abb. 7.5).

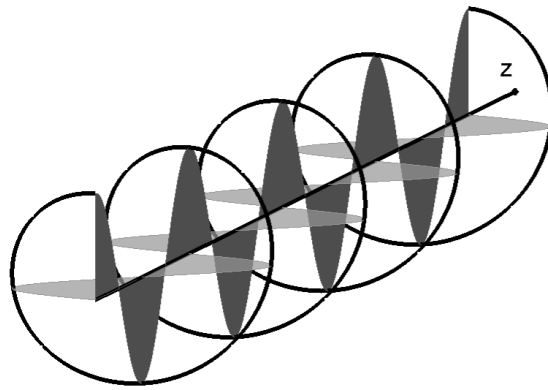


Abb. 7.5: Erzeugung einer zirkulären Polarisation durch Addition zweier linear polarisierter Signale (Eigene Berechnung: Signale mit identischer Amplitude und einer Phasenverschiebung von $\delta = \pm\pi/2$).

Entlang der Ausbreitungsachse (z-Achse) ist der Betrag des Feldstärkevektors konstant ($E = E_1 = E_2$) während der Feldstärkevektor um diese rotiert. Eine Drehung im Uhrzeigersinn (aus Sicht des Senders) wird als RHCP-Signal bezeichnet (RHCP: right hand circular polarized) und resultiert aus einer Phasenverschiebung von $\delta = -\pi/2$. Entsprechend ergibt sich bei $\delta = +\pi/2$ ein linkspolarisiertes Signal (LHCP) (KRAUS 1947; Festlegung entspricht IEEE-Definition).⁷

Im Vergleich zu einer linearen Polarisation zeichnet sich die zirkuläre Polarisation durch eine höhere Störfestigkeit (z.B. gegenüber Ionosphäreinflüssen) aus, weshalb sich die zirkuläre Polarisation für viele Satelliten-Anwendungen besonders eignet (DAVIES 1990) und bei den derzeit verfügbaren GNSS-Systemen auch zur Anwendung kommt. Ein weiterer Vorteil ist, dass aufgrund der zweiten Polarisationssebene bei der Anwendung auf eine azimutale Ausrichtung der Empfangs- und Sendeantennen verzichtet werden kann.

Zur Erzeugung eines zirkulären Signals können, entsprechend der obigen Darstellung, zwei linear polarisierte Dipolsignale gleicher Amplitude verwendet werden (Kreuzdipol). Die Phasenverschiebung kann durch eine räumliche $\lambda/4$ -Verschiebung eines Dipols in Strahlrichtung oder durch eine phasenverschobene Einspeisung realisiert werden. Letztere kann z.B. durch ein zusätzliches $\lambda/4$ langes Leitungselement erreicht werden.

⁷ Die Drehrichtung von RHCP und LHCP ist nicht einheitlich definiert, da je nach Fachgebiet die Rotation aus Richtung der Strahlquelle oder aus Richtung des Empfängers betrachtet wird.

Sind die Amplituden nicht identisch, resultiert eine elliptische Polarisation, wobei die Halbachsen der Ellipse in Richtung der beiden Feldvektoren liegen (Abb. 7.4b). Weicht die Phasenverschiebung von $\delta = \pi/2$ ab, so resultiert daraus ebenfalls eine elliptische Polarisation, wobei die Orientierung der Ellipse von der Phasenverschiebung abhängig ist (Abb. 7.4c).

Die genannten Möglichkeiten zur Erzeugung der Phasenverschiebung sind von der Wellenlänge und somit von der Frequenz abhängig. Eine zirkulare Polarisation kann somit streng nur für exakt eine Frequenz erreicht werden. Kreuzdipole sind somit konstruktionsbedingt extrem schmalbandig. Dies würde bei der Antennenkalibrierung bedeuten, dass für unterschiedliche Frequenzen (bspw. L1 und L2) unterschiedliche Sender eingesetzt werden müssten. Um dies zu vermeiden, werden bei der Kalibrierung Helixantennen eingesetzt, die sich u.a. durch ein besonders breitbandiges Abstrahlverhalten auszeichnen (Abschnitt 7.4).

Bei zirkular oder elliptisch polarisierten Signalen ist bei Rotationen von Sender oder Empfänger der sogenannten *phase-wind-up* Effekt zu berücksichtigen. Die Rotation einer Antenne um die Ausbreitungsachse führt zu einer Veränderung der Phasenlage in der Größenordnung des Rotationswinkels, da sich durch die Drehung der Antenne auch das „antennenfeste“ elektromagnetische Feld dreht. Eine mathematische Darstellung findet sich u.a. in WU et al. 1993. Im Falle der Antennenkalibrierung ist dieser Effekt zu berücksichtigen, wenn die Testantenne zur Bestimmung der azimutalen Empfangseigenschaften gedreht wird.

7.4 Die Helixantenne

Helixantennen, die auch bei den GPS-Block-II Satelliten eingesetzt wurden (siehe Abb. 7.6), zeichnen sich durch eine zirkulare Polarisation, eine hohe Breitbandigkeit und eine gute Richtcharakteristik aus, weshalb sie sich auch bei der Antennenkalibrierung sehr gut als Sender eignen.

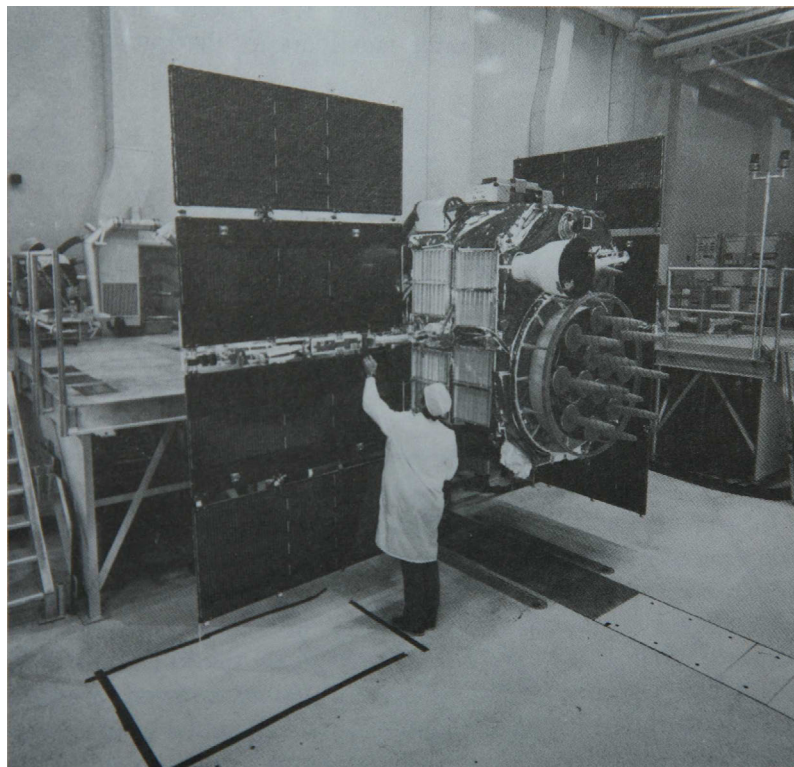


Abb. 7.6: Block II GPS-Satellit mit Helixantennen (Foto: LEICK 1995).

Die wesentlichen Eigenschaften von Helixantennen, die auch als Wendel- oder Spiralantennen bezeichnet werden, sind Gegenstand dieses Kapitels. JOHN D. KRAUS, der als Erfinder der Helixantenne angesehen werden kann, hat diese Antennenform bereits 1946 entwickelt und 1947 erstmals darüber publiziert (KRAUS 1947). Die theoretischen Überlegungen, die im Folgenden dargestellt sind, werden ausführlich in (KRAUS u. MARHEFKA 2003) erläutert.

Helixantennen bestehen im Wesentlichen aus einem zylinderförmig aufgewickelten dünnen Leiter, wobei aus Stabilitätsgründen häufig ein Kunststoffzylinder als Träger verwendet wird. Abbildung 7.7 zeigt eine Prinzipskizze sowie ein Foto einer Helixantenne. Die abgebildete Antenne wurde von RUDOLF WOHLLEBEN (ehemals Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn) speziell für die Antennenkalibrierung konzipiert.



Abb. 7.7: Prinzipskizze (KRAUS u. MARHEFKA 2003) und Abbild einer Helixantenne.

Die Geometrie der Antenne sowie die Zusammenhänge zwischen Steigung, Durchmesser, Wicklungsabstand und Wicklungslänge können, wie in Abb. 7.8 dargestellt, beschrieben werden.

D = Durchmesser der Antenne
 $C = D \cdot \pi$ = Umfang der Antenne
 S = Abstand (spacing) zwischen den Wicklungen
 α = Steigungswinkel = $\arctan S/\pi D$
 L = Länge einer Wicklung
 n = Anzahl (number) der Wicklungen
 A = Achslänge
 d = Durchmesser des Leiters

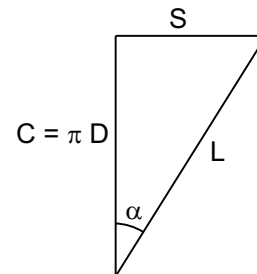


Abb. 7.8: Wicklungsgeometrie einer Helix (KRAUS u. MARHEFKA 2003).

Die Erzeugung der elektromagnetischen Strahlung resultiert, entsprechend MAXWELLS Formulierungen, aus der Ladungsbewegung im Leiter. Die Abstrahlung findet dabei, wie auch im Falle des Dipols, entlang des gesamten Leiters statt. Durch die Spiralförmigkeit wird dabei die Orientierung des Feldstärkevektors geändert. Das Funktionsprinzip der Antenne kann durch die Abstrahlung an zwei Positionen A und B (Abb. 7.7, rechts) des Antennendrahtes verdeutlicht werden. Position A befindet sich an der Oberseite der Antenne, B eine viertel Wicklung in Strahlrichtung weiter. Während in A der Stromfluss etwa horizontal verläuft (auf den Betrachter zu), verläuft dieser in B nahezu vertikal. Stark vereinfacht können A und B als zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Dipole interpretiert werden. Die Signale weisen aufgrund des Signalweges entlang des Leiters (Draht zwischen A und B) eine Phasenverschiebung auf. Entsprechend der Überlegungen in Abschnitt 7.3 liegt somit im Allgemeinen eine elliptische Polarisierung vor. Somit kann bereits eine viertel Drahtwicklung als elliptisch polarisiert strahlende Antenne verwendet werden, wobei das Funktionsprinzip dem des Kreuzdipols sehr ähnlich ist (ZINKE und BRUNSWIG 1990).

Um eine zirkulare Polarisierung als Spezialfall der elliptischen Polarisierung zu erhalten, muss die Phasenverschiebung $\pi/2$ betragen, wozu eine Anpassung von Durchmesser D und Steigungswinkel α an die vorliegende Frequenz/Wellenlänge erfolgen muss. Eine Verringerung der verbleibenden Polarisierungsabweichungen sowie eine Verbesserung der Richtcharakteristik wird durch die Verwendung mehrerer hintereinander angeordneter Wicklungen erreicht. Diese müssen so angeordnet sein, dass sich die von den in Achsrichtung hintereinander liegenden Leiterelementen abgestrahlten Wellen gleichphasig überlagern. Das bedeutet, dass die Freiraumwelle, die den Weg S mit Lichtgeschwindigkeit c_0 zurücklegt, der leitungsgebundenen Welle, die den längeren Weg L mit reduzierter Geschwindigkeit v (Gleichung 7.2) zurücklegt, um λ_0 (Wellenlänge im Vakuum) oder vielfache k von λ_0 vorhereilen muss. Für $k = 1$ kann dies nach (ZINKE und BRUNSWIG 1990) durch

$$\frac{L}{v} - \frac{S}{c_0} = k \cdot \frac{\lambda_0}{c_0} = \frac{\lambda_0}{c_0} \quad (7.7)$$

ausgedrückt werden. Es wird sichtbar, dass diese Gleichung bei einer gegebenen Antennengeometrie, beschrieben durch L und S , nur von einer Frequenz erfüllt sein kann, wenn im Leiter eine konstante Geschwindigkeit v für alle Frequenzen angenommen wird. Durch Umformung der obigen Gleichung (7.7)

$$\frac{c_0}{v} = \frac{\lambda_0 + S}{L} \quad (7.8)$$

und Berücksichtigung der aus Abbildung 7.8 abgeleiteten Beziehungen

$$L = \frac{C}{\cos(\alpha)} \quad \text{und} \quad S = C \cdot \tan(\alpha) \quad , \quad (7.9)$$

folgt

$$\frac{v}{c_0} = \frac{C}{\lambda_0 \cdot \cos(\alpha) + C \cdot \sin(\alpha)} \quad (7.10)$$

Mit Hilfe des relativen Umfangs $C_\lambda = C/\lambda_0$ ergibt sich

$$\frac{v}{c_0} = \frac{C_\lambda}{\cos(\alpha) + C_\lambda \cdot \sin(\alpha)} \quad , \quad (7.11)$$

wobei v/c_0 auch als relative Phasengeschwindigkeit p bezeichnet wird (KRAUS u. MARHEFKA 2003). In Abbildung 7.9 sind die relativen Phasengeschwindigkeiten dargestellt, die für eine Antenne mit gegebenen relativen Umfang C_λ und gegebenem Steigungswinkel α die Bedingung entsprechend Gleichung 7.11 erfüllen.

Da bei konstantem Durchmesser D der relative Umfang C_λ proportional zur Frequenz ist, gibt die Abbildung indirekt die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Frequenz an. Somit muss sich zur Erfüllung von Gleichung 7.7 die Phasengeschwindigkeit auf der Wendel in Abhängigkeit von der Frequenz ändern, wobei die Geschwindigkeit v mitunter größer als die Lichtgeschwindigkeit sein muss.

Die herausragende Eigenschaft von Helixantennen ist, dass bei einem Betrieb in dem als AXIAL MODE bezeichneten Arbeitsbereich automatisch eine Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Leiter erfolgt, wobei auch eine Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit stattfinden kann, so dass die einzelnen Windungen phasengleiche Strahlungsbeiträge liefern. Der AXIAL MODE von Helixantennen mit 7 oder mehr Wicklungen wird in KRAUS u. MARHEFKA 2003 mit $3/4 < C_\lambda < 4/3$ angegeben.

Eine Folge dieser Eigenschaft ist, dass eine Abstrahlung über einen großen Frequenzbereich möglich ist und eine gute Annäherung an eine zirkulare Polarisierung erreicht wird. Für den AXIAL MODE kann die

Polarisationsreinheit, die durch das Achsverhältnis AR (Axial ratio) beschrieben wird, durch

$$AR = (2n + 1)/2n \quad (7.12)$$

abgeschätzt werden, wobei n der Anzahl der Wicklungen entspricht.

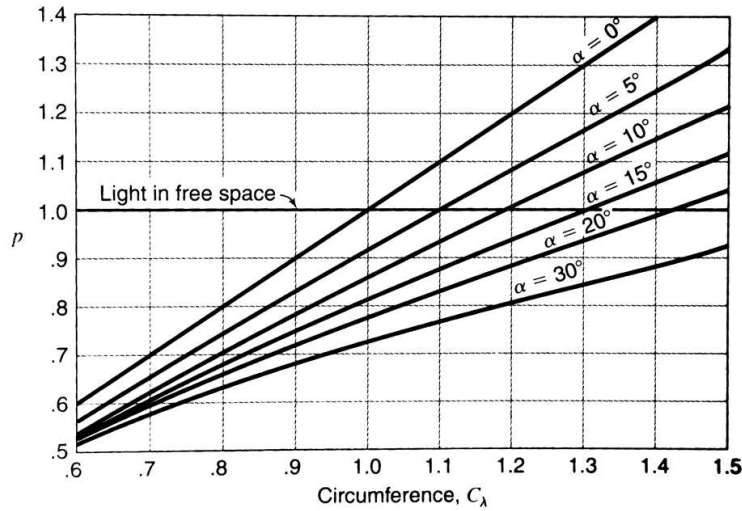


Abb. 7.9: Bedingung für die Erzeugung zirkular polarisierter Signale: Notwendige relative Phasengeschwindigkeit p in Abhängigkeit von Steigungswinkel α und relativem Umfang C_λ (KRAUS u. MARHEFKA 2003).

Soll bei der Kalibrierung im Bereich von 1.15 GHz bis 1.65 GHz nur ein Sender eingesetzt werden, so empfiehlt sich eine Anpassung der Frequenz auf die Mittenlage von etwa 1.4 GHz . Da ursprünglich keine simultane Untersuchung aller Frequenzen vorgesehen war, stehen derzeit am IGG zwei Sender zur Verfügung, die an die Frequenzen $L1$ und $L2$ angepasst sind. Diese Antennen wurden speziell für die Antennenkalibrierung konzipiert und gefertigt (s. oben). Der AXIAL MODE des $L2$ -Senders ($f_{L2} \approx 1.23\text{ GHz}$) erstreckt sich über den Bereich von 0.9 GHz bis 1.6 GHz und deckt somit den bei der Kalibrierung verwendeten Bereich nahezu vollständig ab.

Zur Überprüfung der Eignung des $L2$ -Senders für die Kalibrierung im Bereich des $L1$ -Bandes, wurden Kalibrierungen mit beiden Sendern ($L1$ und $L2$) durchgeführt. Vergleiche der Ergebnisse zeigen, dass die Differenzen im Rahmen der Messgenauigkeit liegen und die Kalibrierergebnisse somit unabhängig vom eingesetzten Sender sind (s. Abschnitt 9.3). Die Kalibrierung der Frequenzen innerhalb des genannten Frequenzbandes ist folglich mit einem Sender möglich.

Als weiteres generelles Problem der Antennenkalibrierung sind Reflexionen im Nah- und Fernfeld der Antenne zu nennen. Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zu diesen Themen behandelt.

7.5 Reflexion und Absorption elektromagnetischer Wellen

In der Elektrodynamik kennzeichnet der Feldwellenwiderstand Z_F (auch Wellenimpedanz genannt) das Verhältnis der transversalen Feldkomponenten E und H einer sich transversal ausbreitenden elektromagnetischen Welle. In einem leitenden Medium mit Leitfähigkeit κ , Kreisfrequenz ω , Permeabilität μ und

Permittivität ϵ gilt für den Feldwellenwiderstand (ROTHAMMEL u. KRISCHKE 2001):

$$Z_F = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\kappa + j \cdot \omega \cdot \epsilon}} \quad (7.13)$$

wobei j die imaginären Einheit ($j^2 = -1$) symbolisiert. Für verlustfreie Medien mit verschwindender Leitfähigkeit ($\kappa = 0$), also elektrisch nicht leitenden Materialien, wird der Feldwellenwiderstand reell

$$Z_F = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \quad (7.14)$$

Die Permittivität ϵ sowie die Permeabilität μ lassen sich dabei durch ihre Werte bei Vakuum (elektrischen Feldkonstante ϵ_0 , magnetischen Feldkonstante μ_0) und die relativen materialabhängigen Einflussfaktoren (relativen Permittivität ϵ_r , relativen Permeabilität μ_r) ausdrücken. Für eine elektromagnetische Welle im Vakuum ($\mu_r = \epsilon_r = 1$) oder in Luft ($\mu_r = 1$; $\epsilon_r \approx 1.0006$) gilt (ZINKE und BRUNSWIG 1990)

$$Z_F = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120 \cdot \pi \Omega \approx 377 \Omega \quad (7.15)$$

Der Feldwellenwiderstand wird dann auch als Freiraumwellenwiderstand bezeichnet.

Die **Absorption** einer elektromagnetischen Welle bei der Ausbreitung in einem Medium ist ebenfalls materialabhängig. Quantitativ kann sie durch die Dämpfungskonstante α beschrieben werden (WOLFSPERGER 2008):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\omega \cdot \epsilon}\right)^2}} \quad (7.16)$$

Eine elektromagnetische Welle wird demnach besonders stark gedämpft, wenn die Leitfähigkeit κ oder die Permeabilität μ groß sind. Eine Absorption, bei der die elektromagnetischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, findet nicht statt, wenn das Medium nicht leitfähig ist ($\kappa = 0$, z.B. bei Vakuum, Luft):

$$\alpha(\kappa = 0) = 0 \quad (7.17)$$

Eine **Reflexion** einer elektromagnetischen Welle tritt auf, wenn sich entlang der Ausbreitungsrichtung der Feldwellenwiderstand an der Grenzschicht zwischen zwei Medien ändert. Das Verhältnis der Amplituden der einfallenden Welle E_e zur reflektierten Welle E_r wird als Reflexionsfaktor r bezeichnet und kann auch in Abhängigkeit vom Feldwellenwiderstand der Medien 1 und 2

$$r = \frac{Z_{F1} \cdot \cos\vartheta - Z_{F2} \cdot \cos\vartheta_g}{Z_{F1} \cdot \cos\vartheta + Z_{F2} \cdot \cos\vartheta_g} \quad (7.18)$$

berechnet werden (WOLFSPERGER 2008). Hierbei kennzeichnet ϑ den Einfallswinkel und ϑ_g den Winkel des gebrochenen Signals zur Normalen der Grenzfläche. Starke Reflexionen sind demnach zu erwarten, wenn der Unterschied zwischen den Feldwellenwiderständen der unterschiedlichen Materialien groß ist (wird auch als Impedanzsprung bezeichnet). Im Falle des Auftreffens auf ein ideal leitendes Medium 2 ist wegen $\kappa = \infty$ der Feldwellenwiderstand $Z_{F2, \kappa=\infty} = 0$ (Gleichung 7.13), woraus wegen $r = 1$ eine Totalreflexion resultiert (Gleichung 7.18).

7.6 Funktionsweise von Pyramidenabsorbern

Zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten wird die Kalibrierung idealerweise in reflexionsarmen Räumen durchgeführt. Durch den Einsatz von Absorbern soll ein möglichst großer Anteil der auf die Hallenwände auftreffenden Energie in Wärme umgewandelt werden. In der AMK Bonn werden Pyramidenabsorber aus mit Graphit (Kohlenstoff) getränktem Polyurethanschaum verwendet. Durch den Kohlenstoff wird die für die Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie notwendige Leitfähigkeit (siehe Abschnitt 7.5) der Absorber erzielt. Zu hohe Impedanzsprünge - diese führen entsprechend der Erläuterungen in Abschnitt 7.5 zu Reflexionen - werden zum einen durch die insgesamt nur mäßig Leitfähigkeit des Materials vermieden. Zum anderen führt die Pyramidenform der Absorber dazu, dass bei senkrecht eintreffenden Strahlen der Übergang des Feldwellenwiderstands der Luft zum Widerstandswert des Absorbermaterials als kontinuierlicher Prozess stattfindet, da die Fläche des Absorbermaterials kontinuierlich zunimmt. Der verbleibende reflektierte Anteil wird durch Mehrfachreflexionen, welche ebenfalls Folge der Pyramidengeometrie sind, weiter gedämpft, so dass nur ein Bruchteil der Energie als Störstrahlung in die Kammer und somit unter Umständen zur Testantenne zurückgestrahlt wird (Abb. 7.10). Je höher die Pyramidenspitzen sind, desto stärker ist die Absorption, da insbesondere der Weg durch das absorbierende Medium verlängert wird und die Anzahl der Mehrfachreflexionen ansteigt. Zudem kann die Impedanzanpassung optimiert werden.

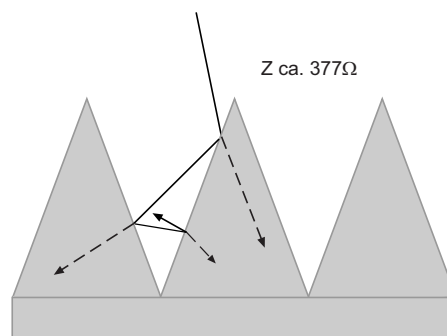


Abb. 7.10: Wirkungsweise von Pyramidenabsorbern.

Die Reflexionsdämpfung der in der AMK Bonn hauptsächlich eingesetzten Absorber (Typ SFC-24, Absorberhöhe 61cm) wird vom Hersteller für die Frequenz $f = 1\text{ GHz}$ bei senkrechtem Einfallswinkel mit 40 dB angegeben. Dieser Wert steigt für höhere Frequenzen an (45 dB bei 3 GHz). Bei nicht senkrechter Einstrahlrichtung reduziert sich die Reflexionsdämpfung entsprechend der folgenden Multiplikatoren:

Absorberhöhe in Wellenlängen	Abweichung vom Senkrecht-Winkel ($0^\circ = \text{senkrecht}$, $90^\circ = \text{parallel}$)							
	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
4	1	0.95	0.86	0.75	0.70	0.60	0.51	0.43
2	0.90	0.82	0.74	0.66	0.58	0.49	0.42	0.34

Tab. 7.1: Multiplikatoren zur Ableitung der Reflexionsdämpfung bei nicht senkrechtem Einfallswinkel (Auszug aus dem Datenblatt des Herstellers).

Bei den bei der Kalibrierung eingesetzten Frequenzen ist die Absorberhöhe 2.5 bis 3 Mal höher als die Wellen-

länge. Bis zu einem Einfallswinkel von 55° werden somit Dämpfungen von 30dB (entspricht Faktor 1000) und mehr erreicht. In dem Bereich in dem Reflexionen des Signals in Richtung der Testantenne zu erwarten sind (z.B. von der Hallenstirnseite hinter der Testantenne), trifft das Signal nahezu senkrecht auf die Absorber, so dass dort eine Dämpfung von ca. 40dB (Faktor 10000) erreicht werden kann. Bei der Antennenkalibrierung im HF-Labor liegt die Signalstärke des Testsignals deutlich oberhalb der Signalstärke der an der Erdoberfläche ankommenden Satellitensignale. Folglich sind die Reflexionssignale absolut betrachtet mitunter auch stärker als im Falle der GNSS-Anwendung. Aufgrund der starken Signaldämpfung, die mit den Absorbern erreicht wird, ist aber das Verhältnis der Signalstärke des direkten Signals im Vergleich zu der Signalstärke eines reflektierten Signals (Mehrwegesignal) deutlich günstiger. Die durch Mehrwege verursachten Phasenverschiebungen sind somit geringer.

Für die Verkleidung des Drehstandes werden auch Absorber geringerer Höhe (bis zu SFC-8 mit 20cm Höhe) eingesetzt. Die Absorption bei senkrechtem Einfallswinkel sinkt hier bereits auf 30dB , so dass hier sehr flache Einfallswinkel, die zu einer noch geringeren Dämpfung führen, möglichst zu vermeiden sind.

In diesem Kapitel wurden einige elektrodynamische Aspekte erläutert. Dabei wurden anhand des Dipols und der Helixantenne die Möglichkeiten zur Erzeugung zirkular polarisierter Signale aufgezeigt. Anhand theoretischer Überlegungen wurde sichtbar, dass mit Helixantennen eine gute Polarisationsreinheit auch außerhalb der Mittenfrequenz (Optimalfrequenz) erreicht werden kann. Eine empirische Überprüfung dieser Überlegungen folgt in Abschnitt 9.3.

Die Kenntnisse über die Wirkungsweise von Absorbern sind sowohl bei der Konzeption einer Messkammer als auch bei der Verkleidung des Antennendrehstandes von großer Bedeutung. Durch eine optimale Ausrichtung der Absorber zur Einstrahlrichtung des Signals kann eine Optimierung der Wirkung der Absorber erreicht werden. Dies wurde bei der Konzeption der verschiedenen Testsetups (Kapitel 8 und 9) berücksichtigt. Hierauf wird jedoch im Einzelnen nicht näher eingegangen.

8 Analyse der Kalibrierunsicherheiten anhand spezieller Testmessungen

In Kapitel 6 ist das Grundprinzip des Laborverfahrens zur absoluten Kalibrierung von GNSS-Antennen dargestellt. In den folgenden zwei Kapiteln wird auf Untersuchungen zur Kalibriergenauigkeit eingegangen.

8.1 Beschreibung des generellen Vorgehens

Während die Präzision⁸ des Verfahrens durch Wiederholungsmessungen leicht bestimmt werden kann, ist die Richtigkeit der Ergebnisse nur schwer zu quantifizieren. Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Genauigkeit besteht prinzipiell darin, die ermittelten Kalibrierergebnisse bei der hochpräzisen relativen Punktbestimmung einzusetzen und die Einflüsse der Kalibrierergebnisse auf Koordinatenebene (z.B. Vergleich mit anderen Messverfahren) oder Beobachtungsebene (Analyse der Residuen) abzuschätzen. Ein solcher Ansatz und einige exemplarische Ergebnisse sind in Abschnitt 11.2 dargestellt.

Aufgrund der bei realen GNSS-Messungen vorhanden Störeinflüsse, die zum Teil wie die Antenneneffekte von der Einstrahlrichtung des Signals abhängen (z.B. Mehrwege-, Nahfeld- und Troposphäreneffekte), ist eine exakte Abschätzung der Kalibriergenauigkeit nicht möglich ist. Eine Plausibilitätsprüfung im Rahmen der Größenordnung der übrigen Einflussgrößen kann aber erfolgen.

Zur Abschätzung der Richtigkeit der Kalibrierergebnisse liefert auch der Vergleich mit anderen Kalibrierverfahren (relatives und absolutes Feldverfahren) alleine keine zufriedenstellenden Aussagen, da nur eine relative Genauigkeit zwischen den Verfahren ableitbar ist. Die bei den Vergleichen auftretenden Differenzen können jedoch den einzelnen Verfahren nicht zugeordnet werden. Erst ein Vergleich mehrerer unabhängiger Verfahren kann zu eindeutigeren Aussagen führen. Es ist jedoch zu beachten, dass Nahfeldeffekte, die unabhängig von den Kalibrierverfahren sind, die Vergleiche der Kalibrierverfahren erschweren. Vergleiche der verschiedenen Kalibrierverfahren wurden im Rahmen eines Ringversuchs durchgeführt (s. Abschnitt 11.1).

Ein weiterer Ansatz besteht in der Analyse einzelner Komponenten des Kalibriersetups (z.B. Genauigkeit des Netzwerkanalysators) bzw. in der Analyse der Auswirkung einzelner Einflussgrößen auf das Kalibrierverfahren bzw. auf Teile des Systems (z.B. Temperatureinfluss auf die Wellenausbreitung im Koaxialkabel). Hierzu sind eine Vielzahl von Einzelexperimenten notwendig, die es erlauben, die einzelnen Störgrößen vom Gesamtsystem zu entkoppeln. Solche Einflussgrößen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe umfasst die Komponenten und Einflüsse, deren Auswirkungen auf die gemessene Phasenlage und somit auf das Kalibrierergebnis unmittelbar quantifiziert werden können.

Die Untersuchungen zu dieser Gruppe sind in diesem Kapitel dargestellt und umfassen folgende Aspekte:

1. Temperatureinfluss auf die Phasenmessung
2. Einfluss der Signalstärke auf die Kalibrierung
3. Analyse der Phasenmessgenauigkeit (unter Berücksichtigung einzelner Systemkomponenten)
4. Positioniergenauigkeit des Antennendrehstandes
5. weitere Kabeleffekte: Kabelbiegung und Verdrillung
6. Analyse der Richtigkeit der Phasenmessung

⁸ Definitionen zu den Begriffen Messabweichung, Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision finden sich in den Normen DIN 1319 und DIN 55350.

Bei der zweiten Gruppe lässt sich der Einfluss einer Störgröße auf eine einzelne Phasenmessung nicht mehr eindeutig bestimmen. Stattdessen ist der Einfluss auf das gesamte ermittelte Antennenpattern zu beurteilen. Die Einflussgrößen der zweiten Gruppe werden in Kapitel 9 unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel erläuterten Effekte behandelt.

8.2 Temperatureinfluss auf die Phasenmessung

Der Temperatureinfluss auf die Phasenmessung stellt bei der Kalibrierung eine wichtige Störgröße dar. Der bedeutsame Einfluss resultiert dabei, wie in diesem Kapitel gezeigt wird, aus der Temperaturabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Koaxialkabeln. Der Temperatureinfluss auf die Ausbreitung im freien Raum kann hingegen bei der Laborkalibrierung meist vernachlässigt werden, da der Abstand Sender-Empfänger nur wenige Meter beträgt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Koaxialkabel ist von der relativen Permittivität ϵ_r und der relativen magnetischen Permeabilität μ_r des verwendeten Dielektrikums abhängig (Kapitel 7). Da bei Koaxialkabeln nichtmagnetische Materialien als Dielektrikum verwendet werden, kann die relative magnetische Permeabilität als $\mu_r = 1$ angenommen werden, so dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Koaxialkabel durch

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \approx \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8.1)$$

ausdrücken lässt (z.B. SCHRÖDER 1968), wobei c_0 die Lichtgeschwindigkeit ist. Die Eigenschaften der Leiter (Innen- bzw. Außenleiter) sind hierbei nicht maßgebend, da sich die Energie in Form elektromagnetischer Wellen zwischen diesen ausbreitet. Der Aufbau von Koaxialkabel ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

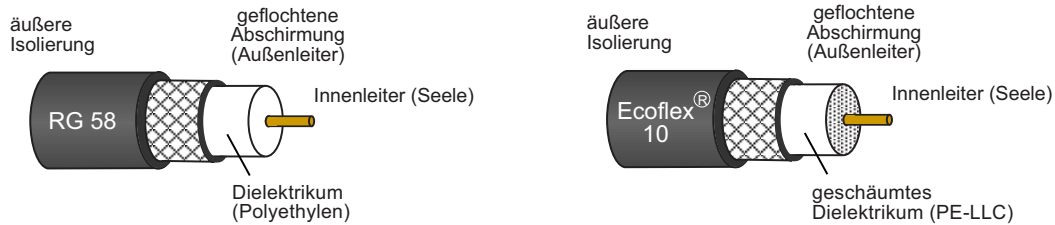


Abb. 8.1: Aufbau von Koaxialkabeln vom Typ RG 58 bzw. Ecoflex® 10.

Die relative Permittivität ϵ_r des Dielektrikums beschreibt dessen Durchlässigkeit für elektrische Felder und ist u.a. frequenz- und temperaturabhängig. Eine Temperaturänderung (T_1 nach T_2) führt somit zu einer Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, was wegen der konstanten Frequenz einer Veränderung der Wellenlänge entspricht.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta v}{f} = \frac{v_1 - v_2}{f} = \left(\frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r(f, T_1)}} - \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r(f, T_2)}} \right) \cdot \frac{1}{f} \quad (8.2)$$

Diese physikalischen Zusammenhänge, die auch zur Bestimmung der relativen Permittivität einer Materialprobe genutzt werden (s. ROBINSON et al. 2003), führen bei der Kalibrierung dazu, dass die aus der Antennencharakteristik resultierenden Phasenverschiebungen durch Temperatureffekte überlagert werden. Dabei ist nur die Temperaturänderung während der Kalibrierung relevant. Die Absoluttemperatur hat in diesem

Zusammenhang keinen Einfluss auf das Kalibrierergebnis, da bei der Kalibrierung nur relative Phasenverschiebungen bei unterschiedlichen Einstrahlrichtungen ermittelt werden.

Da über die physikalischen Eigenschaften der Dielektrika der eingesetzten Kabel keine exakten Daten vorliegen, wurden empirische Tests zur Bestimmung des Temperatureinflusses durchgeführt. Hierzu wurden Ein- und Ausgang des Netzwerkanalysators (NWA) direkt mit den zu testenden Kabeln verbunden und die Phasenlage für verschiedene GNSS-Frequenzen überwacht, während die Temperatur variiert wurde. Eine ausreichend große Klimakammer stand für diese Tests nicht zur Verfügung, so dass die Raumtemperatur des Messlabors durch Lüften und Heizen variiert wurde. Zum einen waren dadurch die Möglichkeiten der Temperaturregulierung begrenzt und zum anderen resultierte daraus eine stark ortsabhängige Temperaturverteilung (Abstand zu den Heizkörpern, Türen und Fenstern, Wänden). Um bei den Experiment eine annähernd gleichmäßige Temperatur entlang des gesamten Kabels zu gewährleisten, wurden die Kabel in Schleifen übereinandergelegt und die Temperatur in der Mitte der Schleifen gemessen. Diese Kabelanordnung ist nicht ideal, da die vollständige Entkopplung der Signale nicht garantiert werden kann, führt aber dennoch, wie die Ergebnisse zeigen, zu guten Ergebnissen.

Bei ersten Versuchen wurden RG-58 Kabel, die häufig zum Standardequipment einer GNSS-Ausrüstung gehören, getestet. In Abbildung 8.2 sind zwei Beispiele dargestellt. Die Phasenlage kann an der linken Hochachse, die Temperatur an der rechten Hochachse abgelesen werden. Die beiden Messreihen wurden mit einem Kabel ähnlichen Typs (beides RG-58 Kabel, jedoch von unterschiedlichen Herstellern) unterschiedlicher Länge durchgeführt. Die Signalstärke wurde auf das bei der Kalibrierung übliche Maß herabgesetzt (s. Abschnitt 8.3).

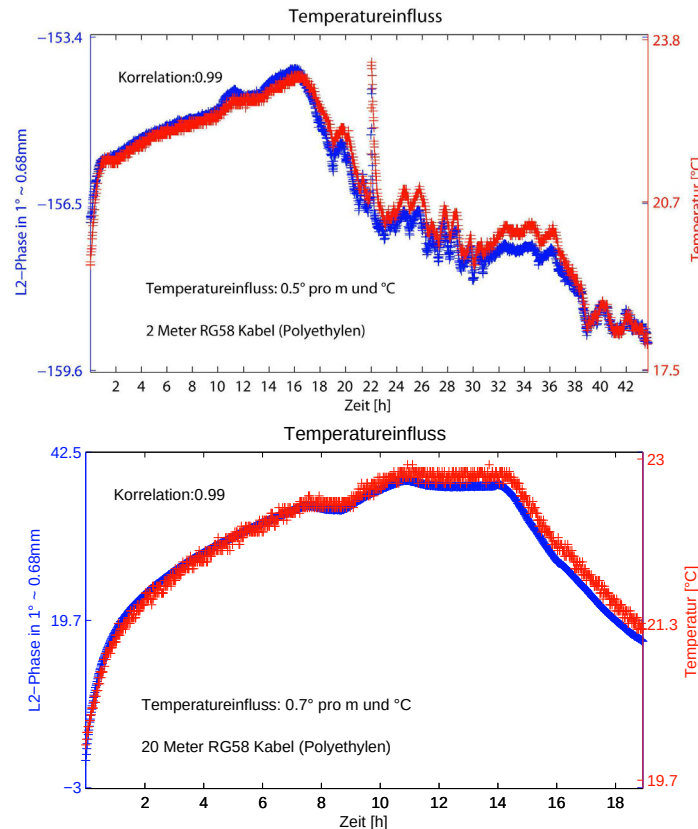


Abb. 8.2: Temperatureinfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Koaxialkabel.

Bei beiden oben dargestellten Experimenten wird eine sehr hohe Korrelation zwischen Phasenlage und Temperatur sichtbar. Beim oberen Experiment sind am Anfang der Zeitreihe deutliche Unterschiede zwischen den Kurven ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Kabeltemperatur zunächst an die Raumtemperatur angleichen musste. Dieser Aufwärmeeffekt wurde bei der Durchführung der Messung nicht berücksichtigt. Die Spitze in den Messkurven bei ca. 22h ist Folge einer Stoßlüftung von wenigen Minuten.

Der Temperatureinfluss liegt bei beiden Experimenten zwischen 0.5° und 0.7° Phasenverschiebung pro Meter und 1°C Temperaturänderung (Werte für L2). Wird zur Abschätzung des Gesamteffektes ein mittlerer Wert von 0.6° ($\approx 0.4\text{mm}$) herangezogen⁹, so ergibt sich bei der für die Kalibrierung benötigten Kabellänge von bis zu 25 Metern ein Temperatureinfluss von 10mm pro $^\circ\text{C}$. Die Temperatur müsste somit zur Einhaltung einer maximalen Phasenabweichung von 0.2mm (Abschnitt 3.2, Tabelle 3.3) auf mindestens 0.02°C stabil gehalten werden. Die gegebenen Genauigkeitsanforderungen können mit den zur Verfügung stehenden Mitteln weder durch die Stabilisierung der Raumtemperatur noch durch eine Erfassung der Temperatur entlang des gesamten Kabels erreicht werden.

Aus Gleichung 8.2 wird ersichtlich, dass die Temperaturabhängigkeit der Phasenmessung aus der Temperaturabhängigkeit der relativen Permittivität ϵ_r des Dielektrikum resultiert. Da die relative Permittivität von Gasen oder Luft im Vergleich zu Polyethylen deutlich temperaturstabiler ist, wurde mit Kabeln experimentiert, bei denen das Dielektrikum aus geschäumten PET besteht (siehe Abb. 8.1). Das Ergebnis eines Experimentes mit einem Ecoflex[®] 10 Kabel, ist in Abb. 8.3 dargestellt.

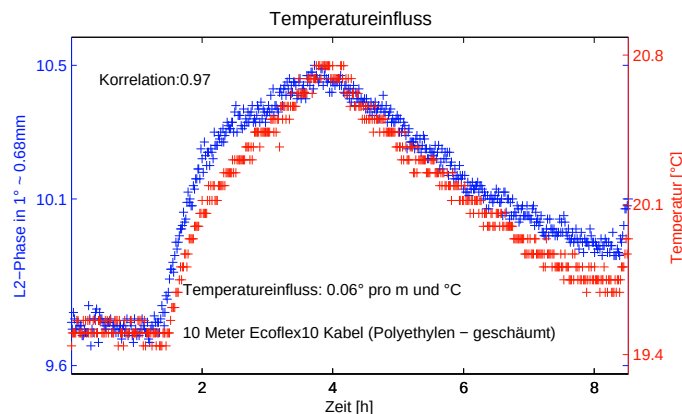


Abb. 8.3: Temperatureinfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Mikrowellen (hier 1227.60MHz) im Koaxialkabel.

Der Temperatureinfluss ist bei diesem Kabeltyp um etwa Faktor 10 geringer und liegt bei 0.04mm (L2) und 0.02mm (L1) pro $^\circ\text{C}$ und m . Entsprechend reduziert sich im Vergleich zu Standard RG-58 Kabeln auch die Anforderung an die Temperaturstabilität auf 0.2°C (L2) bzw. 0.4°C (L1).

In der AMK Bonn werden diese Anforderungen eingehalten, solange die Tür zur Messkammer verschlossen bleibt. Wird die Tür geöffnet, so strömt von außen Luft ein und die geforderte Temperaturstabilität wird nicht mehr erreicht. Nach der Schließung der Tür ist der Temperaturgang rückläufig, so dass in der Regel die Ausgangstemperatur wieder erreicht wird. Dieser Vorgang zieht sich jedoch, je nach Temperaturgradient zwischen AMK und Nebenraum, über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde hin. Die ansonsten hohe Temperaturstabilität resultiert daraus, dass die Messkammer selber in einem Raum ohne direkter Sonneneinstrahlung liegt, die Absorber eine zusätzliche isolierende Wirkung haben und sich bis auf die Motoren des Drehstandes

⁹ Im weiteren Verlauf wird aus Anschauungsgründen nur noch die über die Wellenlänge abgeleitete metrische Größe angegeben.

keine nennenswerten Wärmequellen in der Antennenmesskammer befinden. Die übrigen Komponenten (PC, Netzwerkanalysator, Motorsteuerung etc.) befinden sich in einem Vorraum der Antennenmesskammer. Da die AMK Bonn speziell für die Kalibrierung von GNSS-Antennen konzipiert wurde, konnten die Kabel bei der Montage der Absorber fest zwischen diesen verlegt werden, woraus eine zusätzliche Isolierung der Kabel resultiert.

Neben der Temperaturstabilisierung besteht eine weitere Möglichkeit in der Überwachung der verbleibenden Temperaturänderungen. Neben der Temperatur wird auch der Temperatureinfluss auf die Phasenmessung bestimmt. Hierzu werden bei der Kalibrierung im Abstand von ca. 2 - 5 Minuten Referenzmessungen bei einer vorgegebenen Antennenausrichtung (0° Azimut, 90° Elevation) durchgeführt. In Abbildung 8.4 ist exemplarisch eine solche Zeitreihe dargestellt.

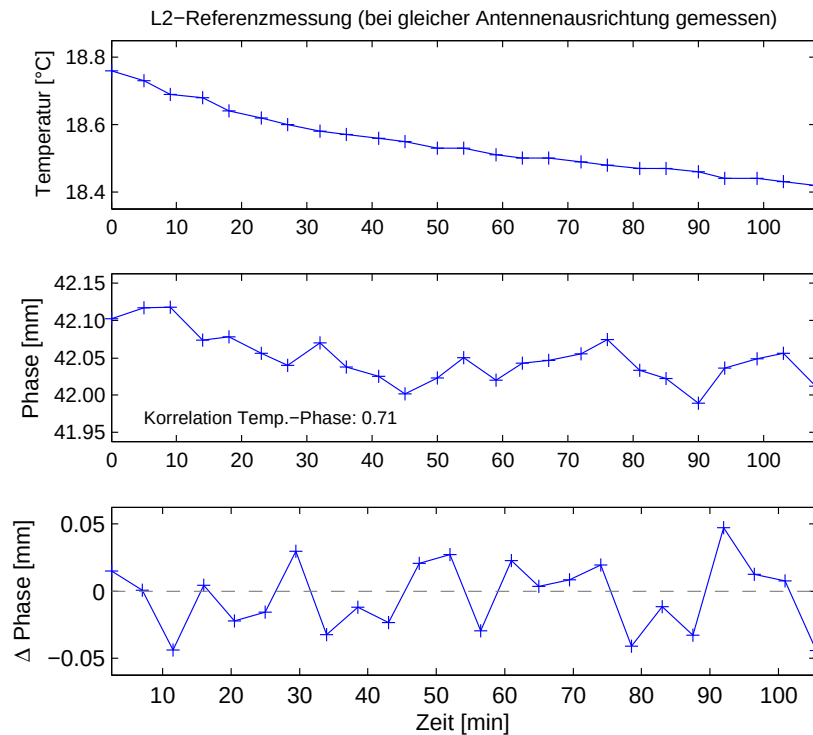


Abb. 8.4: Referenzmessungen während einer Kalibriermessung (Frequenz L2, 1227.60 MHz).

Die obere Kurve zeigt den Temperaturverlauf in der Raummitte (entlang der Kabel befinden sich keine Temperatursensoren). Ausgehend von einem Temperatureinfluss von 0.04mm pro Meter und 1°C Temperaturänderung (siehe Abb. 8.3) würde aus der insgesamt festgestellten Temperaturänderung von -0.3°C unter der Berücksichtigung der gesamten Kabellänge ein Phasenverschiebung von -0.3mm resultieren, wenn der gemessene Temperaturunterschied auch repräsentativ für die Temperatur entlang des Kabels wäre. Aufgrund der zusätzlichen Isolierung durch die Absorber reduziert sich dieser Anteil in diesem Beispiel auf den sichtbaren Trend von etwa -0.1mm (mittlere Grafik).

Die dritte Grafik in Abbildung 8.4 zeigt den Gradient der Phasenlage. Benachbarte Referenzmessungen weichen maximal 0.05mm voneinander ab. Diese Abweichungen spiegeln neben dem Temperatureinfluss insbesondere die zufälligen Anteile der Phasenmessung und der Positionierung wider. Übersteigt der Temperatureinfluss das Messrauschen signifikant, können aus den Referenzmessungen Korrekturen abgeleitet und zeitproportional an die Kalibrierdaten angebracht werden. Der verbleibende Temperatureinfluss

liegt dann im Bereich des Messrauschens. Es sei erwähnt, dass in Abhängigkeit von der Lüftungsdauer und dem Temperaturunterschied zwischen AMK und Vorraum auch gegenläufige Trends von Temperatur und Phasenlage beobachtet wurden. Dies resultiert wahrscheinlich daraus, dass die Raumtemperatur der Kabeltemperatur vorausschlägt. Dieses Verhalten wurde jedoch nicht weiter analysiert, da die Referenzmessungen eindeutig zeigen, dass die verbleibenden Temperatureffekte vernachlässigbar sind.

Neben des Einflusses der Temperatur auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Koaxialkabel muss auch der Einfluss der Atmosphäre auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Mikrowellen im freien Raum abgeschätzt werden. Hierzu finden sich in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher empirisch abgeleiteter Formeln, die den Einfluss der meteorologischen Parameter Temperatur (T), Partialdruck der trockenen Luft (p_d) und Partialdruck der feuchten Luft (e) auf die Brechzahl für Mikrowellen beschreiben (z.B. in BEVIS et al. 1994 oder RÜEGGER 2002). Die verschiedenen Formeln liefern bezüglich der absoluten Werte signifikant unterschiedliche Ergebnisse. Bei der hier notwendigen relativen Betrachtung und der hohen Stabilität der meteorologischen Bedingungen sind diese Unterschiede jedoch vernachlässigbar, so dass der Auswahl der Formel keine zu große Beachtung zukommen muss. Für die im Folgenden gezeigten Abschätzungen wurde zur Berechnung des Brechungsindex N folgende Formel (aus RÜEGGER 2002) herangezogen

$$\begin{aligned} N &= k_1 \cdot \frac{p_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \\ &= 77.6890 \cdot \frac{p_d}{T} + 71.2952 \cdot \frac{e}{T} + 375463 \cdot \frac{e}{T^2} . \end{aligned} \quad (8.3)$$

Der Brechungsindex beschreibt wegen

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = (c_0/v - 1) \cdot 10^6 \quad (8.4)$$

die atmosphärenbedingte Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bezogen auf die Ausbreitung im Vakuum (c_0) in ppm (parts per million). Durch Bildung der partiellen Ableitungen (nach e , T , p_d) lässt sich der Einfluss kleiner atmosphärischer Änderungen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. die gemessene Phasenlage abschätzen. Es folgt:

$$\begin{aligned} \partial N / \partial p_d &= 77.6890 \cdot \frac{1}{T} \\ \partial N / \partial e &= 71.2952 \cdot \frac{1}{T} + 375463 \cdot \frac{1}{T^2} \\ \partial N / \partial T &= -(77.6890 \cdot p_d + 71.2952 \cdot e + 375463 \cdot e \cdot \frac{2}{T}) \cdot \frac{1}{T^2} \end{aligned} \quad (8.5)$$

Für die in der AMK Bonn üblichen durchschnittlichen Atmosphäreigenschaften ($p_d = 1000 \text{ hPa}$, $e = 10 \text{ hPa}$ und $T = 290^\circ \text{ Kelvin}$) ergeben sich folgende meteorologischen Einflüsse (in ppm):

$$\begin{aligned} d_{N,p_d} &= 0.3 \cdot d_{p_d} \\ d_{N,e} &= 4.7 \cdot d_e \\ d_{N,T} &= -1.3 \cdot d_T \end{aligned} \quad (8.6)$$

Bei einer Distanz zwischen Sende- und Empfangsantenne von etwa $r = 6.5 \text{ m}$ gilt für die Einflüsse der einzelnen Größen

$$\begin{aligned} d_{N,p_d} &= 0.002 \cdot d_{p_d} \quad [\text{mm/hPa}] \\ d_{N,e} &= 0.03 \cdot d_e \quad [\text{mm/hPa}] \\ d_{N,T} &= 0.008 \cdot d_T \quad [\text{mm}/^\circ \text{Kelvin}] . \end{aligned} \quad (8.7)$$

Da bei der Kalibrierung eine Genauigkeit von bis zu $\sigma = 0.1 \text{ mm}$ angestrebt ist, sollte der Atmosphäreinfluss unterhalb von 0.03 mm liegen. Ausgehend von den Gleichungen 8.7 lassen sich nachstehende Grenzwerte ableiten:

	6.5m (Bonn)	20m (Greding)
p_d	$\approx 20 \text{ hPa}$	$\approx 6 \text{ hPa}$
e	$\approx 1 \text{ hPa}$	$\approx 0.3 \text{ hPa}$
T	$\approx 3^\circ\text{C}$	$\approx 1^\circ\text{C}$

Tab. 8.1: Anforderungen an die Stabilität der klimatischen Bedingungen während der Kalibrierung. Greding: Messkammer der Bundeswehr (Eine Beschreibung der Messkammer findet sich in CAMPBELL et al. 2004).

Die Überschreitung der Grenzwerte kann in der AMK Bonn ausgeschlossen werden. Die Temperaturänderungen liegen während der Kalibrierzeit von 60 Minuten, wie oben exemplarisch gezeigt, üblicherweise im Bereich unterhalb von 0.3°C . Der Grenzwert für den Wasserdampfpartialdruck wurde in der AMK Bonn mit Variationen von maximal 0.2 hPa bislang stets eingehalten. Wird die Teststrecke verlängert, ist mitunter eine Messwertkorrektur über die Referenzmessungen notwendig. Eine Einhaltung der Grenzwerte im Zeitbereich zwischen zwei Referenzmessungen (ca. 5 Minuten) ist jedoch auch bei 20m-Teststrecken die Regel. Eine Änderungen des Partialdrucks der trockenen Luft von 6 hPa bzw. 20 hPa kann ausgeschlossen werden.

Werden diese Bedingungen eingehalten, kann ein signifikanter Einfluss der klimatischen Bedingungen auf die Kalibrierung ausgeschlossen werden. Andernfalls ist die Bestimmung der Antennenkorrekturen abhängig von der Temperatur T und den Partialdrücken e und p_d . Ein Einfluss der absoluten Temperatur und der absoluten Partialdrücke ist bei den üblichen Laborbedingungen nicht zu befürchten, da konstante Anteile durch die Bildung der richtungsabhängigen Differenzen weitestgehend eliminiert werden. Es verbleibt lediglich ein Maßstabseinfluss, der sich jedoch nur auf die maximalen Differenzen zwischen zwei Einstrahlrichtungen (allenfalls wenige Zentimeter) auswirkt. Die Anforderung an die Stabilität der absoluten Größen ist somit um etwa Faktor 100 (Verhältnis der Länge der Teststrecke zu den richtungsabhängigen Variationen) geringer, als dies für die relativen Änderungen (Tabelle 8.1) der Fall ist.

Bei GNSS-Anwendungen treten die beschriebenen Effekte ebenfalls auf. Während der Einfluss auf die Freiraumwellen (Troposphäreneinfluss) zu berücksichtigen ist, kann der Einfluss auf die Ausbreitung im Koaxialkabel vernachlässigt werden, da dort die Signale verschiedener Satelliten die gleiche Beeinflussung erfahren und diese Effekte somit durch Differenzbildung eliminiert werden.

8.3 Einfluss der Signalstärke auf die Phasenmessung

Das bei der Antennenkalibrierung vom NWA erzeugte und über die Helixantenne abgestrahlte Testsignal unterscheidet sich von den Signalen der GNSS-Satelliten insbesondere hinsichtlich

- Signalstärke
- Bandbreite und
- Signalstruktur,

so dass mögliche Einflüsse dieser Signaleigenschaften auf die Kalibrierergebnisse analysiert werden müssen. Da mit dem vorhandenen Messequipment keine Codemodellierung, die auch zur Bandspreizung führt, möglich ist, können diese Effekte nicht separat analysiert werden. Aufgrund der im Vergleich zur Chip-Länge kurzen Wellenlänge ist jedoch keine Beeinflussung zu erwarten. Um dies abschließend zu untersuchen, wäre es prinzipiell möglich, Pseudolites (Pseudo-Satelliten, s. WANG 2002), die Testsignale mit aufmodellierten

Codes erzeugen, bei der Kalibrierung zu verwenden. Beim derzeitig erreichten Genauigkeitsniveau besteht hierfür allerdings kein Anlass. Starke Einflüsse würden zudem bei den Vergleichen mit den Feldverfahren (Abschnitt 11.1) und durch die Anwendung der Kalibrierergebnisse in der Praxis (Abschnitt 11.2) sichtbar.

Im Falle der Signalstärke wäre durch die Variation der Sendeleistung eine Anpassung an den bei GNSS an der Erdoberfläche üblicherweise vorliegenden Wertebereich möglich. Dadurch wäre sichergestellt, dass der antenneninterne Signalverstärker in seinem Arbeitsbereich betrieben wird. Bei der Kalibrierung wird jedoch eine deutliche höhere Sendeleistung angestrebt, da dadurch das Messrauschen stark reduziert werden kann. Übersteigt hingegen die Signalstärke den linearen Arbeitsbereich des Antennenverstärkers, so kann dies zu einer Verzerrung (u.a. Phasenverschiebung) des Signals führen (TIETZE et al. 2000). Die Optimierung der Sendeleistung erfolgt bei der Kalibrierung experimentell. Hierbei wird die GNSS Antenne zunächst so ausgerichtet, dass der Sender im Zenit der GNSS-Antenne steht. Die empfangene Signalstärke ist bei dieser Ausrichtung näherungsweise maximal. Durch die Variation der Sendeleistung kann die Abhängigkeit der Phasenlage von der Signalstärke überprüft werden. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abb. 8.5 am Beispiel einer Leica AX1202GG Antenne für die Frequenzen L1 und L2 zu sehen.

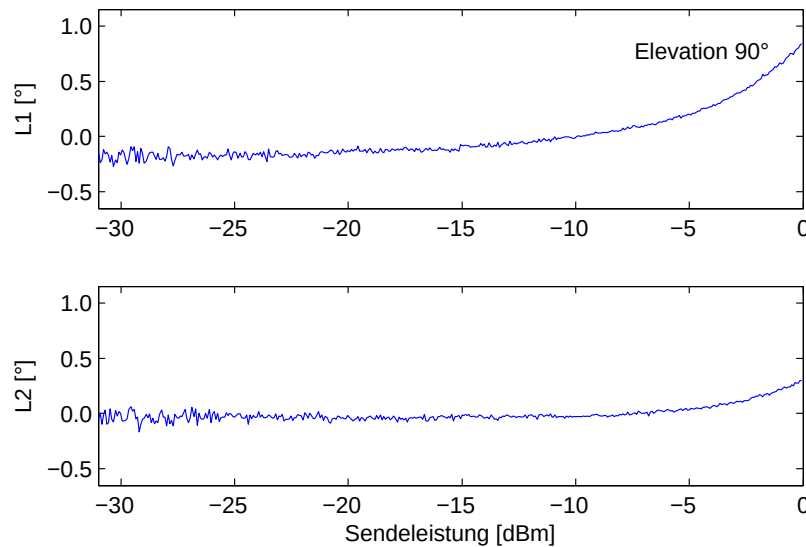


Abb. 8.5: Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung (hier: Leica AX1202GG).

Auf der Rechtsachse sind die unterschiedlichen am Ausgang des NWA abgegebenen Sendeleistungen dargestellt. Es sei angemerkt, dass der Einstellbereich des NWA auf -5 dBm bis $+10\text{ dBm}$ beschränkt ist, dieser jedoch durch die Verwendung zusätzlicher mechanische Dämpfungsglieder angepasst werden kann. Auf der Hochachse der Abbildung sind die gemessenen Phasenlagen abgebildet, wobei diese Werte aus Anschauungsgründen um den Mittelwert reduziert worden sind (L1: $1^\circ \approx 0.53\text{ mm}$ und L2: $1^\circ \approx 0.68\text{ mm}$).

Anhand der Grafiken wird der Einfluss einer zu hohen Sendeleistung ersichtlich. Bei der Kalibrierung würde sich dies insbesondere bei der Bestimmung der elevationsabhängigen PCV auswirken, da der Antennengewinn im Zenit maximal ist und zum Horizont hin abfällt (vgl. Abschnitt 12.2), so dass bei der Kalibrierung trotz konstanter Sendeleistung eine signalstärkeabhängige Phasenverschiebung stattfinden würde. Bei der hier verwendeten Leica AX 1202GG Antenne fällt der Antennengewinn vom Zenit bis zum Horizont um ca. 12 dB ab. Bei einer am NWA anliegenden Sendeleistung von 0 dBm wäre somit bei L1 eine systematische Phasenverschiebung von etwa $-0.8^\circ \approx -0.4\text{ mm}$ die Folge, wie aus Abb. 8.5 ableitbar ist (Differenz der Phasenlage bei 0 dBm bzw. -12 dBm).

Wird die Sendeleistung um 16 dB gesenkt, wird der systematische Einfluss der Signalstärke nahezu vollständig eliminiert, wobei das Messrauschen nur moderat ansteigt. Der relevante Signalstärkebereich ist in Abb. 8.6 dargestellt (Ausschnitt aus Abb. 8.5).

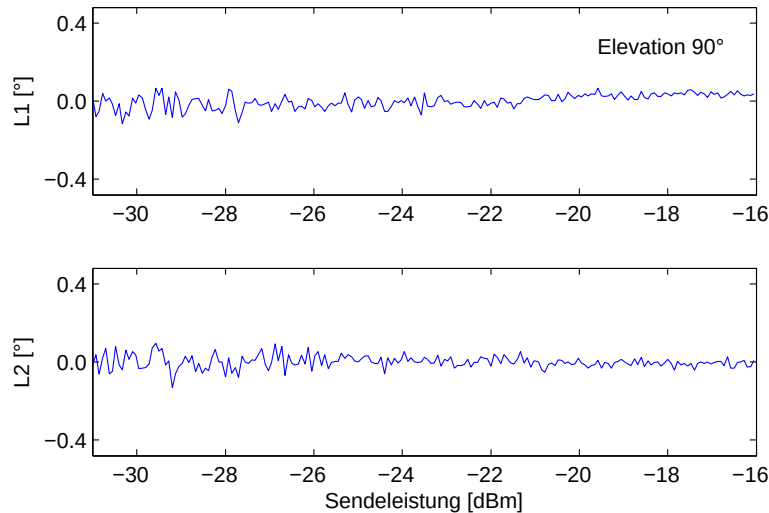


Abb. 8.6: Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung (Ausschnitt aus 8.5).

Aus der elevationsabhängigen Signaldämpfung von 12 dB resultiert bei L1 ein Trend von $< 0.1^\circ \approx 0.05\text{ mm}$, so dass dieser zu vernachlässigen ist. Bei L2 sind keine systematischen Anteile sichtbar. Das Messrauschen im horizontnahen Bereich (Signalstärke ca. -28 dBm) kann durch eine Standardabweichung von $\sigma = 0.1^\circ$ quantifiziert werden (siehe Abschnitt 8.4) und erfüllt die Kalibrieranforderungen (Abschnitt 3.2).

Zur Überprüfung der Ergebnisse kann der identische Test mit einer um 90° gedrehten Antenne (Messung im Horizont) durchgeführt werden. In Abb. 8.7 ist exemplarisch eine solche Messung dargestellt. Die Ergebnisse bestätigen das Rauschniveau des ersten Versuchs (Vergleich -16 dBm in Abb. 8.7 und -28 dBm in Abb. 8.6). Zudem wird der starke Anstieg des Messrauschens bei Abnahme der Signalstärke sichtbar. Dies begrenzt die Möglichkeiten einer weiteren Herabsetzung der Sendeleistung.

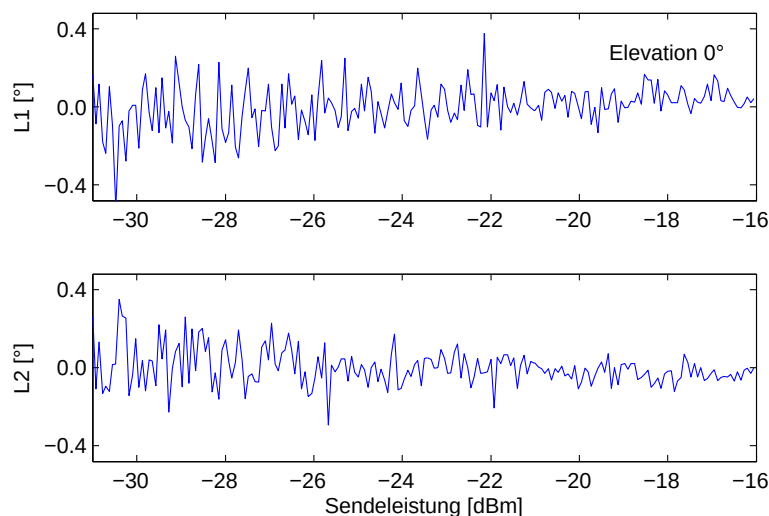


Abb. 8.7: Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung im Horizont (hier: Leica AX1202GG).

Prinzipiell wäre es bei der Kalibrierung möglich, die Ausgangsleistung elevationsabhängig zu regeln. Dadurch würde erreicht, dass sich bei niedrigen Elevationen aufgrund einer höheren Sendeleistung das Rauschen reduziert, ohne dass systematische Phasenverschiebungen infolge des elevationsabhängigen Antennengewinns auftreten. Da das aus der gewählten Sendeleistung resultierende Messrauschen bislang bei allen Antennentypen hinreichend gering war, ist der alternative Lösungsansatz bislang nicht umgesetzt worden.

Die Bestimmung der idealen Sendeleistung muss für jeden Antennentyp, nicht aber für jede Antenne durchgeführt werden. Die Einstellungen sind jedoch nach größeren Änderungen am Testaufbau zu überprüfen, da z.B. die Kabeldämpfung oder der Abstand zwischen Sende- und GNSS-Antenne einen Einfluss auf die an der GNSS-Antenne vorliegende Signalstärke haben.

Das generelle Verhalten unterschiedlicher Antennentypen ist durchaus vergleichbar, wohingegen sich die Grenzwerte für starke Systematiken bzw. erhöhtes Rauschen mitunter deutlich unterscheiden. Auch die Verstärkung des Signals durch den Antennenverstärker fällt sehr unterschiedlich aus. In Tabelle 8.2 sind zur Verdeutlichung einige Daten exemplarisch zusammengefasst.

Antenne	gewählte Leistung am NWA	gemessene Dämpfung im Zenit	gemessene Dämpfung im Horizont
Leica AX1202GG	-16 dBm	-8 dB	-20 dB
Leica AT502	-16 dBm	-10 dB	-18 dB
Leica AT504GG	-16 dBm	-6 dB	-20 dB
Trimble Zephyr Geodetic	-28 dBm	8 dB	-2 dB

Tab. 8.2: optimale Sendeleistung und Signaldämpfung am Beispiel einiger Antennen (L1).

Die Sendeleistung ist für die Trimble Zephyr Geodetic Antenne am stärksten abzusenken. Gleichzeitig verstärkt diese Antenne das Signal deutlich mehr als die übrigen. Das Messrauschen ist jedoch für alle bislang untersuchten Antennentypen vergleichbar, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

8.4 Das stochastische Modell des Kalibrieretups

Für die Beurteilung der Kalibrierengenauigkeit muss neben funktionalen Einflussgrößen (z.B. Temperatureinflüsse, Mehrwegeeffekte) auch das stochastische Verhalten des Kalibrieretups beurteilt werden. Bei der Bestimmung des stochastischen Modells bietet es sich an, das Kalibrieresetup schrittweise aufzubauen, um so den Einfluss einzelner Komponenten analysieren zu können. Dies führt zu einem besseren Verständnis des Kalibrierprozesses und ermöglicht die Lokalisierung von Schwachstellen.

In einem ersten Schritt wird die innere Messgenauigkeit (Präzision) des Netzwerkanalysators (NWA) losgelöst vom übrigen Kalibrieresetup analysiert (Abschnitt 8.4.1). Der mögliche Einfluss der Koaxialkabel auf die Präzision wird in einem zweiten Schritt untersucht (Abschnitt 8.4.2) und dann auf das gesamte Kalibrieresetup übergegangen (Abschnitt 8.4.3). Für die Bestimmung der Präzision werden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Auf eine Bewegung der Antenne wird bei diesen Messungen verzichtet, so dass die Positioniergenauigkeit des Drehstandes die Messungen nicht beeinflusst. Dieser Einfluss wird in Abschnitt 8.5 separat analysiert. Die bei längeren Zeitreihen nicht vermeidbaren Temperatureffekte können aufgrund der Untersuchungen in Abschnitt 8.2 abgeschätzt werden. Die Signalstärke ist bei allen Experimenten entsprechend Abschnitt 8.3 anzupassen. Untersuchungen zur Richtigkeit der Phasenmessung folgen in Abschnitt 8.7.

8.4.1 Analyse des Phasenmessrauschens des Netzwerkanalysators

Der Hersteller quantifiziert die bei der Messung der Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal auftretenden zufälligen Messungsunsicherheiten durch einen *RMS* von 0.03° (NWA Agilent ENA E5062A). In diesem Abschnitt wird diese Spezifikation, welche die Präzision des NWA beschreibt, durch empirische Tests bestätigt. Hierzu muss ein Versuchsaufbau gewählt werden, der äußere Einflüsse auf das Messergebnis, die getrennt untersucht werden, weitestgehend ausschließt. Hierzu werden Ein- und Ausgang des NWA mit einem kurzen Kabel (50cm) miteinander verbunden, so dass von der Kabellänge abhängige Effekte (z.B. Temperatureinflüsse) minimiert werden. Eine Darstellung von insgesamt 10895 Wiederholungsmessungen ist in Abb. 8.8 gegeben. Der ausgewählte Zeitraum von etwas mehr als 2 Stunden übersteigt die Kalibrierdauer um das zweifache. Gleichzeitig ist die Abtastrate mit etwa 0.7 Sekunden etwa 4 mal höher als bei der Kalibrierung. Die Temperaturschwankungen lagen im Messzeitraum im Bereich von 0.3°C (ohne Abbildung). Ein signifikanter Temperatureffekt ist aufgrund der geringen Kabellänge nicht zu erwarten.

Die sichtbaren systematischen Effekte (leichte Wellenbewegungen) sind in Relation zur geforderten Messgenauigkeit so gering, dass diese nicht weiter untersucht werden müssen. Unter Vernachlässigung dieser systematischen Anteile, lässt sich das Messrauschen durch eine Standardabweichung von $\sigma = 0.03^\circ$ quantifizieren. Der Vergleich eines aus den Messwerten abgeleiteten Histogramms mit der aus der Varianz abgeleiteten theoretischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

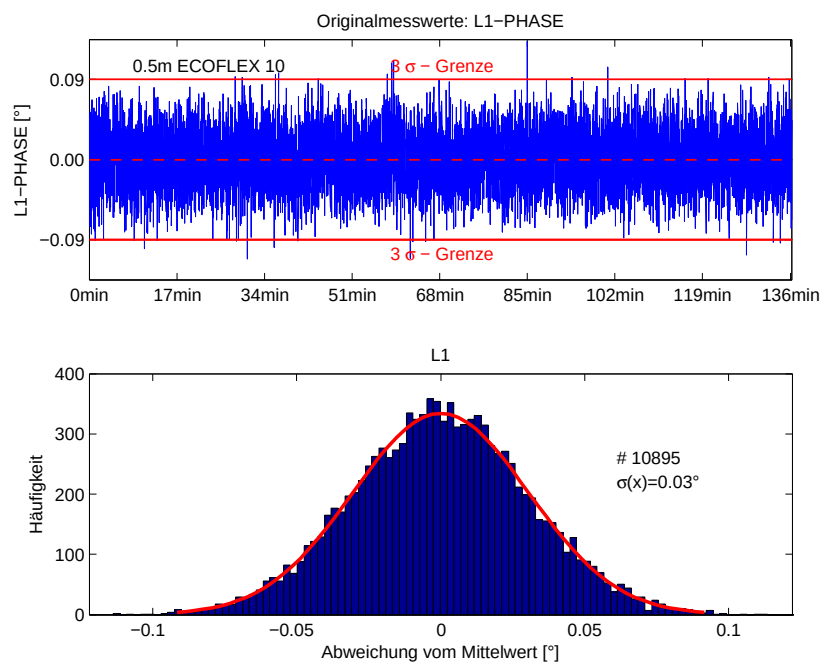


Abb. 8.8: Messrauschen des Netzwerkanalysators (gemessen bei -36 dBm, Abtastrate 0.7 sec).

Zur weiteren Analyse der Phasenmessgenauigkeit und zur Detektion von sich wiederholenden Systematiken ist in Abbildung 8.9 zusätzlich die Autokorrelationsfunktion der Zeitreihe dargestellt. Die Autokorrelationsfunktion berücksichtigt, im Gegensatz zum Histogramm, den zeitlichen Verlauf der Messreihe und ermöglicht die Beurteilung der Erhaltungsneigung des Systems (NIEMEIER 2002). Während im oberen Teil die Autokorrelationsfunktion für die ersten 10% der Messwerte dargestellt ist, zeigt die untere Grafik einen Ausschnitt der ersten 10 Werte. Es wird sichtbar, dass die Korrelation bereits bei einer Verschiebung um eine Position

auf unter 10 Prozent herabsinkt. Aufeinanderfolgende Messwerte können im Rahmen der geforderten Messgenauigkeit somit als vollständig unkorreliert betrachtet werden. Für die Kalibrierung bedeutet dies auch, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Messungen nicht wegen der Erhaltungsneigung des NWA vergrößert werden muss.

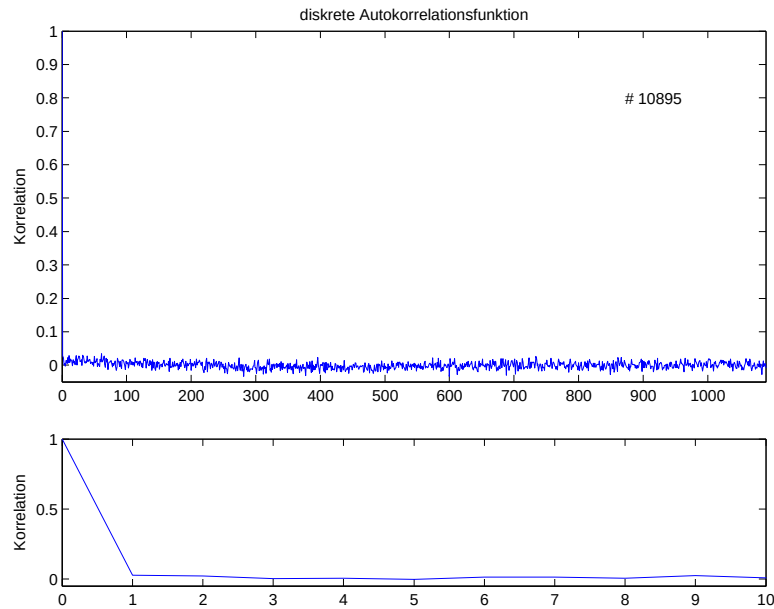


Abb. 8.9: Autokorrelationsfunktion zur Beurteilung der Erhaltungsneigung der Phasenmessung.

Die durch den NWA verursachten zufälligen Messungsunsicherheiten können bei der Kalibrierung vernachlässigt werden. Das Messrauschen liegt mit $\sigma = 0.03^\circ \leq 0.02mm$ um den Faktor 10 unterhalb der Kalibrieranforderungen und mindestens um Faktor 40 unter der derzeit erreichten Kalibriergenauigkeit. Anzumerken ist, dass konstante systematische Einflüsse durch die Untersuchungen nicht aufgedeckt werden können. Solche über die gesamte Kalibrierdauer konstanten Anteile sind für die Kalibrierung jedoch ohne Bedeutung, da aufgrund des differentiellen Messverfahrens (Richtungsdifferenzen) konstante Anteile bei der Differenzbildung eliminiert werden.

Neben den dargestellten Experimenten wurden weitere Tests mit höheren Abtastraten und längeren Messreihen durchgeführt. Auf deren Darstellung wird jedoch aufgrund der Ähnlichkeit zu dem hier dargestellten Beispiel verzichtet. Insgesamt kann die Herstellerangabe von $\sigma = 0.03^\circ$ bestätigt werden (frequenzunabhängig). Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die bei der Kalibrierung eingesetzten Kabel zu einer Verschlechterung der Signalqualität und zu einer Steigerung des Messrauschen bei der Kalibrierung führen.

8.4.2 Einfluss der Kabel auf die Phasenmessgenauigkeit

Bei der leitungsgebundenen Übertragung hochfrequenter Messsignale treten in Abhängigkeit von Frequenz und Kabeltyp Leitungsverluste auf. Neben der Abschwächung des Signals (Dämpfung), die auch zu einer Verschlechterung des SNRs und somit gegebenenfalls zu einer Verringerung der Phasenmessgenauigkeit führt, sind auch zusätzliche Störeinflüsse denkbar, die das Rauschen erhöhen oder zu systematischen Phasenverschiebungen führen können (z.B. Temperatur, Inhomogenitäten im Kabel, Störstrahlung, schlechte Steckerverbindungen).

Während die Signaldämpfung durch eine Anpassung der Signalstärke ausgeglichen werden kann, ist die Existenz möglicher weiterer Einflussgrößen empirisch zu überprüfen. Hierzu wird ein Versuchsaufbau ähnlich dem in Abschnitt 8.4.1 beschriebenen verwendet. Anstelle des kurzen 50cm-Kabels werden jedoch die bei der Kalibrierung eingesetzten Kabel verwendet. Da bei den bisherigen Kalibrierungen die Messentfernung (Abstand Sender-Testantenne) variiert wurde und dabei unterschiedliche Kabellängen (identischer Kabeltyp) zum Einsatz kamen, wurden die Tests mit der längsten verwendeten Kabelkonfiguration (insgesamt 40 Meter) durchgeführt. Die Tests stellen somit einen Extremfall dar.¹⁰ Das Ergebnis dieses Versuchs ist in Abbildung 8.10 dargestellt.

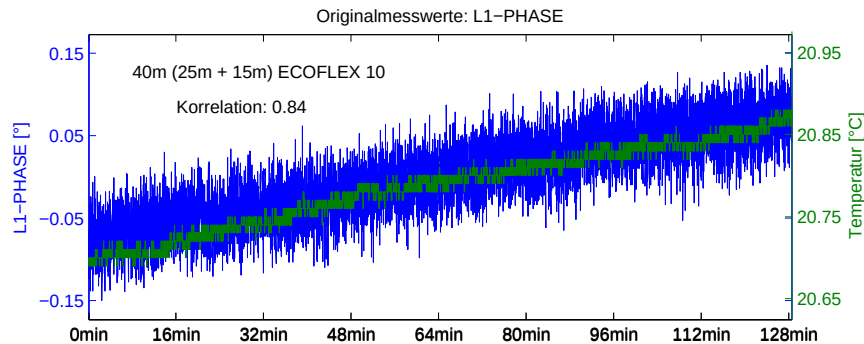


Abb. 8.10: Bestimmung der Auswirkung der Kabelverbindung (40m) zwischen Ein- und Ausgang des NWA auf die Messgenauigkeit.

Sowohl die Phasenlage (linke Achse) als auch die Temperatur (rechte Achse) zeigen einen linearen Trend, wobei die Phasenverschiebung hauptsächlich durch die Temperaturänderung verursacht wird, wie bereits in Abschnitt 8.2 gezeigt wurde. Nach dem dort festgestellten Zusammenhang von 0.04° Phasenverschiebung pro 1°C Temperaturunterschied und 1m Kabellänge (Werte für L1) müsste sich hier ein Einfluss von 0.25° Phasenverschiebung zeigen ($0.04^\circ / (^\circ\text{C} \cdot \text{m}) \cdot 0.13^\circ\text{C} \cdot 40\text{m}$). Tatsächlich sichtbar sind jedoch nur ca. 0.15° . Bei der Bewertung dieser Differenz zwischen der tatsächlichen und der rechnerisch abgeleiteten Phasenverschiebung von 0.1° muss berücksichtigt werden, dass die gemessene Temperatur nicht repräsentativ für die gesamte Kabellänge ist. Zudem ist der in Abschnitt 8.2 abgeleitete Temperatureinfluss mit relativ einfachen Mitteln bestimmt worden.

Unabhängig davon, ob dieser zusätzliche Betrag von 0.1° ebenfalls der Temperatur oder einer anderen Ursache zuzuschreiben ist, kann dieser Effekt bei der Kalibrierung vernachlässigt werden. Die in Abschnitt 8.2 beschriebene Verwendung der Referenzmessungen zur Überwachung oder Korrektur von systematischen Effekten, führt zu einer weitestgehenden Elimination der Effekte. Voraussetzung hierfür ist, dass im Zeitbereich zwischen den Referenzmessungen von etwa 5 Minuten keine deutlichen nichtlinearen Effekte auftreten. Diese Bedingung ist hier erfüllt, so dass zur Analyse der zufälligen Anteile übergegangen werden kann. Die nach Abspaltung eines linearen Trends verbleibenden Residuen sind in Abbildung 8.11 dargestellt.

Das verbleibende Messrauschen unterscheidet sich nicht signifikant von den in Abschnitt 8.4.1 abgeleiteten Ergebnissen mit kurzer Kabelverbindung (0.5m). Das Messrauschen liegt weiterhin im Bereich von $\sigma = 0.03^\circ$ und systematische Effekte sind nicht erkennbar. Dies wurde auch durch Bildung der Autokorrelationsfunktion geprüft. Auf die Darstellung der Autokorrelationsfunktion und der Ergebnisse für die übrigen Frequenzen wird verzichtet. Letztere sind mit den gezeigten Resultaten für L1 vergleichbar. Es kann festgehalten werden, dass die verwendeten Kabel keine Verringerung der Phasenmessgenauigkeit verursachen.

¹⁰In der Antennenmesskammer Bonn beträgt die Kabellänge ca. 20-25 Meter.

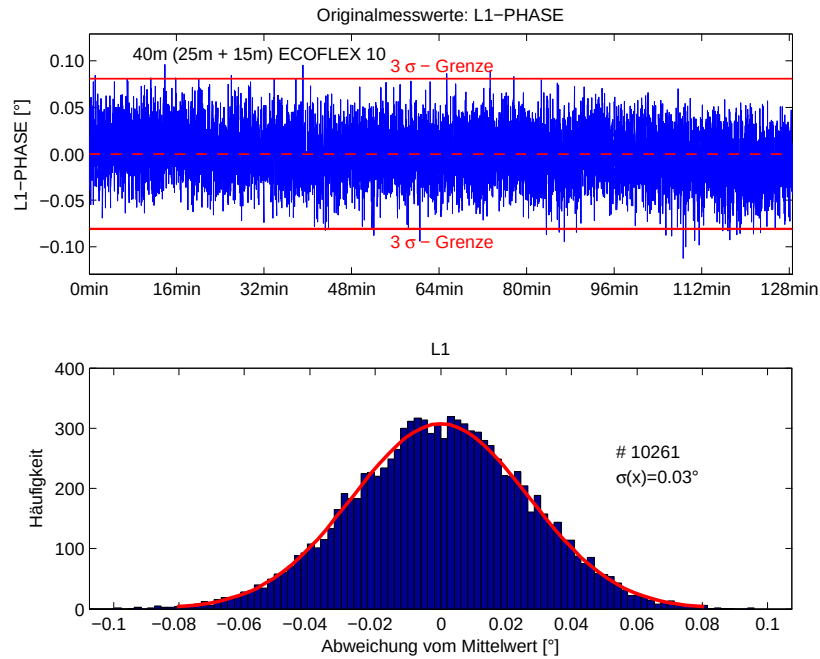


Abb. 8.11: Analyse des Phasenmessrauschen nach Abspaltung des linearen Trends.

8.4.3 Analyse der Phasenmessgenauigkeit des gesamten Systems

Bei den bisherigen Versuchen wurde die Rauschcharakteristik des NWA sowie der Einfluss der Kabel auf das Messrauschen analysiert. Nun wird für die Analyse des Systemrauschens die vollständige Kalibrierereinrichtung entsprechend Abb. 6.2 verwendet. Die Messungen hierzu wurden in der AMK-Bonn durchgeführt. Im Vergleich zur vorherigen Messung unterscheidet sich dieser Aufbau im Wesentlichen dadurch, dass das Signal nicht ausschließlich leitungsgebunden übertragen wird, sondern wie bei der Kalibrierung eine Freiraumübertragung vom Sender zur testenden GNSS-Antenne stattfindet. Neben dem Einfluss des Senders und der GNSS-Antenne (in Abhängigkeit von der Einstrahlrichtung) würden bei diesen Test auch Einflüsse durch Fremdstrahlung oder andere äußere Effekte sichtbar.

Da die empfangene Signalstärke von der Einstrahlrichtung abhängig ist (insbesondere von der Elevation), wurden die Tests mit zwei Einstellungen (Sender in Zenit- und in Horizontrichtung) durchgeführt. Auf eine Drehung der Antenne während der Testmessungen wurde verzichtet, so dass sich Unsicherheiten der Positionierung nicht auf die Ergebnisse auswirken. Da bei diesen Versuchen auch Einflüsse der GNSS-Antenne denkbar sind, wurden die Untersuchungen für verschiedene Antennentypen durchgeführt. Die Signalstärke wurde dabei jeweils entsprechend des in Abschnitt 8.3 erläuterten Verfahrens angepasst. In Abbildung 8.12 sind die Ergebnisse für die Trimble Zephyr Geodetic Antenne und der Zenit-Ausrichtung dargestellt.

Bei dieser Zeitreihe treten Schwingungen mit Amplituden von $0.03^\circ \approx 0.02\text{mm}$ auf. Die Ursache konnte nicht gefunden werden. Da die Effekte bei L1 nicht sichtbar sind (ohne Abbildung), können tatsächliche Änderungen des Messabstands ausgeschlossen werden. Auch Temperatureffekte wären bei beiden Frequenzen sichtbar. Aufgrund der geringen Größenordnung können die Effekte jedoch bei der Kalibrierung vernachlässigt werden. Das sichtbare Rauschen entspricht etwa dem Messrauschen, welches bei den bisherigen Versuchen festgestellt wurde. Die zusätzlichen Komponenten beeinflussen das Rauschen somit nicht signifikant. Auch hier sind zwischen den verschiedenen GNSS-Frequenzen keine signifikanten Unterschiede vorhanden.

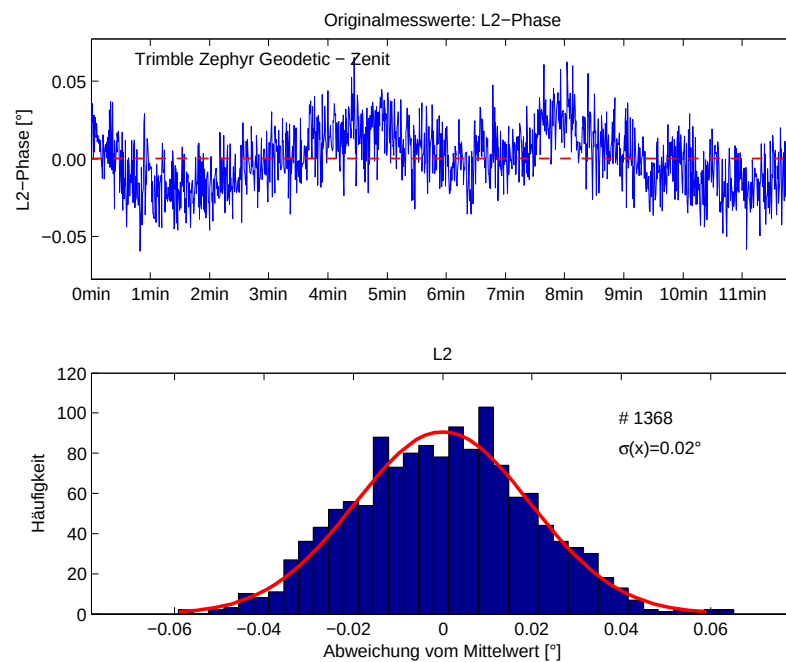


Abb. 8.12: Messrauschen des Systems - Trimble Zephyr Geodetic - Zenit.

Der Gewinn heute gebräuchlicher GNSS-Antennen nimmt, wie bereits mehrfach erwähnt, vom Zenit zum Horizont hin ab (s. Abschnitt 12.2), so dass das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) am Horizont am geringsten ist¹¹. Das Messrauschen steigt bei dieser Antennenausrichtung um Faktor 4-5 auf $\sigma = 0.04mm - 0.05mm$ an (s. Abb. 8.13).

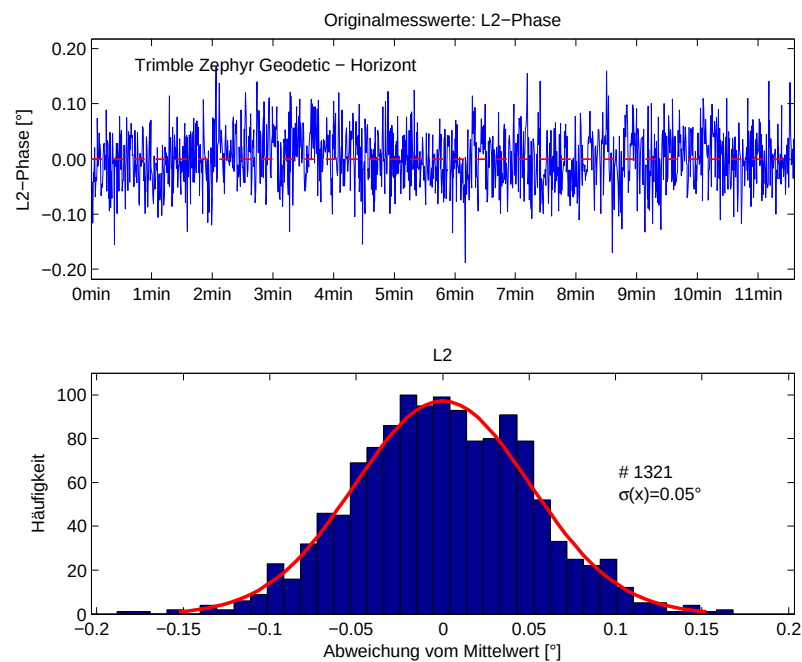


Abb. 8.13: Messrauschen des Systems - Trimble Zephyr Geodetic - Horizont.

¹¹ Auf die Empfangseigenschaften der Antennen unterhalb des Antennenhorizontes wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Das Ergebnis ist für alle Frequenzen im Bereich von 1.15 GHz bis 1.65 GHz identisch, wenn die Frequenzen im Arbeitsbereich der Antenne liegen (vgl. Abb. 12.1). Auch das Messrauschen am Horizont kann bei der Kalibrierung vernachlässigt werden, da die in Kapitel 3 hergeleitete Kalibrieranforderung für Messungen im Horizont mit 1mm um den Faktor 20 höher liegt als das hier erfasste Messrauschen. Prinzipiell ist denkbar, dass die Messgenauigkeit von der verwendeten Antenne abhängig ist. Bei den bislang getesteten Antennen wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede sichtbar (s. Tabelle 8.3).

Elevation	Zenit	Horizont
Trimble Zephyr Geodetic	$\sigma \approx 0.01\text{mm}$	$\sigma \approx 0.04\text{mm}$
Leica AR25	$\sigma \approx 0.01\text{mm}$	$\sigma \approx 0.04\text{mm}$
Leica AT504 GG	$\sigma \approx 0.01\text{mm}$	$\sigma \approx 0.05\text{mm}$
Leica AT502	$\sigma \approx 0.01\text{mm}$	$\sigma \approx 0.04\text{mm}$
Leica AX1202 GG	$\sigma \approx 0.01\text{mm}$	$\sigma \approx 0.05\text{mm}$

Tab. 8.3: Phasenmessgenauigkeit unterschiedlicher Antennen im Zenit und am Horizont

Durch die in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen wird deutlich, dass die Messgenauigkeit des Kalibrieraufbaus bezüglich der Phasenmessung selbst bei einer Einzelmessung ausreichend ist. Bei der Kalibrierung werden dennoch vier Messungen durchgeführt und analysiert, so dass auch eine Kontrolle der Einzelmessung durch die Berechnung der Standardabweichung möglich ist. Auch wenn die Anzahl der Messwerte für die Berechnung einer zuverlässigen Standardabweichung relativ gering ist, genügt das, um bei der Kalibrierung zu prüfen, ob z.B. eine fehlerhafte Anpassung der Signalstärke (ein deutlich zu schwaches Signal führt zu einem stärkeren Rauschen) oder eine fehlerhafte Koaxialverbindung (Steckerverbindungen, Kabelbeschädigungen) vorliegt. Auch mechanische Probleme bei schweren Antennen (starkes Nachschwingen der Dreheinrichtung nach der Positionierung) werden hier sichtbar. In Abbildung 8.14 sind die bei einer Kalibrierung ermittelten Standardabweichungen der Einzelmessungen dargestellt.

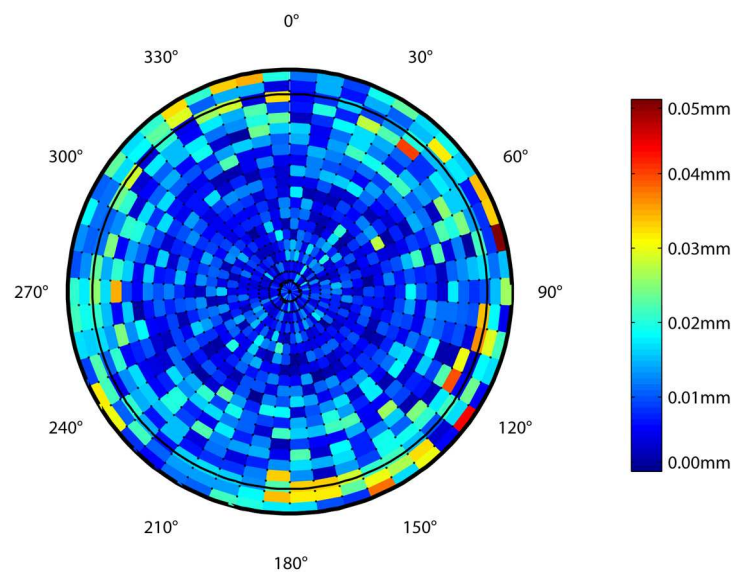


Abb. 8.14: Richtungsabhängige Standardabweichungen der Einzelmessung. Ermittelt aus jeweils 4 Wiederholungsmessungen während der Kalibrierung.

In dieser Polardarstellung stellt der Kreismittelpunkt den Zenit dar, während sich die niedrigen Elevationen am Figurenrand befinden. Jedes Flächenelement repräsentiert eine Einstrahlrichtung. Die äußere schwarze Linie stellt den Horizont dar, die innere Linie kennzeichnet eine Elevation von 10° . Die Farben kennzeichnen die Größe der Standardabweichung. Der Azimut lässt sich anhand der Beschriftung ableiten.

Das Ergebnis bestätigt das oben abgeleitete Messrauschen. Die hier noch etwas geringeren Werte resultieren daraus, dass der zeitliche Abstand zwischen den Messungen sehr gering ist und sich hieraus eine höhere Korrelation ergibt. Dennoch wird die Größenordnung und die Elevationsabhängigkeit des Rauschens bestätigt.

Theoretisch bestünde bei der Kalibrierung die Möglichkeit, die Anzahl der Messwerte pro Antennenausrichtung zur Verminderung des Messrauschens zu erhöhen. Da die systematischen Einflüsse, wie noch gezeigt wird, eindeutig dominieren, wird jedoch darauf verzichtet. Sollte eine bislang nicht untersuchte Antenne ein stärkeres Messrauschen verursachen, könnte die Anzahl der Beobachtungen erhöht werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in diesem Fall wahrscheinlich auch die in der Praxis mit dieser GNSS-Antenne erreichbare Phasenmessgenauigkeit geringer ist, so dass sich auch die Kalibrieranforderungen reduzieren.

Bislang wurde lediglich die Präzision der Phasenmessung analysiert. Da bei den für die Beurteilung der Richtigkeit durchzuführenden Experimenten weitere Unsicherheitsquellen berücksichtigt werden müssen, wird zunächst auf diese eingegangen, bevor in Abschnitt 8.7 Untersuchungen zur Richtigkeit der Phasenmessung dargestellt werden.

8.5 Einfluss der Positioniergenauigkeit des Drehstandes auf die Kalibrierung

Die Positioniergenauigkeit des Antennendrehstandes in Bezug auf den Sender stellt einen weiteren wichtigen Aspekt bei der Bewertung der Kalibriergenauigkeit dar (vgl. Abschnitt 3.2, Gleichung 3.2). Bei der Beurteilung der aus einer Positionsabweichung resultierenden Phasenverschiebung müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden. So wird die an der tatsächlich angesteuerten Antennenausrichtung (Ist-Ausrichtung) ermittelte Antennencharakteristik der im Messprogramm vorgesehenen Ausrichtung (Soll-Ausrichtung) zugeordnet (Geometrie siehe Abbildung 8.18). Die Auswirkung der Positionsabweichung hängt somit von der Struktur des Antennenpatterns ab. Je größer die richtungsabhängigen Variationen sind, desto größer werden die resultierenden Phasenabweichungen.

Bei der azimuthalen Drehung ist dieser Effekt weniger bedeutsam, da die azimuthalen Variationen des Antennenpatterns stets klein sind. Zu berücksichtigen ist jedoch der Einfluss des phase-wind-up-Effektes der bei zirkular und elliptisch polarisierten Signalen resultiert (Abschnitt 7.3). Dieser verursacht bei einer azimuthalen Drehung der Antenne eine Phasenverschiebung in der Größe des Drehwinkels. Bei der Kalibrierung wird zur Berücksichtigung des phase-wind-up-Effektes die Azimutposition von der Phasenmessung abgezogen. Eine eventuelle Abweichung des Drehwinkels vom Soll-Wert führt somit zu einer Phasenabweichung in exakt der Größe der Rotationsabweichung.

8.5.1 Genauigkeit der Positionierung

Bei der Konstruktion des Drehstandes müssen einige speziellen Anforderungen erfüllt werden, die teilweise zu Kompromissen hinsichtlich der Genauigkeit des Antennendrehstandes führen. Diese Aspekte sind in der folgenden Aufzählung dargestellt.

1. Beim Oberbau (Abb. 8.15): Führung des Antennenkabels durch die Hohlwelle ($\rightarrow$ große Dimensionierung der Achse und starke Einschränkung bei der Wahl von Getriebe- und Antriebstechnik)
2. Maximierung des Abstands der Antenne vom Unterbau und von elektromagnetischen Störkomponenten (z.B. Schrittmotor)
3. Maximierung des Drehmomentes für die Kalibrierung schwerer oder ausladender Antennen (z.B. bei Nahfeldexperimenten)
4. weitestmögliche Vermeidung von Reflexionsquellen im Antennen-nahfeld (z.B. durch Reduktion der Abmessungen des Drehstandes)
5. Minimierung des Eigengewichtes
6. Minimierung notwendiger Wartungsarbeiten
7. Minimierung der Kosten

Auf eine genaue Beschreibung der Konstruktion kann an dieser Stelle verzichtet werden. Es sei nur hervorgehoben, dass sich die Antriebskombination aus Schrittmotor, Planetengetriebe und Riemenantrieb dadurch auszeichnet, dass die Positioniergenauigkeit konstruktionsbedingt unabhängig vom Rotationswinkel ist. Eine Aufsummierung möglicher Unsicherheiten findet nicht statt. Eine Ausnahme stellt hier der „Verlust“ von Schritten durch den Schrittmotor dar. Dies tritt jedoch nur auf, wenn der Schrittmotor bei zu hohen Drehmomenten trotz der vorhandenen Untersetzungen an seiner Leistungsgrenze betrieben wird. Solche Effekte werden allerdings aufgrund ihrer Größenordnung z.B. durch die bereits in Abschnitt 8.2 erläuterten Kontrollmessungen sichtbar.

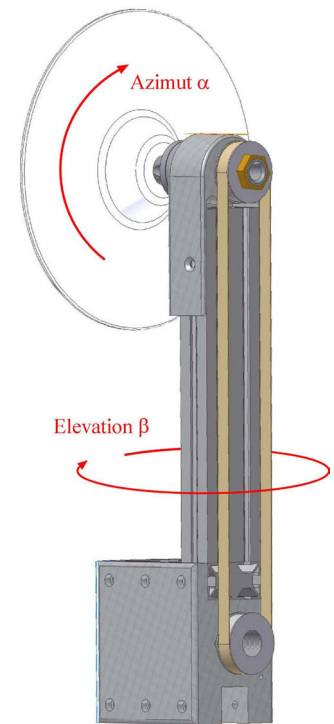


Abb. 8.15: Oberbau des Antennendrehstandes.

Zur Überprüfung der Positioniergenauigkeit des Unterbaus der Dreheinrichtung (Elevations-Achse) kann auf diesen statt des Oberbaus ein Theodolit montiert werden. Der mit dem Drehstand angesteuerte Drehwinkel lässt sich so mit übergeordneter Genauigkeit überprüfen. Bei den bisherigen Versuchen wurde als Zielzeichen eine 6m entfernte Zielmarke verwendet, wodurch die Richtungsmessgenauigkeit in erster Linie durch die Anzielgenauigkeit und nicht durch die Genauigkeit des Theodolits begrenzt ist. Die Anzielung des Zielzeichens ist dabei mit einer Genauigkeit von $\sigma = 0.3mm$ möglich. Dies entspricht bei einer Entfernung von 6m einer Winkelmessgenauigkeit (2 Richtungen) von etwa $\sigma = 0.005^\circ$, so dass die Unsicherheiten der Referenzmessungen zu vernachlässigen sind.

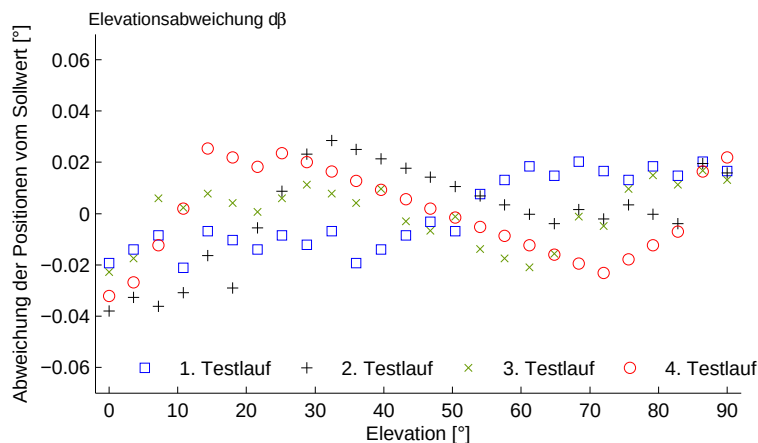


Abb. 8.16: Beurteilung der Positioniergenauigkeit mit Hilfe von Tachymetermessungen.

Die vier exemplarisch ausgewählten Testmessungen zeigen Abweichungen im Bereich von $\pm 0.04^\circ$, so dass bei der Kalibrierung nicht mit Positionsabweichungen von mehr als 0.1° ($\approx 2 \cdot 0.04^\circ$) gerechnet werden muss (maximale Abweichung).

Für den Oberbau kann die Überprüfung der Positioniergenauigkeit mit dem vorgestellten Verfahren wegen der horizontalen Lage der Rotationsachse nicht in Gebrauchslage durchgeführt werden. Aufgrund der Verwendung höherwertiger Komponenten (Motor, Getriebe) und einer noch präziseren Fertigung sind die zu erwartenden Abweichungen hier noch geringer. Bei den folgenden Abschätzungen zur Auswirkung der Positionierunsicherheit auf das ermittelte Antennenpattern wird dennoch für beide Rotationen von einer maximalen Abweichung von 0.1° ausgegangen, da so keine zu optimistischen Annahmen folgen.

Die genannte Positioniergenauigkeit von 0.1° ist nur zu erreichen, wenn der Zahnkranz des Riemenantriebes stets an der gleichen Flankenseite des Zahnriemens anliegt. Ist dies nicht der Fall, ist die Einhaltung der Genauigkeit aufgrund des Riemenspiels nicht möglich. Bei der Kalibrierung werden deshalb alle Messpositionen stets aus der gleichen Richtung angefahren.

8.5.2 Auswirkung der relativen Positioniergenauigkeit auf die ermittelte Phasenlage

Die Auswirkung der Positioniergenauigkeit auf die Erfassung der richtungsabhängigen Phasenvariationen wurde in Abschnitt 8.2 bereits teilweise sichtbar. Die dort in Abbildung 8.4 (untere Grafik) dargestellten Referenzmessungen beinhalten neben Temperatureffekten und zufälligen Abweichungen der Phasenmessung auch den Einfluss der Positioniergenauigkeit. Die Variationen von maximal 0.05mm würden einem phase-wind-up-Effekt und somit einer Positioniergenauigkeit von $0.1^\circ \approx 0.05\text{mm}$ entsprechen. Allerdings ist wegen der genannten übrigen Messungsunsicherheiten davon auszugehen, dass nur ein geringer Anteil der in Abbildung 8.4 sichtbaren Abweichungen auf die Positionierunsicherheiten zurückzuführen ist. Die oben für den Oberbau abgeschätzte Genauigkeit von 0.1° wird demnach zumindest eingehalten. Zudem kann festgehalten werden, dass die resultierende Auswirkung der Positionierunsicherheit von 0.05mm , unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 genannten Kalibrieranforderungen, vernachlässigt werden kann.

Neben der Auswirkung des phase-wind-up-Effektes muss berücksichtigt werden, dass aufgrund einer Positionierabweichung nicht die Phasenvariation der gewünschten Einstrahlrichtung (α, β) , sondern der entsprechende Wert für eine leicht unterschiedliche Richtung $(\alpha + d\alpha, \beta + d\beta)$ erfasst wird. Diese Situation ist in Abb. 8.17 geschildert (dargestellt ist nur die Elevation β).



Abb. 8.17: Einfluss der Positioniergenauigkeit auf die Abtastung richtungsabhängiger Phasenvariationen.

Von einer Positionierabweichung von 0.1° ausgehend, muss nun geprüft werden, wie groß die Unterschiede des Antennenpatterns an zwei um 0.1° verschiedenen Einstrahlrichtungen sein können (Anteile von PCO und PCV). Als zulässiger Grenzwert wird erneut eine maximale Phasenabweichung von 0.1mm angestrebt. Da der Einfluss des PCOs im Vergleich zu den PCV groß ist (siehe Kapitel 2), wird diese Abschätzung zunächst am Beispiel des PCOs durchgeführt. In Abb. 8.18 ist die Kreisbahn des mittleren Phasenzentrums um den Rotationspunkt POR der Dreheinrichtung dargestellt.

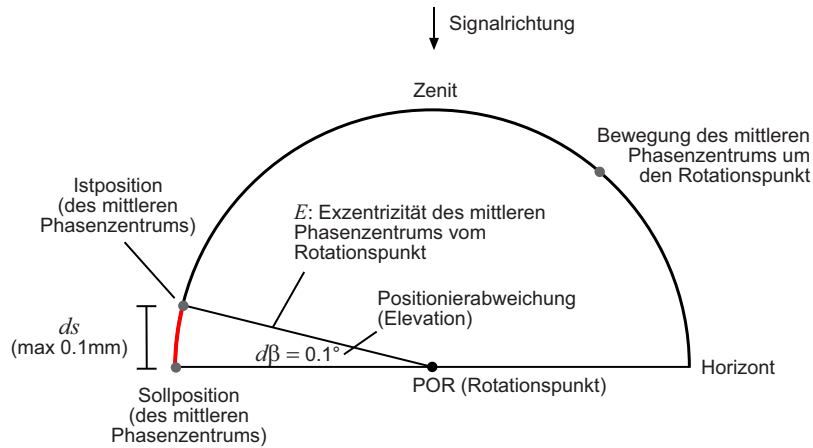


Abb. 8.18: Auswirkung der Positioniergenauigkeit - Anteil des mittleren Phasenzentrums.

Die Exzentrizität E des mittleren Phasenzentrums führt bei einer Positionierabweichung $d\beta$ zu einer geometrischen Veränderung des Abstands ds zwischen dem mittleren Phasenzentrum und der Sendeanenne. Dieser Einfluss ist am Horizont am größten. Aus der Vorgabe einer maximal zulässigen Phasenverschiebung von 0.1mm und einer bekannten Positionierabweichung von 0.1° lässt sich ableiten, dass sich erst ab einer Exzentrizität von

$$E \approx \frac{ds}{d\beta} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{0.1\text{mm}}{0.1^\circ} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57\text{mm} \quad (8.8)$$

eine relevante Phasenverschiebung ergibt. Da bei der Kalibrierung das mittlere Phasenzentrum zumindest näherungsweise in den Rotationspunkt (POR) geschoben wird (s. Abschnitt 6.4), treten Exzentrizitäten von über zwei bis maximal drei Zentimeter nicht auf. Aus der Exzentrizität des Phasenzentrums und der Positioniergenauigkeit folgen somit keine signifikanten Einflüsse. Da die PCV eine Größenordnung von ein bis zwei Zentimeter nicht überschreiten, lässt sich dieses Ergebnis auch auf die PCVs übertragen. Zur Kontrolle können bei der Kalibrierung die gemessenen Elevationsscans betrachtet werden. Exemplarisch ist in Abbildung 8.19 ein solcher Elevationsscan für eine Antenne vom Typ Leica AR25, der vergleichsweise große PCV aufweist, dargestellt.

Die obere Grafik zeigt die gemessene Phasenlage, die sich aus den Phasenzentrumsvariationen und dem verbleibenden Anteil des Phasenzentrums (ungenau Anpassung an den Rotationspunkt der Achse) zusammensetzt. Die untere Grafik veranschaulicht die Phasendifferenzen zwischen zwei benachbarten Messpositionen. Aus diesen Differenzen lässt sich der maximale Einfluss der Positioniergenauigkeit abschätzen. Hier liegt die maximale Differenz bei ca. 4° bzw. etwa 2mm , wobei die Einstrahlrichtung um 4.5° verändert wurde. Bei einem näherungsweise linearen Verlauf zwischen den Positionen 0° und 4.5° Elevation resultiert aus einer Positionsunsicherheit von 0.1° eine Phasenabweichung von etwa 0.045mm ($\approx 2\text{mm}/4.5^\circ \cdot 0.1^\circ$). Somit bestätigt sich, dass dieser Anteil vernachlässigt werden kann.

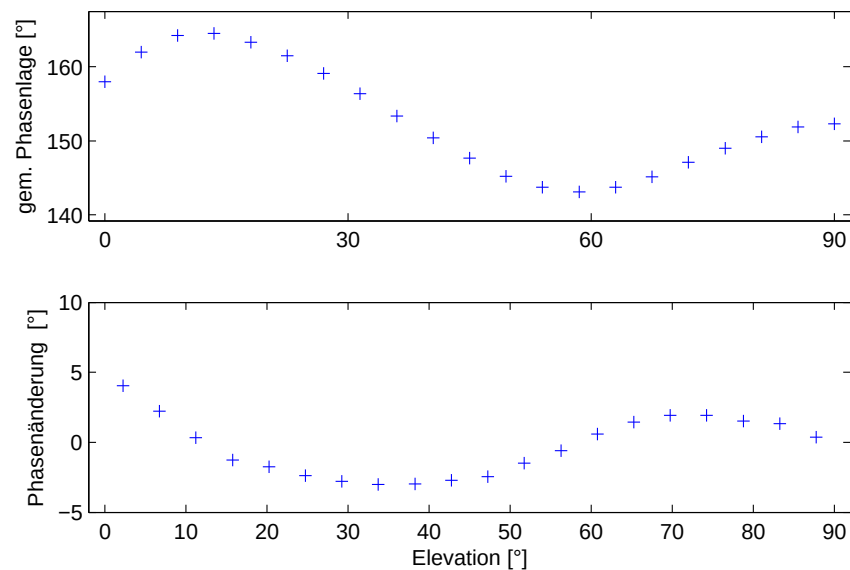


Abb. 8.19: Elevationsabhängige Phasenvariationen am Beispiel eine Leica AR25 Antenne (L1).

8.5.3 Auswirkung der absoluten Positioniergenauigkeit auf die ermittelte Phasenlage

Bislang wurde lediglich die Positionsänderung untersucht, wobei keine signifikanten Einflüsse sichtbar wurden. Vernachlässigt wurde, dass die Antennenanfangsausrichtung bei der Kalibrierung nicht mit einer Positioniergenauigkeit von 0.1° (max. Abweichung) eingestellt werden kann. Im Falle des Azimuts wird die Anfangsausrichtung manuell und ohne Hilfsmittel eingestellt, wobei Abweichungen von ca. $1^\circ - 2^\circ$ nicht vermieden werden können. Ein signifikanter Einfluss würde - entsprechend der obigen Überlegungen - bereits bei einem Radius von 3mm auftreten (Abb. 8.18). Zum einen sind jedoch die hier relevanten Lagekomponenten des PCOs meist kleiner als 3mm . Zum anderen wirkt sich der Effekt des Lageoffsets nur bei Messungen im Horizont voll aus. Dort sind die Genauigkeitsansprüche aber deutlich geringer (Faktor 3-5), weshalb eine höhere Genauigkeit bei der azimutalen Ausrichtung der Antenne nicht notwendig ist. In der Praxis wird zudem ebenfalls auf eine genauere Ausrichtung verzichtet, so dass eine Genauigkeitssteigerung im Labor keine positive Auswirkung für die Praxis bedeuten würde. Der phase-wind-up-Effekt muss hier nicht berücksichtigt werden, da alle Azimut-Einstellungen von der Anfangsorientierung gleichermaßen betroffen sind.

Im Falle der Elevation wird die Antenne zu Beginn der Kalibrierung so ausgerichtet, dass sich der Sender im Zenit der GNSS-Antenne befindet. Die Ausrichtung kann dabei durch einen Laserpointer erfolgen, der am Dreharm befestigt wird und so die Zenitrichtung der GNSS-Antenne visualisiert. Um den manuellen Aufwand bei der Kalibrierung zu reduzieren, wird die Anfangsorientierung stattdessen durch einen mechanischen Anschlag markiert, dessen Position bei der Einrichtung der Kalibriereinrichtung mit Hilfe des Lasers festgelegt wurde.

Bei der Ausrichtung der Antenne ergibt sich zudem das prinzipielle Problem, dass die Lage des Phasenzentrums des Senders nicht bekannt ist und die Ausrichtung folglich lediglich auf die Sendermitte erfolgen kann. Die gesamte Abweichung δ von der Soll-Ausrichtung setzt sich somit zum einen aus der Ungenauigkeit der Anzielung mit dem Laserspot δ_1 und zum anderen aus der unbekannten Lage des Sendezentrums δ_2 zusammen. Diese Situation ist in Abbildung 8.20 dargestellt.

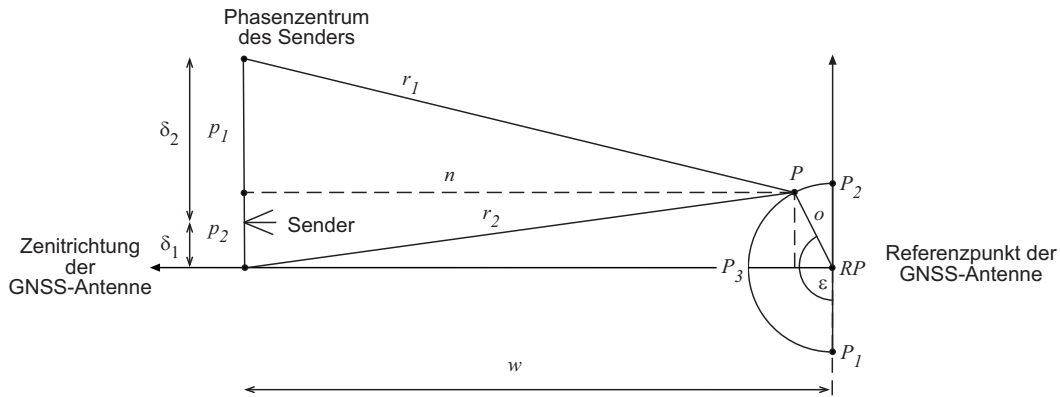


Abb. 8.20: Einfluss der Ausrichtung der GNSS-Antenne zum Sender.

Aus der nicht korrekten Ausrichtung ergeben sich zwei Einflüsse:

1. Der erste Einfluss resultiert, wie bei der relativen Positioniergenauigkeit, aus einer falschen Zuordnung der Phasenbeobachtungen. Wird für eine Abschätzung der maximal auftretenden Phasenverschiebung eine Anziabweichung von $\delta_1 = 1\text{cm}$ sowie eine maximale Abweichung des Phasenzentrums des Senders aus der Antennensymmetrieachse von $\delta_2 = 2\text{cm}$ (Anmerkung: die Lagekomponenten des Offsets übersteigen bei GNSS-Antennen selten eine Größenordnung von wenigen Millimetern), so ergibt sich eine Gesamtabweichung von $\delta = 3\text{cm}$, was bei einer Teststrecke von $w = 6.5\text{m}$ (Messabstand AMK Bonn) einer Ausrichtungsungenauigkeit von ca. 0.25° entspricht. Im Vergleich zur relativen Positioniergenauigkeit von 0.1° (max. Abweichung) steigt der Einfluss der absoluten Ausrichtung somit um Faktor 2.5 an. Somit erhöhen sich die in Abschnitt 8.5.2 ermittelten Einflüsse auf folgende Werte:

- a) Einfluss der Positionierabweichung aufgrund einer Exzentrizität des PCOs von 57mm : 2.5mm oder: Einhaltung des Grenzwertes durch Reduktion der Exzentrizität auf 23mm (aktuelle Praxis)
- b) Einfluss der Positionierabweichung aufgrund der PCV: $0.11\text{mm} = 0.045\text{mm} \cdot 2.5$

Die aus der absoluten Ausrichtung resultierenden Einflüsse erfüllen die angestrebte Kalibrierengenauigkeit von $\sigma_{30-90^\circ} = 0.2 - 0.3\text{mm}$ nur bedingt. Aufgrund der zur Zeit dominierenden Nahfeldeffekte (s. Kapitel 10) kann dennoch vorerst auf weitere Optimierungen verzichtet werden.

2. Der zweite Einfluss folgt aus dem Streckenunterschied zwischen der tatsächlich bei der Kalibrierung relevanten Distanz r_1 (Abstand zwischen den Phasenzentren von GNSS-Antenne und Sender) und der bei der Auswertung angenommenen Distanz r_2 . Dieser Modellfehler führt zu einer Phasenverschiebung entsprechend der Streckendifferenz $r_2 - r_1$.

Zur Abschätzung des Einflusses müssen die Strecken r_1 und r_2

$$r_1 = \sqrt{p_1^2 + n^2} \quad r_2 = \sqrt{p_2^2 + n^2} \quad (8.9)$$

berechnet werden, wobei sich die Katheten p_1 , p_2 und n

$$p_1 = \delta + o \cdot \cos(\epsilon) \quad (8.10)$$

$$p_2 = o \cdot \cos(\epsilon) \quad (8.11)$$

$$n = w - o \cdot \sin(\epsilon) \quad (8.12)$$

in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger w , der Abweichung des aktuellen Phasenzentrums vom Rotationspunkt o und dem Elevationswinkel ϵ berechnen lassen. Die auftretende Phasenabweichung ergibt sich dann aus der Differenz der Strecken p_1 und p_2 .

In Tabelle 8.4 ist eine Abschätzung für drei Extremstellen (P1: $\epsilon = 0^\circ$, P2: $\epsilon = 180^\circ$, P3: $\epsilon = 90^\circ$) gegeben, wobei neben den obigen Annahmen eine Abweichung des Bezugspunktes der Phasenmessung vom Rotationspunkt von $o = 3\text{cm}$ angesetzt wurde.

-	$r_1 [m]$	$r_2 [m]$	$r - n [mm]$
P1	6.50028	6.50007	0.21
P2	6.5	6.50007	-0.07
P3	6.47007	6.47	0.07

Tab. 8.4: Einfluss der Antennenausrichtung auf die Phasenmessung.

Insgesamt sind Phasenverschiebungen von 0.28mm ($= 0.21\text{mm} + 0.07\text{mm}$) zu erwarten. Die Einhaltung der geforderten Kalibrierengenauigkeit ist somit derzeit nicht ganz erreichbar, wobei die Abschätzung der Phasenverschiebung auf sehr pessimistischen Annahmen basiert und die tatsächliche Ausrichtung wahrscheinlich besser ist. Eine Reduktion der Abweichungen könnte, da die Teststrecke fest vorgegeben ist und das Phasenzentrum der GNSS-Antenne aufgrund der frequenzabhängigen Variationen nicht präziser eingestellt werden kann, durch eine Kalibrierung des Senders erreicht werden, wodurch die Lage des Phasenzentrums des Senders bekannt würde. Hierauf wurde bislang verzichtet, da aufgrund der Nahfeldeffekte (s. Kapitel 10) die derzeitige Genauigkeit des Kalibrierverfahrens durch die hier diskutierten Effekte nicht verringert wird.

Zudem kann eine ungenaue Anfangsorientierung mit Abweichung $d\beta$ auch messtechnisch aufgedeckt werden, indem die Elevationsscans für zwei um 180° verschiedene Azimute durchgeführt werden. Durch diese Kontrollmessungen werden identische Einstrahlrichtungen bei unterschiedlichen Antennenpositionen ermöglicht (Abb. 8.21). So entspricht die Einstrahlrichtung bei z.B. 0° Azimut und 40° Elevation der Einstrahlrichtung $\mathbf{e}$ bei 180° Azimut und $140^\circ = 180^\circ - 40^\circ$ Elevation (Fall A):

$$\mathbf{e}(\alpha, \beta) = \mathbf{e}(\alpha + 180, 180 - \beta) \quad (8.13)$$

Weicht die Ausgangsrichtung vom Sollwert ab, so liegen unterschiedliche Einstrahlrichtungen vor (Fall B):

$$\mathbf{e}(\alpha, \beta + d\beta) = \mathbf{e}(\alpha + 180, 180 - \beta + d\beta) \quad (8.14)$$

In diesem Fall ($d\beta \neq 0$) kann anhand des Vergleichs der Phasenmessungen für die Positionen B_1 und B_2 unmittelbar ein Widerspruch festgestellt werden, der auf die Ausrichtung zurückzuführen ist. Da diese Kontrollen für alle Elevationen von 0° bis 180° möglich sind, ergeben sich zwei Messkurven A und B, anhand derer eine Berechnung der Ausrichtungskorrektur durch die Verwendung der Kreuzkorrelationsfunktion möglich ist.

Vorweggenommen sei, dass derzeit die Nahfeldeffekte so groß sind, dass der Einfluss der Ausrichtung vernachlässigbar ist und auch die Detektion der Ausrichtungsabweichung nur bei gut geschirmten Antennen möglich ist. Derzeit wird das Verfahren im Wesentlichen zur Detektion grober Fehlausrichtungen (z.B. durch Bedienfehler) verwendet. Sollten in Zukunft die Anforderungen an die Genauigkeit steigen (z.B. nach Lösung der Nahfeldproblematik), steht mit dem vorgestellten Verfahren eine weitere Option zur Optimierung der Ausrichtung zur Verfügung.

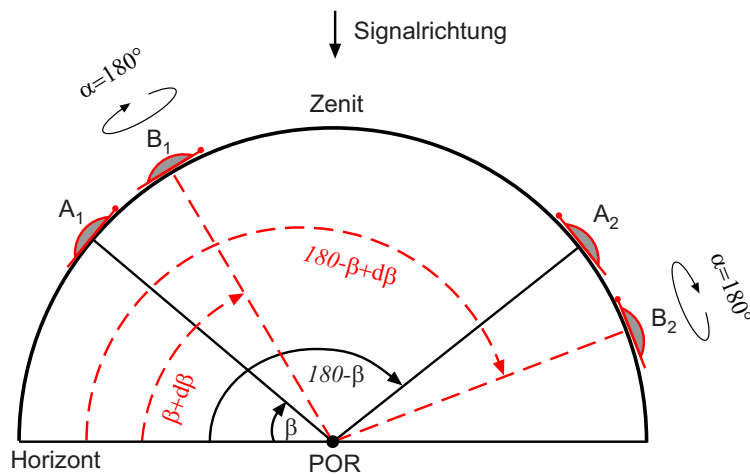


Abb. 8.21: Antennenausrichtung zur Ermittlung der Anfangsorientierung (Elevation).

8.6 Einfluss der Kabelbewegung auf die Phasenmessung

In Abschnitt 8.2 ist die Abhängigkeit der Phasenmessung von der Kabeltemperatur erläutert worden. Ein weiterer Kabeffekt resultiert aus der Bewegung des Koaxialkabels, die aufgrund der Rotation der Antenne unvermeidbar ist. Bei diesen Rotationen können je nach Kabelführung zum einen Verdrillungen (Kabeldrehung um die Kabellängsachse) und zum anderen Änderungen der Krümmungsradien (Kabelbiegung) auftreten. Dabei wird das elektrische Feld an den Rand des Leiters gedrängt, wodurch sich die elektrische Länge des Leiters erhöht, was zu einer systematischen Phasenverschiebung führt (SÄILY et al. 2003).

Eine Minimierung der Kabeffekte konnte im Falle der horizontal liegenden Azimutachse durch eine Führung des Kabels durch die Rotationsachse, die als Hohlwelle konzipiert ist, erreicht werden (Abb. 8.22). Das Koaxialkabel wird zwar weiterhin verdrillt, wickelt sich aber nicht mehr um den Arm des Antennendrehstandes, wodurch Änderungen der Krümmungsradien vermieden werden.



Abb. 8.22: Azimutachse des Drehstandes mit Hohlwelle zur Kabeldurchführung.

Da die Elevation bei der Kalibrierung nur um bis zu 90° verändert wird und sich die Umwicklung des Kabels um die Rotationsachse auf eine Kabellänge von ca. 1m verteilt (Azimut: 360° , 40cm), treten hier nur geringe Änderungen der Krümmungsradien und somit auch nur geringe Phasenverschiebungen auf, weshalb hier bislang auf die konstruktiv sehr aufwändige Führung des Kabels durch die vertikale Rotationsachse verzichtet wurde.

Der Einfluss der Kabelbewegung kann im Falle der Azimutrotation durch den Vergleich der Phasenmessungen bei 0° und 360° beurteilt werden. Diese Kontrollmessungen werden bei jeder Kalibrierung für alle angesteuerten Elevationen durchgeführt (Abb. 8.23). Neben geringen systematischen Anteilen mit Beträgen zwischen -0.1mm und $+0.1\text{mm}$ resultiert aus den Kabeleffekten zusätzlich ein mittlerer Offset von hier 0.9mm , der aus Darstellungsgründen bereits herausgerechnet wurde.

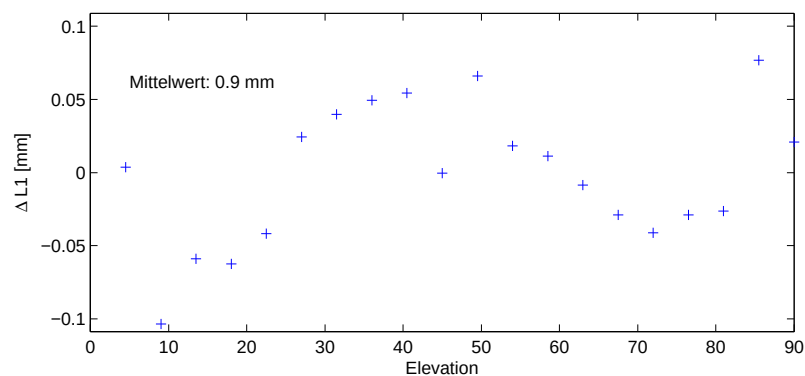


Abb. 8.23: Einfluss der Kabelbewegung auf die Phasenmessung.

Die sichtbaren Differenzen setzen sich aus dem Einfluss der Kabelbewegung, den zufälligen Abweichungen der Phasenmessung (Abschnitt 8.4, $\sigma < 0.05\text{mm}$) und dem Einfluss der relativen Positioniergenauigkeit (Abschnitt 8.5, $\approx 0.1\text{mm}$ max. Abweichung) zusammen. Da weder die Phasenmessung noch die Positioniergenauigkeit zu systematischen Effekten führt, ist hier im Wesentlichen der Einfluss der Kabelbewegung sichtbar. Signifikante systematische Temperatureinflüsse sind aufgrund des geringen zeitlichen Abstands zwischen den Messungen (je nach Ablauf max. 3 Minuten) nicht zu erwarten. Zur Elimination des Kabeleffektes, dessen Größenordnung auch vom verwendeten Kabeltyp abhängt, werden bei der Kalibrierung die ermittelten Widersprüche linear in Abhängigkeit vom Rotationswinkel (Azimut) verteilt. Die Linearität im Bereich von 0° bis 360° wurde experimentell durch eine schrittweise Verdrehung um weitere 360° geprüft. Eine deutliche Abweichung vom festgestellten linearen Verhalten tritt erst nach mehr als zwei vollen Umdrehungen auf, wobei das Kabel dann bereits unter einer spürbaren Spannung steht. Da bei der Kalibrierung nur bis 360° rotiert wird, hat dieses Verhalten für die Kalibrierung keine Relevanz.

Ähnliche Kontrollen werden auch für die Untersuchung des elevationsabhängigen Kabeleinflusses durchgeführt, wobei üblicherweise kein signifikanter Offset zwischen den Messungen bei 0° und 360° festgestellt wird. Die sichtbaren Widersprüche entsprechen von der Größenordnung den bei der Azimutdrehung auftretenden Variationen. Dass der systematische Offset nur bei der Azimutdrehung auftritt, kann durch mehrere Einflussgrößen begründet sein. So wird wegen des eingeschränkten Hohlwellendurchmessers für den Bereich von der GNSS-Antenne bis durch die Hohlwelle ein Kabel mit geringerem Durchmesser verwendet. Zudem vollzieht sich die Kabelbewegung auf einer Kabellänge von nur ca. 40cm, woraus eine stärkere Beeinflussung der Leiterstruktur resultiert. Diese hohe mechanische Belastung macht auch einen gelegentlichen Austausch des Kabels notwendig. Während der Vergleich der Phasenmessungen bei 0° und 360° Azimut bei jeder

Kalibrierung automatisiert durchgeführt wird, ist dies im Falle der Elevationsdrehung nicht möglich, da die Absorberverkleidung des Antennendrehstandes eine Rotation um 360° Elevation verhindert. Für die gesonderte Überprüfung der Kabeleigenschaften wird diese Verkleidung demontiert.

Ein Alternative zu dem gewählten Verfahren zur Reduktion der Kabeleffekte besteht in der Verwendung einer HF-Drehkupplung, wodurch die Kabelbewegung vollständig vermieden werden kann. Diese Kupplungen verursachen jedoch ebenfalls Phasenverschiebungen, die laut Herstellerangaben eine Größenordnungen von bis zu 2° ($\approx 1\text{mm}$) erreichen können. Eine weitere Genauigkeitssteigerung wäre nur möglich, wenn die Einflüsse der Drehkupplung zeitlich konstant und systematisch sind, so dass diese messtechnisch erfasst und korrigiert werden können (Kalibrierung der Drehkupplung). Bislang wurden hierzu keine Untersuchungen durchgeführt. Die derzeitigen Kabeleffekte im Bereich von $\pm 0.1\text{mm}$ erreichen zwar eine bezüglich der in Abschnitt 3.2 geforderten Genauigkeit kritische Größenordnung, sind aber im Vergleich zu anderen Einflussgrößen (z.B. Nahfeldeffekte) vernachlässigbar. Eine Reduktion des Kabeleinflusses ist somit derzeit noch nicht notwendig.

8.7 Untersuchungen zur Richtigkeit der Phasenmessung

Die Präzision der Phasenmessung wurde bereits durch die in Abschnitt 8.4 dargestellten Experimente analysiert, wobei im Wesentlichen zufällige Anteile sichtbar wurden. Bei diesen Experimenten wurde die Soll-Phasenlage nicht verändert. Dies hat zur Folge, dass Systematiken, die im direkten Zusammenhang mit der gemessenen Phasenlage stehen (z.B. Maßstabsabweichungen) nicht aufgedeckt werden können. Somit kann die Richtigkeit der Phasenmessung anhand der bisherigen Untersuchungen nicht garantiert werden. In diesem Kapitel werden zwei Verfahren zur Untersuchung der Richtigkeit vorgestellt, wobei das erste Verfahren auf der Verwendung des phase-wind-up Effektes beruht und beim zweiten Ansatz die aus definierten Entfernungsänderungen zwischen Sende- und Empfangsantenne resultierenden Phasenverschiebungen analysiert werden.

8.7.1 Bestimmung der Richtigkeit der Phasenmessung durch Rotation der Antenne

Für die Untersuchung der Phasenmessgenauigkeit wird der phase-wind-up-Effekt genutzt. Dieser verursacht bei einer azimuthalen Drehung der GNSS-Antenne eine Phasenverschiebung in der Größe des Drehwinkels. Wird bei der Kalibrierung die GNSS-Antenne so ausgerichtet, dass sich der Sender im Zenit befindet, ändert sich die Einstrahlrichtung trotz Rotation der GNSS-Antenne nicht, wobei der phase-wind-up-Effekt dennoch wirksam wird. Die mit dem Netzwerkanalysator gemessene Phasenverschiebung kann somit durch den Vergleich mit dem Rotationswinkel validiert werden.

Die Genauigkeit der azimuthalen Rotation wurde in Abschnitt 8.5.2 analysiert, wobei dort die Rotationsabweichungen aufgrund des phase-wind-up-Effektes als Phasenänderungen sichtbar wurden. Hier soll nun die Rotation zur Erzeugung einer Soll-Phasenverschiebung verwendet werden, die zur Beurteilung der Phasenmessgenauigkeit verwendet werden soll. Diese gegenseitige Kontrolle von Phasenmessung und Rotation erscheint auf den ersten Blick ungeeignet. Da jedoch bei der Beurteilung der Rotationsgenauigkeit nur minimale Phasenvariationen auftreten (in der Größe der Rotationsabweichung), treten dort keine zu berücksichtigenden systematischen Einflüsse auf, die im Zusammenhang mit der Größe der Phasenverschiebung stehen. Die bei nahezu konstanter Phasenlage wirkenden Messunsicherheiten wurden hingegen ausführlich analysiert (s.a. Abschnitt 8.4), so dass die Phasenmessgenauigkeit für die Ableitung der Rotationsgenauigkeit in Abschnitt 8.5.2 verwendet werden kann. Infolgedessen können durch Rotationen Phasenverschiebungen

mit bekannter Genauigkeit erzeugt werden. Die unterschiedlichen Ansätze sind demnach zur gegenseitige Kontrolle von Phasenmessung und Rotation durchaus geeignet.

Bei der Gegenüberstellung von Phasenverschiebung und Rotationswinkel muss berücksichtigt werden, dass bei den nachfolgend beschriebenen Ergebnissen nahezu alle bereits diskutierten Unsicherheitsquellen wirksam werden. Dies sind insbesondere:

- Temperatureffekte: Max. Einfluss bei einer Messdauer von hier ca. 5 Minuten $< 0.05^\circ$ (Abschnitt 8.2)
- zufälliges Messrauschen: $\sigma \approx 0.02^\circ$ (Abschnitt 8.4)
- Ausrichtung der Antenne: Dieser Einfluss ist wegen geringer azimuthaler Variation in Zenitrichtung zu vernachlässigen (Abschnitt 8.5)
- Genauigkeit der Rotation um den Azimut: max. Abweichung $< 0.1^\circ$ (Abschnitt 8.5.2)
- Einflüsse der Kabelbiegung: max. Abweichung bis zu 0.2° (Abschnitt 8.6)
- Polarisationsabweichungen (s.u.)

Als Polarisationsabweichungen wird die Abweichung einer elliptischen Polarisation von einer zirkularen bezeichnet. Eine solche Abweichung führt dazu, dass die aus der Drehung resultierende Phasenverschiebung vom Drehwinkel abweicht, wie anhand Abbildung 7.4 ersichtlich ist. Würden Sender oder GNSS-Antennen eine solche elliptische Polarisation aufweisen, würde der Einfluss als periodischer Effekt sichtbar. Auf diesen Einfluss wird im weiteren Verlauf noch eingegangen. Die gute Polarisationsreinheit des Senders wird zudem in Abschnitt 9.3 belegt.

Ein Schwachpunkt des gewählten Ansatzes ist, dass die Annahme der Richtungsunabhängigkeit im Zenit nur gewährleistet ist, wenn die Auswirkung von Restreflexionen und Nahfeldeffekten bei allen azimuthalen Ausrichtungen konstant ist. Während mögliche Restreflexionen von den Kammerwänden aufgrund des konstanten Setups auch als konstant angenommen werden können, gilt dies für den Einfluss der Nahfeldeffekte nicht. Während einige Nahfeldkomponenten (z.B. ein Dreifuß) bei der Rotation mitgedreht werden, bleiben andere (einige Komponenten des Antennendrehstands) während der Messung konstant. Aufgrund der Rotation der Antenne bleibt zwar die Lage der Antenne im Raum konstant, die Orientierung der Antenne wird dabei jedoch verändert. Auf die Auswirkung wird im weiteren Verlauf noch eingegangen.

Im Folgenden werden einige sehr unterschiedliche Ergebnisse dargestellt. Hieran lassen sich einige der oben genannten Einflussgrößen diskutieren. In Abb. 8.24 ist zunächst das Ergebnis eines Vergleichs von Rotationswinkel und Phasenmessung für die Frequenzen L1 und L2 (= G01 und G02) dargestellt, wobei die mittleren Differenzen von ca. 38.4° bzw. 97.9° ohne Bedeutung sind, da hier nur Phasenänderungen beurteilt werden. Der eingestellte Rotationswinkel wurde bereits berücksichtigt, so dass nur die Differenzen zwischen den gemessenen Phasenänderungen und den eingestellten Rotationswinkeln sichtbar sind. Zudem wurde jeweils der Widerspruch zwischen 0° und 360° Azimut, der aus der Kabelbiegung und zu geringen Anteilen aus der Temperatur resultiert, in Abhängigkeit vom Rotationswinkel linear verteilt (Abschnitt 8.6).

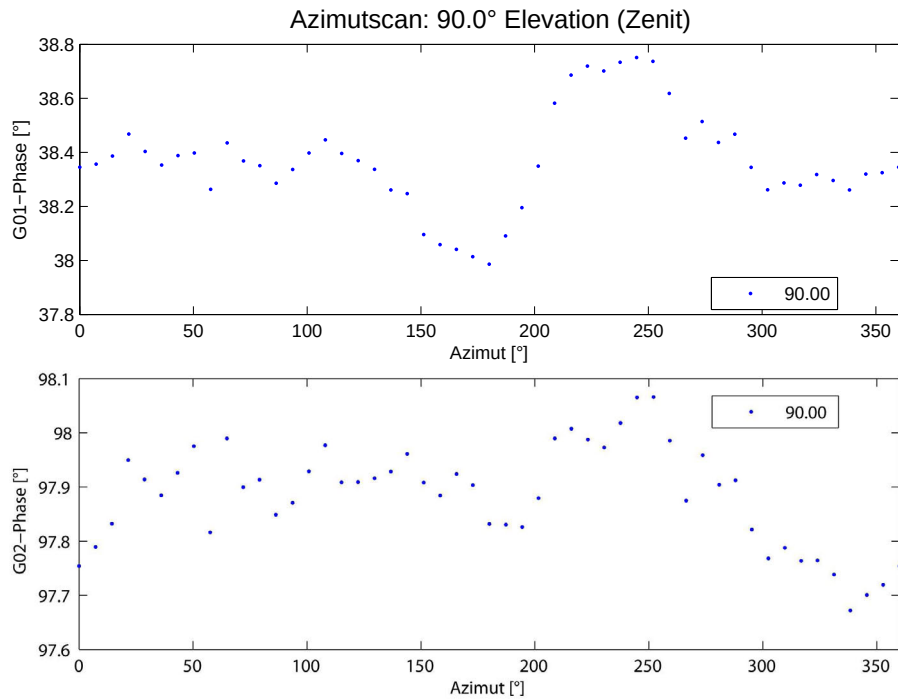


Abb. 8.24: Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 1).

In der oberen Abbildung (L1) zeigen die Beobachtungen im Bereich von 0° bis 150° sowie von 270° bis 360° Azimut eine gute Übereinstimmung von Rotationsänderung und Phasenmessung, wobei die Variationen im Bereich von 0.2° liegen. Diese Abweichungen lassen sich vollständig mit der Rotationsgenauigkeit und den zufälligen Anteilen der Phasenmessgenauigkeit begründen. Im Bereich von 150° bis 270° treten hingegen deutliche systematische Effekte auf, die sich nicht durch die in der obigen Auflistung genannten Einflussgrößen erklären lassen. Auffällig ist auch, dass dieser Effekt für die L2-Frequenz nicht sichtbar wird. Dementsprechend können Temperatureinflüsse sowie Rotationsabweichungen ausgeschlossen werden, da diese Effekte für beide Frequenzen im Falle der Rotation identisch und bezüglich der Temperatur (s. Abschnitt 8.2) ähnlich sind. Bei der L2-Frequenz sind die Variation im Bereich von etwa 270° bis 360° auffällig, wobei sich die Variationen von maximal 0.4° ($\approx 0.2\text{mm}$) durchaus aus den oben genannten Einflussgrößen ergeben können.

Ein weiteres Beispiel für die L1-Frequenz ist in Abb. 8.25 gegeben. Hier liegen die Abweichungen erneut im Bereich von $\pm 0.4^\circ$. Es sind systematische Einflüsse vorhanden, die jedoch nicht den in Abb. 8.24 im Falle der L1-Frequenz sichtbaren Systematiken entsprechen. Es kann deshalb ausgeschlossen werden, dass die sichtbaren Systematiken aus der Polarisationsabweichung des L2-Senders resultieren, da solche Einflüsse des Senders für verschiedene Antennen identisch wären.

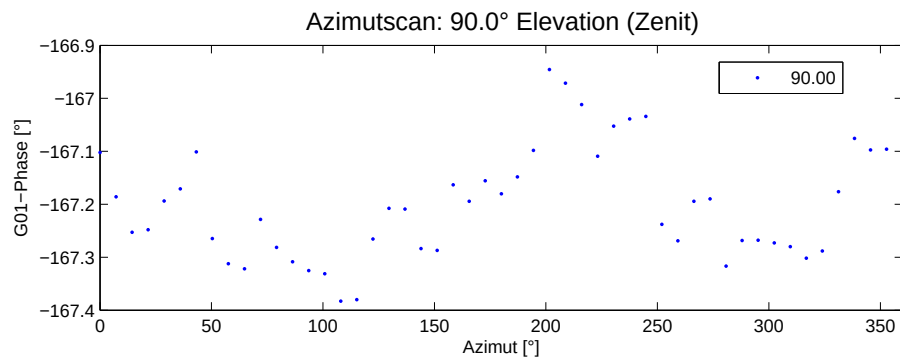


Abb. 8.25: Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 2).

Bei der dritten ausgewählten Testmessung wurde das Setup um eine quadratische Metallplatte ergänzt (Aufbau ähnlich zur Variante 2 in Abb. 10.5). Die Metallplatte wurde mitgedreht, so dass ein antennenfestes Nahfeld realisiert wurde. Die Ergebnisse (Abb. 8.26 oben) weisen deutliche systematische Effekte auf, die eine völlig andere Charakteristik als die bisherigen aufweisen.

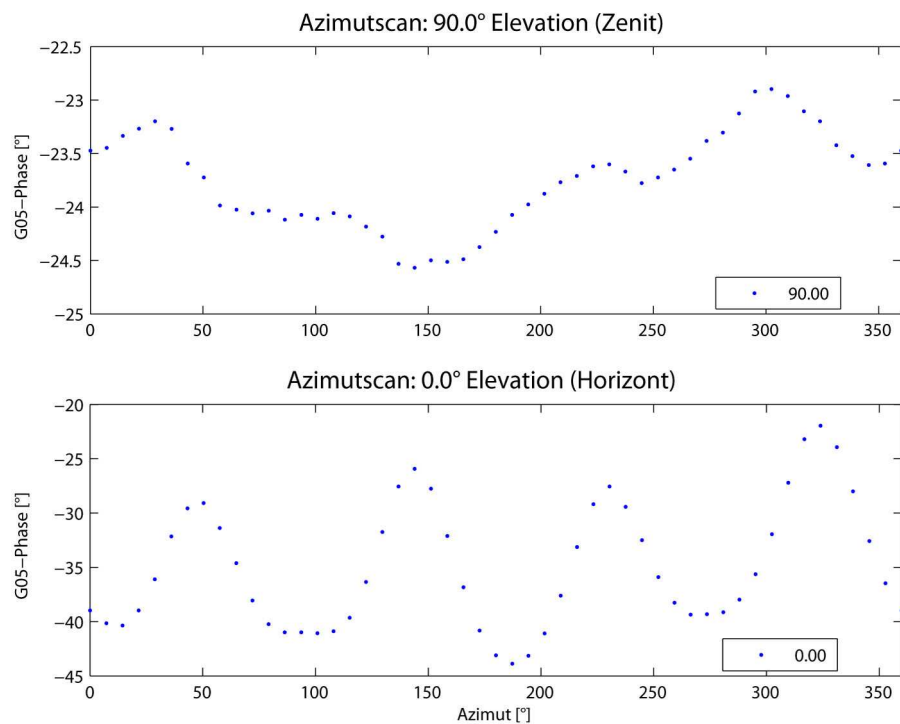


Abb. 8.26: Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 3).

Die Variationen sind zudem mit 1.5° ($\approx 0.8\text{mm}$) sehr groß. Die oben in der Auflistung genannten Einflussgrößen kommen hier als Ursache nicht in Frage, da die möglichen Größenordnungen deutlich geringer sind. Mögliche Polarisationsabweichungen des Senders können aufgrund der obigen Überlegungen ausgeschlossen werden. Die sichtbaren Variationen sind zumindest teilweise auf Nahfeldeinflüsse zurückzuführen. Dies wird deutlich, wenn die Ergebnisse der unteren Grafik betrachtet werden. Dargestellt sind die Ergebnisse einer Messung mit dem identischen Aufbau, wobei die Dreheinrichtung so ausgerichtet war, dass sich der Sender

im Horizont der Antenne befand. Bei dieser Messung wirken sich somit die azimutabhängigen Variationen der Antenne aus. Allerdings werden in Abb. 8.26 vier Schwingungen sichtbar, die bei Messungen ohne Metallplatte nicht vorhanden sind. Die Maxima treten bei etwa 45° , 140° , 230° und 325° Azimut, also etwa alle 90° , auf. Durch Wiederholungsmessungen, bei denen die Metallplatte verdreht wurde, konnte gezeigt werden, dass ein Bezug zwischen der Ausrichtung der quadratischen Metallplatte und dem resultierenden Phasenmuster besteht.

Das Muster, das bei der Messung im Horizont sehr deutlich ist, ist ebenfalls, wenn auch sehr stark abgeschwächt und durch andere Effekte überlagert, in der Messung im Zenit sichtbar. Die lokalen Maxima sind deutlich schwächer und in der Lage etwas verschoben. Auch hier konnte aber durch Wiederholungsmessungen mit verdrehter Metallplatte eindeutig gezeigt werden, dass die Metallplatte eine Ursache für die sichtbaren Systematiken ist. Aufgrund des neben der Maxima auftretenden Systematiken ist allerdings davon auszugehen, dass weitere Effekte wirksam sind. Da jedoch keine Messung ohne Nahfeldeffekte realisierbar ist, kann nicht überprüft werden, ob es sich ausschließlich um Nahfeldeffekte handelt. Dass trotz der Verwendung einer konstanten Antennen-Metallplatten-Kombination bei konstanter Einstrahlrichtung Phasenvariationen auftreten, resultiert daraus, dass sich nur ein Teil des Nahfelds (Metallplatte) mit der Antenne mitdreht, während ein weiterer Anteil (Oberbau der Kalibriereinrichtung) bei der Rotation fest im Raum verbleibt. Gerade bei der Verwendung von nicht rotationssymmetrischen und gut reflektierenden Nahfeldkomponenten wird dieses Problem sichtbar. Wird auf sich mitdrehende Nahfeldkomponenten (bis auf die symmetrische Rotationsachse) ganz verzichtet, treten in der Regel geringere Effekte auf

Dieses Phänomen konnte bislang nicht physikalisch erklärt werden. Hierzu ist es wahrscheinlich notwendig, auf numerische Verfahren zur Modellierung der elektromagnetischen Wechselwirkungen (Beugung, Streuung) zurückzugreifen. Näherungslösungen können dabei durch geometrische Ansätze, die auf den Gesetzen der Physikalischen Optik (PO) und/oder geometrischen Beugungstheorien (UTD) basieren, berechnet werden (JAKOBUS 1998). Gerade im Nahfeld der Antenne und bei verlustbehafteten Materialien führen diese Methoden häufig zu unzureichenden Ergebnissen. Eine vollständige Simulation des elektrischen Feldes ist ebenfalls theoretisch möglich, setzt allerdings exakte Kenntnisse über die Geometrie und die elektromagnetischen Materialeigenschaften der Nahfeldkomponenten voraus (ALAYDRUS 2001). Diese Thematik wurde bislang am IGG nicht aufgegriffen. Zu berücksichtigen ist, dass ein solcher Ansatz nur dann zum Ziel führt, wenn dieser auch bei der Positionsbestimmung im Felde zur Nahfeldmodellierung angewendet wird. Inwieweit hinsichtlich der Positionsbestimmung Genauigkeitssteigerungen zu erwarten sind, wurde zudem bislang nicht untersucht.

Die Rotation der Antenne und die Beobachtung der Phasenvariationen werden bei jeder Kalibrierung durchgeführt, so dass im Zenit mehrere widersprüchliche Phasenkorrekturen vorliegen. Bei der weiteren Auswertung der Kalibrierergebnisse wird ein mittlerer Wert verwendet und dieser auch im Kalibrierergebnis angegeben. Festzuhalten ist, dass nicht angestrebt wird, einen Aufbau zu wählen, bei dem diese Widersprüche nicht auftreten, da dies nur bedeutet, dass sich die Nahfeldeffekte stets konstant auswirken. Eine Verbesserung der Kalibrierergebnisse wird dadurch nicht erzielt. Auch muss berücksichtigt werden, dass diese Effekte auch bei niedrigen Elevationen wirksam werden und vollständig in das Kalibrierergebnis eingehen.

8.7.2 Bestimmung der Richtigkeit der Phasenmessung durch Änderung der Messentfernung

Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der absoluten Phasenmessgenauigkeit besteht darin, die Entfernung zwischen Sender und GNSS-Antenne (=Teststrecke) um definierte Beträge zu verändern und diese Entfernungsänderungen mit den sich daraus resultierenden Phasenverschiebungen zu vergleichen, wobei die

Phasenmessungen mit der Wellenlänge in ein metrisches Maß umzurechnen sind. Die Entfernungsänderungen können durch zwei alternative Varianten erfolgen. Zum einen kann der gesamte Oberbau des Drehstandes in Richtung des Senders verschoben werden. In diesem Fall ändert sich die Position der Antenne relativ zur unmittelbaren Antennenumgebung nicht, so dass keine Nahfeldeinflüsse zu erwarten sind. Zum anderen kann der Abstand zwischen GNSS-Antenne und Oberbau verändert werden. Diese Abstandsänderung ist äquivalent zur Änderung der Teststrecke, wenn die Dreheinrichtung in Richtung des Senders ausgerichtet ist. Zur Veränderung des Abstands kann ein längenvariables Distanzstück (s. Abb. 8.27) verwendet werden. Bei diesem Distanzstück kann die innenliegende Messingachse aus dem Aluminiumrohr herausgezogen werden. Die Gewindeschrauben ermöglichen eine Fixierung der Achse, wobei der Druck der Schrauben auf die abgeflachte Messingachse sicherstellt, dass sich die Achse nicht verdreht und somit keine Phasenverschiebungen aufgrund des phase-wind-up Effektes auftreten können.



Abb. 8.27: Distanzstück zur Veränderung des Abstands zw. Sender und GNSS-Antenne.

Da bei dieser Variante der Abstand der Antenne zum Oberbau verändert wird, verändert sich auch die Nahfeldsituation, weshalb dieser Test nur bei gut geschirmten Antennen eine Beurteilung der Phasenmessgenauigkeit des Systems ermöglicht. Nahfeldeinflüsse, die hier nicht Gegenstand der Untersuchungen sind, wirken sich dann nur geringfügig aus, so dass beide Möglichkeiten der Streckenveränderung zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Ein exemplarisch ausgewähltes Ergebnis ist in Abb. 8.28 wiedergegeben, wobei hier das in Abb. 8.27 dargestellte Distanzstück zur Veränderung der Teststrecke verwendet wurde.

Für die Frequenzen L1, L2 und L5 sind an 6 Positionen Phasenmessungen durchgeführt worden. Zur besseren Präsentation wurden alle Phasenmessungen der ersten Messposition auf Null reduziert. Die Abweichungen zwischen den ermittelten Phasenverschiebungen (umgerechnet in mm) und den Streckenänderungen, die mit einem Messschieber erfasst wurden, streuen im Bereich von $\pm 0.2\text{mm}$. Als Ursache für die Abweichungen sind Unsicherheiten bei der Streckenmessung ebenso denkbar wie Nahfeldeinflüsse, Kammerrestfehler oder systematische Anteile des Netzwerkanalysators. Bei Wiederholungsmessungen hat sich die Größenordnung der Effekte bestätigt, der Verlauf der Abweichungen war jedoch variabel. Typisch ist hingegen die stets geringe Streuung zwischen den verschiedenen Frequenzen, was auf frequenzunabhängige Einflüsse hindeutet. Dies wurde jedoch aufgrund der geringen Größenordnung nicht näher untersucht.

Mit diesem zweiten Verfahren zur Überprüfung der Phasenmessung werden maximale Abweichungen von 0.2mm sichtbar, so dass auch die geforderte Genauigkeit noch erfüllt wird. Im Vergleich zum ersten Ansatz (Phasenänderung durch Antennenrotation) sind die Abweichungen deutlich geringer. Dies kann auf die bei der ersten Variante stärkeren Nahfeldeinflüsse zurückgeführt werden, wobei auch bei der zweiten Variante Nahfeldeffekte nicht gänzlich auszuschließen sind. Der Nachteil des zweiten Ansatzes ist, dass nur geringe Verschiebebeträge möglich sind, weshalb die Kombination beider Ansätze sinnvoll ist.

Diese Tests zeigen sehr deutlich, dass die nicht vermeidbaren Nahfeldeinflüsse, die bei der zweiten Variante lediglich konstant sind, die Genauigkeit des Verfahrens begrenzen. Es wird auch sichtbar, dass aufgrund der

Nahfeldeffekte eine Beurteilung der Kalibrierengenauigkeit alleine aus den Testmessungen nicht möglich ist. Bevor in Kapitel 10 auf den Einfluss unterschiedlicher Nahfeldsituationen auf das Phasenpattern eingegangen wird, werden im nächsten Kapitel mögliche Einflüsse des Senders und des Messabstands zwischen Empfänger und Sender auf die Kalibrierergebnisse untersucht.

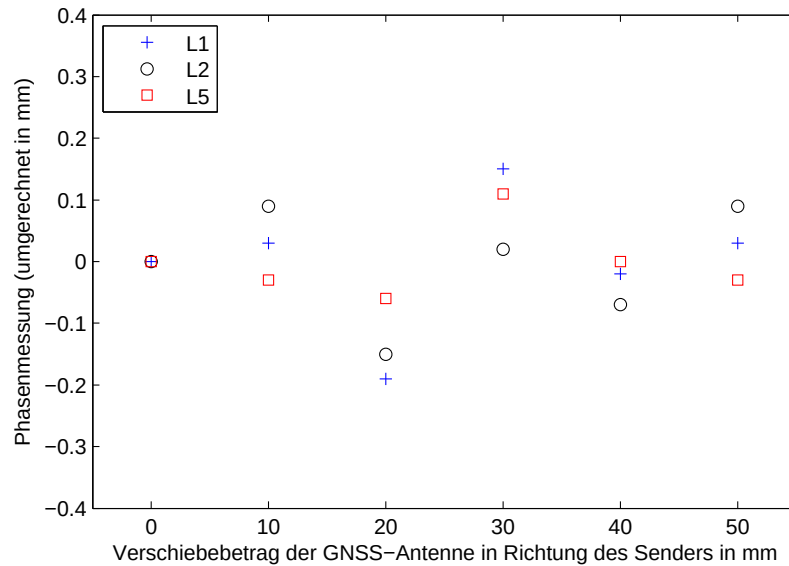


Abb. 8.28: Vergleich von Phasen- und Streckenmessung zur Ableitung der Phasenmessgenauigkeit bei den Frequenzen L1, L2 und L5.

9 Einfluss verbleibender Systematiken auf das Kalibrierergebnis

Bei den in Kapitel 8 vorgestellten Untersuchungen konnten die Einflüsse einzelner Störgrößen auf die Phasenmessung abgeschätzt werden. In diesem Kapitel werden nun weitere Einflussgrößen untersucht. Die Einflussgrößen der zweiten Gruppe unterscheiden sich von denen der ersten dadurch, dass die Beurteilung der Einflüsse nur anhand des gesamten Antennenpatterns erfolgen kann, während bei der ersten Gruppe einzelne Beobachtungen und nicht die abgeleiteten Kalibrierparameter für die Untersuchungen verwendet wurden. Bei der Interpretation der in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass bei der Durchführung vollständiger Kalibrierungen sämtliche in Kapitel 8 genannten Einflussgrößen wirksam werden. Folgende Einflussgrößen werden der zweiten Gruppe zugeordnet:

1. **Sender:** Wie in Abschnitt 7.4 erläutert, sind Helixantennen konstruktionsbedingt auf exakte eine Frequenz (Mittenfrequenz) optimiert, wobei insbesondere die Polarisationsreinheit und der Antennengewinn mit zunehmendem Frequenzabstand von dieser Mittenfrequenz schlechter werden. Es muss somit geprüft werden, ob die verwendete L2-Sendeantenne (1.2276 GHz) für die Kalibrierung im gesamten verwendeten Frequenzbereich von 1.15 GHz bis 1.65 GHz geeignet ist.
2. **Messabstand:** Die an einer GNSS-Empfangsantenne ankommende Wellenfront des von einem GNSS-Satelliten abgestrahlten Signals kann aufgrund der großen Entfernung zwischen Sender und Empfänger als ebene Wellenfront angesehen werden. Da die Abweichung der eigentlich gekrümmten Wellenfront von einer ebenen Wellenfront von der Entfernung zum Sender abhängig ist und bei der Kalibrierung der Messabstand auf wenige Meter reduziert werden muss (AMK Bonn 6.5 m), ist zu prüfen, ob eine solche Reduktion zu signifikanten Kalibrierabweichungen führt.
3. **Nahfeldeffekte:** Nahfeldeffekte können ebenfalls durch den Vergleich verschiedener vollständiger Kalibrierergebnisse analysiert werden. Den Nahfeldeffekten ist jedoch aufgrund der Komplexität der Thematik und der Größenordnung der Nahfeldeinflüsse ein eigenes Kapitel (10) gewidmet worden.

Um die Ergebnisse bewerten zu können, müssen die auftretenden Differenzen im Kontext der Wiederholgenauigkeit des Verfahrens betrachtet werden. Diese wird im folgenden Abschnitt bestimmt.

9.1 Wiederholgenauigkeit des Kalibrierverfahrens

Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit des Kalibrierverfahrens wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt, wobei das Kalibriersetup zwischen den einzelnen Kalibrierungen (3-5 pro Antennentyp) nicht verändert wurde. Insgesamt wurden für die Untersuchungen 6 Antennentypen (Leica AR25, Leica AT502, Leica AT504GG, Leica AX1202GG, Trimble Zephyr Geodetic, Trimble GNSS Choke Ring) verwendet, so dass Ergebnisse für ein breites Spektrum unterschiedlicher Antennen vorliegen, wobei sich gezeigt hat, dass die Wiederholgenauigkeit nicht vom Antennentyp abhängig ist. In Abb. 9.1 sind zur Veranschaulichung die Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen dargestellt. Das gewählte Beispiel ist repräsentativ für die übrigen Messungen. Die Ergebnisse werden für L1 und L2 gezeigt, gelten aber auch für die benachbarten Frequenzen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Darstellung weiterer Ergebnisse verzichtet.

In dieser Polardarstellung repräsentiert der Kreismittelpunkt den Zenit, während sich die niedrigen Elevationen am Figurenrand befinden. Jeder Messwert wird durch ein Flächenelement repräsentiert. Die äußere schwarze Linie stellt den Horizont dar, die innere Linie liegt zwischen 5° und 10° Elevation. Die Farben repräsentieren die Größenordnungen der Differenzen. Der Azimut lässt sich anhand der Beschriftung ableiten. Die maximalen Differenzen liegen bei $\pm 0.2\text{ mm}$. Auffällig ist, dass es sich nicht um rein zufällige Variationen handelt. Besonders azimuthal benachbarte Messungen weisen häufig gleiche oder ähnliche

Differenzen auf. Dieses Muster resultiert aus der Reihenfolge der Messwerteerfassung. Bei der derzeitigen Messstrategie werden für jede Elevation zunächst alle Phasendifferenzen von 0° bis 360° Azimut erfasst, wobei sich azimutabhängige Effekte (z.B. Kabelbiegung, Positionierabweichungen) und direkt oder indirekt zeitabhängige Effekte (z.B. Temperatureffekte) bei aufeinanderfolgenden Messungen ähnlich auswirken.

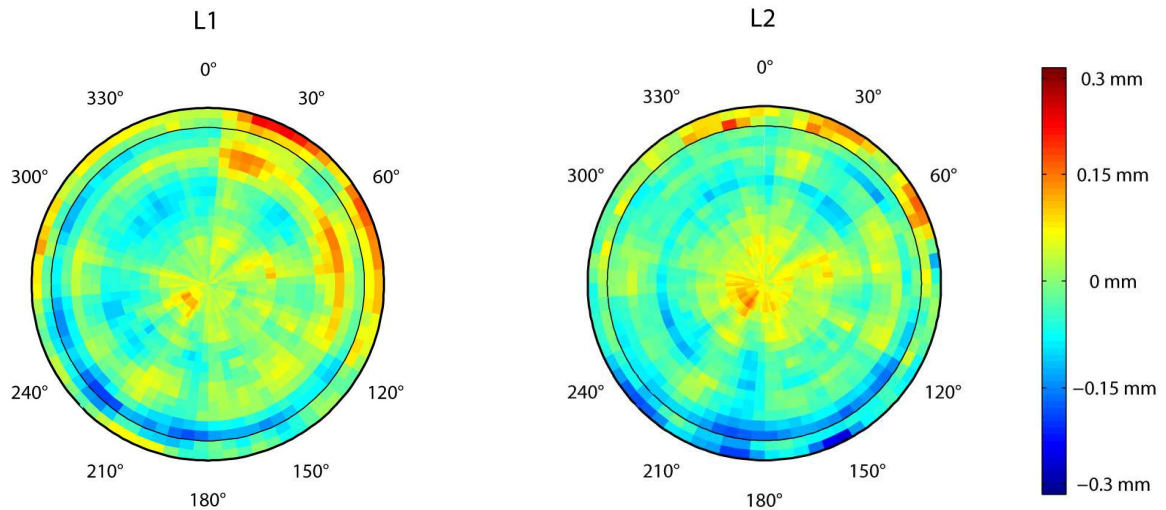


Abb. 9.1: Exemplarische Darstellung der Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen (hier am Beispiel einer Trimble Zephyr Geodetic 2 GNSS-Antenne).

Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieser Systematiken besteht in der zufälligen Ansteuerung aller Messpositionen. Dies hätte aufgrund längerer Fahrwege eine Verlängerung der Kalibrierdauer zur Folge. Zudem würden die verbleibenden systematischen Anteile nur „verschleiert“ und eine Beurteilung der Ergebnisse erschwert, weshalb auf eine solche „Optimierung“ verzichtet wird, zumal aufgrund der geringen Größenordnung der Effekte auch keine relevanten Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse zu erwarten sind.

Während die in Abbildung 9.1 verwendete Darstellung für die Beurteilung der Richtungsabhängigkeit der Korrelationen sehr gut geeignet ist, eignen sich Histogramme zur Beurteilung der Verteilung der Abweichungen. Zwei solcher Histogramme (L1 und L2) sind in Abb. 9.2 dargestellt.

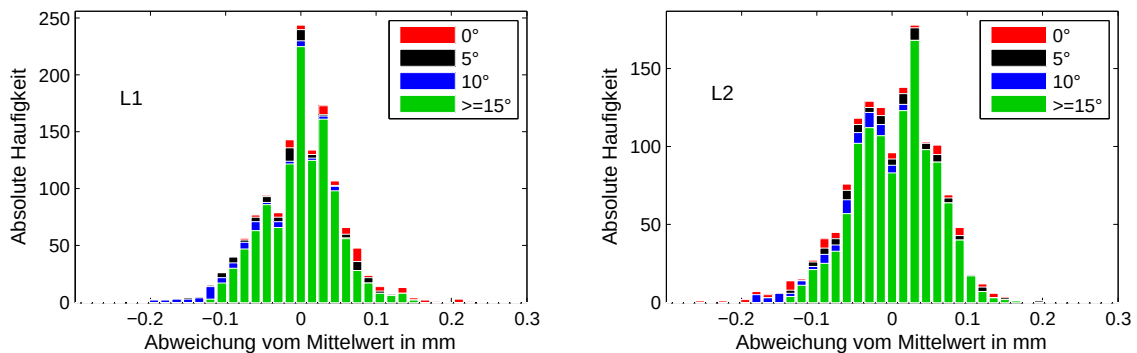


Abb. 9.2: Histogramm der Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen (Daten aus Abb. 9.1).

Die Kalibrierdifferenzen sind nach ihrer Größenordnung klassifiziert, wobei durch die farbliche Kodierung der niedrigen Elevationen auch hier eine Zuordnung der Differenzen zu verschiedenen Elevationen in Grenzen möglich ist. Anhand der Grafik wird sichtbar, dass die meisten Differenzen (ca. 95%) im Bereich von $\pm 0.1\text{mm}$ liegen, wobei berücksichtigt werden muss, dass hier die Anteile beider Kalibrierungen sichtbar werden. Werden diese Differenzen im Kontext der Ergebnisse aus Kapitel 8 betrachtet, so lässt sich die Größenordnung der hier sichtbaren Differenzen mit den dort behandelten Effekten

1. Messrauschen: 0.05mm bei niedrigen Elevationen
2. Kabelbiegung: Einfluss nach Korrektur $\leq 0.1\text{mm}$
3. Positioniergenauigkeit: Einfluss $\leq 0.1\text{mm}$

begründen. Es ist somit davon auszugehen, dass alle für die Abschätzung der inneren Genauigkeit relevanten Einflussgrößen erkannt wurden. Wird trotz vorhandener Systematiken aus den Daten eine empirische Standardabweichung berechnet, so liegt diese bei $s = 0.07\text{mm}$ und somit unter 0.1mm . Somit erfüllt die Präzision des Kalibrierverfahrens die in Abschnitt 3.2 geforderte Kalibrierengenauigkeit. Auf eine Quantifizierung der Wiederholengenauigkeit durch die Angabe einer Standardabweichung wird im Folgenden verzichtet, da dort die systematischen Abweichungen eindeutig dominieren, wie insbesondere bei der Analyse der Nahfeldeffekte in Kapitel 10 deutlich wird. Aber auch die bei Wiederholungsmessungen sichtbaren Korrelationen zeigen, dass es sich hier nicht um normalverteilte Abweichungen handelt. Aus diesem Grunde werden im folgenden Abschnitt zwei weitere Möglichkeiten zur Beurteilung der Genauigkeit diskutiert.

9.2 Kriterien zur Beurteilung systematischer Kalibrierunsicherheiten

Bereits im vorangegangenen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, dass eine Beschreibung der Kalibrierunsicherheiten aufgrund dominierender systematischer Abweichungen nicht durch die Varianz erfolgen kann. Stattdessen können die Abweichungen, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, durch maximale Abweichungen klassifiziert werden. Da die Auswirkung der Kalibrierunsicherheit auf die Positionsbestimmung anhand dieses Kriteriums nicht abgeleitet werden kann, wird in Abschnitt 9.2.2 ein Verfahren zur Abschätzung der Auswirkung der Kalibrierabweichungen im Positionsraum auf der Basis von Null-Basislinien erläutert. Bei beiden Kriterien werden stets die Abweichungen zwischen zwei Kalibrierungen analysiert.

9.2.1 Klassifizierte maximale Abweichungen zur Bewertung von Kalibrierdifferenzen

Ein sehr einfache Möglichkeit zur Beschreibung der Abweichungen besteht darin, die maximal auftretenden Abweichungen als Kriterium für die Beurteilung der Übereinstimmung zweier Kalibrierungen heranzuziehen. Da sowohl die Anforderungen an die Kalibrierengenauigkeit als auch die Kalibrierengenauigkeit elevationsabhängig sind, ist eine elevationsabhängige Klassifizierung sinnvoll. Bei den bisherigen Untersuchungen haben sich folgende Klassen als geeignet erwiesen:

- | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| • 0 – 90° Elevation | • 5 – 90° Elevation | • 10 – 90° Elevation |
| • 15 – 90° Elevation | • 20 – 90° Elevation | • 30 – 90° Elevation |

Eine differenzierte Beurteilung von Kalibrierergebnissen ist nur anhand von maximalen Abweichungen nicht möglich. Jedoch bietet dieser Ansatz den Vorteil, dass er eine gute Automation zulässt und auffällige Kalibrierungen gut erkannt werden können. So lässt sich zum Beispiel anhand dieser Kriterien feststellen, ob die Abweichungen einer Kalibrierung zu einem Antennentypmittel vorgegebene Grenzwerte überschreiten.

Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass stets einzelne Abweichungen das Ergebnis festlegen und Kalibrierungen aufgrund einzelner Ausreißer oder lokaler Auffälligkeiten mitunter als zu schlecht eingeschätzt werden. Ein weiterer ganz wesentlicher Nachteil ist, dass die Auswirkung der Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung nicht ableitbar ist. Während dieser Ansatz im normalen Kalibrierbetrieb eine hohe Bedeutung hat, wird im Rahmen dieser Arbeit eine visuelle Beurteilung aller Abweichungen bevorzugt.

9.2.2 Einfluss des Phasenpatterns auf die Positionsgenauigkeit

Eine weit verbreitete Methode zur Beurteilung der Auswirkung unterschiedlicher Kalibrierergebnisse auf die relative Positionsbestimmung besteht in der Berechnung einer Null-Basislinie. Das Vorgehen ist in Abb. 9.3 skizziert. Zunächst wird ein realer Datensatz einer GNSS-Station dupliziert. Die gegeneinander zu testenden Kalibrierdatensätze werden anschließend verwendet, um die Antenneneinflüsse zu korrigieren, so dass GNSS-Datensätze resultieren, die sich auf eine sogenannte Nullantenne (reale Antenne mit rechnerisch eliminiertem Phasenpattern) beziehen. Die Koordinatendifferenzen zwischen den beiden Nullantennen können mit einer GNSS-Standardauswertesoftware berechnet werden, wobei verschiedenen Auswertestrategien und Einstellungen (Beobachtungsdauer, Elevationsmaske, Frequenz/Linearkombination, Troposphärenschätzung etc.) möglich sind. Die drei Basislinienkomponenten beschreiben unmittelbar den Einfluss der unterschiedlichen Kalibrierergebnisse auf die Positionsbestimmung. Das Ergebnis gilt streng genommen nur für den verwendeten Testdatensatz, so dass bei anderen Ausgangsdaten leicht abweichende Ergebnisse möglich sind.

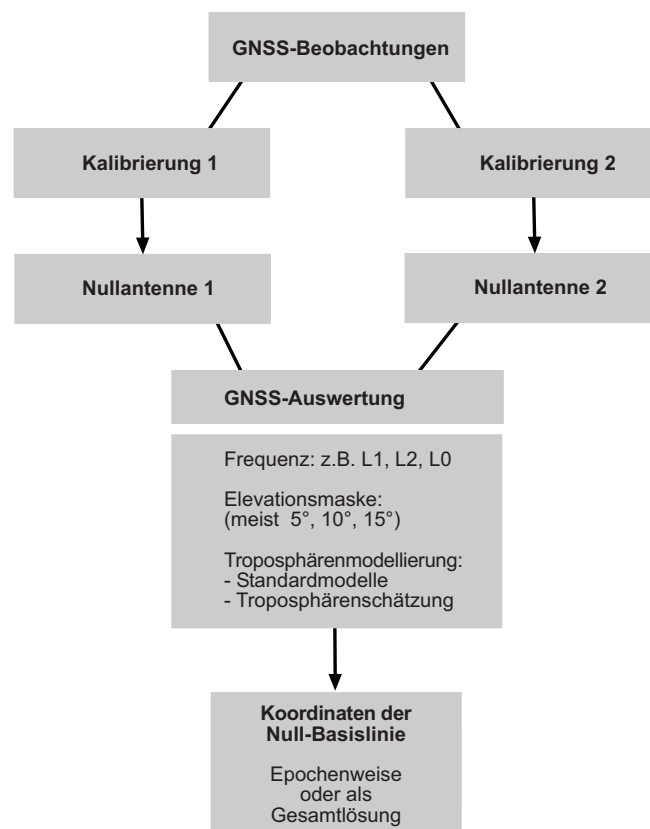


Abb. 9.3: Konzept der Berechnung von Null-Basislinien.

Wird jedoch die Auswertung epochenweise durchgeführt, so lässt die hieraus resultierende Zeitreihe die Ableitung allgemeingültiger Schlüsse in gewissen Grenzen zu, da bei einer ausreichend langen Beobachtungsdauer (mehrere Stunden) sehr viele verschiedene Satellitenkonfigurationen auftreten, für die jeweils die Koordinatendifferenzen berechnet werden. Bei anderen Datensätzen treten somit nur im Falle extremer Beobachtungssituationen (starke Abschattungen oder ähnliches) stark abweichende Ergebnisse auf. Solche Situationen können jedoch durch die Verwendung entsprechender Datensätze oder durch die Manipulation von Testdaten (Erzeugung von Abschattungen durch die Elimination von Beobachtungen) ebenfalls empirisch getestet werden.

In Abb. 9.4 ist das Ergebnis einer epochenweise ausgewerteten Null-Basislinie dargestellt. Die dabei verwendeten Kalibrierergebnisse sind dieselben, die auch der Abb. 9.1 zugrundeliegen. Da nur das Verfahren verdeutlicht und bewertet werden soll, wird auf eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse verzichtet. Kurz hervorzuheben ist, dass die maximalen Abweichungen etwa den in Abb. 9.1 sichtbaren maximalen Abweichungen entsprechen, wobei bei der Höhenkomponente die größten Abweichungen auftreten. Für die Höhenkomponente ist durch die rote Linie der aus allen Epochen abgeleitete Mittelwert dargestellt. Die Verschiebung von 0.01 mm vom wahren Wert (Null-Basislinie) ist vernachlässigbar. Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass je nach gewähltem Zeitintervall deutlichere Verschiebungen auftreten können, die jedoch bei diesem Datensatz auch im Extremfall der Auswertung einer einzelnen Epoche den Höhenunterschied von 0.15 mm nicht übersteigen. Bei dem aktuellen Genauigkeitsstand der GNSS-Verfahren sind diese Abweichungen, die sich aus den Anteilen beider Kalibrierungen zusammensetzen, vernachlässigbar (vgl. Kapitel 3). Diese Schlussfolgerung konnte bereits aufgrund der Größenordnung der Abweichungen (Abb. 9.1) im Vergleich zur Streckenmessgenauigkeit (s. Kapitel 3) gezogen werden.

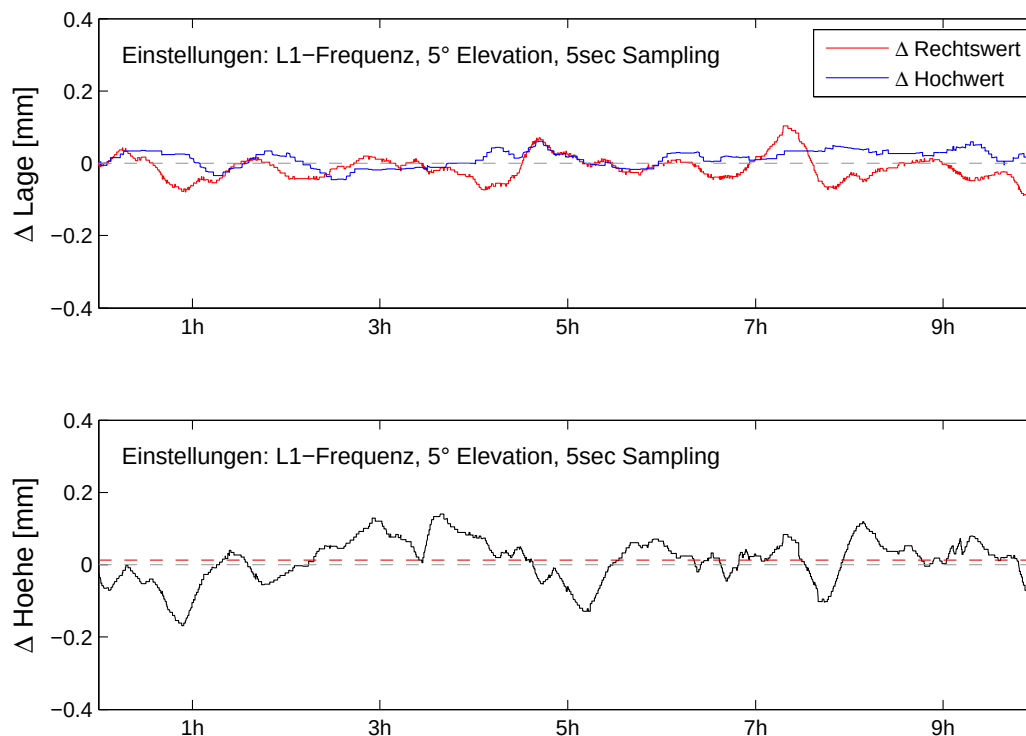


Abb. 9.4: Abschätzung der Auswirkung von Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung durch epochenweise Auswertung einer Null-Basislinie.

Die Abschätzung der Auswirkung von Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung ist für alle Frequenzen und Linearkombinationen separat durchzuführen. Häufig werden stattdessen für L1 und L2 vergleichbare Ergebnisse angenommen und für die Abschätzung im Falle der ionosphärenfreie Linearkombination $L0$ eine Verstärkung um Faktor 3 angesetzt. Dies ist nicht zulässig, wie anhand der folgenden Überlegungen deutlich wird. Die Linearkombination $L0$ ergibt sich zu (vgl. Abschnitt 3.3):

$$L0 = 2.5457 \cdot L1 - 1.5457 \cdot L2 . \quad (9.1)$$

Wird für L1 und L2 eine identische Standardabweichung σ angenommen, so folgt aufgrund der Varianzfortpflanzung für die Linearkombination

$$\sigma_{L0} = \sqrt{(2.5457 \cdot \sigma)^2 + (1.5457 \cdot \sigma)^2} \approx 3 \cdot \sigma . \quad (9.2)$$

Diese Abschätzung setzt zum einen voraus, dass die Varianzen von L1 und L2 identisch sind. Zum anderen müssen die Abweichungen zufälliger Art sein. Beide Voraussetzungen sind hier nicht erfüllt. Die unterschiedliche Qualität der L1- und L2-Kalibrierung wird z.B. beim Vergleich der Laborkalibrierung mit den Feldverfahren in Abschnitt 11.1 sichtbar. Die Existenz dominierender systematischer Anteile wurde bereits mehrfach erläutert. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass sich Systematiken, die für L1 und L2 identisch sind, bei der Ionosphärenfreien Linearkombination nicht verstärken, sondern aufgrund der Differenzbildung nur einfach eingehen (wg. der Faktoren 2.5457 und -1.5457), wie anhand Gleichung 9.1 ersichtlich wird.

Die vorgestellten Ansätze (a: Klassifizierung maximaler Abweichungen, b: Berechnung von Nullbasislinien) ermöglichen die Beurteilung der Abweichungen zwischen zwei Kalibrierungen. Während der erste Ansatz in der Regel für eine automatisierte Detektion von auffälligen Kalibrierungen genutzt wird, ermöglicht der zweite Ansatz die Abschätzung der Auswirkung unterschiedlicher Kalibrierungen auf die Positionsbestimmung.

9.3 Einfluss der Sendeantenne auf das Kalibrierergebnis

In Abschnitt 7.4 ist die Funktionsweise der Helixantennen beschrieben. Dieser Antennentyp zeichnet sich insbesondere durch seine enorme Bandbreite, also die Fähigkeit über einen breiten Frequenzbereich zu senden, aus. Die Qualität des erzeugten Signals (Signalstärke, Polarisationsreinheit) verringert sich mit dem Abstand der Sendefrequenz von der Mittenfrequenz f_m , für welche die Antenneneigenschaften konstruktionsbedingt optimal sind. Nach KRAUS u. MARHEFKA 2003 bleibt die hohe Polarisationsreinheit bei Helixantennen im Frequenzbereich von $0.77 \cdot f_m$ bis $1.3 \cdot f_m$ erhalten. Somit ergeben sich für die beiden am IGG vorhandenen Sendeantennen (L1 und L2) Frequenzbereiche von

L1 (1.57542 GHz): 1.2 GHz bis 2.0 GHz bzw.

L2 (1.22760 GHz): 0.9 GHz bis 1.6 GHz .

Während der L1-Bereich nicht alle GNSS-Frequenzen beinhaltet (z.B. GPS-L5 mit 1176.45 GHz), deckt die L2-Antenne den gesamten derzeit benötigten Frequenzbereich ab (s. Abb. 9.5). Um diese theoretischen Überlegungen auch empirisch zu belegen, wurde 2007 eine GNSS-Antenne mit beiden Sendern kalibriert. Diese Kalibrierungen wurden in einer Absorberhalle des Instituts für Hochfrequenztechnik der TU Darmstadt durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, nachzuweisen, dass die Wahl des Senders keinen signifikanten Einfluss auf die Kalibrierergebnisse hat. Aufgrund der theoretischen Überlegungen lag der Fokus der Untersuchungen insbesondere auf der Überprüfung der Eignung des L2-Senders für Kalibrierungen im L1-

Frequenzbereich. Für diese Untersuchungen sind die Frequenzen GPS-L1 und GLONASS-G1 ideal geeignet. Die L1-Frequenz ist hervorzuheben, weil bei dieser Frequenz Kalibrierabweichungen fast ausschließlich auf den Einfluss des L2-Senders zurückzuführen sind, da bei der Kalibrierung mit der L1-Sendeantenne Sende- und Mittenfrequenz übereinstimmen. Die G1-Frequenz liegt hingegen am oberen Ende des Frequenzbereichs (Abb. 9.5), so dass im Falle des L2-Senders maximale Abweichungen zu erwarten sind. Sollte die Polarisationsqualität des L2-Senders im L1/G1-Bereich unzureichend sein, so sind systematische azimutabhängige Variationen zu erwarten. Zudem könnte bei einer Reduktion des Antennengewinns auch ein Anstieg des Messrauschens sichtbar werden.

Da zum Zeitpunkt dieser Versuchsreihe keine GLONASS-spezifizierte Antenne zur Verfügung stand, wurden die Untersuchungen mit einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne durchgeführt, die nach Herstellerangaben nicht GLONASS-kompatibel ist. Anhand der Durchlasscharakteristik dieser Antenne (Abb. 9.5) kann jedoch die Eignung der Antenne für die notwendigen Kalibrierungen belegt werden. Auf der Rechtsachse der Abbildung sind die Frequenzen von 1.15 GHz bis 1.65 GHz dargestellt. Die Trägerfrequenzen der GPS- (Kennung L), GLONASS- (G) und Galileo-Signale (E) sind ebenfalls eingezeichnet (vertikale Linien). Der Hochwert zeigt die am Netzwerkanalysator ermittelte Signalstärke relativ zu einem hier zufällig festgesetzten Referenzlevel an. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass die GLONASS-G1-Frequenzen zwar bereits leicht außerhalb des eigentlichen Arbeitsbereiches liegen (leichter Abfall der Signalstärke), aber die Signalstärke das Rauschniveau noch deutlich übersteigt. Bei der Kalibrierung ist somit allenfalls mit einem Anstieg des Messrauschens zu rechnen.

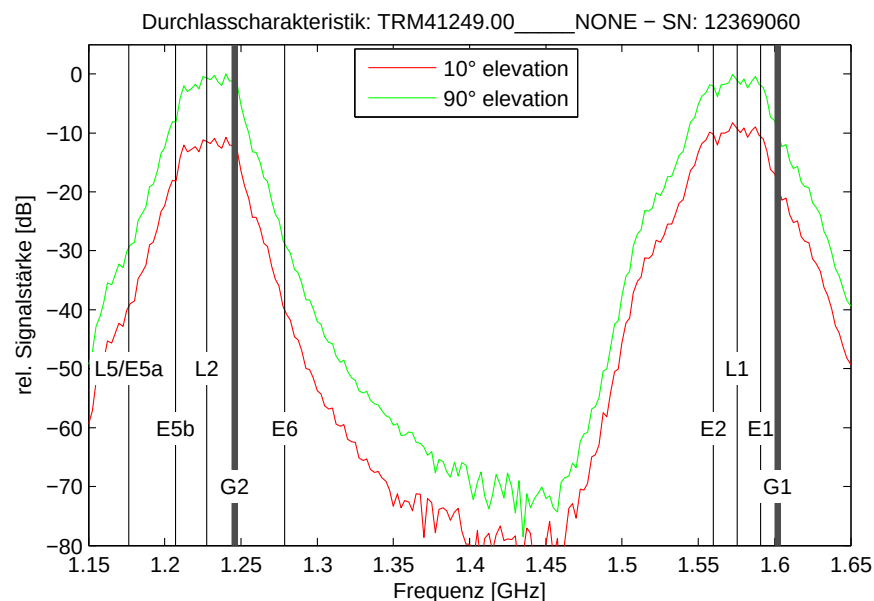


Abb. 9.5: Durchlasscharakteristik einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne (nicht GLONASS-spezifiziert). Die Frequenzen können den Satellitensystemen zugeordnet werden (L: GPS, G: GLONASS und E: Galileo).

In Abbildung 9.6 sind die Differenzen zwischen den Kalibrierungen mit L1- und L2-Sender dargestellt. Es wurde lediglich der Sender ausgetauscht. Weitere Veränderungen am Setup wurden nicht vorgenommen. Für beide Frequenzen zeigen sich maximale Differenzen im Bereich von 0.15 mm . Die sichtbaren Differenzen übersteigen die bei Wiederholungsmessungen typischen Abweichungen nicht (s. Abschnitt 9.1). Die hier sichtbaren Differenzen sind insbesondere für die L1-Frequenz sogar noch etwas geringer. Dies resultiert daraus, dass von mehreren Messungen mit sehr ähnlichen Ergebnissen ein Beispiel mit tendenziell geringeren

Variationen ausgewählt wurde, da so die Signifikanz möglicher systematischer Einflüsse aufgrund der geringen zufälligen Unsicherheiten ansteigt. Insgesamt sind die sichtbaren Systematiken bezüglich der Amplitude jedoch nicht größer als die in Abb. 9.1 sichtbaren Effekte. Bei den in Abb. 9.6 dargestellten Ergebnissen sind die Korrelationen zwischen benachbarten Azimuten besonders ausgeprägt. Es kann ausgeschlossen werden, dass diese Effekte vom Sender verursacht werden, da mögliche Einflüsse des Senders gerade nicht für verschiedene Azimute gleich sind. Stattdessen lassen sich die Effekte durch Variationen bei der Einstellung der Elevation begründen. Diese mechanischen Probleme wurden zwischenzeitlich behoben und treten bei dem heute eingesetzten Antennendrehstand nicht mehr auf.

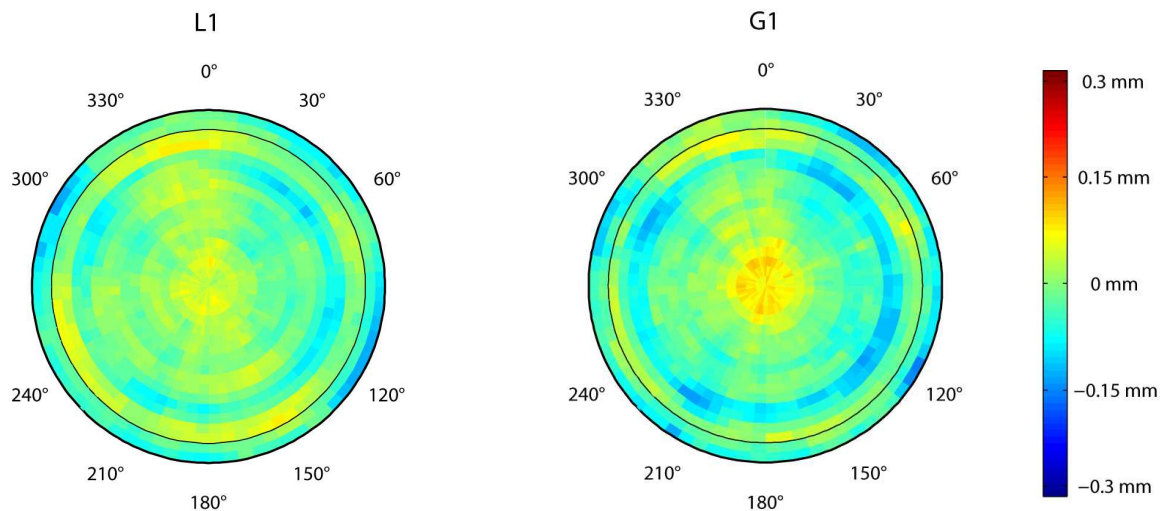


Abb. 9.6: Differenzen des Antennenpatterns bei Nutzung zweier unterschiedlich optimierter Sender (optimiert für L1 bzw. L2). Durch die Verwendung des L2-Senders ist weder bei GPS-L1 noch bei GLONASS-G1 ein Anstieg der Messungsunsicherheiten erkennbar.

Auf eine Wiederholung der Testmessungen mit dem neuen Aufbau wurde verzichtet, da in der AMK Bonn der Zugang zum Sender nicht ohne die Demontage von Absorberelementen möglich ist und die gezeigten Ergebnisse bereits eindeutig sind. Der L2-Sender ist für die Kalibrierung im gesamten GNSS-Frequenzbereich geeignet. Aus der Verwendung eines Senders resultieren zwei wesentliche Vorteile. Zum einen kann auf einen Zugang zum Sender verzichtet werden. Ein solcher Zugang, der in der AMK Bonn nur durch die Verwendung von zusätzlichen begehbaren Absorbern möglich gewesen wäre, hätte zu einer Verschlechterung des Absorptionsverhaltens der Messkammer geführt. Zum anderen würde sich die Kalibrierzeit bei der Nutzung von zwei Sendern verdoppeln und stets ein manueller Austausch der Sender notwendig.

9.4 Einfluss des Messabstands auf das Kalibrierergebnis

Bei der Konzeption einer Antennenmesskammer kommt der Festlegung des Abstands zwischen Sender und Testantenne eine wesentliche Bedeutung zu. Während bei GNSS-Messungen der Abstand zwischen Sender und Antenne bei Messungen auf der Erdoberfläche mehr als 20000 km beträgt, ist bei der Kalibrierung der mögliche Abstand auf wenige Meter begrenzt (Greding max. 30m, AMK Bonn 6.5m). Aufgrund dieser starken Reduktion ist eine Betrachtung der Fernfeldeigenschaften notwendig. Hierzu werden in diesem Kapitel ein theoretischer und ein empirischer Ansatz verfolgt. Zunächst wird der Begriff des Fernfeldes erläutert, da dieser Begriff im Kontext der Antennenkalibrierung für drei unterschiedliche Dinge verwendet wird.

9.4.1 Begriffsdefinitionen: Fernfeld

1. Im Kontext der Mehrwegeproblematik wird unter dem Nahfeld die unmittelbare Umgebung der Empfangsantenne bezeichnet. Das Nahfeld beinhaltet z.B. Stativkopf, Antennenhalter und Dreifuß. Das Fernfeld schließt sich an dieses Nahfeld an, so dass sich z.B. Fassaden, Wege oder Zäune in der Regel im Fernfeld einer Antenne befinden. Diese wenig exakte Unterteilung kann durch die Betrachtung der unterschiedlichen Eigenschaften der Regionen elektromagnetischer Felder von Antennen (vgl. BALANIS 2005) konkretisiert werden. Dieser Sachverhalt hat für die Wahl des Messabstandes zwischen Sender und Antenne jedoch keine Relevanz.

2. In der Hochfrequenztechnik beschreibt das Fernfeld den Bereich, in dem das elektrische und das magnetische Feld in Phase sind und auf eine getrennte Betrachtung von elektrischem und magnetischem Feld verzichtet werden kann. In der Literatur sind sehr unterschiedliche Fernfelddefinitionen zu finden. Eine kurze Übersicht sowie weitergehende Literaturquellen finden sich in ROTHAMMEL u. KRISCHKE 2001 und BANSAL 1999. Für den hier verwendeten Sender ergeben sich je nach Ansatz Ergebnisse zwischen $0.4m$ bis $1m$. Bei einer Messdistanz von $6.5m$ ist die Fernfeldbedingungen jedoch in jedem Fall eingehalten.

3. Wird die geometrische Ausbreitung des Testsignals betrachtet, so ergibt sich eine dritte Fernfeld-Definition. Als Fernfeld wird hier der Bereich bezeichnet, in dem das Signal mit hinreichender Genauigkeit als eine ebene Wellenfront angesehen werden kann. Dieser für die Festlegung des Messabstands relevante Aspekt wird im folgenden Abschnitt analysiert.

9.4.2 Theoretische Ableitung der minimalen Messdistanz

Die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse ist nur dann gewährleistet, wenn das Testsignal dem von einem Satellit abgestrahlten Signal bestmöglich entspricht. Ein Aspekt ist hierbei die Ebenheit der an der Empfangsantenne ankommenden Wellenfront, deren Abweichung von einer idealen Wellenfront mit zunehmendem Abstand zwischen Sender und Empfänger geringer wird (KRAUS u. MARHEFKA 2003). Die geometrische Situation ist in Abb. 9.7 dargestellt.

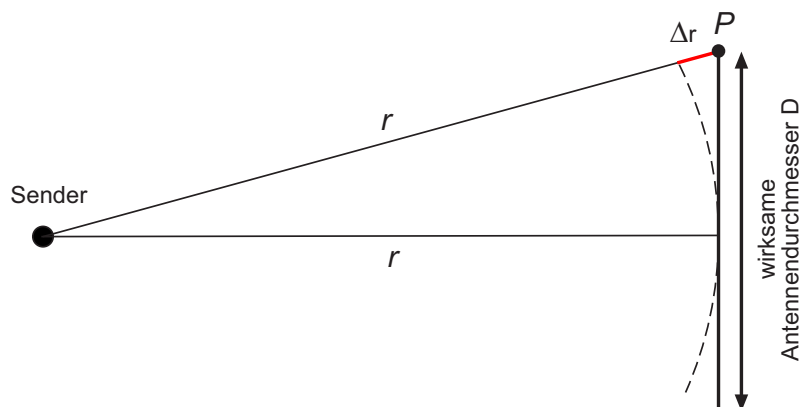


Abb. 9.7: Ableitung der Fernfeldbedingung aus der Geometrie der Strahlausbreitung.

Die Phasenverschiebung Δr in einem Punkt P der Testantenne lässt sich mit der Messdistanz r und dem maximalen Durchmesser der Antennenwirkfläche D (die Antennenwirkfläche entspricht nicht der Fläche der

Antennenapparatur) über den Satz des Pythagoras abschätzen. Bei einer solchen Abschätzung treten jedoch mehrere Vereinfachungen und Unsicherheiten auf. Zunächst kann der Sender nicht als Punktquelle angesehen werden, so dass sich eine andere als der in Abb. 9.7 dargestellten Geometrie ergibt. Weiterhin ist der wirksame Antennendurchmesser in der Regel nicht exakt bekannt, so dass auch hier zusätzliche Unsicherheiten bzgl. der Abschätzung auftreten. Eine weitere Einschränkung der Gültigkeit resultiert daraus, dass die in Abb. 9.7 dargestellte Geometrie nur dann gültig ist, wenn die Phasenfront eine Kugelschale mit Radius r beschreibt und die Krümmung somit $1/r$ entspricht. Da es sich bei Helix-Antennen um Richtantennen handelt, ist diese Bedingung nicht erfüllt (KRAUS u. MARHEFKA 2003).

Eine detaillierte Darstellung der Fernfeldproblematik sowie eine Abschätzung des Einflusses der Messdistanz auf die Phasenmessung findet sich in ZEIMETZ und KUHLMANN 2008. Dort wird für eine Teststrecke von 6m eine Phasenverschiebung von weniger als 0.2mm berechnet, wobei dieser Wert aufgrund der obigen Einschränkungen nur als ungefähre Abschätzung anzusehen ist. Ebenfalls in ZEIMETZ und KUHLMANN 2008 dargestellte empirische Untersuchungen werden in Abschnitt 9.4.3 mit einigen Ergänzungen vorgestellt.

Angemerkt sei noch, dass der in der Literatur häufig zu findende Grenzwert für die Einhaltung der Fernfeldbedingung von

$$r_{Nah/Fernfeld} = \frac{2D^2}{\lambda} + \frac{\lambda}{32} \approx \frac{2D^2}{\lambda} \quad (9.3)$$

hier nicht verwendet werden kann. Zum einen ist diese Gleichung nur für Antennen mit $D > 2.5\lambda$ gültig (BANSAL 1999). Zum anderen führt dieser Ansatz zu einer Phasenverschiebung von $\lambda/16$ bzw. 22.5° . Diese rein geometrisch bedingte Phasenverschiebung, die mit Hilfe des Satzes des Pythagoras leicht überprüft werden kann, entspricht bei der L1-Frequenz einer Verschiebung von fast 12mm und ist somit bei der Kalibrierung von GNSS-Antennen nicht akzeptabel.

9.4.3 Empirische Tests zum Einfluss kurzer Messstrecken auf die Antennenkalibrierung

Für die empirischen Tests zur Untersuchung des Einflusses der Länge der Teststrecke auf das Kalibrierergebnis konnte die von der Bundeswehr zur Verfügung gestellte 41m lange Absorberhalle (Breite: 16m, Höhe: 14m) des EMV-Testzentrums in Greding (Wehrtechnischen Dienststelle 81) genutzt werden. In dieser Messkammer können Kalibrierungen mit unterschiedlichen Messabständen durchgeführt werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse kann gezeigt werden, inwieweit signifikante Abweichungen auftreten, welche auf den Messabstand zurückzuführen sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass keine azimutabhängigen Effekte zu erwarten sind, da sich bei einer Drehung der Antenne um den Azimut die in Abb. 9.7 dargestellte Geometrie nicht ändert. Stattdessen sind elevationsabhängige Effekte zu erwarten.

Die im Folgenden dargestellten Tests wurden 2007 durchgeführt. Bei einer ersten Kalibrierung betrug der Messabstand 16m. Bei einer zweiten Kalibrierung wurde der Abstand auf 5m verkürzt (AMK Bonn: 6.5m). Die Differenzen der beiden Kalibrierungen (5m vs. 16m) finden sich in der folgenden Abbildung.

Die Abweichungen liegen im Wesentlichen im Bereich von $\pm 0.4mm$. Lediglich im Bereich von ca. 280° bis 330° Azimut treten bei 5° und 10° Elevation mit $-0.6mm$ etwas größere Abweichungen auf. Insgesamt zeigt das Ergebnis eindeutig, dass die Abweichungen deutlich größer sind als die Wiederholgenauigkeit (vgl. Abschnitt 9.1). Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss nun geprüft werden, ob als Ursache der Einfluss des Abstands zwischen Sender und Empfänger in Frage kommt oder ob hier andere Ursachen wirksam werden.

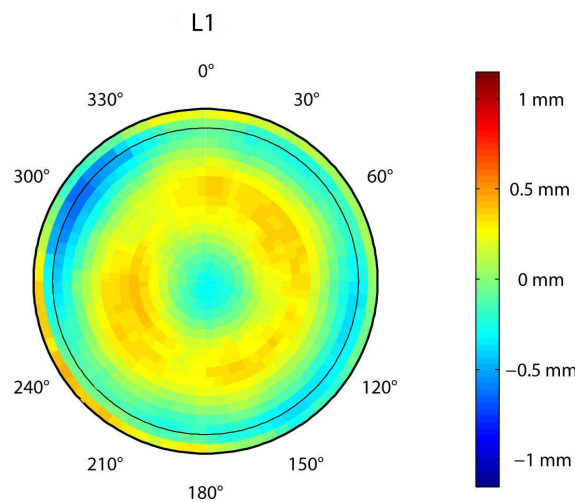


Abb. 9.8: Differenz zw. zwei Kalibrierungen (GPS-L1) mit unterschiedlichen Messabständen (5 vs. 16m).

Da der Einfluss des Messabstands auf Grund der obigen Überlegungen unabhängig vom Azimut sein muss, sind die blau gefärbten Flächen mit Abweichungen im Bereich von -0.5° bis -0.6° nicht auf den Einfluss des Sendeabstands zurückzuführen. Auch die elevationsabhängigen Effekte, die in Abb. 9.8 vom Zenit bis 5° Elevation durch einen Farbwechsel von blau über grün, gelb-orange, grün zurück nach blau deutlich werden, lassen sich nicht durch den Einfluss des Messabstands erklären, da bei einer Verdrehung der GNSS-Antenne in eine Richtung (z.B. vom Zenit zum Horizont) nur stetige Änderungen des Wegunterschiedes Δr mit gleichem Vorzeichen zu erwarten sind, wie anhand der in Abb. 9.7 beschriebenen Geometrie ersichtlich wird. Bei den hier sichtbaren Effekten ändert sich hingegen gerade bei den mittleren Elevationen (30° bis 70°) das Niveau, so dass andere Ursachen für diese Effekte verantwortlich sein müssen.

Das Ergebnis ist insofern zufriedenstellend, als dass kein Einfluss des Sendeabstands sichtbar ist. Die vorhandenen Systematiken können aufgrund der obigen Erläuterungen nicht auf den Sendeabstand zurückgeführt werden. Allerdings ist die Ursache für diese Effekte nicht geklärt. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Qualität der 2007 in Greding durchgeführten Kalibrierungen nicht mit der in der AMK Bonn erreichbaren Qualität zu vergleichen ist. Deutliche Verbesserungen wurden durch die höhere Genauigkeit des neuen Drehstands, die Durchführung des Kabels durch die Rotationsachse und einer besseren Absorberverkleidung des Drehstandes erreicht. Zudem waren in der AMK Bonn Optimierungen möglich, auf die bei den Messkampagnen in Greding verzichtet werden musste (z.B. Verlegung der Kabel zwischen den Absorbern, Reduktion der begehbaren Absorber auf ein Minimum). Die hier sichtbaren Differenzen dürfen somit nicht mit der heutigen Reproduzierbarkeit verglichen werden. Das bedeutet allerdings auch, dass die Bestimmung des Einflusses des Messabstands auf die Kalibrierung nur mit der damals erreichten Genauigkeit erfolgt ist. Wenn auch die in Abb. 9.8 größten sichtbaren Abweichungen nicht Folge eines zu geringen Messabstands sein können, ist nicht auszuschließen, dass weitere signifikante Effekte vorhanden sind, die jedoch aufgrund anderer dominierender Effekte nicht deutlich werden. Grob abgeschätzt können Systematiken im Bereich von 0.2 mm durchaus unentdeckt bleiben.

Eine Wiederholung der Tests ist derzeit jedoch nicht geplant, da zum einen keine weiteren Messkampagnen in der Absorberhalle in Greding vorgesehen sind und die bisherigen Test gezeigt haben, dass möglicherweise verbleibende Effekte zumindest kleiner als die oben genannten 0.2 mm sein müssen. Werden diese Variationen im Kontext der im nächsten Kapitel vorgestellten Nahfelduntersuchungen betrachtet, so wird sichtbar, dass diese Effekte derzeit vernachlässigbar sind.

9.5 Vorläufiges Ergebnis der Analyse des Budgets der Messungsunsicherheiten

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Zusammenfassung der bisherigen Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Störeinflüsse. Hierbei unterscheidet sich die Unsicherheit der Einmessung des Verschiebebetrags zwischen Rotationspunkt und Antennenreferenzpunkt (Abschnitt 6.4) von allen weiteren Messungsunsicherheiten. Während über den Verschiebebetrag der Bezug zum Antennenreferenzpunkt (ARP) hergestellt wird, haben alle übrigen Messungen keinen direkten Bezug zum ARP. Der Verschiebebetrag kann mit einer Standardabweichung von etwa $\sigma_{\mathbf{a}} \leq 0.1\text{mm}$ bestimmt werden (Abschnitt 6.4). Soll eine vollständige Genauigkeitsabschätzung für das Kalibrierergebnis durchgeführt werden, so ist nach Gleichung 3.2

$$\sigma_K^2 = (\sigma_{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{e}_0)^2 + \sigma_{PCV}^2 \quad (9.4)$$

neben σ_a auch die Standardabweichung der richtungsabhängigen Variationen anzusetzen, wobei Korrelationen zwischen den beiden Anteilen ausgeschlossen werden können. Dies gilt jedoch nicht für die Messungsunsicherheiten, welche die Phasenmessung beeinflussen. Diese Messungsunsicherheiten werden im Folgenden zusammengefasst.

Zufällige Messungsunsicherheiten:

- Messrauschen im Zenit, Abschnitt 8.4: $s_{Zenit} \leq 0.01\text{mm}$
- Messrauschen im Horizont, Abschnitt 8.4: $s_{Horizont} \leq 0.05\text{mm}$
- Einfluss der relativen Positioniergenauigkeit des Drehstands, Abschnitt 8.5: $s \leq 0.05\text{mm}$

Werden die zufälligen Unsicherheiten entsprechend der Regeln des Varianzfortpflanzungsgesetzes addiert, so folgt eine Standardabweichung für den gemeinsamen Einfluss der zufälligen Anteile von etwa $s < 0.07\text{mm}$.

Systematische Messungsunsicherheiten (jeweils maximal zu erwartende Einflüsse):

- Temperatureinfluss, Abschnitt 8.2: nicht signifikant
- Signalstärke, Abschnitt 8.3: $\leq 0.05\text{mm}$ (elevationsabhängig)
- Einfluss der absoluten Positioniergenauigkeit des Drehstands: $\leq 0.1\text{mm}$ (elevationsabhängig)
- Auswirkung der Kabeleffekte, Abschnitt 8.6: $\leq 0.1\text{mm}$ (azimutabhängig)
- Einfluss des Senders, Abschnitt 9.3: nicht signifikant
- Einfluss des Messabstands, Abschnitt 9.4.3: $\leq 0.2\text{mm}$ (elevationsabhängig, Wert sehr unsicher)

Die systematischen Anteile übersteigen die zufälligen Anteile deutlich. Zudem sind drei Einflussgrößen elevationsabhängig, so dass die Phasenmessungen entsprechend korreliert sind. Eine lineare Aufsummierung der elevationsabhängigen Anteile führt zu einer maximalen Abweichung von $d = 0.35\text{mm}$. Es ist allerdings nicht damit zu rechnen, dass diese Größenordnung tatsächlich erreicht wird, da bei allen Abschätzungen eine pessimistische Genauigkeitsbetrachtung durchgeführt wurde. Dies gilt insbesondere im Falle des Messabstands. Bei den entsprechenden Experimenten wurden keine Systematiken erkannt, die auf den Sendeabstand zurückgeführt werden konnten. Allerdings waren die Testmessungen von einer geringeren Qualität, als dies heute der Fall ist, weshalb keine höhere Genauigkeit garantiert werden kann. Elevationsabhängige Systematiken von bis zu 0.35mm können somit nicht ausgeschlossen werden. Im Vergleich zu den zufälligen Anteilen, deren Einflüsse zudem durch Mehrfachmessungen reduziert werden können, sind die systematischen Einflüsse so groß, dass die Genauigkeit des Kalibrierverfahrens im Wesentlichen der Summe der systematischen Messungsunsicherheiten entspricht. Diese Einflüsse sind jedoch im Vergleich zu den Nahfeldeffekten gering, wie im folgenden Kapitel belegt wird.

10 Nahfeldeffekte

Die Nahfeldproblematik ist bereits seit den Anfängen der Antennenkalibrierung bekannt. Schon TRANQUILLA und COLPITTS (1989) zeigen auf, dass Kalibrierergebnisse nur in Kombination mit der bei der Kalibrierung vorhandenen Umgebung gültig sind. SCHUPLER und CLARK führen umfassende Untersuchungen zum Nahfeldeinfluss durch und kommen ebenfalls zu dem Resultat, dass alle Gegenstände in der Umgebung der Antenne deren Empfangsverhalten beeinflussen („almost anything you put near an antenna affects its response“, SCHUPLER und CLARK 2001). Eine tatsächliche Lösung des Nahfeldproblems konnte weder in den bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema (s.a. DILSSNER 2007) noch in dieser Arbeit erbracht werden.

Obwohl bereits zahlreiche Publikationen bzgl. der Nahfeldeinflüsse erschienen sind (siehe oben), wird dieser Problematik oft nicht die notwendige Beachtung zukommen gelassen. Dies führt in Kombination mit der hohen Präzision der verschiedenen Kalibrierverfahren häufig dazu, dass in der Praxis mitunter von viel zu optimistischen Kalibrierergebnissen ausgegangen wird, da die Kalibriergenauigkeit als äußere Genauigkeit bei der GNSS-Anwendung betrachtet wird und die Nahfeldproblematik dabei außer Acht gelassen wird. Gleichzeitig werden auftretende Koordinatenwidersprüche, die in einem Zusammenhang mit der GNSS-Antenne stehen, vorschnell als durch das Nahfeld verursachte Kalibrierabweichungen interpretiert.

10.1 Schwierigkeit bei der Lösung der Nahfeldproblematik

Eine vollständige Lösung der Nahfeldproblematik wäre gegeben, wenn die elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen einer Antenne und dem Antennenumfeld vollständig berechnet werden könnten. Zwar lassen sich die Einflüsse von einfachen Elementarkörpern mit bekannten und homogenen elektromagnetischen Materialeigenschaften auf elektromagnetische Felder simulieren (s. ALAYDRUS 2001), in der Praxis sind diese Ansätze allerdings noch nicht anwendbar. Ein alternativer Ansatz, die Realisierung einer Antennenmontierung, die keine signifikanten Nahfeldeinflüsse auf das Empfangsverhalten einer GNSS-Antenne hat, ist weder bei der Kalibrierung noch bei GNSS-Anwendungen realisierbar.

Um überhaupt Kenntnisse über die Auswirkung möglicher Nahfeldeffekte zu erhalten, ist es sinnvoll, verschiedene Nahfeldsituationen miteinander zu vergleichen und sichtbare Einflüsse zu quantifizieren. Für die Beurteilung der Ergebnisse können z.B. die in Kapitel 9 aufgezeigten Methoden (Vergleich der Pattern, Berechnung von Nullbasislinien) verwendet werden. Bei der Untersuchung zur Nahfeldproblematik zeichnet sich das Laborverfahren zum einen durch die ganzjährig nahezu konstanten Bedingungen aus. Zum anderen können solche Tests aufgrund der kurzen Kalibrierzeiten (60 min) sehr effizient durchgeführt werden¹². Sollen bei Tests in erster Linie elevationsabhängige Variationen analysiert werden, kann häufig auf eine Abtastung aller Azimute verzichtet werden, so dass sich die Kalibrierzeit auf bis zu 12 Minuten reduziert (bei 36°-Schritten im Azimut).

Bei dem Vergleich zweier unterschiedlicher Nahfeldsituationen ist nur die relative Änderung bestimmbar. Die Ergebnisse sind somit nur bedingt auf die Praxis übertragbar. Wird z.B. bei der Kalibrierung zwischen die Antenne und den mit Absorbern verkleideten Oberbau eine Metallplatte montiert, so führt dies zu einer starken Änderung des Nahfelds. Wird hingegen z.B. auf einen Betonpfeiler eine Metallplatte montiert, so sind die Änderungen deutlich geringer oder zumindest anders. Während sich Absorber dadurch auszeichnen, dass Impedanzsprünge und somit Reflexionen vermieden werden (Abschnitte 7.5 und 7.6), reflektieren Metalle und Beton vergleichsweise gut. Auch bezüglich der elektrischen und magnetischen Leitfähigkeit unterscheiden sich die Varianten voneinander.

¹²Zum Vergleich: Bei der absoluten Antennenkalibrierung mit Roboter sind mehrere Stunden pro Kalibrierung notwendig (WÜBBENA et al. 2006).

Während somit die relativen Änderungen (z.B. Kalibrierung mit oder ohne Grundplatte) nur bedingt übertragbar sind, sind die Kalibrierergebnisse selber anwendbar, so dass Kalibrierungen nach Möglichkeit mit den bei den GNSS-Anwendungen verwendeten Nahfeldkomponenten (z.B. Dreifuß, Grundplatte, Radom) durchgeführt werden sollten. Dieser Ansatz kam auch bei den GNSS-Messungen zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes zum Einsatz (FELDMANN-WESTENDORFF 2009). Dort wurde bei der Kalibrierung u.a. der obere Teil eines Stativs mit zuvor exakt definierten Spreizwinkeln der Stativbeine berücksichtigt (s. Abb. 10.1). Die Möglichkeiten der Berücksichtigung von Nahfeldkomponenten sind derzeit bei der Laborkalibrierung aufgrund der Tragfähigkeit des Drehstands auf 15 bis 20kg begrenzt.



Abb. 10.1: Kalibrierung einer GNSS-Antenne unter Berücksichtigung von Nahfeldkomponenten (Foto: SCHMITZ und WÜBBENA 2007).

10.2 Kalibrierungen zur Untersuchung des Nahfeldeinflusses

Im Folgenden werden zwei Beispiele gezeigt, welche die Größenordnung möglicher Nahfeldeffekte aufzeigen. Bei den durchgeführten Experimenten wird die Veränderungen am Aufbau nach Möglichkeit so vorgenommen, dass die Position der Antenne im Raum unverändert bleibt, so dass Einflüsse möglicher Restreflexionen von den Hallenwänden ausgeschlossen werden können. Folgende Untersuchungen werden in diesem Kapitel vorgestellt:

- Einfluss der Anordnung des Antennenkabels am Beispiel einer Leica AX1202GG Antenne
- Einfluss einer Metallplatte am Beispiel einer Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenne

Anhand des ersten beschriebenen Beispiels wird der Einfluss der Anordnung des Antennenkabels im Nahfeld der Antenne dargestellt (siehe auch ZEIMETZ und KUHLMANN 2008). Hierzu wurden Kalibrierungen mit bis auf die Lage des Kabels (s. Abb. 10.2) identischen Aufbauten durchgeführt.

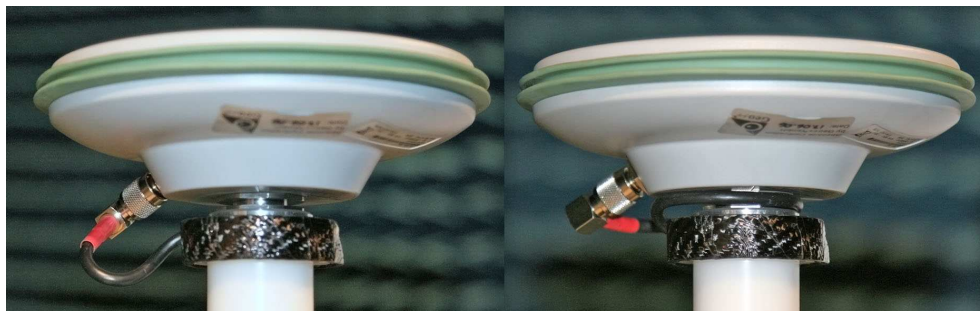


Abb. 10.2: Aufbau zur empirischen Untersuchung des Einflusses der Kabelanordnung auf die Kalibrierung.

Im ersten Experiment (linker Aufbau) formte das Antennenkabel eine Schleife mit einem Durchmesser von etwa 60mm, bevor es durch die Rotationsachse des Aufbaus geführt wurde. Beim zweiten Test wurde das Kabel vor der Durchführung durch die Achse einmal um diese gewickelt, um eine engere Führung um die Achse zu ermöglichen.

Die Differenzen zwischen den beiden Ergebnissen sind in Abb. 10.3 dargestellt. Erwartungsgemäß treten die maximalen Abweichungen im Bereich der niedrigen Elevationen auf. Die maximalen Abweichungen liegen bei 1.5mm und sinken bereits ab 10° Elevation auf unter 1mm ab. Aufgrund der Reproduzierbarkeit des Effektes konnte eindeutig belegt werden, dass die Effekte auf die Kabellage zurückzuführen sind. Um auszuschließen, dass es sich um Leitungseffekte innerhalb des Kabels handelt, wurden ähnliche Test mit ähnlichen Ergebnissen durchgeführt, obwohl statt einer Veränderung des eigentlichen Antennenkabels zusätzliche Kabelstücke im Nahfeld der Antenne platziert wurden.

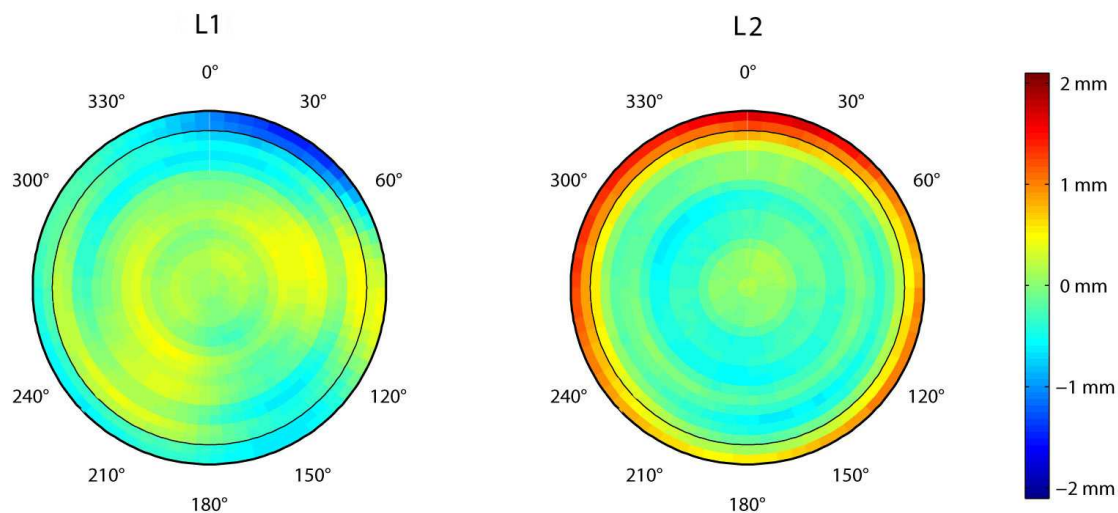


Abb. 10.3: Nahfeldeffekte aufgrund der Anordnung des Antennenkabels (Frequenzen: GPS-L1 und GPS-L2).

Die hier gezeigten Effekte konnten mit einer Choke Ring Antenne nicht erzielt werden. Dennoch wird erkennbar, dass selbst kleinste Variationen im Nahfeld der Antenne das Ergebnis signifikant verändern. Bei der Positionsbestimmung sind solche Effekte hingegen aufgrund der übrigen Störeinflüsse, insbesondere den übrigen Nahfeldeinflüssen, zu vernachlässigen. Dies wird anhand der berechneten Nullbasislinie nach dem in Abschnitt 9.2.2 erläuterten Konzept deutlich (Abb. 10.4).

Die maximalen Abweichungen liegen im Falle der Lagekomponenten im Bereich weniger Zehntel Millimeter und für die Höhe meist unterhalb von einem Millimeter, wobei zu berücksichtigen ist, dass hier eine Elevationsmaske von 10° gewählt wurde und die größten Kalibrierabweichungen erst unterhalb dieser Elevationsgrenze auftreten.

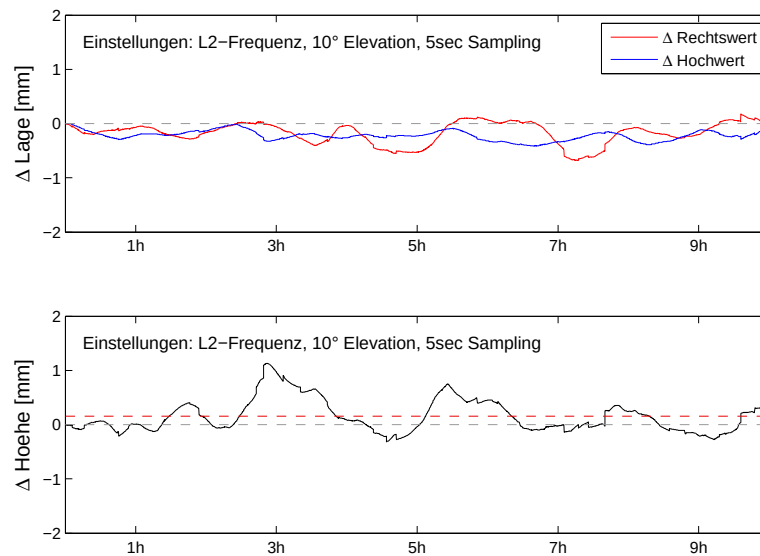


Abb. 10.4: Abschätzung des Kabeinflusses auf die Positionsbestimmung.

Anhand dieses Beispiels wird zum einen die hohe Sensitivität des Kalibrierverfahrens, aber auch die Empfindlichkeit der Antenne deutlich. Zum anderen zeigt es erneut, dass die hohe Kalibrierengenauigkeit durch die Nahfeldeffekte begrenzt ist, wenn die Umgebung der Antenne nicht konstant gehalten werden kann. Bei der zweiten erwähnten Testreihe wurden Untersuchungen zum Einfluss einer Metallplatte, auch in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Platte und Antenne, durchgeführt. Insgesamt sind die drei in Abb. 10.5 dargestellten Setups gegeneinander getestet worden¹³.

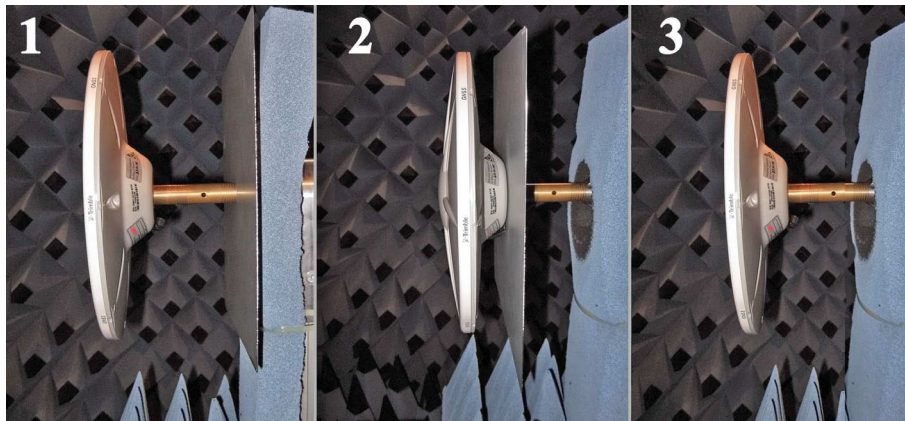


Abb. 10.5: Kalibriervarianten zur Untersuchung des Einflusses einer Metallplatte auf die Kalibrierung.

Beim ersten Aufbau wurde die Metallplatte in einem Abstand zur Antennenunterseite von 10cm montiert (Setup 1), während die Platte beim zweiten Aufbau direkt unterhalb der Antenne befestigt wurde (Setup 2). In beiden Fällen war die Platte fest mit der Rotationsachse verbunden. Beim dritten Experiment wurde auf die Verwendung einer Metallplatte gänzlich verzichtet (Setup 3). Das dort wirksame Antennennahfeld

¹³Für die dritte dargestellte Variante wurde eine Fotomontage verwendet, da kein geeignetes Foto vorliegt.

resultiert somit in erster Linie aus dem verkleideten Oberbau der Dreheinrichtung. Bei allen drei Varianten befand sich die Antenne an der gleichen Position im Raum, so dass signifikante Restreflexionen der Messkammer ausgeschlossen werden können.

Bei den folgenden Vergleichen werden die Ergebnisse der Varianten 2 und 3 mit der ersten Variante verglichen. Aufgezeigt werden die Ergebnisse exemplarisch für die L2-Frequenz. Für die L1-Frequenz wird der Einfluss der Metallplatte ebenfalls sichtbar, wobei die Größenordnung und die Form der Pattern deutlich variieren.

In Abb. 10.6 ist das Phasenpattern dargestellt, das sich bei einer Kalibrierung mit einer 10cm unterhalb der Antenne montierten Metallplatte ergibt (Setup 1). Deutlich erkennbar sind die lokalen Minima und Maxima. Die vier Minima (blau) befinden sich im Bereich der niedrigen Elevationen, die vier Maxima (rot) im Bereich der mittleren Elevationen (ca. 40° bis 50°). Letzteres ist anhand dieser 3D-Darstellung nur schwer ableitbar und wurde direkt aus den Kalibrierdaten abgegriffen.

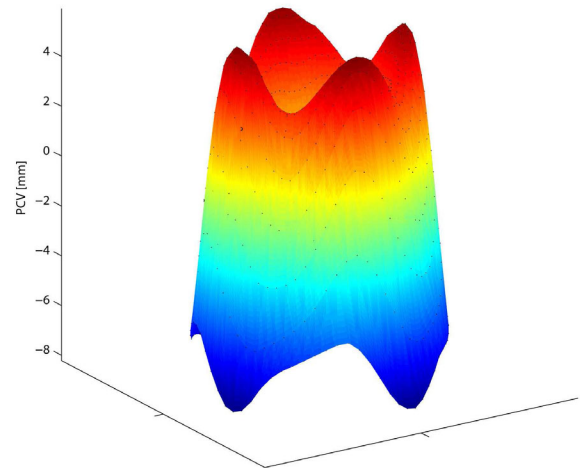


Abb. 10.6: Phasenpattern im Falle einer Kalibrierung mit montierter Metallplatte (Abstand 10cm, Setup 1).

In Abbildung 10.7 ist auf der linken Seite das Kalibrierergebnis der zweiten Variante (Metallplatte direkt an der Antenne) gezeigt. Die lokalen Extremwerte weisen hier deutlich größere Amplituden auf. Dies wird auch bei der Betrachtung der aus beiden Kalibriervarianten abgeleiteten Differenzen ersichtlich (rechte Abbildung). Die Abweichungen erreichen bei den niedrigen Elevationen Maximalwerte von über 8mm . Auch für die Elevationen oberhalb von 30° Elevation treten Abweichungen von über 4mm auf.

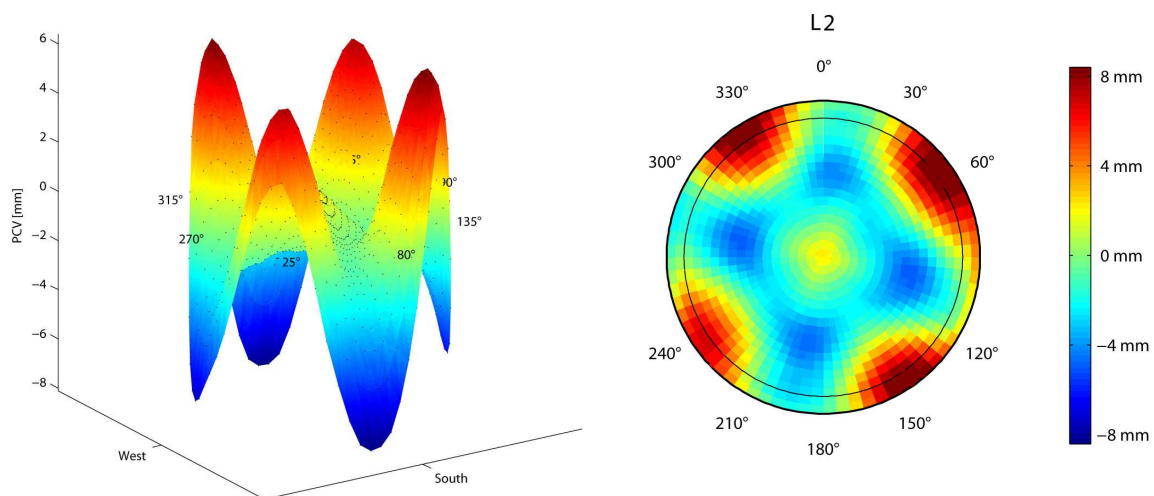


Abb. 10.7: Links: Phasenpattern der Antenne mit einer an ihrer Unterseite montierten Metallplatte (Setup 2). Rechts: Vergleich mit dem Phasenpattern in Abb. 10.6 (Setup 1). Frequenz: Jeweils GPS-L2.

Ein anderes Ergebnis resultiert aus der Kalibrierung ohne Metallplatte (Variante 3). Hier treten nahezu keine azimuthalen Phasenzentrumsvariationen auf (Abb. 10.8). Der Vergleich dieser Kalibrierung mit Variante 1 zeigt die offensichtlich in Variante 1 durch die Metallplatte hervorgerufenen Extremstellen.

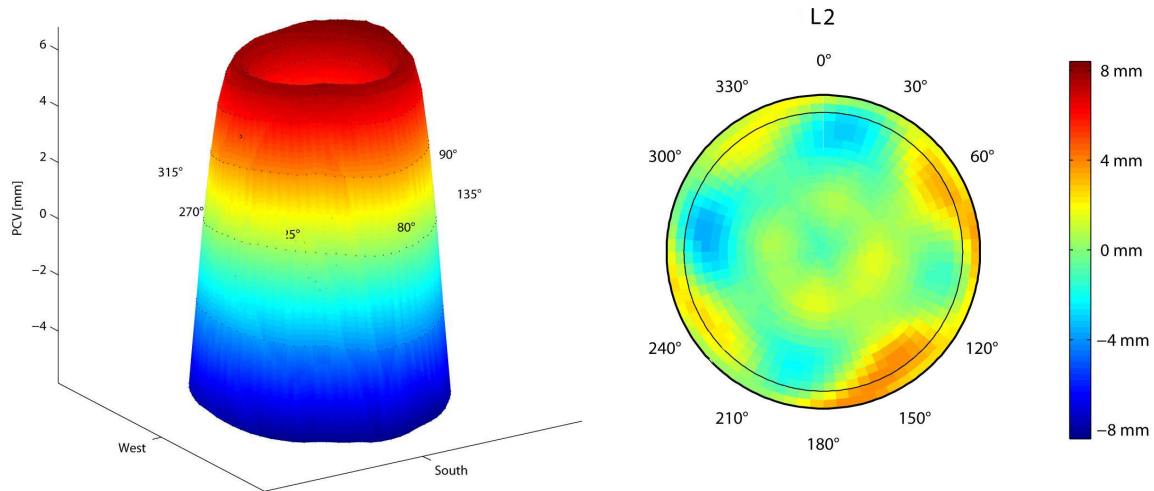


Abb. 10.8: Links: Phasenpattern der Antenne ohne montierter Metallplatte (Setup 3). Rechts: Vergleich mit dem Phasenpattern in Abb. 10.6 (Setup 1). Frequenz: Jeweils GPS-L2.

Bereits die Größenordnung der bei beiden Vergleichen auftretenden Kalibrierdifferenzen zeigt, dass auch bei der Positionsbestimmung deutliche Systematiken sichtbar werden müssen. Zur Quantifizierung der Einflüsse können wiederum Nullbasislinien berechnet werden. Im Folgenden werden hierzu erneut die Varianten 2 und 3 der Variante 1 gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 10.9 und 10.10 dargestellt, wobei aufgrund stark unterschiedlicher Effekte unterschiedliche Achsenskalierungen verwendet werden.

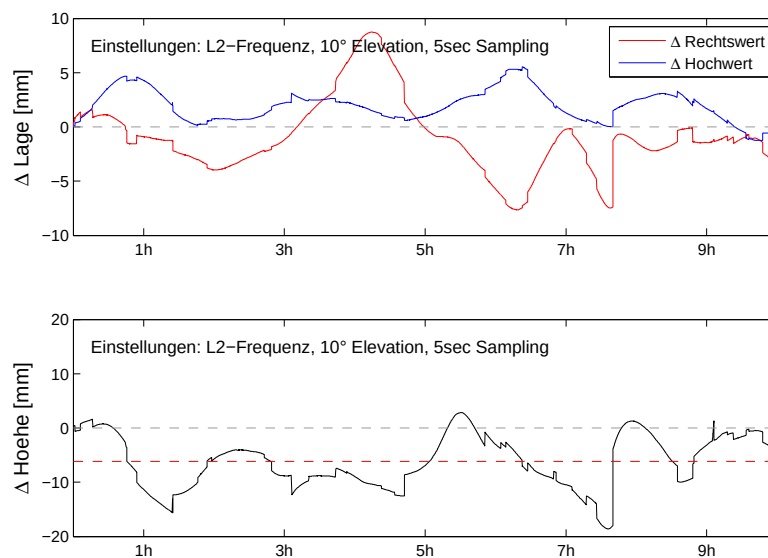


Abb. 10.9: Auswirkung der in unterschiedlichen Abständen montierten Metallplatte auf die Positionsbestimmung (Varianten 1 und 2).

Die direkt unterhalb der Antenne montierte Metallplatte erzeugt bei den verwendeten Testdaten Variationen von 9mm in der Lage und 18mm in der Höhe. Während sich hier die Lageefflüsse durch Mittelbildung über den Gesamtzeitraum fast vollständig eliminieren, verbleibt für die Höhenkomponente ein Offset von etwa 7mm . Die Größenordnung der Effekte überrascht aufgrund der in Abb. 10.7 sichtbaren Differenzen nicht.

Beim zweiten Vergleich sind deutlich geringere Variationen sichtbar. Die Lagekomponenten schwanken im Bereich von $\pm 2\text{mm}$, wobei auch hier keine einseitige Verschiebung festzustellen ist. Eine solche Verschiebung tritt jedoch bei der Höhenkomponente mit etwa -2.5mm auf. Die Schwankungen um diesen Mittelwert sind mit etwa 3mm kaum höher als die der Lagekomponenten.

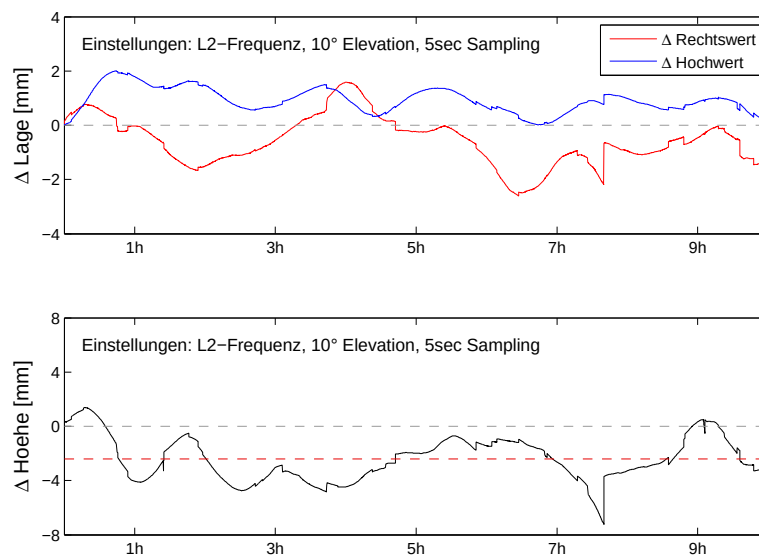


Abb. 10.10: Auswirkung einer unterhalb der Antenne (10cm Abstand) montierten Metallplatte auf die Positionsbestimmung (Varianten 1 und 3).

Während die Anbringung einer Metallplatte unmittelbar unterhalb der Antenne in der Praxis unüblich ist, ähnelt der Aufbau mit Metallplatte in einem Abstand von 10cm vielen Pfeilerstandpunkten, bei denen auf den Pfeiler ein Dreifuß mit Antennenhalter montiert ist, wobei der Abstand zwischen Pfeileroberfläche und Antenne dann in der Regel etwas größer ist. Dennoch zeigt der Vergleich dieser Variante mit dem Experiment ohne Metallplatte sehr deutlich, dass bei solchen Aufbauten erhebliche Systematiken auftreten können. Bei dem hier verwendeten Datensatz ergibt sich bei der Nullbasislinienberechnung bezüglich der L0-Lösung ein Höhenoffset von knapp 8mm (ohne Abbildung). Bei der Schätzung von Troposphärenkorrekturen sind je nach Auswerteanatz Abweichungen bis zu 20mm leicht möglich.

Neben den dargestellten Vergleichen wurden auch die Einflüsse verschiedener Radome, Dreifuße und weiterer Nahfeldkomponenten überprüft. Zudem wurden auch unterschiedliche Absorbermaterialien zur Verkleidung des Drehstands getestet, die ebenfalls signifikante Variationen verursachen können. Dabei hat sich gezeigt, dass eine optimale Verkleidung im Sinne einer weitestgehenden Vermeidung von Nahfeldeffekten nicht zu optimalen Ergebnissen in der Praxis führen muss. Die Beurteilung verschiedener Varianten fällt schwer, da stets nur Unterschiede zwischen den Varianten getestet werden können und alleine aus den Kalibriermessungen keine Aussagen über die Eignung in der Praxis möglich sind. Die Möglichkeiten zur Validierung von Kalibrierergebnissen werden im folgenden Kapitel behandelt.

11 Validierung der Kalibrierergebnisse

Die Validierung der Kalibrierergebnisse ist nicht alleine durch die in Kapitel 8 und 9 vorgestellten Untersuchungen möglich. In diesen Kapiteln wurde im Wesentlichen die innere Genauigkeit des Kalibrierverfahrens analysiert. Untersuchungen zur Richtigkeit wurden nur in Abschnitt 8.7 durchgeführt, wobei sowohl aus Streckenänderungen als auch aus Rotationen resultierende Phasenverschiebungen analysiert wurden. Aus diesen Ergebnissen kann nicht unmittelbar auf die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse für reale GNSS-Messungen zur Positionsbestimmung geschlossen werden. So ist z.B. der Einfluss verschiedener Nahfeldsituationen relativ zueinander geprüft worden (Kapitel 10), wobei jedoch der Nahfeldeinfluss von einigen festen Elementen des Antennendrehstandes bei allen Kalibrierungen vollständig im Ergebnis enthalten ist. Sollte sich dieser Einfluss deutlich von den in der Praxis üblichen Nahfeldsituationen (Stativ, Pfeiler) unterscheiden, muss von einer reduzierten äußeren Genauigkeit ausgegangen werden. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass weitere systematische Effekte aufgrund nicht optimaler Tests unentdeckt geblieben sind.

Zur Validierung der Ergebnisse werden in diesem Kapitel zwei weitere Ansätze verfolgt. Zum einen werden die Kalibrierergebnisse des Laborverfahrens mit denen unabhängiger Feldverfahren verglichen. Zum anderen wird die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse durch die Anwendung dieser bei der hochpräzisen Höhenbestimmung mit GPS belegt.

11.1 Vergleich verschiedener Kalibrierverfahren - Ringversuch 2009

In Kapitel 5 wurde erläutert, dass neben dem Laborverfahren zwei weitere Kalibrierverfahren existieren. Diese Feldverfahren (ein relatives sowie ein absolutes) können aufgrund des völlig unterschiedlichen Ansatzes als unabhängige Kalibrierverfahren betrachtet werden. Eine Möglichkeit zur Validierung der Kalibrierergebnisse besteht somit in dem Vergleich der mit den unterschiedlichen Verfahren durchgeführten Kalibrierungen. Dabei sind verschiedene Kalibrierungen einer Antenne zu vergleichen. Vergleiche von Antennen des gleichen Typs sind nicht ausreichend, da sonst Typvariationen nicht von Kalibrierabweichungen getrennt werden können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass solche Vergleiche für mehrere Antennentypen durchzuführen sind, so dass allgemeingültigere Aussagen über die Gültigkeit der Kalibrierverfahren möglich sind.

Ein diesen Grundsätzen entsprechender Ringversuch wurde im Zeitraum 2008/2009 durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf dem 7. GNSS-Antennenworkshop im März 2009 in Dresden vorgestellt (Vortrag: P. Zeimetz, H. Kuhlmann, L. Wanninger, V. Frevert, S. Schön, K. Strauch: „Ringversuch 2009“). Die wesentlichen Ergebnisse werden an dieser Stelle zusammengefasst, wobei hier die Validierung des Laborverfahrens im Vordergrund steht und die dargestellten Ergebnisse entsprechend ausgewählt sind.

Beim Ringversuch wurden die drei in Abb. 11.1 dargestellten Antennentypen (von links: Leica AR25, Leica AT504GG, Trimble Zephyr Geodetic 2) verwendet. Alle Antennen erfüllen die Anforderungen für hochpräzise GPS-Messungen. Roverantennen wurden im Ringversuch nicht berücksichtigt. Von den ersten beiden Antennentypen wurde jeweils eine Antenne, vom Typ Trimble Zephyr Geodetic 2 wurden zwei Antennen im Ringversuch verwendet. Die Ergebnisse der baugleichen Antennen sind vergleichbar, so dass in dieser Arbeit nur die Ergebnisse einer Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenne dargestellt werden.

Alle Antennen wurden vom Institut für Erdmessung (IfE) der Leibniz Universität Hannover (absolutes Feldverfahren mit Roboter, s. WÜBBENA et al. 2000), dem Geodätischen Institut (GITUD) der Technischen Universität Dresden (relatives Feldverfahren¹⁴, s. WANNINGER 2002) und dem Institut für Geodäsie und

¹⁴Bei diesem relativen Kalibrierverfahren ergibt sich durch die Verwendung einer von der Firma Geo++[®] absolut kalibrierten

Geoinformation (IGG) der Universität Bonn (absolutes Laborverfahren) kalibriert. Zusätzlich lagen teilweise Kalibrierergebnisse von der Firma Geo++[®] und der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung der Stadt Berlin (beide absolutes Feldverfahren) vor. Da die Roboterverfahren eine gute Übereinstimmung zeigen, werden hier lediglich die Ergebnisse des IfE verwendet.



Abb. 11.1: Ringversuch - berücksichtigte Antennen (Leica AR25 & AT504GG, Trimble Zephyr Geodetic 2.)

Bei dem Vergleich der verschiedenen Kalibrierergebnisse ist stets das gesamte Antennenmodell zu berücksichtigen. Eine Beschränkung des Vergleichs auf die PCV oder den PCO ist nicht zulässig (Anhang A). Die Interpretation der Vergleiche wird dadurch erschwert, dass die Differenzen zwischen zwei Kalibrierungen stets die Unsicherheiten beider Kalibrierungen enthalten und keinem der drei Verfahren eine übergeordnete Genauigkeit zugesprochen werden kann. Da an dieser Stelle die Validierung des Laborverfahrens im Vordergrund steht, werden bei den folgenden Vergleichen die Differenzen zur Bonner Lösung gezeigt. Zunächst werden die Ergebnisse für die Leica AR25 Antenne betrachtet.

Leica AR25

In Abb. 11.2 sind die Differenzen zwischen den Kalibrierergebnissen für die L1 Frequenz dargestellt. Die linke Abb. zeigt der Vergleich IGG vs. IfE und die rechte Abb. den Vergleich IGG vs. GITUD.

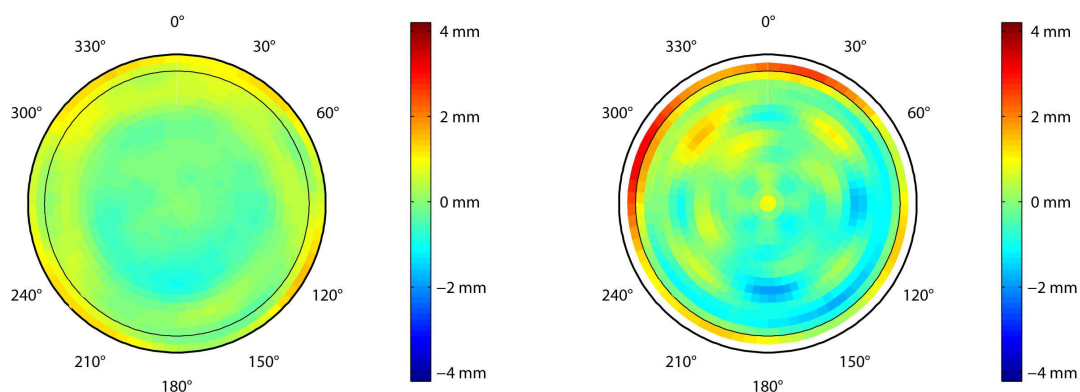


Abb. 11.2: Abweichungen zw. den Kalibrierverfahren (L1): Leica AR25 (links IfE, rechts GI, Referenz IGG).

Es wird deutlich, dass die Residuen im Falle des Vergleichs mit dem Roboterverfahren deutlich geringer sind (linke Abb.). Die Lösung des GITUD zeigt neben größeren Abweichungen im Bereich der niedrigen Elevationen, die aufgrund der Verwendung horizontnaher GPS-Beobachtungen bei diesem Kalibrierverfahren zu erwarten sind, auch größerer systematische Effekte im Bereich der höheren Elevationen. Unterhalb von

Referenzantenne ebenfalls ein absolutes Niveau (vgl. Kapitel 5).

5° Elevation werden beim relativen Verfahren wegen der dort starken Mehrwegeinflüsse keine Kalibrierkorrekturen abgeleitet (vgl. Abschnitt 5.2). Zwischen den beiden Vergleichen lassen sich keine gemeinsamen Systematiken erkennen, die auf systematische Anteile des Laborverfahrens hinweisen würden.

Auch bei der Betrachtung der Verteilung der Residuen (Abb. 11.3)¹⁵ lassen sich keine Gemeinsamkeiten zwischen den Verfahren erkennen. Im Falle des Vergleichs zwischen den beiden absoluten Verfahren (linke Abbildung) liegen die Abweichungen im Bereich von -1 mm bis $+1\text{ mm}$ (gestrichelte rote Linie). Auffällig ist, dass die Abweichungen der niedrigen Elevationen (rot, blau und schwarz hervorgehoben) fast ausschließlich positiv sind, so dass auch hier wieder deutlich wird, dass nicht nur zufällige Abweichungen auftreten. Bei dem Vergleich der Laborkalibrierung mit dem relativen Feldverfahren (rechte Abbildung) sind die Abweichungen etwa um Faktor zwei größer. Aufgrund der sichtbaren Systematiken beschreiben die angegebenen Standardabweichungen die Verteilungen der Abweichungen nicht korrekt. Zumindest für die Differenzen zwischen den absoluten Verfahren stellt jedoch die Standardabweichung eine gute Näherung dar.

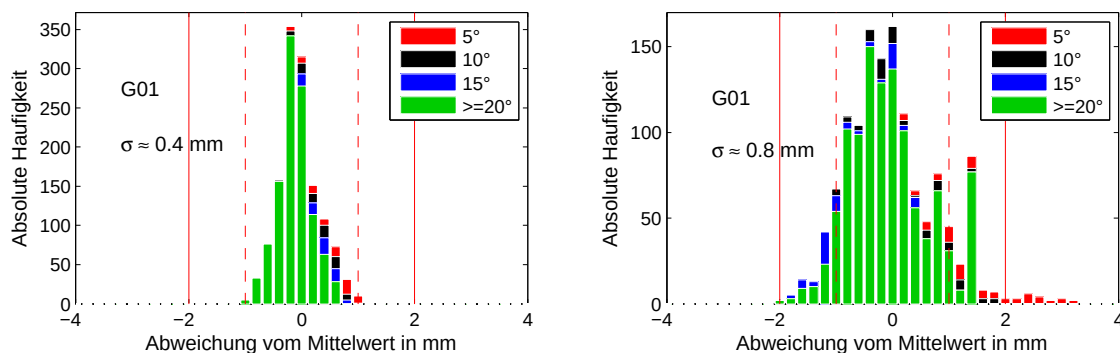


Abb. 11.3: Verteilung der Kalibrierabweichungen (L1): Leica AR25 (links IfE, rechts GI, Referenz IGG).

Hinsichtlich der L2-Frequenz (Abb. 11.4) treten hingegen deutlichere Systematiken auf. Bei dem Vergleich mit der Roboterkalibrierung (links) sind die Abweichungen im Verhältnis zur L1-Frequenz zwar im Mittel nicht signifikant größer, die Verteilung weicht jedoch viel stärker von einer Normalverteilung ab. Bei der relativen Kalibrierung (rechts) treten zudem für die L2-Frequenz deutlich größere Abweichungen auf.

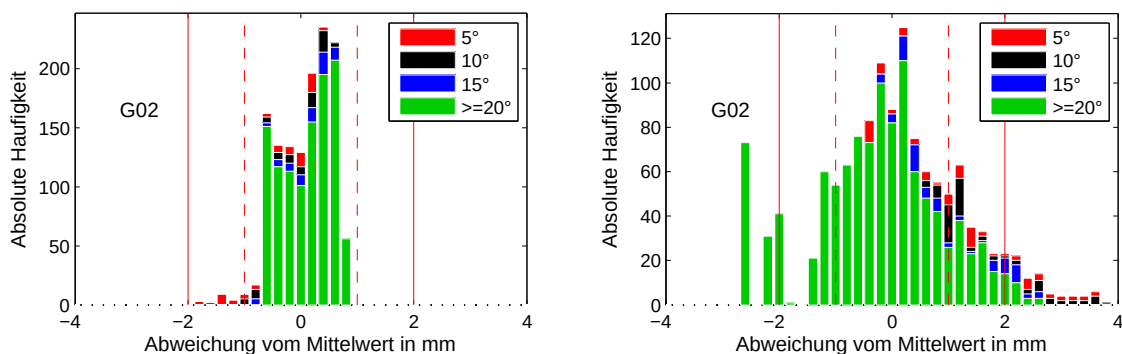


Abb. 11.4: Verteilung der Kalibrierabweichungen (L2): Leica AR25 (links IfE, rechts GI, Referenz IGG).

Die bisherigen Gegenüberstellungen bestätigen, dass systematische Abweichungen auftreten. Auffällig ist,

¹⁵Bei den folgenden Abbildungen werden die Frequenzen L1 und L2 entsprechend der ANTEX-Formatbeschreibung mit G01 und G02 bezeichnet.

dass die Kalibrierergebnisse der Laborkalibrierung deutlich besser zur absoluten Feldkalibrierung als zur relativen Feldkalibrierung passen. Systematische Effekte der Laborkalibrierung, die in jeweils beiden Vergleichen sichtbar würden, können nicht festgestellt werden. Allerdings ist aufgrund der größeren Abweichungen der relativen Kalibrierung die Detektion von systematischen Einflüssen der Laborkalibrierung nur eingeschränkt möglich. Im Folgenden wird aus diesem Grund auf eine Darstellung der Ergebnisse der relativen Kalibrierung verzichtet. Dies bedeutet nicht, dass die Qualität der relativen Kalibrierung generell geringer sind. Die Systematiken verteilen sich gleichmäßig über die Antennenhemisphäre, so dass daraus im Falle von GNSS-Beobachtungen bei ausreichend langer Beobachtungsdauer eine Reduktion der verbleibenden Kalibriereinflüsse resultiert. Da hier jedoch die Antennenpattern unmittelbar miteinander verglichen werden, sind für die Validierung des Laborverfahrens Vergleiche mit dem absoluten Feldverfahren besser geeignet. Dabei bestätigt die gute Übereinstimmung der beiden absoluten Verfahren die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse. Zumindest für die L1-Frequenz wird die in Abschnitt 3.2 geforderte Kalibrierengenauigkeit von $\sigma \approx 0.2 - 0.3\text{mm}$ (30° bis 90° Elevation) erreicht. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die dargestellten Differenzen die Unsicherheiten beider Kalibrierungen enthalten. Zudem treten die systematischen Effekte im Wesentlichen im Bereich der niedrigen Elevationen auf. Dort sind jedoch auch die Kalibrieranforderungen geringer ($\sigma \approx 1\text{mm}$, s. Abschnitt 3.2). Für L2 überschreiten die Abweichungen die Kalibrieranforderungen, wobei nicht die Größenordnung der Abweichungen, sondern deren Verteilung problematisch ist.

Zur Beurteilung des Einflusses der Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung sind in den Abbildungen 11.5 und 11.6 die Ergebnisse der Auswertung einer Null-Basislinie dargestellt. Die erste Abbildung zeigt für die L1-Frequenz, dass maximale Variationen von lediglich wenigen Zehntel Millimetern (Lage) bzw. etwa 1mm (Höhe) auftreten. Da die Variationen um Null schwanken, reduziert sich der Einfluss der Abweichungen auf die Position mit zunehmender Beobachtungsdauer.

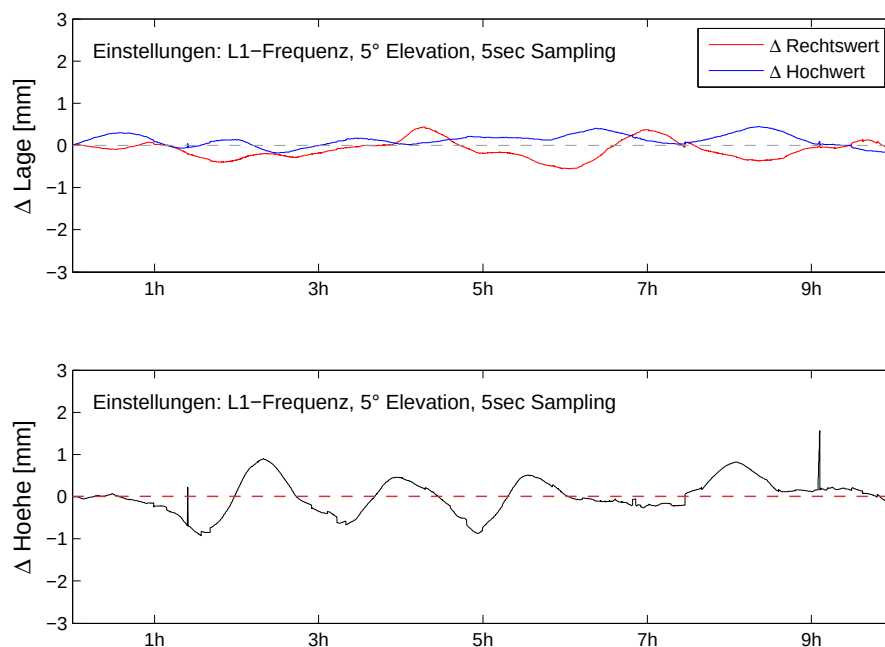


Abb. 11.5: L1-Null-Basislinie (IfE vs. IGG): Abschätzung der Auswirkung der Kalibrierabweichung auf die Positionsbestimmung.

Für die Lage lässt sich dieses Ergebnis auch auf die ionosphärenfreie Linearkombination L0 (Abb. 11.6) übertragen. Die Höhe zeigt im Mittel eine Abweichung zum Sollwert von 1mm , wobei bei kürzeren Beobachtungszeiten (bis ca. 1 Stunde) je nach Satellitenkonstellation deutlich größere Verschiebungen auftreten können (hier z.B. bei Betrachtung des Zeitraums von 1 bis 2 h). Allerdings sind hier nur die Kalibrierunsicherheiten der beiden Verfahren (IGG, IfE) sichtbar. Weitere zufällige und systematische Unsicherheiten (z.B. Rauschen, Mehrwege- und Atmosphäreinflüsse) wirken sich aufgrund des Null-Basislinienkonzeptes nicht auf die dargestellten Ergebnisse aus. Die hier wirkenden Kalibrierunsicherheiten werden jedoch bei realen Messungen durch die übrigen Abweichungen überlagert.

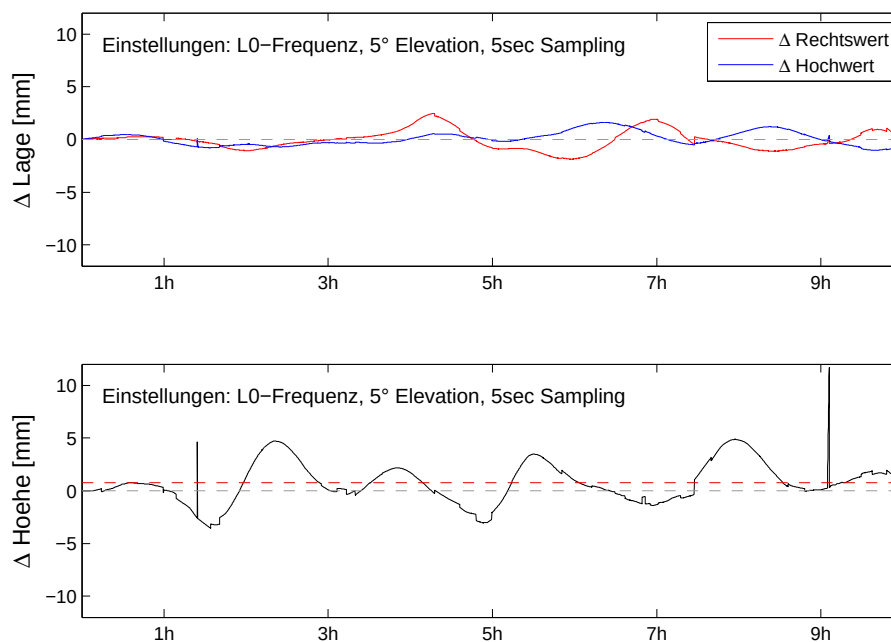


Abb. 11.6: L0-Null-Basislinie (IfE vs. IGG): Abschätzung der Auswirkung der Kalibrierabweichung auf die Positionsbestimmung.

Die Korrelationen zwischen benachbarten Einstrahlrichtungen führen dazu, dass die daraus resultierenden Positionsabweichungen bei aufeinanderfolgenden Epochen aufgrund der sich nur langsam ändernden Satellitenkonstellation ebenfalls korreliert sind und so, je nach Beobachtungslänge, signifikante Einflüsse bei der Positionsbestimmung möglich sind.

Leica AT504GG

Bei der zweiten im Ringversuch berücksichtigten Antenne zeigen sich hinsichtlich der L1-Frequenz Ergebnisse, die mit den obigen vergleichbar sind (Abb. 11.7). Bei der L2-Frequenz treten jedoch insbesondere bei den niedrigen Elevationen deutlich größere (bis Faktor zwei) Abweichungen auf. Eindeutig ist, dass weder anhand der Kalibrierdifferenzen (ohne Darstellung) noch anhand der Histogramme identische Systematiken für die Antennentypen Leica AT504GG und Leica AR25 erkennbar sind. Daraus folgt, dass die sichtbaren Systematiken und somit die Auswirkung möglicher Kalibrierunsicherheiten vom Antennentyp abhängig sind. Somit kommen als Ursache auch Nahfeldeinflüsse in Frage, da sich diese bei unterschiedlichen Antennentypen unterschiedlich auswirken, wie auch in Abschnitt 11.2 noch gezeigt wird. Effekte die sich bei unterschied-

lichen Antennen gleichermaßen auswirken würden, (z.B. Kabeinflüsse, Einflüsse des Senders, systematische Abweichung der Antennenausrichtung) können hingegen ausgeschlossen werden.

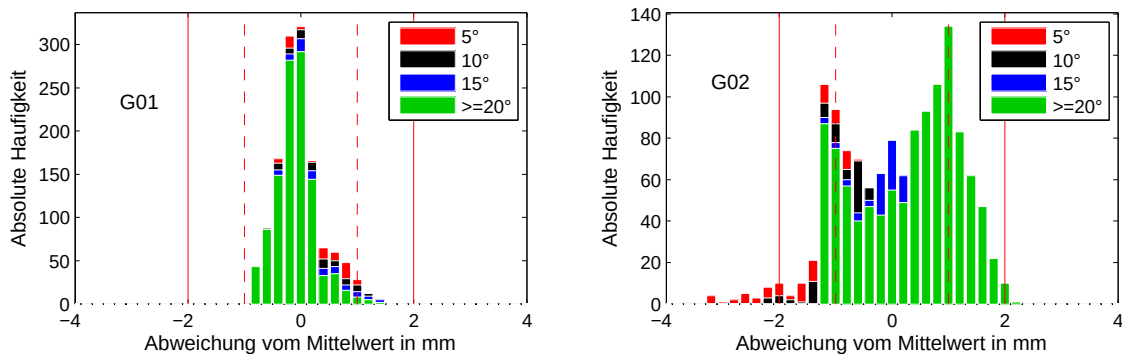


Abb. 11.7: Verteilung der Kalibrierabweichungen: Leica AT504GG (links IfE, rechts GI, Referenz IGG).

Trimble Zephyr Geodetic 2

Die dritte im Ringversuch berücksichtigte Antenne (Trimble Zephyr Geodetic (TZG) 2) belegt noch deutlicher, dass die Ergebnisse für unterschiedliche Antennentypen variieren. Anders als bei den vorherigen Beispielen sind hier die Differenzen für die L2-Frequenz - bis auf den Bereich von 0° bis 10° Elevation - geringer als für die L1-Frequenz (Abb. 11.8). Für die L2-Frequenz ergibt sich für die Elevationen oberhalb von 10° (grüne und blaue Anteile) eine Standardabweichung von $\sigma = 0.4\text{mm}$. In diesem Elevationsbereich sind die Abweichungen weitestgehend zufälliger Art. Auch hier wird die geforderte Genauigkeit von $\sigma = 0.3\text{mm}$ erreicht, wenn unterstellt wird, dass aus dem Feldverfahren zumindest geringe Anteile resultieren.

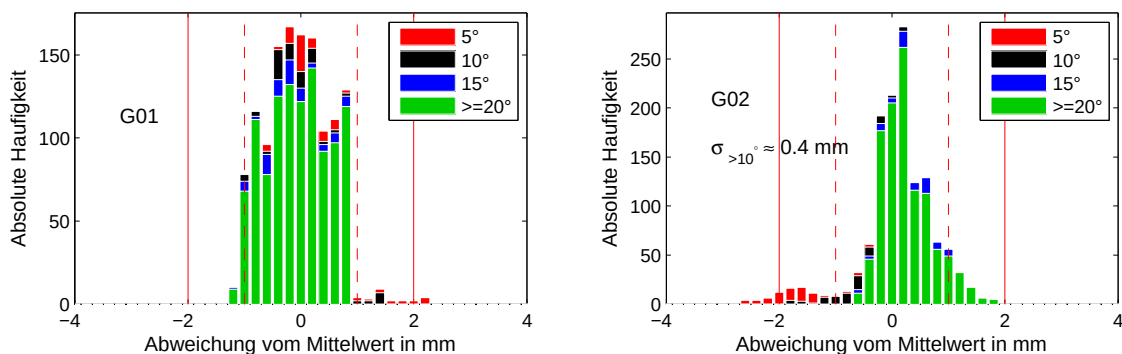


Abb. 11.8: Verteilung der Kalibrierabweichungen: TZG2 (links IfE, rechts GI, Referenz IGG).

Die teils sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse und die daraus abgeleitete hohe äußere Genauigkeit der Kalibrierverfahren wird nicht für alle Antennen und/oder Frequenzen erreicht. Meist fallen die Kalibrierungen bei L1 besser als bei L2 aus, wobei auch der umgekehrte Fall auftritt. Dies lässt sich auf die Kalibrierung der GLONASS-Frequenzen (hier nicht dargestellt) übertragen. Auch die G1-Kalibrierungen sind tendenziell besser als die G2-Ergebnisse, wobei die Vergleiche der GPS-Kalibrierungen eine etwas bessere Übereinstimmung zeigen, als dies bei den GLONASS-Frequenzen der Fall ist.

Bei den sichtbaren Abweichungen fallen insbesondere systematische Effekte auf, die bei ähnlicher Einstrahlrichtungen stark korreliert sind. Diese Korrelationen führen bei GNSS-Messungen dazu, dass die Kalibrierunsicherheiten aufeinanderfolgender Epochen nicht als unabhängig angesehen werden können. Eine Reduktion

der Kalibriereinflüsse durch die Beobachtung mehrerer Epochen resultiert somit erst aus ausreichend langen Beobachtungszeiten. Dabei deuten die Ergebnisse der Null-Basislinienberechnung darauf hin, dass ab Beobachtungszeiten von 2 Stunden mit einer deutlichen Reduktion der Effekte zu rechnen ist. Dies wurde jedoch noch nicht weiter untersucht, da gerade bei der präzisen Höhenbestimmung mit GNSS-Verfahren lange Beobachtungszeiten auch aus anderen Gründen (z.B. Reduktion von Mehrwegeeffekten) notwendig sind (vgl. LEICK 1995).

Anhand der Ergebnisse der Nullbasislinienauswertung wurde sichtbar, dass die Kalibrierabweichungen auch zu konstanten Koordinatenverschiebungen (insbesondere der Höhenkomponente) führen können, so dass längere Beobachtungszeiten nicht zu einer Verbesserung der Lösung führen. Die Abweichungen der Höhenkomponente liegen für L1 meist im Bereich unterhalb von 1mm . Für die L2-Frequenz steigen diese Abweichungen auf bis zu 2mm an (hier ohne Darstellung). Bei der Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination L0 werden die Anteile beider Frequenzen wirksam (vgl. auch Abschnitt 9.2.2).

Die Ursachen für die auftretenden Systematiken sind bislang nicht eindeutig geklärt. Es ist davon auszugehen, dass zumindest ein Teil der Abweichungen auf die bei den Kalibrierverfahren unterschiedlichen Nahfeldeinflüsse zurückzuführen sind (s. Fotos der Kalibriereinrichtungen in den Kapiteln 5 und 6). Trotz dieser noch verbleibenden Abweichungen belegt die insgesamt gute Übereinstimmung der Verfahren die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse. Im folgenden Abschnitt wird die hohe Kalibrierengenauigkeit sowie der Einfluss der Nahfeldeffekte durch eine GPS-Höhenmesskampagne und Vergleiche mit Sollhöhenunterschieden belegt.

11.2 Anwendung der Kalibrierergebnisse bei der präzisen Höhenbestimmung

Die Beurteilung der Genauigkeit und der Gültigkeit von Kalibrierergebnissen ist aufgrund einer fehlenden Solllösung schwierig. Neben Vergleichen mit unabhängigen Verfahren können die Kalibrierergebnisse auch durch deren Anwendung im Rahmen von GNSS-Messkampagnen validiert werden. Liegen für die verwendeten Standpunkte Koordinaten mit übergeordneter Genauigkeit vor, so ist es möglich, die Kalibrierengenauigkeit einzuschätzen, wenn die übrigen Messunsicherheiten (z.B. Mehrwegeeffekte, Nahfeldeinflüsse, zufällige Abweichungen) weitestgehend eliminiert oder zumindest korrekt eingeschätzt werden.

In Juni 2009 wurde eine Messkampagne zur Validierung der Ergebnisse der Laborkalibrierung durchgeführt. Die wesentlichen Eigenschaften und Ergebnisse der Messkampagne werden an dieser Stelle zusammengefasst. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in ZEIMETZ und KUHLMANN 2010.

Die Messkampagne wurde auf einer EDM-Teststrecke der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Diese Teststrecke besteht aus 8 Pfeilern mit Abständen zwischen 18 und 1100 Metern (s. Abb. 11.9).

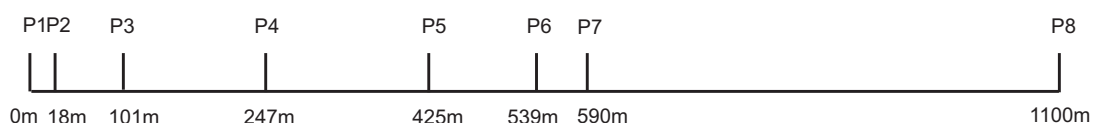


Abb. 11.9: Anordnung der Pfeiler der EDM-Prüfstrecke. Die Entfernungen sind gerundet.

Die Bestimmung der Höhenunterschiede zwischen den Pfeilern sowie der Antennenhöhen wurde mittels Präzisionsnivelements durchgeführt. Die Bestimmung der Antennenhöhen wurde jeweils vor und nach jeder GPS-Session durchgeführt. Dazu wurde die Antenne abgeschraubt und die Nivellierlatte jeweils auf die in Abb. 11.10 gekennzeichnete Fläche des Antennenhalters gehalten. Für die Höhenunterschiede zwischen den Pfeilern sind keine Abweichungen zu erwarten die größer als 0.2mm bis 0.4mm sind (vgl. ZEIMETZ und KUHLMANN 2010). Anzumerken ist, dass die erreichte Nivellementsgenauigkeit nicht besonders hoch ist, da die Messbedingungen zur Zeit der Messkampagne extrem ungünstig waren. Die Höhenunterschiede zwischen den Pfeilern sind allesamt geringer als 30mm . Aufgrund der geringen Basislinienlängen, der minimalen Höhenunterschiede und der etwa gleichen atmosphärischen Bedingungen an allen Punkten sind weder signifikante Ionosphären- noch Troposphären-effekte zu erwarten (vgl. SANTERRE 1991).

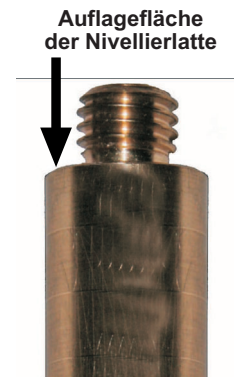


Abb. 11.10: Bezugspunkt der Antennenhöhenbestimmung.

Alle Pfeiler sind gleichen Typs und befinden sich auf einem Erdwall, der zwischen 3 und 4 Meter über dem Niveau der Umgebung liegt. Der auf dem Foto (Abb. 11.11, links) sichtbare Zaun liegt deutlich unterhalb des Antennenhorizontes. Aufgrund des großen Abstands zu den Antennen sind allenfalls kurzperiodische Effekte zu erwarten (BILICH et al. 2007), so dass aufgrund der Beobachtungsdauer von mehreren Stunden größere Einflüsse unwahrscheinlich sind. Der Erdwall ist uneben, nicht befestigt und unregelmäßig begrünt. Die Mehrwegesituation ist somit als sehr günstig einzuschätzen.

Insgesamt wurden 122 Basislinien beobachtet, wobei 3 verschiedene Antennentypen und 2 unterschiedliche Nahfeldsituationen auf 8 verschiedenen Standpunkten verwendet wurden. Durch die große Anzahl unterschiedlicher Basislinien konnten folgende Aspekte bereits bei der Erstellung des Beobachtungsplans berücksichtigt werden:

1. **Mehrwegeeffekte:** Durch die Verwendung gleicher Antennen-Nahfeldkombinationen auf unterschiedlichen Standpunkten kann weitestgehend ausgeschlossen werden, dass mögliche stationsabhängige Mehrwegeeffekte als Antenneneinflüsse interpretiert werden.
2. **Nahfeldefeffekte:** Zur Detektion von Nahfeldefeffekten wurden mehrere Messungen mit jeweils identischen oder gleichen Antennen an identischen Standpunkten, jedoch mit zwei unterschiedlichen Nahfeldsituationen durchgeführt. Durch die unterschiedlich langen Antennenträger (vgl. Abb. 11.11) wurde insbesondere der Abstand zur Pfeileroberfläche verändert.
3. **Antenneneinflüsse:** Zur Detektion von Antenneneinflüssen bzw. von Kalibrierabweichungen sind alle Versuche mit drei unterschiedlichen Antennentypen durchgeführt worden. Da die Kalibrierabweichungen vom Antennentyp abhängig sind, können systematische Abweichungen auf diese Weise erkannt werden.

Die beiden unterschiedlichen Antennenmontierungen bzw. Nahfeldsituationen sind in Abb. 11.11 dargestellt. Die beiden Varianten unterscheiden sich nur durch ein zusätzliches Distanzstück, das beim linken Aufbau zwischen Antenne und Dreifuß montiert ist. Der rechte Aufbau ist hinsichtlich möglicher Nahfeldefeffekte als sehr kritisch einzustufen (siehe Abschnitt 10.2), hier jedoch gerade aus diesem Grunde so gewählt worden.



Abb. 11.11: Pfeiler und Antennenmontierung.

Alle Kombinationen sind mehrfach gemessen worden, um die Sicherheit der Aussagen zu erhöhen, wobei neun verschiedene Antennen zum Einsatz kamen. Alle in der folgenden Auflistung genannten Antennen sind vor der Messkampagne in der AMK Bonn individuell kalibriert worden. Im Folgenden werden diese Antennen mit 504, TRM1 und TRM2 abgekürzt.

- 3 LEIAT504GG (Leica AT504GG Choke Ring Antenna)
- 3 TRM41249.00 (Trimble Zephyr Geodetic)
- 3 TRM55971.00 (Trimble Zephyr Geodetic 2)

Bei der GPS-Auswertung wurde für alle Basislinien ein Standardatmosphärenmodell verwendet und die Elevationsmaske auf 10° Elevation festgesetzt. Die Beobachtungsdauer variiert zwischen 4 und 9.5 Stunden, wobei, wie in ZEIMETZ und KUHLMANN 2010 dargestellt ist, keine von der Beobachtungsdauer abhängigen Unterschiede erkennbar sind.

Neben den nivellierten Höhenunterschieden zwischen den Antennen wurden auch die Strecken zwischen diesen erfasst, wobei zumindest für die Pfeiler 1 bis 7 eine Genauigkeit von ca. $\sigma = 1\text{mm}$ bis 2mm (aus Tachymetermessungen) erreicht wurde. Da für die mit GPS bestimmten Höhendifferenzen eine Genauigkeit von $\sigma = 0.8\text{mm}$ bis $\sigma = 1\text{mm}$ ermittelt wurde (wie im Folgenden gezeigt wird) und die Lagekomponenten üblicherweise mit einer um Faktor 2-3 höheren Genauigkeit bestimmt werden können (vgl. LEICK 1995), sind die terrestrisch ermittelten Strecken hier nicht als Solllösung geeignet. Aus diesem Grund wird die folgende Auswertung auf die Höhenkomponente beschränkt. Da sich Kalibrierabweichungen besonders auf die Höhenkomponente auswirken, resultieren aus dieser Beschränkung keine Einschränkung bezüglich der Aussagekraft der Ergebnisse. Auf einen Vergleich der Lagekomponenten der verschiedenen GPS-Messungen untereinander wurde ebenfalls verzichtet. Zum einen können systematische Kalibriereinflüsse durch solche Vergleiche nicht bzw. nur bedingt aufgedeckt werden, so dass nur eine innere Genauigkeit abgeleitet werden kann. Zum anderen sind die einzelnen Basislinien nur 3 bis 5 mal gemessen worden, so dass die Stichprobe für die Analyse konkreter Basislinien sehr gering ist.

In Abb. 11.12 sind die Differenzen zwischen den nivellierten und den mit der L1-Frequenz bestimmten Höhenunterschieden dargestellt, wobei die GPS-Höhen mit Hilfe des Quasigeoidmodells GCG05 (s. LIEBSCH et al. 2006) reduziert wurden. Aufgrund der geringen Ausdehnung des Testfeldes können die verbleibenden Abweichungen der Lotrichtungen des lokalen Schwerefeldes von denen des Quasigeoids vernachlässigt werden. Dies wird in ZEIMETZ und KUHLMANN 2010 dadurch nachgewiesen wird, dass keine entfernungsabhängigen Einflüsse erkennbar sind.

In der Abbildung kennzeichnen rote Symbole die Basislinien, bei denen eine TRM1-Antenne verwendet wurde. Grün sind die entsprechenden Abweichungen, wenn beide Antennen vom Typ TRM1 waren. Alle übrigen Varianten sind blau dargestellt. Bei den L1-Lösungen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen erkennbar. Dies wird auch bei der Berechnung der Standardabweichung deutlich. Diese ergibt sich zu $\sigma = 0.8\text{mm}$, unabhängig davon, ob alle Abweichungen (σ) oder nur die blau und grün dargestellten verwendet werden ($\sigma_{\text{ohne+}}$). Dies ist, wie noch gezeigt wird, bei den Lösungen für L0 und L2 nicht der Fall.

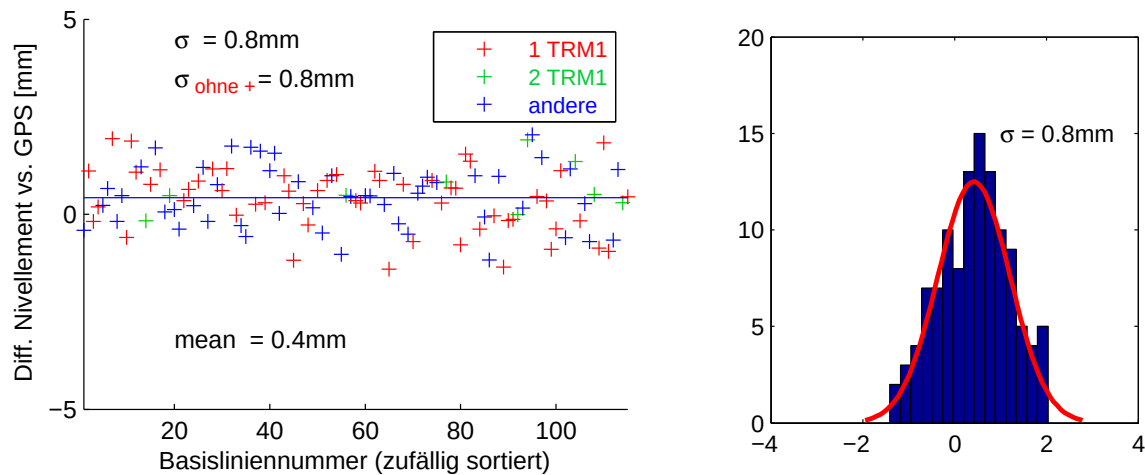


Abb. 11.12: Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L1-Lösung).

Alle Abweichungen streuen um einen Mittelwert von 0.4mm. Dieser Mittelwert ist signifikant, wobei die Ursache nicht aufgedeckt werden konnte. Systematische Kalibrierabweichungen sind unwahrscheinlich, da solche Effekte aufgrund von Antennenwechseln mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten müssten und im Mittel nicht sichtbar sein dürften. Auffällig ist auch, dass der Mittelwert für alle Frequenzen (L1, L2, L0) identisch ist. Verbleibende Systematiken aus der Korrektur des Geoideinflusses, können nicht ausgeschlossen werden, sind jedoch eher unwahrscheinlich, da solche Effekte mit zunehmender Basislinienlänge ansteigen sollten, dies jedoch nicht beobachtet wurden. Zusätzlich sind Abweichungen in den Nivellementsergebnissen möglich.

Die maximalen Abweichungen zum Nivellement betragen knapp 2mm. Die Verteilung der Abweichungen (Abb. 11.12 rechts) ist dem theoretischen Wahrscheinlichkeitsdichteverlauf einer Normalverteilung (rote Linie, berechnet aus der Standardabweichung, skaliert über die Beobachtungsanzahl) ähnlich. Insgesamt sind die Ergebnisse der Höhenmesskampagne von sehr hoher Qualität. Bei der Beurteilung der Höhenwidersprüche muss berücksichtigt werden, dass auch die Nivellementsdaten mit Unsicherheiten behaftet sind. Soll von der erreichten GPS-Genauigkeit auf die Kalibrierengenauigkeit geschlossen werden, ist zudem zu berücksichtigen, dass neben den Kalibrierunsicherheiten auch weitere bei GPS-Messungen wirkende Unsicherheiten (insbesondere Nahfeld- und Mehrwegeeffekte) in den Ergebnissen enthalten sind.

Da die Quantifizierung der einzelnen Einflussgrößen nicht möglich ist, kann zunächst nur festgehalten werden, dass die Einflüsse der Kalibrierunsicherheiten auf die Höhenkomponente so gering sind, dass eine Standardabweichung von $\sigma = 0.8\text{mm}$ erreicht werden kann. Dies gilt auch für Basislinien, bei denen unterschiedliche Antennen gemischt werden. In Abschnitt 11.1 wurde durch den Vergleich des Laborverfahrens mit den Feldverfahren gezeigt, dass keine systematischen Kalibrierabweichungen auftreten, die für unterschiedliche Antennentypen identisch sind. Somit kann auch ausgeschlossen werden, dass diese Genauigkeit nur erreicht wird, wenn sich gemeinsame systematische Kalibrierunsicherheiten aufgrund der Differenzbildung eliminieren. Stattdessen zeigt die Kombination der Ergebnisse aus dem Ringversuch und den Feldversuchen, dass hier tatsächlich eine hohe äußere Genauigkeit vorliegt.

Für die L2-Ergebnisse (Abb. 11.13) weisen die Differenzen zwischen Nivellement und GPS-Messung wesentliche Unterschiede im Vergleich zur L1-Frequenz auf. Zunächst treten deutlich größere Abweichung auf. Dies führt auch zu einer deutlich größeren Standardabweichung.

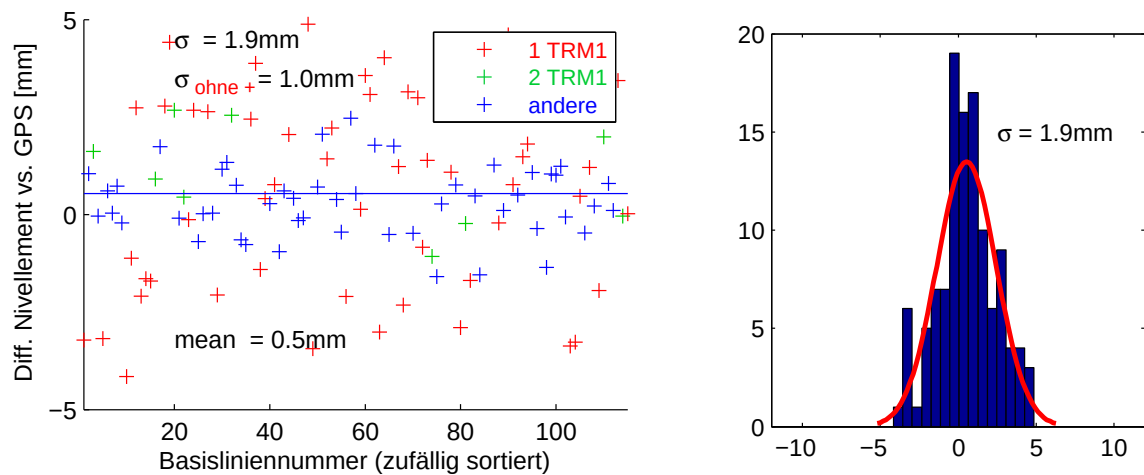


Abb. 11.13: Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L2-Lösung).

Auffällig ist hier, dass die rot dargestellten Abweichungen, also die bei denen nur eine TRM1 Antenne bei der Basislinienbestimmung beteiligt war, die übrigen Differenzen deutlich übersteigen und verstärkt im Bereich von -4mm oder $+4\text{mm}$ auftreten. Die Streuung um -4mm bzw. $+4\text{mm}$ entspricht etwa der Streuung der blauen und grünen Punkte. Ohne Berücksichtigung der roten Abweichungen ergibt sich eine Standardabweichung von $\sigma_{L2} = 1\text{mm}$, die sich nicht mehr stark von σ_{L1} unterscheidet. Im Histogramm, das die Verteilung aller Abweichungen darstellt, werden diese Sachverhalte dadurch sichtbar, dass einerseits im Bereich der niedrigen Abweichungen die Häufung höher ist, als aus der theoretische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion folgen würde. Andererseits sind im Bereich der größeren Abweichungen deutlich mehr Basislinien zu finden, als dies bei einer Normalverteilung der Differenzen der Fall wäre. Die Stichprobe ist dabei mit 122 Werten ausreichend groß. Auf die Ursachen wird im weiteren Verlauf noch eingegangen.

Da im Falle der L1-Frequenz keine signifikanten Systematiken sichtbar sind, wirken bei der Linearkombination L0 (Abb. 11.14) im Wesentlichen die Anteile der L2-Frequenz. Diese gehen entsprechend Gleichung 3.10 etwa mit Faktor 1.54 in die Beobachtungen ein. Dieser Faktor lässt sich auch im Koordinatenraum wiederfinden. Während bei der L2-Frequenz viele der roten Abweichungen im Bereich von $\pm 4\text{mm}$ liegen, häufen sich hier Abweichungen mit Werten von etwa $\pm 6\text{mm}$. Ohne Berücksichtigung der rot dargestellten Abweichungen liegen auch hier die Ergebnisse auf einem sehr hohen Niveau.

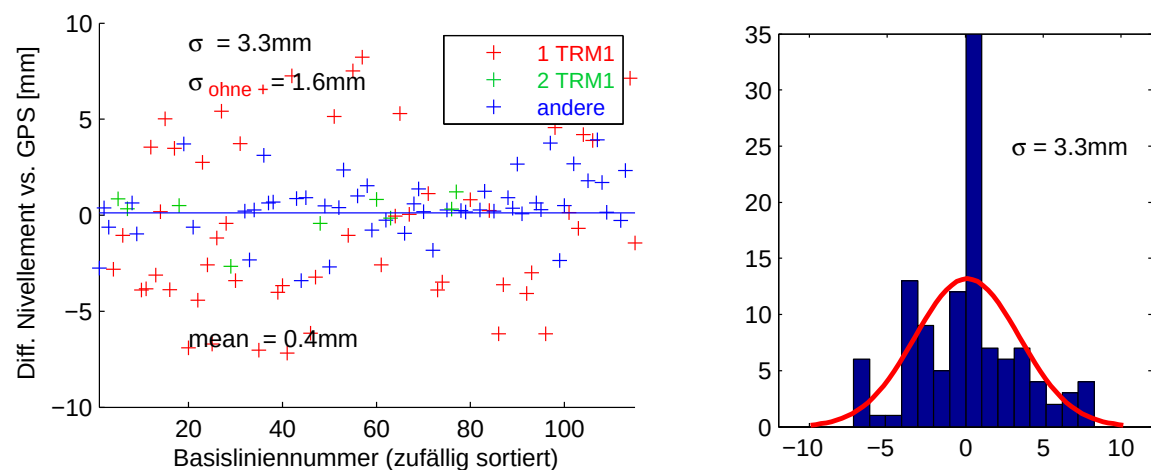


Abb. 11.14: Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L0-Lösung).

Werden die unterschiedlichen Antennenmontierungen bei den Analysen betrachtet, so wird deutlich, dass die für L2 und L0 sichtbaren Systematiken (rote Abweichungen) auf Nahfeldeffekte zurückzuführen sind, was auf den folgenden Seiten näher erläutert wird: In Abb. 11.15 (linke Abbildung) sind erneut die Abweichungen zwischen GPS-Messung und Nivellement dargestellt, wobei nur die Messungen einer der fünf Sessions abgebildet sind (L2-Lösung, Session 2).

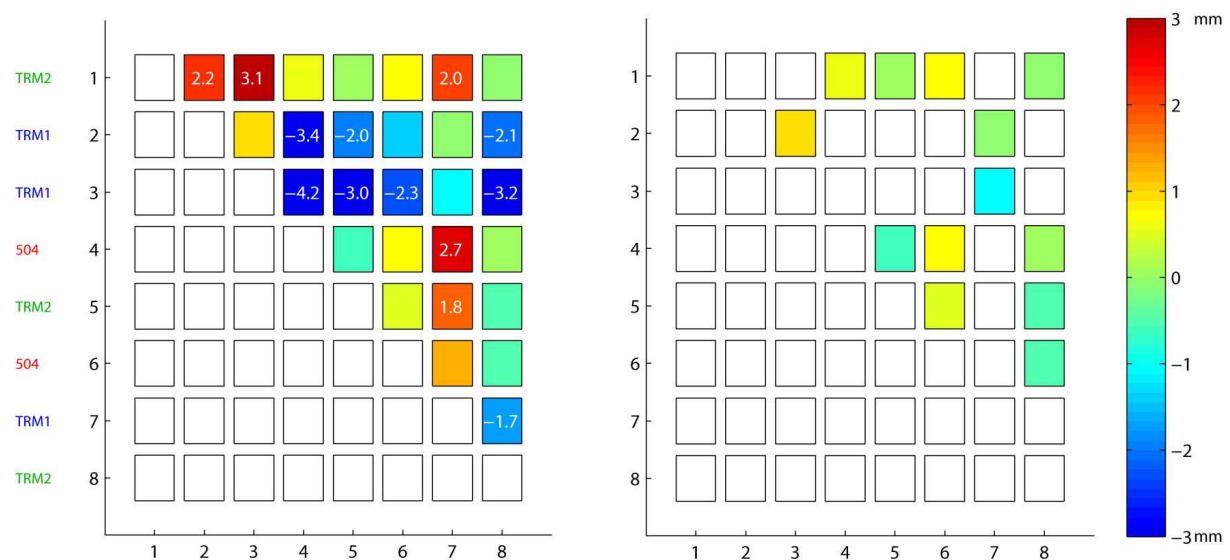


Abb. 11.15: Darstellung des Höhenvergleichs für alle Basislinien der Session 2 (Frequenz L2). Rechte Abbildung: Darstellung der Basislinien, bei denen nicht exakt eine TRM1-Antenne verwendet wurde.

In der dargestellten Matrix sind die Ergebnisse des Höhenvergleichs für alle möglichen Basislinienkombinationen einer GPS-Session wiedergegeben, die sich aufgrund der 8 GPS-Pfeiler (vgl. Abb. 11.9) ergeben (Beispiel: Differenz zw. GPS und Niv. bei Basislinie P1-P2: 2.2mm, linke Abbildung, erster Eintrag oben links). Durch die Beschriftung der Zeilen sind auch die verwendeten Antennentypen ersichtlich. Über die Farbe eines Matrixelementes lässt sich die Größe der Abweichungen ableiten. Basislinien mit einer Abweichung

zur nivellierten Höhe von mehr als 1.5mm sind durch eine zusätzliche Beschriftung mit der entsprechenden Abweichung zum Nivellementsergebnis hervorgehoben. Diese Beschriftungen enthalten zwar keine neuen Informationen, heben aber die kritischen Basislinien hervor.

Die großen Abweichungen treten ausschließlich dann auf, wenn exakt eine TRM1 Antenne an der Basislinie beteiligt ist. So zeigt die erste Zeile der Matrix Auffälligkeiten bei den Punkten 2, 3 und 7. Während auf Punkt 1 eine TRM2 Antenne montiert war, wurden an den Punkten 2, 3 und 7 TRM1 Antennen verwendet. Bei Basislinien mit zwei Antennen des Typs TRM1 (Basislinien 2-3, 2-7, 3-7) treten diese Effekte nicht auf. Besonders deutlich wird dies anhand der rechten Abbildung. Dort sind alle Basislinien mit Beteiligung exakt einer TRM1 Antenne eliminiert worden. Der Grenzwert von $\pm 1.5\text{mm}$ wird an keiner Stelle überschritten. Es ist somit eindeutig, dass die TRM1 Antennen hier signifikante Effekte verursachen. Die Streuung dieser Effekte um etwa 4mm (je nach Festlegung der Basislinienrichtung ergeben sich unterschiedliche Vorzeichen $\Delta h_{12} = -\Delta h_{21}$) entspricht der Streuung, die sich für die Basislinien ohne sichtbare Systematiken ergibt ($\sigma = 1\text{mm}$). Die Systematiken sind somit für alle drei TRM1 im Rahmen der Messgenauigkeit identisch, so dass sich diese Effekte eliminieren, wenn zwei Antennen gleichen Typs verwendet werden.

In Abbildung 11.16 sind die Basislinienergebnisse der Session 4 visualisiert (ebenfalls L2). Während in Session 2 alle Antennen ohne zusätzliches Distanzstück montiert worden sind (entsprechend Abbildung 11.11, rechtes Foto), kamen in Session 4 auch Montierungen mit Distanzstück zum Einsatz. Bei diesen Antennen ist in Abb. 11.16 hinter der Bezeichnung des Antennentyps eine vertikale Linie als Symbol für das Distanzstück hinzugefügt worden (z.B. TRM1 |). Für den zweiten Standpunkt (TRM1 Antenne mit Distanzstück) treten nur in Kombination mit Antennen des Typs TRM1 (ohne Distanzstück) größere Abweichungen auf. Auch hier schwanken die Abweichungen im Bereich von 4mm . Es ist offensichtlich, dass die in Abb. 11.11 im rechten Foto gezeigte Montierung in Kombination mit TRM1 Antennen signifikante Nahfeldeffekten verursacht. Andere Ursachen können mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden (vgl. ZEIMETZ und KUHLMANN 2010).

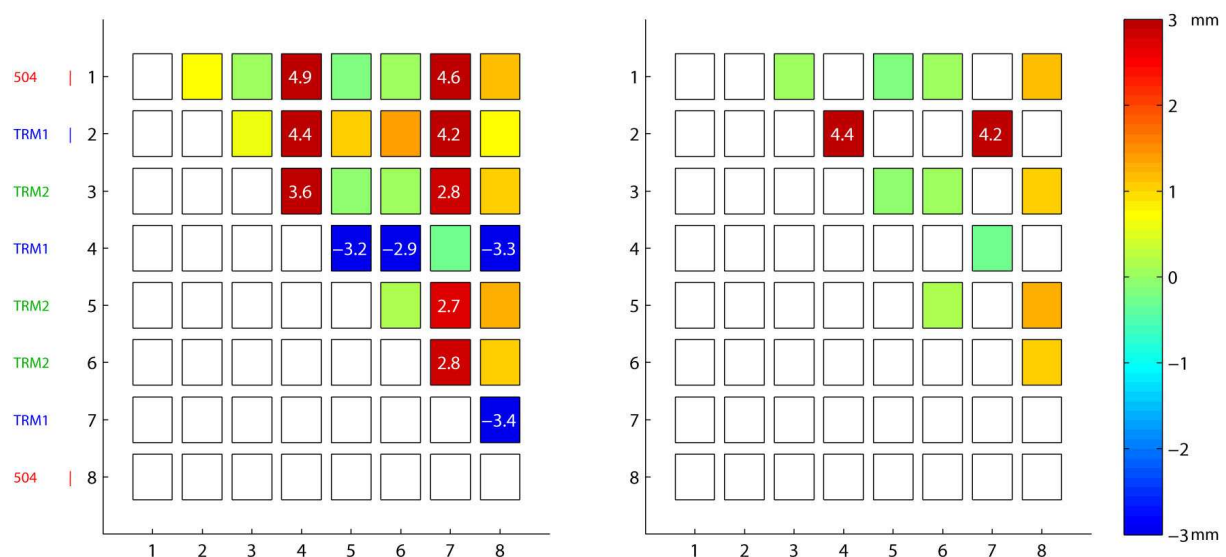


Abb. 11.16: Darstellung des Höhenvergleichs für alle Basislinien der Session 4 (Frequenz L2). Rechte Abbildung: Darstellung der Basislinien, bei denen nicht exakt eine TRM1-Antenne verwendet wurde.

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen werden nur im Falle der TRM1 Antenne Nahfeldeffekte sichtbar. Die Choke Ring Antennen und die TRM2 Antennen zeigen hier keinerlei Nahfeldempfindlichkeit, wobei letztere äußerlich nahezu baugleich zu den TRM1 Antennen sind. Aus diesen Versuchen darf jedoch keinesfalls geschlossen werden, dass die TRM1 Antenne generell stör anfälliger ist als andere Antennen. Bei einer anderen Antennen-Nahfeld-Kombination können andere Antennen negativ auffallen.

Nahfeldeffekte, die hier als dominierende Einflussgröße detektiert wurden, treten bei der Kalibrierung ebenso wie bei GNSS-Messungen auf. Bei der Kalibrierung können diese Effekte ebenso wie bei GNSS-Messungen nicht von den Antenneneigenschaften getrennt werden. Die Nahfeldeffekte begrenzen somit derzeit die erreichbare Kalibriergenauigkeit, wobei je nach Ausprägung der Nahfeldeffekte sogar die Gültigkeit der Kalibrierergebnisse in Frage zu stellen ist. Durch diverse Untersuchungen (Nahfelduntersuchungen, Ringversuch, präzise Höhenbestimmung) konnte jedoch gezeigt werden, dass die Kalibrierergebnisse gültig sind bzw. bleiben, wenn die Nahfeldproblematik entsprechend berücksichtigt wird. Dabei besteht eine Lösung dieses Problems in der Nutzung identischer Antennen-Nahfeldkombinationen. Ein alternativer Ansatz wurde bei der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) 2006-2011 verwendet, wobei hier alle beteiligten Antennen mitsamt einiger Nahfeldkomponenten (Dreifuß und Stativkopf) kalibriert worden sind (FELDMANN-WESTENDORFF 2009). Da in der Praxis häufig weder die Kalibrierung des Nahfelds noch die Verwendung gleicher Antennen-Nahfeld-Kombinationen gewährleistet werden kann, sollte zumindest bei der Konzeption des Aufbaus auf geeignete Nahfeldkomponenten geachtet werden. Der in der hier vorgestellten Messkampagne verwendete Aufbau ohne Distanzstück ist schon aufgrund der gut reflektierenden Pfeileroberfläche und des geringen Abstands zwischen Antenne und Pfeiler als sehr kritisch anzusehen. Der Einfluss des Nahfelds kann gegebenenfalls durch GPS-Messungen auf kurzen Basislinien mit bekannten Höhenunterschieden getestet werden, wobei bei einzelnen Messungen die Sicherheit der Aussagen im Vergleich zu den hier vorgestellten Untersuchungen deutlich geringer ist, da mögliche Widersprüche nicht einzelnen Ursachen zugeordnet werden können.

Im starken Kontrast zu den Nahfeldproblemen steht die hohe Genauigkeit der ermittelten Höhendifferenzen, die dann möglich ist, wenn keine dominierenden Nahfeldeffekte auftreten. Die Höhenmesskampagne belegt in diesen Fällen auch die hohe Kalibriergenauigkeit. Daraus darf aber eben nicht geschlossen werden, dass die Verwendung kalibrierter Antennen generell zu einer hohen Höhenmessgenauigkeit führt. Neben den aus den Nahfeldeffekten resultierenden Einschränkungen waren für die hier erreichte Genauigkeit auch die generell guten Bedingungen (z.B. Mehrwegesituation, Horizontfreiheit), die geringen Basislinienlängen sowie die minimalen Höhenunterschiede Voraussetzung. Gewählt wurden diese optimalen Bedingungen, da so der Einfluss der Kalibrierunsicherheiten relativ zu den übrigen Unsicherheiten ansteigt, so dass Kalibrierunsicherheiten deutlicher sichtbar werden. Trotz der geringen Basislinienlängen wurden für die GPS-Messungen auch L0-Lösungen mit zusätzlicher Schätzung der Troposphärenparameter berechnet. Dabei resultieren bei den von der Nahfeldproblematik betroffenen Basislinien Abweichungen im Bereich zwischen 10mm und 25mm . Diese Berechnungen sind nicht dargestellt, da die Ergebnisse stark von den Methoden der Troposphärenschätzung abhängen und keine Aussagen über die Kalibriergenauigkeit ermöglichen.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden durch den Vergleich mit Sollhöhenunterschieden empirische Standardabweichungen von $s_{L1} = 0.8\text{mm}$, $s_{L2} = 1\text{mm}$ und $s_{L0} = 1.6\text{mm}$ ermittelt. Diese Genauigkeiten wurden unter optimalen Bedingungen und durch Verwendung individuell kalibrierter Antennen erreicht.

Vergleichbare Ergebnisse wurden auch bei den in WANNINGER et al. 2006 dargestellten GPS-Testmessungen ermittelt (Abschnitt 4.1). Auch bei den dort durchgeführten Experimenten wurden individuell kalibrierte Antennen (relatives und absolutes Feldverfahren) verwendet und die mit GPS ermittelten Höhenunterschiede kurzer Basislinien (wenige Meter) mit nivellierten Sollhöhenunterschieden verglichen. Die Übereinstimmung der Testergebnisse deutet auch auf die vergleichbare Qualität der verschiedenen Kalibrierverfahren hin.

12 Weitere Anwendungsbereiche des Laborverfahrens

Das Laborverfahren zur Kalibrierung von GNSS-Antennen unterscheidet sich von den Feldverfahren u.a. durch zwei bislang nicht näher erläuterte Eigenschaften. Zum einen kann neben der Bestimmung des Phasenpatterns auch der Antennengewinn, also die Sensitivität der Antenne, in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels direkt gemessen werden. Zum anderen sind aufgrund der frei wählbaren Testfrequenzen auch Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit möglich. Auf diese Aspekte wird in diesem Kapitel eingegangen.

12.1 Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit des Phasenpatterns

Bei der Kalibrierung in der AMK Bonn werden derzeit Frequenzen von 1.15 GHz bis 1.65 GHz verwendet (vgl. Kapitel 6). Dieser Frequenzbereich wird bei der Kalibrierung gleichabständig mit bis zu 1001 Frequenzen abgetastet, woraus ein Frequenzabstand von 0.0005 GHz resultiert. Innerhalb des genannten Frequenzbereichs kann somit die Frequenzabhängigkeit des Empfangsverhaltens beurteilt werden.

Kenntnisse über die Frequenzabhängigkeit des Antennenpatterns können genutzt werden, um die mit den Feldverfahren ermittelten Kalibrierdaten um weitere, bei der Kalibrierung noch nicht berücksichtigte Frequenzen zu ergänzen. Da bei den Feldverfahren eine Kalibrierung nur möglich ist, wenn das entsprechende Positionierungssystem operabel ist, können mit den Feldverfahren derzeit ausschließlich die GPS-Frequenzen L1 und L2 und die GLONASS-Frequenzen R1 und R2 kalibriert werden. Es kann nicht berücksichtigt werden, dass bei GLONASS jeder Satellit auf einer leicht unterschiedlichen Frequenz sendet. Stattdessen kann nur ein Korrekturdatensatz für eine mittlere Frequenz abgeleitet werden (vgl. WÜBBENA et al. 2006). Durch die Analyse der Frequenzabhängigkeit des Empfangsverhaltens mit Hilfe des Laborverfahrens kann nun untersucht werden, ob für bestimmte Antennentypen aus vorhandenen Korrekturdaten einzelner Frequenzen, z.B. durch eine lineare Inter- oder Extrapolation, auf die Kalibrierergebnisse anderer Frequenzen geschlossen werden kann. Ist dies der Fall, könnten z.B. aus der GPS-L1-Frequenz und der mittleren GLONASS-R1-Frequenz auch frequenzabhängige Korrekturen innerhalb des GLONASS-Bandes ermittelt werden. Fundamentale Voraussetzung ist ein bekannter Verlauf der Phasenänderungen zwischen den beteiligten Frequenzen, wobei meist ein linearer Verlauf unterstellt wird. Zur Frequenzabhängigkeit des Antennenpatterns finden sich einige Laboruntersuchungen in SCHUPLER und CLARK 2001, wobei dort die Überprüfung der Linearität nicht im Vordergrund steht und diese aus den dargestellten Daten auch nicht sicher ableitbar ist. Zudem wurden bei den dort vorgestellten Versuchen nur Choke Ring Antennen untersucht.

In der AMK Bonn wurden bereits in den Jahren 2008 und 2009 erste Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit durchgeführt. Das Vorgehen zur Analyse der frequenzabhängigen Phasen- und Signalstärkevariationen sowie erste Ergebnisse sind bereits auf dem 7. GNSS-Antennenworkshop im März 2009 vorgestellt worden (Vortrag M. Becker, P. Zeimet: Zur Frequenzabhängigkeit des Antennenphasenzentrums). Im Folgenden werden für zwei exemplarisch ausgewählte Antennentypen die Frequenzabhängigkeiten aufgeführt.

Anhand der in der oberen Grafik in Abbildung 12.1 dargestellten Durchlasscharakteristik kann der Arbeitsbereich der Antenne abgelesen werden. Die eingezeichnete Signalstärke zeigt, dass die AT504GG Antenne für den Empfang in den Frequenzbereichen 1.2 bis 1.27 GHz und 1.55 bis 1.62 GHz geeignet ist. In der mittleren und der unteren Grafik sind die PCO-Komponenten für die GPS-Frequenz L1 (=G01) und die GLONASS-Frequenzen im R01-Band eingezeichnet. Auf die Darstellung der PCOs im L2-Bereich wurde verzichtet, da dies zu einer ungünstigeren Achsskalierung führen würde. Die PCO-Komponenten zeigen hier einen nahezu linearen Verlauf von der GPS-L1-Frequenz bis zur höchsten der GLONASS-Frequenzen.

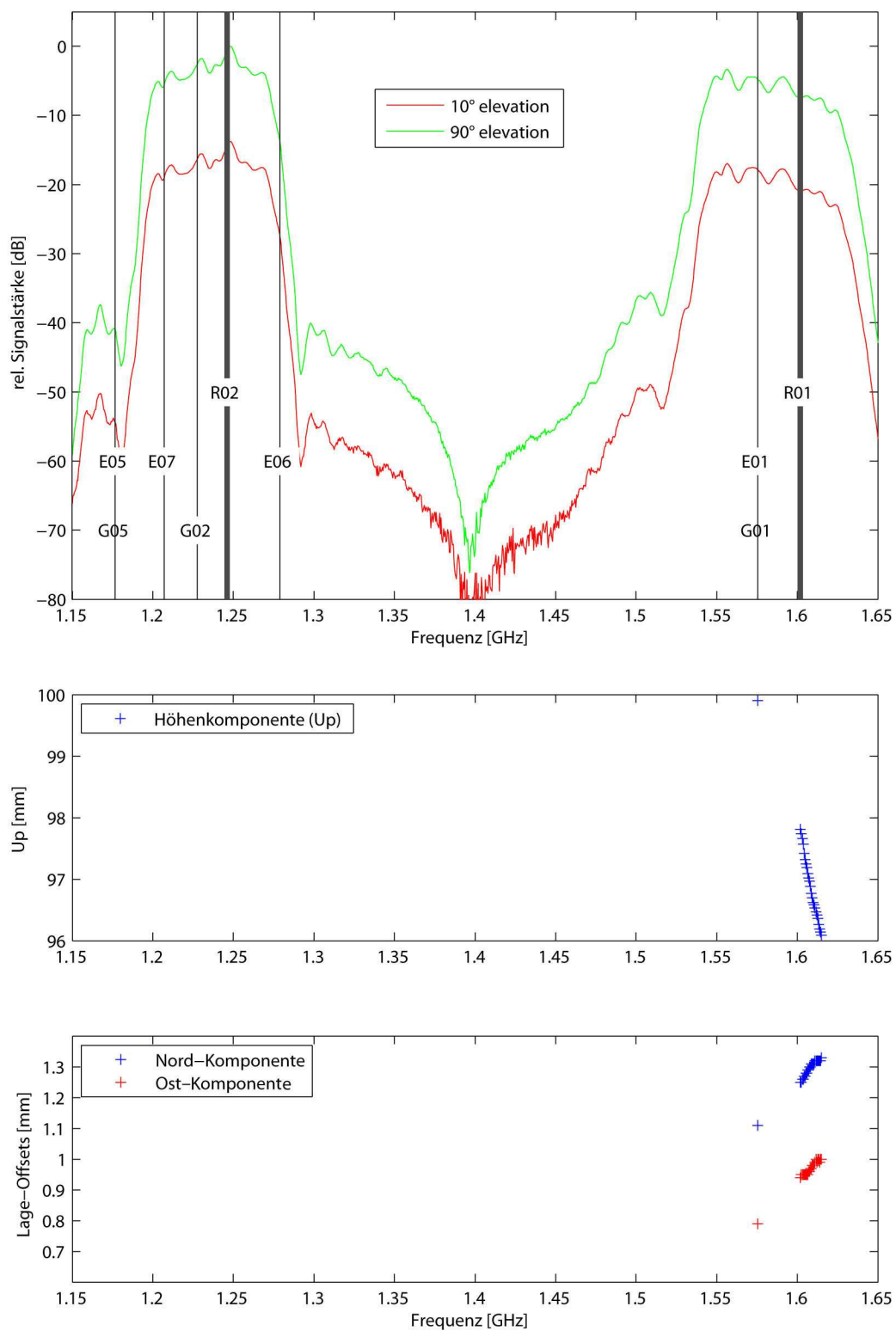


Abb. 12.1: Frequenzabhängige PCO-Variationen (Leica AT504GG Antenne). Die vertikalen Linien kennzeichnen die Frequenzen: GPS (G01, G02 und G05), GLONASS (R01, R02), Galileo (E01, E05, E06, E07).

Aufgrund dieser Ergebnisse scheint eine Ableitung frequenzabhängiger Variationen innerhalb des GLONASS-

Bandes mit Hilfe des oben vorgestellten Ansatzes möglich. Zu prüfen ist, ob sich auch für die Phasenzentrumsvariationen ein linearer Verlauf bestätigt. Hierzu ist in Abb. 12.2 die Frequenzabhängigkeit des gesamten Patterns (PCO + PCV) für einen Azimut (hier 0°) dargestellt. Während die Hochachse die verschiedenen Elevationen kennzeichnet, sind auf der Rechtsachse erneut die Frequenzen aufgetragen. Anhand der Farbkodierung lassen sich die Phasenänderungen ableiten, wobei sich alle Differenzen auf eine in der Mitte des Frequenzbereichs liegende Referenzfrequenz beziehen. Anhand der Ergebnisse wird näherungsweise der lineare frequenzabhängige Verlauf bestätigt. Auffällig ist, dass die Frequenzabhängigkeit bei unterschiedlichen Elevationen unterschiedlich stark ausfällt. So ist bei 90° Elevation ein in erster Annäherung gleichmäßiger Anstieg von etwa -0.7mm bis 0.7mm sichtbar, während die Phasenvariationen bei 30° Elevation nur noch von -0.5mm bis 0.5mm ansteigen.

Aufgrund der insgesamt geringen Größenordnung der Variationen muss auch die Signifikanz dieser Variationen unter Berücksichtigung der Kalibrierengenauigkeit betrachtet werden. Da viele der Kalibrierunsicherheiten jedoch nicht frequenzabhängig (z.B. Positionierungsabweichungen, Ausrichtung des Prüflings in Richtung des Senders) bzw. aufgrund des geringen Frequenzabstands nahezu identisch sind (z.B. Temperatur- und Kabeleffekte), ist eine relative Genauigkeit anzusetzen, die deutlich über der äußeren Genauigkeit liegt. Die Genauigkeit der relativen Phasenänderungen ist somit für benachbarte Frequenzen sehr hoch, wobei die äußere Genauigkeit im Vergleich deutlich geringer ist. Die relativen Unterschiede sind jedoch signifikant.

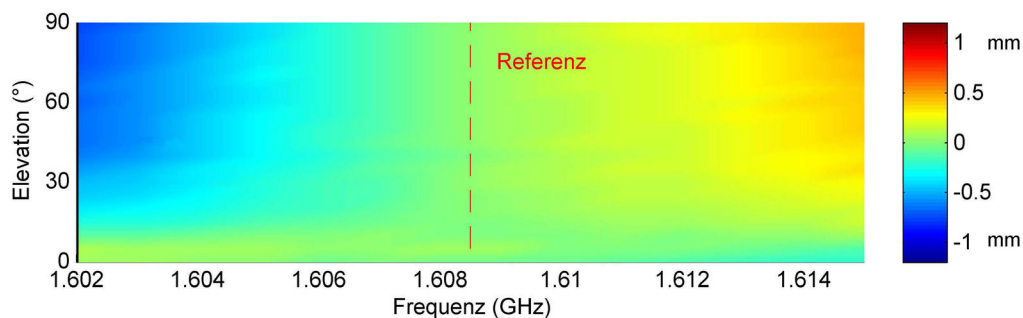


Abb. 12.2: Frequenzabhängige Phasenvariationen innerhalb des GLONASS-R01-Bandes.(Leica AT504GG)

Überprüft wurde hier bislang nur die Linearität innerhalb des GLONASS-Bandes. Für die oben erläuterte Ableitung frequenzabhängiger Korrekturen müsste diese Betrachtung bis hin zur GPS-L1-Frequenz ausgedehnt werden. Hier deuten jedoch die geringen Variationen darauf hin, dass die Verwendung einer mittleren Phasenkorrektur für das gesamte R01-Band bei GNSS-Messungen wahrscheinlich ausreichend ist. Zur Abschätzung wurde eine Nullbasislinie berechnet, wobei die äußeren der oben dargestellten Frequenzen (1.602 GHz und 1.615 GHz) gegeneinander getestet wurden. Das Ergebnis ist in Abbildung 12.3 dargestellt.

Die daraus resultierenden Abweichungen liegen im Bereich von bis zu $\pm 0.2\text{mm}$ und sind vernachlässigbar, zumal hier „Extremwerte“ sichtbar werden. Bei der Koordinatenbestimmung mit GLONASS werden mehrere Satelliten, also auch mehrere Frequenzen verwendet, so dass nicht nur die äußeren Frequenzen genutzt werden und sich somit die Auswirkung bei der Koordinatenbestimmung in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation reduziert.

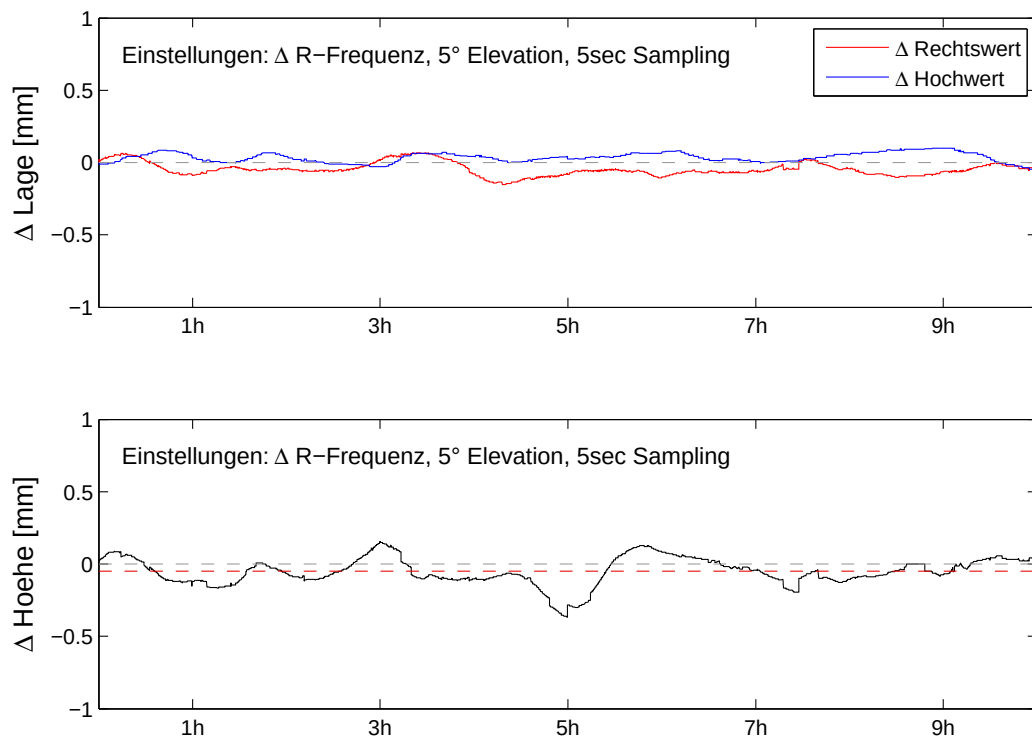


Abb. 12.3: Simulation des Einflusses der Frequenzabhängigkeit des Phasenpatterns innerhalb des GLONASS-Bandes (Leica AT504GG).

Im Falle der Leica AT504GG Antenne kann die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit innerhalb des GLONASS-R1-Bandes nur zu minimalen Verbesserungen führen. Anhand des folgenden Beispiels wird deutlich, dass der vorgestellte lineare Ansatz zur Ableitung frequenzabhängiger Korrekturen nicht immer gültig ist. In Abbildung 12.4 ist zunächst die Frequenzabhängigkeit der Up-Komponente des PCOs einer Leica AR25 Antenne dargestellt. Auf eine Darstellung der Lagekomponenten wird verzichtet, da diese für die getestete Antenne vernachlässigbar klein sind.

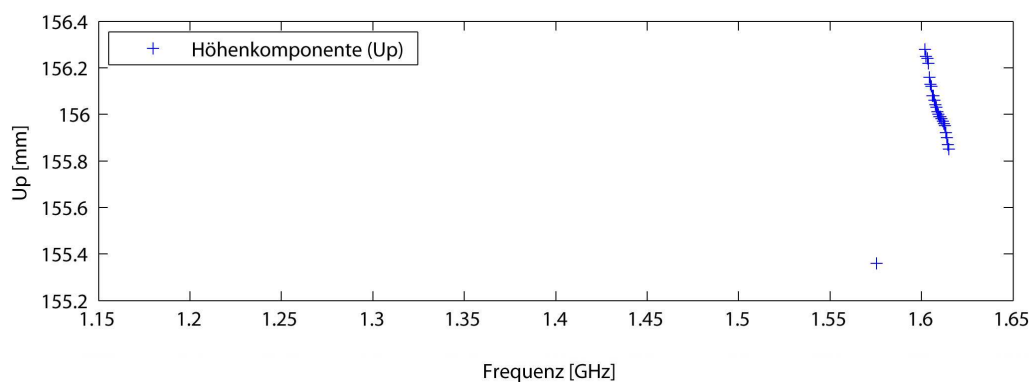


Abb. 12.4: Frequenzabhängige PCO-Variationen (Leica AR25).

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass nicht grundsätzlich von einer linearen Frequenzabhängigkeit ausgegangen werden kann. Dies bestätigt sich auch bei der Betrachtung des aus dem PCO und den PCV zusammengesetzten Patterns (Abb. 12.5). Würde dennoch ein linearer Verlauf zur Ableitung frequenzabhängiger Korrekturen angesetzt, so würden hieraus größere Abweichungen resultieren als im Falle der Verwendung einer mittleren GLONASS-Frequenz. Bei der hier getesteten Antenne sind die Variationen jedoch so gering, dass die Modellfehler klein ausfallen würden. An diesem Beispiel wird dennoch deutlich, dass grundsätzlich mit Hilfe des Laborverfahrens überprüft werden sollte, ob eine individuelle Korrektur der GLONASS-Frequenzen überhaupt sinnvoll ist und wie der frequenzabhängige Verlauf modelliert werden kann.

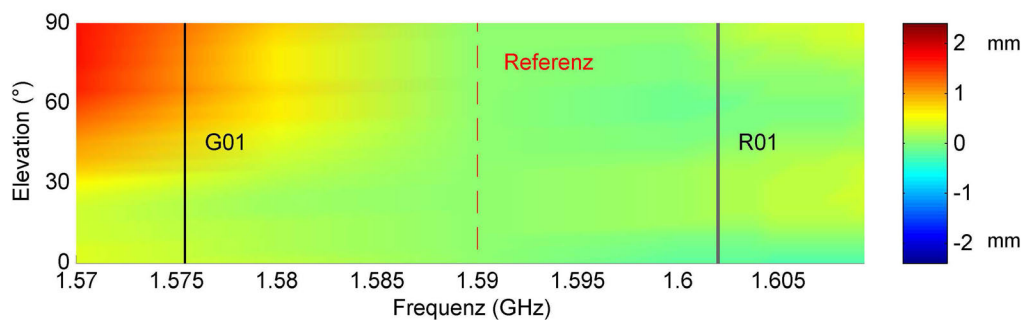


Abb. 12.5: Frequenzabhängige Phasenvariationen (Leica AR25, Frequenzbereich GPS-L1 bis GLONASS-R1).

Ist der frequenzabhängige Verlauf bekannt, kann der vorgestellte Ansatz auch verwendet werden, um aus vorhandenen GPS- und GLONASS-Kalibrierungen Korrekturdaten für neue Systeme (z.B. Galileo) oder neue Frequenzen (z.B. GPS-L5) abzuleiten. Hier sind die Frequenzabstände mitunter deutlich größer als dies innerhalb des GLONASS-Bandes der Fall ist, so dass auch die Anforderungen an die Parametrisierung der Frequenzabhängigkeit ansteigen. Die Qualität solcher abgeleiteter Korrekturdaten ist sicher geringer als die der messtechnisch bestimmten Korrekturen. Für Antennen, die jedoch nicht ein zweites mal kalibriert werden sollen bzw. können (z.B. Antennen auf Permanentstationen), bietet das vorgestellte Verfahren einen alternativen Ansatz zur sonst weitverbreiteten Lösung dieses Problems durch die Verwendung von Antennentypkorrekturen. Dies ist jedoch im Einzelfall zu überprüfen, da

- die Effekte vom Antennentyp abhängen,
- die Effekte für die Frequenzbereiche L1 und L2 unterschiedlich sein können
- und der Frequenzabstand zu einer bereits kalibrierten Frequenz berücksichtigt werden muss.

Allgemeine Aussagen sind somit schwierig und individuelle Kalibrierungen stets vorzuziehen.

Bislang wurde der vorgestellte Ansatz noch nicht zur Ableitung von Kalibrierdaten für neue Systeme/Frequenzen angewendet. Auch die ausführliche Beurteilung der Qualität des Ansatzes beschränkte sich bislang auf Untersuchungen innerhalb des GLONASS-Bandes. In Zukunft wird eventuell die Ableitung von Kalibrierdaten für die GPS-L5-Frequenz aus den Frequenzen GPS-L2 und GLONASS-R2 notwendig, so dass dann weitere Untersuchungen folgen werden. Abschließend sei angemerkt, dass bislang alle in der AMK Bonn erfassten Kalibrierrohdaten archiviert werden, so dass durch eine Reprozessierung dieser Daten jederzeit Korrekturdaten für neue Frequenzen im Bereich von 1.15 GHz bis 1.65 GHz abgeleitet werden können.

12.2 Erfassung der richtungsabhängigen Sensitivität von GNSS-Antennen

In den bisherigen Untersuchungen wurde fast ausschließlich auf Aspekte der Phasenmessung eingegangen. Bei der Kalibrierung mit dem Laborverfahren wird jedoch auch die Leistung des empfangenen Signals relativ zu der vom Netzwerkanalysator erzeugten Sendeleistung bestimmt. Bei der Antennenkalibrierung kann somit neben den richtungsabhängigen Phasenvariationen auch der richtungsabhängige Wirkungsgrad der Antenne bestimmt werden. Hierbei werden derzeit nur die relativen Änderungen zwischen den verschiedenen Einstrahlrichtungen erfasst. Für die Ableitung eines absoluten Bezugs müsste der an der GNSS-Antenne vorliegende Signalpegel bekannt sein. Bei der Kalibrierung ist allerdings zunächst nur die vom Netzwerkanalysator erzeugte Sendeleistung bekannt. Der Leistungspegel dieses Signals unterscheidet sich von dem an der GNSS-Antenne vorliegenden Pegel im Wesentlichen aufgrund folgender Aspekte.

- Dämpfungseinfluss des Koaxialkabels
- Wirkungsgrad des Senders in Richtung der GNSS-Antenne
- Freiraumdämpfung (u.a. abhängig von der Entfernung und der Richtcharakteristik des Senders)

Bislang wird die Pegelmessung nur zur Bestimmung des Arbeitsbereichs der GNSS-Antennen verwendet, weshalb auf die Bestimmung des absoluten Wirkungsgrads verzichtet wurde. Sollte für zukünftige Aufgaben die absolute Bestimmung notwendig sein, so könnte der Signalpegel im Rotationspunkt der Dreheinrichtung mit Hilfe einer Referenzantenne mit bekanntem Antennengewinn bestimmt werden (SCHUPLER 2001).

In Abb. 12.6 ist die richtungsabhängige Wirkungsweise einer Leica AT504GG Antenne dargestellt. In dieser Darstellung sind die niedrigen Elevationen (0°) am Figurenrand und der Zenit in der Figurenmitte abgebildet. Der Wirkungsgrad ist im Zenit am höchsten und fällt zum Horizont hin um ca. 15.8 dB ab. Da kein absolutes Niveau des Patterns abgeleitet werden kann, wurde der Gewinn im Zenit auf 0 dB festgelegt. Auffällig sind die geringen azimuthalen Variationen. Bezüglich dieser Eigenschaft unterscheidet sich der Antennengewinn sehr stark von den Phasenvariationen, bei denen zumindest bei den meisten Antennentypen auch azimuthale Anteile vorhanden sind (siehe Abbildungen auf Seite 5).

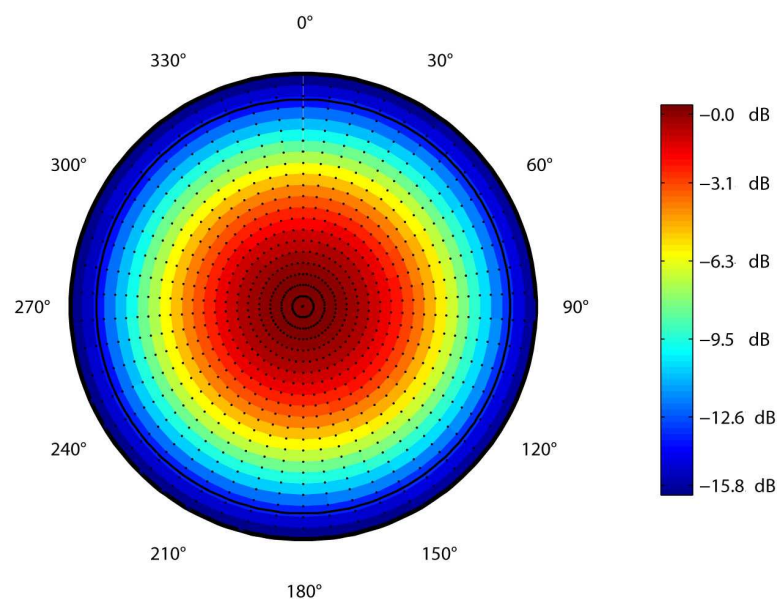


Abb. 12.6: Richtungsabhängigkeit des Wirkungsgrads einer Leica AT504GG Antenne (L1).

Ein Anwendungsbereich für den Kenntnisse über den richtungsabhängigen Wirkungsgrad von fundamentaler Bedeutung sind, ist die Detektion von Mehrwegeeffekten auf der Basis von Signalpegel- bzw. SNR-Beobachtungen (SNR: Signal-Rausch-Verhältnis). Auch bei diesem Anwendungsgebiet sind kein Kenntnisse über das absolute Niveau des Antennenwirkungsgrades notwendig. Die Idee der Detektion von Mehrwegeeffekten anhand des SNRs basiert auf der Tatsache, dass Mehrwegeeffekte nicht nur die Phasenmessung, sondern auch Signalpegel und SNRs beeinflussen (AXELRAD et al. 1996).

Ein u.a. in BILICH et al. 2004 vorgestellter Ansatz zur Bestimmung der Mehrwegeeffekte bedarf in einem ersten Prozessierungsschritt die Reduktion der bei der GNSS-Messung erfassten SNR-Daten um richtungsabhängige Einflüsse. Letztere resultieren im Wesentlichen aus dem Gewinn des Senders (Satellit), der Freiraumausbreitung und dem Gewinn der Empfangsantenne. Der Ablauf ist in Abb. 12.7 wiedergegeben.

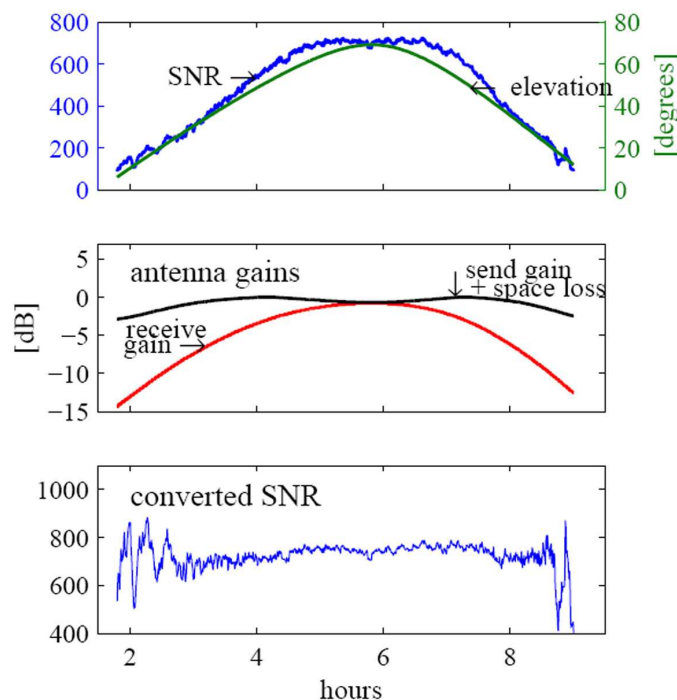


Abb. 12.7: Reduktion der SNR Daten zur Aufdeckung von Mehrwegeeffekten (BILICH et al. 2004).

In der oberen Grafik sind das erfasste SNR sowie der Elevationsverlauf eines Satelliten dargestellt. Die mittlere Grafik zeigt die richtungsabhängigen Wirkungsgrade von Sende- und Empfangsantenne, wobei auch die Freiraumdämpfung berücksichtigt ist. In der unteren Grafik folgen die um die in der mittleren Grafik dargestellten Größen reduzierten SNR-Werte. Aus diesen Daten ist letztendlich eine Detektion möglicher Mehrwegeeffekte verursachender Reflektoren sowie eine Ableitung des daraus resultierenden Mehrwegeefflusses ableitbar (BILICH et al. 2004). Das Ergebnis einer solcher Berechnung ist in Abb. 12.8 dargestellt.

Hier wurden zwei dominante Reflektoren mit Höhen (bezogen auf die Antenne) von ca. 23cm und 62cm detektiert (a). Aus diesen Reflektoren können zur Überprüfung des Modells die zugehörigen SNR-Werte berechnet werden (b). Die Qualität des Verfahrens zeigt sich auch anhand des Vergleichs der berechneten Mehrwegekorrekturen mit den bei der Positionsbestimmung ermittelten Residuen (c). Die Effizienz des Verfahrens hängt u.a. von der Qualität der im Modell berücksichtigten, nicht durch Mehrwegeeffekte verursachten, richtungsabhängigen SNR-Daten ab. Diese sind, anders als in Abb. 12.7 skizziert, von deutlich mehr Faktoren als den Antenneneffekten und der Freiraumdämpfung abhängig (vgl. z.B. BECKER et al. 2004).

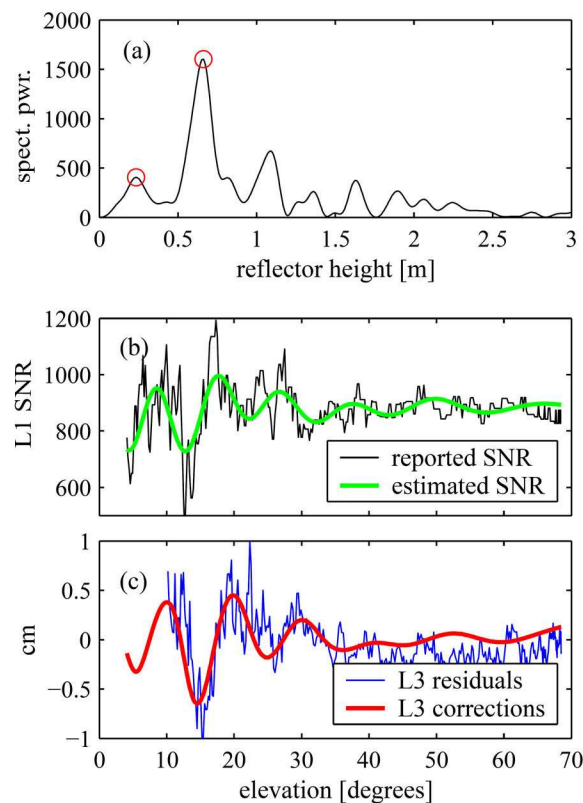


Abb. 12.8: Ergebnis der SNR-basierten Berechnung von Trägerphasenkorrekturen (BILICH et al. 2004).

Ein weiteres Konzept zur Nutzung der SNR-Daten zur Verbesserung der GNSS-Qualität besteht in der SNR-basierten Gewichtung der Phasenbeobachtung bei der GNSS-Basislinienauswertung (vgl. KIRCHNER u. BECKER 2005). Im Vergleich zur einfachen elevationsabhängigen Gewichtung besitzt dieser Ansatz den Vorteil, dass nicht alle horizontnahen Beobachtungen gleichermaßen stark herabgewichtet werden, sondern nur dann, wenn die SNR-Werte von einem theoretischen Verlauf abweichen, was durch vorhandene Mehrwege oder andere Störeinflüsse verursacht werden kann. Bei diesem Ansatz, bei dem ebenfalls zunächst die richtungsabhängigen Antenneneinflüsse berücksichtigt werden, gehen ungestörte horizontnahe Beobachtungen stärker in die Koordinatenbestimmung ein, als es bei einer elevationsabhängigen Gewichtung der Fall ist.

Bei den in der AMK Bonn bislang durchgeführten Kalibrierungen wird die Signalstärke grundsätzlich aufgezeichnet. Dies gilt auch für die in den Kapitel 8, 9 und 10 vorgestellten Experimente. Diese Daten wurden bislang nur ausgewertet, wenn dies für die Untersuchung der Phasenvariationen sinnvoll oder notwendig war. Gerade mit Hinblick auf die Mehrwege- und Nahfeldprobleme ist es jedoch sinnvoll, besonders die in Kapitel 10 vorgestellten Untersuchungen zur Nahfeldproblematik auf die Signalstärke auszuweiten. Eventuell resultieren aus diesen Untersuchungen neue Erkenntnisse, die bei der Reduktion dieser Effekte verwendet werden können.

In diesem Kapitel wurden Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, die aus dem absoluten Laborverfahren zur Kalibrierung von GNSS-Antennen resultieren, die jedoch weit über die ausschließliche Bestimmung der richtungsabhängigen Phasenvariationen hinausgehen. Neben der Möglichkeit zur Analyse der frequenzabhängigen Einflüsse, bietet insbesondere die Bestimmung der richtungsabhängigen Sensitivität der Antenne weiteres Potential für eine Genauigkeitssteigerung der Koordinatenbestimmung mit GNSS-Verfahren.

13 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Laboreinrichtung zur absoluten Kalibrierung von GNSS-Antennen aufgebaut, wobei Optimierungen am verwendeten Laborverfahren realisiert werden konnten. Neben einer *Minimierung der Störeinflüsse* konnte die Kalibrierdauer deutlich verkürzt werden (20 bis 90 Minuten pro Kalibrierung). Weitere wesentliche Aspekte der Arbeit stellen die Untersuchungen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und der wirksamen Messungsunsicherheiten dar. Bei der Analyse der Messungsunsicherheiten wurden insbesondere Nahfeldeffekte als dominante Einflussgröße offengelegt. Andere Einflussgrößen wie Temperatur- und Kabeleffekte konnten durch geeignete Mess- und Auswertestrategien auf ein vernachlässigbares Maß reduziert werden. Dadurch wird nun eine Präzision erreicht, die, anders als die Richtigkeit, den in Abschnitt 3.2 abgeleiteten Anforderungen an die Kalibrierengenauigkeit genügt. Zur Bestimmung der Gültigkeit der Kalibrierergebnisse wurden Vergleiche mit unabhängigen Feldverfahren herangezogen. Zudem wurden die Kalibrierergebnisse durch deren Anwendung bei der Höhenauswertung einer Messkampagne und dem Vergleich mit Sollhöhenunterschieden getestet.

Die *Quantifizierung der Kalibrierengenauigkeit* kann nicht durch die Angabe nur eines Genauigkeitsmaßes erfolgen. Während die Präzision des Verfahrens bei unveränderter Antennenumgebung durch eine Standardabweichung von $\sigma = 0.1\text{mm}$ angegeben werden kann, ist die Angabe eines allgemeingültigen Genauigkeitsmaßes für die Richtigkeit nicht möglich. Dies zeigt sich insbesondere bei Kalibrierungen mit geänderten Nahfeldbedingungen und den daraus resultierenden Veränderungen des Phasenpatterns. Da stets nur relative Änderungen sichtbar sind, ist die Angabe einer äußeren Genauigkeit lediglich mit Informationen der Kalibrierung nicht möglich.

Durch *Vergleiche mit unabhängigen Kalibrierverfahren* kann die Übereinstimmung der Verfahren überprüft werden. Die Bewertung der Differenzen ist hingegen schwierig, da kein Verfahren mit übergeordneter Genauigkeit existiert, und die Realisierung möglichst identischer Nahfeldeinflüsse aufgrund der unterschiedlichen Kalibriereinrichtungen schwierig ist.

Durch *GNSS-Testmessungen* mit kalibrierten Antennen und Vergleichen mit Sollhöhenunterschieden lassen sich Antenneneinflüsse im Positionsraum beurteilen. Allerdings dürfen verbleibende Messabweichungen keinesfalls alleine der Antennenkalibrierung zugeschrieben werden. Deshalb können auch hier keine Kalibrierengenauigkeiten abgeleitet werden. Dass bei der Verwendung geeigneter Antennen-Nahfeld-Kombinationen Höhendifferenzen mit einer Genauigkeit von $\sigma = 1\text{mm}$ erreicht werden können, weist jedoch bereits auf die gute Kalibrierengenauigkeit hin (vgl. Abschnitt 11.2, Standardabweichung gilt für L1 und L2).

Bei ungünstigen *Nahfeldbedingungen* steigen die Abweichungen auf einige Millimeter (L1 und L2) an. Bei der Basislinienauswertung mit der ionosphärenfreien Linearkombination L0 können diese auf zweistellige Millimeterbereiche ansteigen und sich bei der zusätzlichen Schätzung von Troposphärenparametern weiter verstärken. Dabei wirken sich bei GNSS-Messungen zum einen die Nahfeldeinflüsse der GNSS-Station aus. Zum anderen fließen bei der Auswertung der GNSS-Beobachtungen auch die bei der Antennenkalibrierung wirksamen Nahfeldeinflüsse ein. Im Falle der Antennenkalibrierung können zur Beurteilung des Nahfeldeinflusses verschiedene Antennen-Nahfeldkombinationen relativ zueinander getestet werden. Der absolute Einfluss kann jedoch dadurch nicht bestimmt werden.

Bei der Lösung der Nahfeldproblematik können in Zukunft, basierend auf den bisherigen Untersuchungen, mehrere unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann die Eignung verschiedener Nahfeldumgebungen experimentell getestet werden. Hierzu müssen Antennenkalibrierungen mit verschiedenen Nahfeldkomponenten (z.B. Metallplatte, Dreifuß) durchgeführt werden. Durch GNSS-Messungen, bei de-

nen diese Nahfeldkomponenten ebenfalls verwendet werden, kann anschließend die Qualität der Ergebnisse validiert werden (z.B. durch den Vergleich mit Sollkoordinaten). Um allgemeingültige Aussagen zu erhalten, müssen die bei der Kalibrierung verwendeten Nahfeldkomponenten in verschiedenen Testumgebungen eingesetzt werden. Idealerweise lässt sich eine Nahfeldsituation finden, die nahezu unabhängig von der GNSS-Stationsumgebung und vom Antennentyp zu guten Ergebnissen führt.

Ein zweiter Ansatz besteht darin, die Nahfeldeinflüsse analytisch zu bestimmen und rechnerisch zu berücksichtigen. Hierzu müssen die Wechselwirkungen elektromagnetischer Felder mit den Komponenten des Antennennahfeldes sowie der GNSS-Antenne berechnet und der Einfluss auf die Phasenmessung abgeleitet werden. Die mathematischen und physikalischen Grundlagen der als „Geometrical theory of diffraction“ (GTD) bezeichneten Thematik sind seit mehr als 50 Jahren Gegenstand der Forschung (KELLER 1957). Heute können Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Feldern und einfachen Körpern berechnet werden, wobei Kenntnisse über die elektromagnetischen Materialeigenschaften der Körper Voraussetzung sind. Im Kontext der GNSS-Verfahren wäre zu prüfen, inwieweit eine Modellierung der Nahfeldeffekte möglich ist. Die Möglichkeiten zur Erfassung der geometrischen Beschreibung der Antennenumgebung und deren Darstellung durch primitive Körper sind aufgrund der Forschungstätigkeiten im Bereich des terrestrischen Laserscannings deutlich besser als vor einigen Jahren. Die Problematik der Erfassung der elektromagnetischen Materialeigenschaften könnte in einem ersten Schritt durch die Verwendung „künstlicher Umgebungen“ aus Materialien mit bekannten Eigenschaften (z.B. Aluminium) umgangen werden. Die Sensitivität der GNSS-Antennen, die für die Abschätzung der Auswirkung des Nahfeldeinflusses auch unterhalb des Antennenhorizontes bekannt sein muss, kann mit dem Laborverfahren zur absoluten Antennenkalibrierung erfasst werden.

Da die Einflüsse unterschiedlicher Kalibrierergebnisse insbesondere dann unbefriedigende Größenordnungen annehmen, wenn bei der GNSS-Auswertung Troposphärenparameter geschätzt werden, ist eine Untersuchung der mathematischen Korrelation zwischen den verbleibenden Antenneneinflüssen und der Troposphärenmodellierung sinnvoll. Da die Korrelationen vor allem daraus resultieren, dass sich sowohl Troposphäreneinflüsse als auch Nahfeldeinflüsse elevationsabhängig auswirken, ist zu untersuchen, ob aus den Korrelationen Rückschlüsse auf die Kalibrierabweichungen möglich sind oder ob Optimierungen der Modelle vorgenommen werden können.

A Zum Vergleich zweier Kalibrierergebnisse

Üblicherweise werden zur Beschreibung der richtungsabhängigen Empfangscharakteristik einer Antenne Phasenzentrumsvariationen bestimmt, welche sich auf ein mittleres Phasenzentrum E beziehen. Die Lage des mittleren Phasenzentrums wird dabei im Allgemeinen auf den Antennenreferenzpunkt (ARP) bezogen (s. Kapitel 2). Dabei ist die Wahl der Lage des mittleren Phasenzentrums im Prinzip beliebig und die Bestimmung eines solchen auch nicht notwendig (dann folgt $E = ARP$), da sich zu jedem Phasenzentrum ein möglicher Satz von Phasenzentrumsvariationen angeben lässt, der das Antennenverhalten vollständig beschreibt. Es liegt somit ein klassischer Datumsdefekt vor, der bei der Auswertung von Kalibriermessungen unterschiedlich gelöst wird.

Sollen Kalibrierergebnisse miteinander verglichen werden, so müssen jeweils die vollständigen Modelle berücksichtigt werden. Ein Vergleich der PCOs alleine ist somit nicht zulässig. Dies gilt sowohl für die Höhenkomponente als auch für die Lagekomponenten. Vor einem Vergleich zweier Kalibrierdatensätze müssen diese Datensätze somit zunächst in ein gemeinsames System überführt werden. Im Folgenden wird dieser Datumsübergang beschrieben, wobei die Phasenzentrumsvariationen des ersten Datensatzes auf das Phasenzentrum des zweiten umgerechnet werden. Hierbei kennzeichnet $r_{ARP}(\alpha, \beta)$ die von der Einstrahlrichtung α (Azimut) und β (Elevation) abhängige, auf den ARP bezogene Phasenabweichung. Der PCO ¹⁶ beschreibt den Vektor zwischen dem ARP und dem jeweiligen mittleren Phasenzentrum. Die Richtung des eintreffenden Signals wird durch den Einheitsvektor $\mathbf{e}_0(\alpha, \beta)$ angegeben. Die richtungsabhängigen Phasenzentrumsvariationen werden durch PCV_1 und PCV_2 gekennzeichnet. Die konstanten Anteile c_1 und c_2 resultieren daraus, dass mit allen Kalibrierverfahren jeweils nur die aufgrund einer geänderten Einstrahlrichtung resultierende Phasenvariation erfasst werden kann und der absolute Bezug des Phasenpatterns nicht bestimmt ist (Kapitel 5 und 6). Ausgehend von zwei zu vergleichenden Phasenkorrekturen

$$r_{ARP}(\alpha, \beta) = \mathbf{pco}_1 \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV_1(\alpha, \beta) + c_1 \quad (\text{A.1})$$

$$r_{ARP}(\alpha, \beta) = \mathbf{pco}_2 \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV_2(\alpha, \beta) + c_2 \quad (\text{A.2})$$

ergibt sich durch Gleichsetzung beider Ergebnisse:

$$\mathbf{pco}_2 \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV_2(\alpha, \beta) + c_2 = \mathbf{pco}_1 \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV_1(\alpha, \beta) + c_1 \quad (\text{A.3})$$

Nach einer einfachen Umformung

$$PCV_2(\alpha, \beta) = (\mathbf{pco}_1 - \mathbf{pco}_2) \cdot \mathbf{e}_0(\alpha, \beta) + PCV_1(\alpha, \beta) + c_1 - c_2 \quad (\text{A.4})$$

resultiert bereits eine Form, welche einen Vergleich der Phasenvariationen zulässt. Die Phasenreststücke c_1 und c_2 sind für alle Einstrahlrichtungen identisch und für die Positionsbestimmung ohne Relevanz (s. Kapitel 5). Bei dem Vergleich der Antennenpattern führen diese konstanten Anteile dazu, dass ein Offset ($c = c_1 + c_2$) zwischen den Phasenpattern sichtbar wird. Dieser kann durch verschiedene Methoden beseitigt werden, wobei folgende Varianten üblich sind:

- Gleichsetzen der Phasenkorrekturen für 90° Elevation
- Gleichsetzen der aus jeweils allen Abweichungen berechneten Mittelwerte
- Minimierung der Quadratsumme der Phasenabweichungen (Schätzung von c)

Die Wahl von c führt nur zu einer Verschiebung der Abweichungen und ist somit ohne Bedeutung.

¹⁶Die Abkürzung PCO wird üblicherweise in Großbuchstaben geschrieben, weshalb diese Schreibweise auch in dieser Arbeit verwendet wird. In Formeln wird jedoch an der üblichen Kleinschreibung von Vektoren festgehalten.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Antennenmodell für den Fall einer idealen Antenne (nach CAMPBELL et al. 2004).	3
2.2	Antennenmodell für den Fall einer realen Antenne (nach CAMPBELL et al. 2004).	4
2.3	PCV und Foto einer Leica AT504 Choke-Ring-Antenne.	5
2.4	PCV und Foto einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne.	5
2.5	PCV und Foto einer Leica AX1202GG Antenne.	5
3.1	Messrauschen im Falle großer Elevationen (Nullbasislinie, L1).	9
3.2	Messrauschen im Falle niedriger Elevationen (Nullbasislinie, L1).	10
3.3	Messrauschen im Falle niedriger Elevationen (Zero-Baseline, L2).	10
3.4	Doppeldifferenzresiduen im Falle einer kurzen Basislinie (L1).	12
3.5	Doppeldifferenzresiduen im Falle einer kurzen Basislinie (L1).	12
4.1	Änderungen der Höhenkoordinate nach dem Wechsel des Antennentyps.	17
5.1	Kategorisierung der Kalibrierverfahren.	19
5.2	Kalibriermechanik DRB 2 für die Relativkalibrierung mit Antennendrehung.	20
5.3	Kalibrieraufbau des absoluten Feldverfahrens mit Robotor.	22
5.4	Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen.	23
5.5	Vergleich der Ergebnisse verschiedener Kalibriereinrichtungen.	23
6.1	Simulation der Satellitenbewegung durch Bewegung des Senders.	25
6.2	Prinzipskizze einer Antennenmesskammer.	26
6.3	Antennenmesskammer Bonn - Konzeption und Dimensionierung.	28
6.4	Antennenmesskammer Bonn.	28
6.5	Messerwerte eines Elevationsscans bei 0° Azimut.	29
6.6	Messergebnisse einer vollständigen Kalibrierung.	30
6.7	Antennenmodell unter Berücksichtigung der Exzentrizität des ARP.	32
6.8	Einfluss einer Exzentrizität der Lagekomponenten des PCOs auf die Phasenmessung.	32
6.9	Darstellung der geometrischen Beziehungen zwischen Antennenreferenzpunkt, Phasenzentrum und Rotationspunkt.	33
7.1	Kondensator und stromdurchflossener gerader Leiter.	36

7.2	Schwingkreis: Aufbau und Funktionsprinzip.	38
7.3	Mitwirkung des Verschiebestromes am Aufbau des magnetischen Feldes.	39
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen.	39
7.5	Erzeugung einer zirkularen Polarisation durch Addition zweier linear polarisierter Signale. . .	40
7.6	Block II GPS-Satellit mit Helixantennen.	41
7.7	Prinzipskizze und Abbild einer Helixantenne.	42
7.8	Wicklungsgeometrie einer Helix.	42
7.9	Bedingung für die Erzeugung zirkular polarisierter Signale.	44
7.10	Wirkungsweise von Pyramidenabsorbern.	46
8.1	Aufbau von Koaxialkabeln vom Typ RG 58 bzw. Ecoflex® 10.	49
8.2	Temperatureinfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Koaxialkabel.	50
8.3	Temperatureinfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Mikrowellen im Koaxialkabel. . .	51
8.4	Referenzmessungen während einer Kalibrierung.	52
8.5	Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung I.	55
8.6	Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung II.	56
8.7	Einfluss der Sendeleistung auf die Phasenmessung im Horizont.	56
8.8	Messrauschen des Netzwerkanalysators.	58
8.9	Autokorrelationsfunktion zur Beurteilung der Erhaltungsneigung der Phasenmessung.	59
8.10	Bestimmung der Auswirkung der Kabelverbindung auf die Messgenauigkeit.	60
8.11	Analyse des Phasenmessrauschen nach Abspaltung des linearen Trends.	61
8.12	Messrauschen des Systems - Trimble Zephyr Geodetic - Zenit.	62
8.13	Messrauschen des Systems - Trimble Zephyr Geodetic - Horizont.	62
8.14	Richtungsabhängige Standardabweichungen der Einzelmessung.	63
8.15	Oberbau des Antennendrehstandes.	65
8.16	Beurteilung der Positioniergenauigkeit mit Hilfe von Tachymetermessungen.	65
8.17	Einfluss der Positioniergenauigkeit auf die Abtastung richtungsabhängiger Phasenvariationen. .	66
8.18	Auswirkung der Positioniergenauigkeit - Anteil des mittleren Phasenzentrums.	67
8.19	Elevationsabhängige Phasenvariationen am Beispiel eine Leica AR25 Antenne (L1).	68

8.20 Einfluss der Ausrichtung der GNSS-Antenne zum Sender.	69
8.21 Antennenausrichtung zur Ermittlung der Anfangsorientierung (Elevation).	71
8.22 Azimutachse des Drehstandes mit Hohlwelle zur Kabeldurchführung.	71
8.23 Einfluss der Kabelbewegung auf die Phasenmessung.	72
8.24 Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 1).	75
8.25 Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 2).	76
8.26 Untersuchung zur Richtigkeit der Phasenänderung (Antenne 3).	76
8.27 Distanzstück zur Veränderung des Abstands zw. Sender und GNSS-Antenne.	78
8.28 Vergleich von Phasen- und Streckenmessung zur Ableitung der Phasenmessgenauigkeit. . . .	79
9.1 Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen.	81
9.2 Histogramm der Differenzen zwischen zwei Wiederholungsmessungen.	81
9.3 Konzept der Berechnung von Null-Basislinien.	83
9.4 Abschätzung der Auswirkung von Kalibrierabweichungen auf die Positionsbestimmung. . . .	84
9.5 Durchlasscharakteristik einer Trimble Zephyr Geodetic Antenne.	86
9.6 Differenzen des Antennenpatterns bei Nutzung zweier unterschiedlich optimierter Sender. . .	87
9.7 Ableitung der Fernfeldbedingung aus der Geometrie der Strahlausbreitung.	88
9.8 Differenz zw. zwei Kalibrierungen mit unterschiedlichen Messabständen.	90
10.1 Kalibrierung einer GNSS-Antenne unter Berücksichtigung von Nahfeldkomponenten.	93
10.2 Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Kabelanordnung auf die Kalibrierung.	93
10.3 Nahfeldeffekte aufgrund der Anordnung des Antennenkabels.	94
10.4 Abschätzung des Kabeinflusses auf die Positionsbestimmung.	95
10.5 Kalibriervarianten zur Untersuchung des Einflusses einer Metallplatte auf die Kalibrierung. .	95
10.6 Phasenpattern im Falle einer Kalibrierung mit montierter Metallplatte.	96
10.7 Phasenpattern der Antenne mit einer an ihrer Unterseite montierten Metallplatte.	96
10.8 Phasenpattern der Antenne ohne montierter Metallplatte.	97
10.9 Auswirkung einer unterschiedlich montierten Metallplatte auf die Positionsbestimmung. . . .	97
10.10 Auswirkung einer unter der Antenne montierten Metallplatte auf die Positionsbestimmung. .	98
11.1 Ringversuch - berücksichtigte Antennen.	100

11.2 Abweichungen zw. Kalibrierverfahren (L1).	100
11.3 Verteilung der Kalibrierabweichungen (L1, Leica AR25).	101
11.4 Verteilung der Kalibrierabweichungen (L2, Leica AR25).	101
11.5 L1-Null-Basislinie (IfE vs. IGG): Auswirkung der Kalibrierabweichung auf die Position.	102
11.6 L0-Null-Basislinie (IfE vs. IGG): Auswirkung der Kalibrierabweichung auf die Position.	103
11.7 Verteilung der Kalibrierabweichungen (Leica AT504GG).	104
11.8 Verteilung der Kalibrierabweichungen (Trimble Zephyr Geodetic 2).	104
11.9 Anordnung der Pfeiler der EDM-Prüfstrecke.	105
11.10 Bezugspunkt der Antennenhöhenbestimmung.	106
11.11 Pfeiler und Antennenmontierung.	107
11.12 Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L1-Lösung).	108
11.13 Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L2-Lösung).	109
11.14 Ergebnisse des Vergleichs der GPS-Höhendifferenzen mit denen des Nivellements (L0-Lösung).	110
11.15 Darstellung des Höhenvergleichs für alle Basislinien der Session 2 (Frequenz L2).	110
11.16 Darstellung des Höhenvergleichs für alle Basislinien der Session 4 (Frequenz L2).	111
12.1 Frequenzabhängige PCO-Variationen (Leica AT504GG Antenne).	114
12.2 Frequenzabhängige Phasenvariationen innerhalb des GLONASS-R01-Bandes.	115
12.3 Einfluss der Frequenzabhängigkeit des Phasenpatterns innerhalb des GLONASS-Bandes.	116
12.4 Frequenzabhängige PCO-Variationen (Leica AR25).	116
12.5 Frequenzabhängige Phasenvariationen (Leica AR25).	117
12.6 Richtungsabhängigkeit des Wirkungsgrads einer Leica AT504GG Antenne (L1).	118
12.7 Reduktion der SNR Daten zur Aufdeckung von Mehrwegeeffekten.	119
12.8 Ergebnis der SNR-basierten Berechnung von Trägerphasenkorrekturen.	120

Tabellenverzeichnis

3.1	GPS: Codesignale und Trägerwellen.	7
3.2	GPS Phasenmessgenauigkeit.	11
3.3	Entfernungsmessgenauigkeit und geforderte Kalibrierengenauigkeit (L1).	13
3.4	Einfluss der Kalibrierengenauigkeit auf die Positionsbestimmung.	15
4.1	Validierung der Feldverfahren: GPS-Höhendifferenzen von den Sollhöhendifferenzen.	16
7.1	Reflexionsdämpfung der Mikrowellenabsorber.	46
8.1	Anforderungen an die Stabilität der klimatischen Bedingungen während der Kalibrierung. . .	54
8.2	optimale Sendeleistung und Signaldämpfung am Beispiel einiger Antennen (L1).	57
8.3	Phasenmessgenauigkeit unterschiedlicher Antennen	63
8.4	Einfluss der Antennenausrichtung auf die Phasenmessung.	70

Literatur

- Alaydrus, M. (2001): *Hybridmethode zur Lösung komplexer elektromagnetischer Feldprobleme: Kombination der Finite-Elemente-Methode, eines Integralgleichungsverfahrens und der Vereinheitlichten Geometrischen Beugungstheorie*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2001.
- Axelrad, P.; C.J. Comp, P.F. Macdoran (1996): *SNR-based multipath error correction for GPS differential phase*. In: Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 2.
- Balanis, C.A. (2005): *Antenna Theory*. 3. Auflage, John Wiley and Sons Verlag, New York.
- Bansal, R. (1999): *The far field: how far is far enough?*. In: Applied Microwave and Wireless, Nov. 1999, S. 58-60.
- Becker, M.; M. Kirchner; P. Zeimet (2004): *Site and equipment calibration for GPS observation facilities in the CERGOP-2/Environment project*. Proceedings 3rd CERGOP-2 Conference, Sofia, 30. Sep. - 1. Oct. 2004, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, ISSN 0867-3179, No. 4 (71).
- Bevis, M.; S. Businger; S. Chiswel; T.A. Herring; R.A. Anthes; C. Rocken; R.H. Ware (1994): *GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water*. In: Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, S. 379-386.
- Breuer, B.; J. Campbell; B. Görres; J. Hawig, R. Wohlleben (1995): *Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen*. In: Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), S. 49-59.
- Bilich, A., K.M. Larson, P. Axelrad (2004): *Observations of Signal-to-Noise Ratios (SNR) at Geodetic GPS site CASA: Implications for Phase Multipath*. Proceedings of the Centre for European Geodynamics and Seismology, Vol. 23, S. 77-83.
- Bilich, A., K.M. Larson (2007): *Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ration (SNR)*. In: Radio Science, Vol. 42, No. 2.
- Bilich, A.; K.M. Larson; P. Axelrad (2008): *Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Bolivia*. In: Journal of Geophysical Research, Vol.113.
- 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.
- Davies, K. (1990): *Ionospheric Radio*. In: IEE Electromagnetic Waves Series, Institution of Engineering and Technology, Vol. 31.
- Dilßner, F. (2007): *Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 271, 2007.
- DIN 1319 Teil 3: *Grundbegriffe der Meßtechnik*, Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- DIN 55350 Teil 13: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik*, Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- Eissfeller, B. (1997): *Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger*. In: Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München., Heft 55, 1997.
- Feldmann-Westendorff, U. (2009): *Von der See bis zu den Alpen: Die GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006-2011*. In: DVW Schriftenreihe, Band 57, Wießner Verlag, S. 95-112.
- Frevert, V.; A. Nuckelt, D. Stöcker (2003): *Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen*. DGON-Symposium POSNAV 2003, Schriftenreihe des Geodätischen Instituts der TU Dresden, Heft 3, S. 353-359.
- Geiger, A. (1988): *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr. 43, Zürich, 1988.

- Görres, B. (1996): *Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System*. DGK Reihe C (Dissertationen), Nr. 461, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt.
- Görres, B.; J. Campbell; M. Becker; M. Siemes (2006): *Absolute calibration of GPS antennas: Laboratory results and comparison with field and robot techniques*. GPS Solutions, Vol. 20, S. 136-145, Springer, Berlin.
- Görres, B. (2009): *Aktueller Stand der GNSS-Antennenkalibrierung*. In: DVW Schriftenreihe, Band 57, Wiesner Verlag.
- Hatanaka, Y.; M. Sawada; A. Horita; M. Kusaka (2001): *Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part 1: Measurement of phase characteristics*. Earth Planets Space, Nr. 53, S. 13-21.
- Hatanaka, Y.; M. Sawada; A. Horita; M. Kusaka; J.M. Johnson; C. Rocken (2001): *Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part 1: Evaluation of the phase map by GEONET data*. Earth Planets Space, Nr. 53, S. 23-30.
- Hofmann-Wellenhof, B.; H. Lichtenegger; J. Collins (2001): *GPS Theory and Practise*. Springer-Verlag, Wien.
- Hollis, J.S.; T.J. Lyon; L. Clayton (Hrsg.) (1970): *Microwave Antenna Measurements*. Scientific-Atlantic Inc, Atlanta, USA.
- Howind, J. (2005): *Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen*. Deutsche Geodätische Kommission, DGK C584, München.
- Hu, Y.Y. (1961): *A method of determining phase centers and its application to electromagnetic horns*. Journal of the Franklin Institute, Vol. 27, S. 31-39, 1961.
- Jackson, J.D. (1983): *Klassische Elektrodynamik*. 2. verbesserte Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin.
- Jackson, J.D. (2006): *Klassische Elektrodynamik*. 4. überarbeitete Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin.
- Jakobus, U.; F.M. Landstorfer (1998): *Hybride Kopplung von MoM, PO und UTD zur Analyse hochfrequenter Abstrahlprobleme*. Tagungsband der ITG-Fachtagung vom 21. bis 24. Aug. 1998, München.
- Joeckel, R.; M. Stober (1999): *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. 4. neubearb. und erw. Auflage, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Kaniuth, K.; K. Stuber (2002): *The impact of antenna radomes on height estimates in regional GPS networks*. International Association of Geodesy Symposia 124, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, S. 101-106.
- Keller, J.B. (1957): *Diffraction by an aperture*. Journal of Applied Physics, Vol. 28, S. 426-444.
- Kim, D.; R.B. Langley (2000): *GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues*. Proceedings of the 7th GNSS Workshop - International Symposium on GPS/GNSS, Seoul, Korea.
- Kirchner M.; M. Becker (2005): *The use of signal strength measurements for quality assessments of GPS observations*. Proceedings of the EGU G9 Symposium „Geodetic and Geodynamic Programmes of the CEI“, Wien, 25-30 April 2005, Reports on Geodesy, Warszawa University of Technology, No. 2 (73).
- Klein, G.; M. Klette (2005): *Monitoring der SAPOS Stationen in Bayern*. Mitteilungen des DVW Bayern, 03/2005, S. 401-424.
- Kraus, J.D. (1947): *Helical Beam Antenna*. Electronics, Vol.20, S. 109-111.
- Kraus, J.D.; (1950): *Antennas*. Mc Graw Hill Verlag, New York.
- Kraus, J.D.; R.J. Marhefka (2003): *Antennas: For all Applications*. 3. Auflage, Mc Graw Hill Verlag, New York.
- Leick, A. (1995): *GPS Satellite Surveying*. 2. Auflage, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Liebsch G.; U. Schirmer; J. Ihde; H. Denker; J. Müller (2006): *Quasigeoidbestimmung für Deutschland*. In: DVW-Schriftenreihe, No. 49, S. 127-146, 2006.

- Mader, G.L. (1999): *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*. GPS Solutions, Vol. 3, S.50-58.
- Menge, F.; G. Seeber (1999): *Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 310, S. 181-194. München.
- Menge, F. (2003): *Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 247, 2003.
- Meertens, C.; C. Alber, J. Braun, B. Stephens, R. Ware, M. Exner, P. Kolesnikoff (1996): *Field and anechoic chamber tests of GPS antennas*. Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop, S. 107-118.
- Niemeier, W. (2002): *Ausgleichsrechnung*. 1. Auflage, de Gruyter Verlag, Berlin.
- Robinson, D.A.; M. Schaap; S.B. Jones; S.P. Friedman; C.M.K. Gardner (2003): *Considerations for Improving the Accuracy of Permittivity Measurement using Time Domain Reflectometry: Air-Water Calibration, Effects of Cable Length*. Soil Science Society of America Journal. Vol. 67, S. 62-70.
- Rothacher, M.; S. Schaer; L. Mervart; G. Beutler (1995): *Determination of Antenna Phase Center Variations using GPS Data*. Proceedings of the IGS Workshop „Special Topics and New Directions“. Potsdam, Germany.
- Rothacher, M. (2001): *Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations*. In: GPS Solutions, Vol. 4, Nr. 3, S. 55-60.
- Rothammel, K.; A. Krischke (2001): *Rothammels Antennenbuch*. 12. aktualisierte Auflage, DARC Verlag, Baunatal.
- Rüeger, J.M. (2002): *Refractive Index Formulae for Radio Waves*. Proceedings of FIG XXII International Congress 2002, Washington, USA.
- Säily, J.; P. Eskelinen, A.V. Räsänen (2003): *Pilot Signal-Based Real-Time Measurement and Correction of Phase Errors Caused by Microwave Cable Flexing in Planar Near-Field Tests*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 2, S. 195-200.
- Santerre, R. (1991): *Impact of GPS Satellite Sky Distribution*. In: Manuscripta Geodaetica, Vol. 16, S. 28-53.
- Schmid, R.; M. Rothacher; D. Thaller; P. Steigenberger (2005): *Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. Impact on GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna*. In: GPS Solutions. Vol. 9, Nr. 4, S. 283-293.
- Schmitz, M.; G. Wübbena (2007): *Einflüsse auf die GNSS Höhenbestimmung - Grenzen und Chancen*. 5. ascos Anwender- und Kundentreffen, 10. und 11. Mai 2007, Herne.
- Schröder, H. (1968): *Elektrische Nachrichtentechnik*. Band1. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin.
- Schupler, B.R.; T.A. Clark (1991): *How different Antennas affect the GPS observable*. In: GPS World, Nov/Dez 1991, S. 32-36.
- Schupler, B.R.; R.L. Allshouse; T.A. Clark (1994): *Signal Characteristics of GPS User Antenna*. Preprint of a Paper accepted for Publication in Navigation in Late 1994.
- Schupler, B.R. (2001): *The Response of GPS Antennas - How Design, Environment and Frequency Affect What You See*. In: Phys. Chem. Earth, Vol. 26. NO. 6-8, S. 605-611.
- Schupler, B.R.; T.A. Clark (2001): *Characterizing the Behaviour of Geodetic GPS Antennas*, In: GPS World, Feb. 2001, S. 48-55.
- Seeber, G. (2003): *Satellite Geodesy*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Walter der Gruyter, Berlin.
- Sims, M.L. (1985): *Phase center variation in the geodetic TI4100 GPS receiver system's conical spiral antenna*. Proceedings of 1st Int. Sym. on Positioning with GPS, Rockville, USA, S. 227-244.

- Steigenberger, P.; M. Rothacher.; R. Schmid; A. Rülke; M. Fritsche; R. Dietrich; V. Tesmer: *Effects of different antenna phase center models on GPS-derived reference frames*. In: Drewes, H. (eds.) *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia, Vol. 134, S. 83-88, Springer Verlag.
- Svorčík, V.; O. Ekrt; V. Rybka; J. Lipták; V. Hnatowicz (2000): *Permittivity of polyethylene and polyethyleneterephthalate*. In: *Journal of materials science letters*. Vol. 19., Nr.20, S. 1843-1845.
- Tietze, U.; C. Schenk; E. Gamm (2000): *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Torge, W. (2002): *Geodäsie*. 2. Auflage, Gruyter Verlag, Berlin.
- Tranquilla, J.M.; B.G. Colpitts (1989): *GPS Antenna Design Characteristics for High Precision Applications*. *Proceedings of ASCE Speciality Conference on High Precision Applications*, *Journal of surveying engineering*, Vol. 115, No. 1, S. 2-14.
- Wang, J. (2002): *Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems*. In: *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, No. 1, S. 48-56.
- Wanninger, L.; M. May (2000): *Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations*. *Proceedings of ION GPS 2000*, Salt Lake City.
- Wanninger, L. (2002): *Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennen-kalibrierung*, 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.
- Wanninger, L.; M. Fettke (2008): *GNSS-Antennenwechsel auf den SAPOS-Referenzstationen in Rheinland-Pfalz*. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen ZFV*, 6/2008, S. 375-380.
- Wohlleben, R. (1968): *Strahlungszonen- und Phasenzentrum der zweiarmigen, kegelförmigen logarithmischen Spiralantenne*. Dissertation, Aachen, 1968.
- Wolfsperger, H.A. (2008): *Elektromagnetische Schirmung - Theorie und Praxisbeispiele*. Springer, Berlin.
- Wu, J.T.; S.C. Wu; G.A. Hajj; W.I. Bertiger; S.M. Lichten (1993): *Effects of antenna orientation on GPS carrier phase*. In: *Manuscripta Geodetica*, Vol. 18, S. 91-98.
- Wübbena, G.; F. Menge; M. Schmitz; G. Seeber; C. Völksen (1996): *A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations*. Presented at ION GPS 1996, September, Kansas City, Missouri, USA.
- Wübbena, G.; M. Schmitz; F. Menge; V. Böder; G. Seeber (2000): *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in real-Time*. Presented at ION GPS 2000, September, Salt Lake City, USA.
- Wübbena, G.; G. Schmitz; C. Boettcher; C. Schumann (2006): *Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern*. *Proceedings of the IGS Workshop „Perspectives and Visions for 2010 and beyond“*, May 8-12, 2006, Darmstadt.
- Zeller, W.; A. Franke (1977): *Das physikalische Rüstzeug des Ingenieurs*. 11. verbesserte Auflage, Technik-Tabellen-Verlag Fikentscher und Co, Darmstadt.
- Zeimetz, P.; H. Kuhlmann (2006): *Systematic effects in absolute chamber calibration of GPS antennas*, In: *Geomatica*, 60/3, S. 267-274, Canadian Institute of Geomatics.
- Zeimetz, P.; H. Kuhlmann (2008): *On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber*. *Proceedings of the FIG Working Week*, 14.-19. Juni 2008, Stockholm, Schweden.
- Zeimetz, P.; H. Kuhlmann (2010): *Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS Measurements*. Accepted for presentation: *Proceedings of the FIG Working Week*, 11.-16. April 2010, Sydney, Australia.
- Zinke, O.; Brunswig, H. (1990): *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*. 4. neubearb. und erw. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.