Schlussbericht zum BMWI Vorhaben 50 NA 1216

Verbesserte Positionierung und Navigation durch konsistente Multi-GNSS Antennenkorrekturen

Institut für Erdmessung
Leibniz Universität Hannover

Tobias Kersten · Steffen Schön

2014

Institut für Erdmessung
- Positionierung und Navigation -
Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön
Schneiderberg 50 · 30167 Hannover
Tel: 0511 – 762 3397 Fax: 0511 – 762 4006

Leibniz Universität Hannover

Schlussbericht zum Vorhaben Verbesserte Positionierung und Navigation durch konsistente Multi-GNSS Antennenkorrekturen

Tobias Kersten, Steffen Schön

Förderkennzeichen
50 NA 1216

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hannover 2014

Das in diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWI) unter dem Förderkennzeichen 50 NA 1216 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung obliegt dem Autor.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung zum Vorhaben **9**
I.1 Aufgabenstellung 11
I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde 13
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 15
I.4 Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projektes 17
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 21

II Eingehende Darstellungen zum Vorhaben **23**
II.1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen 25
A Entwicklung eines Verfahrens zum adäquaten Vergleich von Kalibrierergebnissen 25
B Einfluss von Phasenzentrumsvariationen und Group Delays auf Positionierung und Navigation 33
B.1 Einfluss von Phasenzentrumsvariationen auf die GNSS-Prozessierung . 33
B.2 Einfluss von Group Delay Variationen auf die codebasierte Navigation 39
B.3 Einfluss von Group Delay Variationen und Phasenzentrumsvariationen auf statische und kinematische Positionierung mit PPP 43
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 53
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 55
II.4 Voraussichtlicher Nutzen - insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes 57
II.5 Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 59
II.6 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens . . . 61
Literatur 62

Abschnitt I

Kurze Darstellung zum Vorhaben

I.1 Aufgabenstellung

Im Vorhaben sollen zwei Hauptziele verfolgt werden: Zum einen werden die Auswirkungen der im Vorhaben 50 NA 0903 gewonnenen neuen Kalibrierwerte der Codephasen-Variationen bzw. Code Group Delays (GDV) auf die GNSS-basierte Positionierung und Navigation untersucht. Zweites Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens zum adäquaten Vergleich von Kalibrierergebnissen der Träger- und Codephasenbeobachtung von Global Navigation Satellite System (GNSS)-Beobachtungen.

Im Vorhaben 50 NA 0903 (Kersten und Schön, 2012c) hat sich gezeigt, dass das derzeit propagierte und angewendete Verfahren zum Vergleich von Antennenkalibrierungen nicht aussagekräftig ist: je nach Darstellung der Korrekturwerte kann eine beliebig gute Übereinstimmung zu Referenzkorrekturen erhalten werden. Mathematisch gesehen ist die Ursache dafür der Rangdefekt der Modellierung der Antennenphasenzentrumsvariationen. Anders ausgedrückt bedeutet dies dass bei der Bestimmung der Korrekturwerte Freiheitsgrade bestehen über die die verschiedenen Kalibriereinrichtungen unterschiedlich verfügen (z.B. wird in Hannover der Korrekturwert in Zenitrichtung zu Null gesetzt, während in Dresden ein gewichtetes Mittel über verschiedene Elevationsbereiche minimiert wird). Auf diese Problematik haben bereits Rothacher et al. (1995) hingewiesen. Im Vorhaben soll in einem ersten Arbeitspaket ein Konzept entwickelt werden, das die Information wie über die Freiheitsgrade verfügt wurde beim Vergleich adäquat berücksichtigt und somit zu belastbaren Vergleichsaussagen führt.

Das zweite Arbeitspaket konzentriert sich auf das Studium der Auswirkungen der im Vorhaben 50NA0903 bestimmten GDV auf die Positionierung und Navigation. In der Literatur liegen nur Aussagen zum Einfluss der Trägerphasenkorrekturen vor. Gewöhnlich werden ausschließlich die Auswirkungen auf die Koordinaten analysiert. Im vorgelegten Vorhaben soll erstmals der gemeinsame Einfluss von Trägerphasenkorrekturen sowie Group Delay Variationen mehrerer GNSS auf die Zielparameter analysiert werden. Neben Koordinaten sollen weitere relevante Zielparameter betrachtet werden. Hierunter fallen auch die Troposphärenparameter im Fall statischer Positionsberechnungen. Ziel ist es anhand typischer Szenarien allgemeine Aussagen über die Größe der GDV-Effekte gerade bei der Kombination von Träger- und Codephasenbeobachtungen abzuleiten.

Zunächst wird der Einfluss der GDV auf präzise Landeanflüge mit hohen Ansprüchen an die Genauigkeit analysiert. Hierzu wird auf Daten zurückgegriffen, die in Flugversuchen gemeinsam mit dem Institut für Flugführung der TU Braunschweig erhoben wurden. Für die verwendeten Aero-Antennen sind dabei zunächst die GDV-Kalibrierwerte zu bestimmen. Ein Vergleich verschiedener Trajektorienauswertungen mit und ohne Berücksichtigung der Kalibrierwerte erlaubt die Abschätzung von minimalen und maximalen Auswirkungen auf die GPS-basierte Flugzeugpositionierung. Erste Studien aus statischen Daten zeigen, dass für P1 Koordinatenvariationen zwischen 0.5 - 1.0 m, für die ionosphärenfreie Linearkombination P3 bis zu 2 m möglich sind.

Als zweites Szenario wird die statische und kinematische Positionierung mit dem Verfahren Precise Point Positioning (PPP) betrachtet. In Erweiterung zu den Szenarien 1 und 2 soll

hier erstmals die Auswirkungen von sowohl GDV als auch Phase Center Correction (PCC) untersucht werden. Es wird erwartet dass die Berücksichtigung von GDV die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten verbessert und damit die Konvergenzzeit der Positionslösung reduziert, was insbesondere für kurze Messzeiten wichtig ist.

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe Positionierung und Navigation am Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover (IfE) ist seit dem Jahr 2006 durch Herrn Prof. Steffen Schön besetzt und zentrale Arbeitsfelder der Arbeitsgruppe sind die

- Empfängertechnologie, Indoor-Navigation und Mehrwegeanalysen
- Entwicklung der Turbulenztheorie zur Erforschung stochastischer Prozesse in der GNSS-Netzauswertung,
- Entwicklungen zum Qualitätsmanagement aktiver Referenzstationsnetze,
- High-rate GNSS und Anwendungen der Flugnavigation
- Analyse des Einflusses hoch-genauer externer Uhren auf die GNSS-Datenauswertung

Durch die interdisziplinär ausgerichtete Arbeitsgruppe bestehen fruchtbare Synergien, die erfolgreich genutzt und nachhaltig erweitert werden.

Zu Beginn des Vorhabens stand ein GNSS-Labor mit aktueller Ausstattung zur Verfügung. Die am IfE entwickelte Software wird auf Grundlage eines server-orientierten Subversionsmanagements (open source Produkte) fortgeführt, um die Quellcodes der individuellen Applikationen zu harmonisieren und nachhaltig weiterentwickeln zu können.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Durchführung des Vorhabens konnte ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (Dipl.-Ing. Tobias Kersten) permanent eingesetzt werden, der teilweise durch studentische Hilfskräfte in seiner Arbeit unterstützt wurde.

Das Vorhaben ist in 2 Arbeitspakete (A - B) untergliedert. Bei der Bearbeitung des Themenkomplexes hat es sich als günstig ergeben, zunächst mit dem Arbeitspaket B zu beginnen.

Der Inhalt des Arbeitspaketes A befasste sich mit der *Entwicklung eines Verfahrens zum adäquaten Vergleich von Kalibrierergebnissen* vor Allem in theoretischer Hinsicht.

Im Arbeitspaket B wurden Studien zum Einfluss der Phasenzentrumsvariationen und der Group Delay Variationen (GDV) auf die Positionierung und Navigation durchgeführt.

Im Arbeitspaket B1 wurde zunächst der *Einfluss von Phasenzentrumsvariationen auf die GNSS-Positionierung* untersucht. Hauptschwerpunkt war dabei die Umsetzung der Ansätze in praktische Analysen und deren Evaluation und Validierung anhand konkreter und realer Datensätze. Es konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Modellierungen innerhalb von GNSS-Software-Applikationen teilweise erhebliche Unterschiede auf die geschätzten Parameter (Position, Empfängeruhrfehler, troposphärische Verzögerung) haben können. Die Analysen wurden mit diversen manipulierten PCC-Pattern durchgeführt. Zusätzlich konnte eine siderische Reproduzierbarkeit gewährleistet werden.

Innerhalb des Arbeitspaketes B2 *Einfluss von Group Delay Variationen auf die Code-basierte Navigation* konnte das Verständnis für die teilweise deutlich zu erwartenden GDV-Einflüsse sowie deren Signifikanz auf die Positionierung und Navigation für die Anwendungsfälle präziser Landeanflüge und Fahrzeugtrajektorien vertieft und nachhaltig verbessert werden.

Im abschließenden Arbeitspaket B3 (*Einfluss von Group Delay Variationen und Phasenzentrumsvariationen auf statische und kinematische Positionierung mit PPP*) ist der Fokus auf die Studien zur Analyse des Einflusses auf die statische Positionierung gelegt. Zusätzlich wurde auch ein sehr wichtiger Aspekt, der im Zuge der Mehrdeutigkeitsschätzung mit kombinierten Träger- und Codephasenbeobachtungen einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der trägerphasenbasierten Positionslösung und speziell innerhalb der PPP-Prozessierung ausüben kann, betrachtet.

I.4 Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projektes

In Ergänzung zu Kersten und Schön (2012c) sind folgende neuen Entwicklungen und Arbeiten ergänzend zu nennen.

Die GNSS-Antennenkalibrierung ist ein hoch aktuelles Forschungsgebiet geblieben. So sind in den letzten Jahren neue Antennenkalibriereinrichtungen hinzugekommen. In Zusammenarbeit mit der Bezirksregierung Köln (vormals Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen) wurde von der Universität Bonn eine echolose Kammer zur Antennenkalibrierung installiert (Zeimetz, 2010, und Referenzen darin). Darin können Korrekturen für alle Frequenzen bestimmt werden; eine Untersuchung der Code-Beobachtungen ist jedoch nicht möglich, da mit der unmodellierten Trägerwelle gearbeitet wird. Der National Geodetic Survey (NGS) hat ein Feldverfahren zur Antennenkalibrierung mit einem Roboter ähnlich dem Hannoverschen Verfahren umgesetzt, z.B. Bilich und Mader (2010); Mader et al. (2012). Allerdings hat der verwendete Roboter nur zwei Freiheitsgrade, so dass die Antennen nicht um einen raumfesten Punkt gedreht werden können. Bei den Diskussionen über die neuen Kalibrierergebnisse hat es sich als problematisch erwiesen, dass keine adäquate Methodik zum Vergleich von Antennenkalibierungen existiert, vgl. Mader et al. (2012); Rothacher et al. (1995a).

Die Berücksichtigung von Antennenphasenzentumskorrekturen auf Satelliten spielt eine wichtige Rolle für die präzise Positionierung von LEO Satelliten oder die Navigation bei Formationsflügen. Beispiele sind die Schwerefeldmissionen (z.B. Jäggi et al. (2009) für das GRACE-Satellitenpaar oder Bock et al. (2011) für GOCE) oder Fernerkundungssatelliten (TaDEM-X/TerraSAR, Montenbruck et al. (2009)).

Die Auswirkung auf die Stationskoordinaten regionaler wie globaler Netze insbesondere bei der Anwendung von GPS-GLONASS Kombinationen ist eine wichtige offene Fragestellung. Seit 17.04.2011 sind mit der Herausgabe des ITRF2008 und dem IGS Referenzrahmen IGS08 nun GPS- und GLONASS-Antennenkalibrierungen im offiziellen ANTEX File des IGS (igs08.atx) verfügbar. Rebischung et al. (2012) zeigen dass das Hinzunehmen von GLONASS-Kalibrierungen zu einem systematischen Versatz in den Koordinaten (bis zu einem Zentimeter) und somit zu kritischen Einbußen bei der Stabilität der für alle Positionierungs- und Navigationsaufgaben wichtigen Referenzrahmen ITRF und IGS08 führt. Diese Problematik wird sich zukünftig durch die hinzukommenden GNSS (Galileo, Beidou) weiter verstärken.

Dach et al. (2011) analysieren gemeinsame GPS und GLONASS Auswertungen und zeigen dass Koordinatenvariationen bis zu 1 cm auftreten, Teile der Phasenzentrumsdifferenzen aber in einem sogenannten Inter-System-Bias abgefangen werden. Am Beispiel der Fundamentalstation Wettzell verweisen Steigenberger et al. (2011) auf Diskrepanzen zwischen aus GPS abgeleiteten Koordinaten im Vergleich zu hochpräzisen terrestrisch bestimmten Koordinaten. Ein Teil der Diskrepanzen kann durch Verwendung der korrekten Phasenzentrumsvariationen erklärt werden; die restlichen Effekte sind noch ungeklärt und ggf. auf die spezielle

Parametrisierung und die hohen mathematischen Korrelationen zwischen den Parametern der Auswertung zurückführbar.

Untersuchungen des Einflusses der PCC auf aus GNSS-Beobachtungen abgeleitete Wasserdampf-Werte für globale Wettermodelle sind durch de Galisteo et al. (2011) durchgeführt worden. In ihrer Publikation finden sie, dass durch die korrekte Anwendung von absoluten PCC die systematischen Abweichungen von 2-3 mm PWV zu den anderen verwendeten Techniken wie z.B. Sounding und Sun Photometers verschwinden und somit konsistente Aussagen getroffen werden können.

Weitere Themen im Umfeld der Antennenkalibrierung sind die Berücksichtigung sogenannter Nahfeldeffekte, d.h. die Beeinflussung der Antennencharakteristik durch die direkte Umgebung wie Dreifuss, Unterbau, Montierung, etc. Hierzu wurden in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen beispielsweise im Rahmen der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (2008-2012) durchgeführt. Ein Ansatz beruht auf einer Antennenkalibrierung mit und ohne Nahfeldunterbau, vgl. z.B. Dilssner et al. (2008), Kersten und Schön (2009) oder Zeimetz (2010). Die Effekte können mehrere Zentimeter betragen. In Hirth et al. (2011) wurden Nahfeldeffekte teilweise erfolgreich kalibriert und Übereinstimmung zwischen aus GNSS bestimmten Höhendifferenzen und Präzisionsnivellements auf dem mm Niveau erreicht. Wübbena et al. (2010) propagieren die Nutzung mehrerer kalibrierter Hilfsstationen um eine Referenzstation um dort Nahfeldeffekte numerisch zu bestimmen. Aktuell ist zum Beispiel durch Görres (2010) dokumentiert, dass das Nahfeldproblem von GNSS-Empfangsantennen derzeit eine ungelöste Fragestellung und ein offener Forschungsbereich ist.

Um die komplexe Thematik der Antennenkalibrierung und Anwendung von Korrekturen für den Nutzer bei praktischen Vermessungen und Navigationsaufgaben besser zugänglich zu machen, wurde ein Merkblatt der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement für die Antennenkalibrierung herausgegeben (Zeimetz et al., 2011) in das die Arbeiten des Vorhabens 50 NA 0903 direkt eingeflossen sind.

Am Institut für Erdmessung liegen langjährige Erfahrungen im Bereich der hochpräzisen GNSS-Auswertung und Korrektur systematischer Effekte vor. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich auf die Beschreibung von Mehrwegeeffekten mittels Ray-Tracing und Software-Empfängern im Rahmen des Vorhabens BERTA. Erste Ergebnisse zeigen die Bedeutung der Diffraktionseffekte, Liso et al. (2011). Untersuchungen zur atmosphärischen Turbulenz werden in Rahmen von DFG-Projekten durchgeführt (Vennebusch et al., 2011). In Kube et al. (2012) wurde ein »virtueller Empfänger« entwickelt, der die GNSS-Signalkontinuität bei präzisen gekurvten Landeanflügen garantiert und GNSS sowie Pseudolite-Signale beispielsweise um den Forschungsflughafen Braunschweig kombiniert. Aktuelle Arbeiten im Rahmen des Exzellenzclusters QUEST (Quantum Engineering and Space Time Research) zielen auf die Untersuchung des Einflusses hoch-genauer Uhren auf die Positionierung und Navigation mit GNSS. Neben umfangreichen Untersuchungen zum Empfängerverhalten bei Verwendung externer Uhren konnte gezeigt werden, dass sich bei der kinematischen Positionierung die Höhengenauigkeit (RMS) um 70% steigern lässt, wenn externe hoch genaue Uhren verwendet werden, Weinbach und Schön (2011).

Im Vorhaben 50 NA 0903 stand die Bestimmung von Antennenkalibrierwerten für Multi-GNSS im Vordergrund. Es konnten Algorithmen zur konsistenten Betrachtung von Multi-GNSS (GPS + GLONASS) und Mehrfrequenzkalibrierungen entwickelt, erfolgreich umgesetzt und getestet werden, vgl. Kersten und Schön (2012c) sowie die zahlreichen internen Technischen Berichte. In verschiedenen Konferenzbeiträgen wurden die einzelnen Aspekte

dem Fachpublikum vorgestellt und diskutiert wie beispielsweise der Einfluss der Empfänger bzw. Tracking Loops in Kersten und Schön (2010b) oder der Einfluss der Uhrmodellierung und Beobachtungsgewichtung, (Kersten und Schön, 2010e,d).

Darüber hinaus konnte erfolgreich ein Konzept der Kalibrierung von antennenspezifischen Verzögerungen für die Code-Beobachtung entwickelt und umgesetzt sowie Testkalibrierungen durchgeführt werden. Die Auswirkungen von Kalibrierergebnissen auf die Zeit- und Frequenzübertragung wurden erstmals auf der Precise Time and Time Interval PTTI Konferenz (Kersten und Schön, 2011a) bzw. auf der European Frequency and Time Forum (EFTF) (Kersten und Schön, 2012a) vorgestellt. Diese neuen Ergebnisse sind auf große Resonanz gestoßen in der Wissenschaft wie auch von Herstellerseite.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die bisherige intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen dem IfE und der Arbeitsgruppe von Prof. Neumann (Geodätisches Institut Hannover (GIH)) konnte im Rahmen dieses Vorhabens fortgesetzt werden. Die zu lösenden Fragestellungen befassten sich mit den Themen der Ausgleichungsrechnung, wie z.B. der Schätzbarkeit und Trennbarkeit von Parametern, als auch ingenieurgeodätischer Fragestellungen zur Abschätzung von stochastischen Prozessen sowohl innerhalb der GDV-Kalibrierung als auch der GNSS-Prozessierung.

Das IfE pflegt bei Fragen hinsichtlich zur Zeit- und Frequenzübertragung sowie zur apparativen Unterstützung hinsichtlich der Ausstattung mit externen Frequenznormalen einen regen Kontakt mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), speziell zu Herrn Dr. Peick und Dr. Bauch.

Des weiteren besteht ein Austausch zu Fragen der Antennenkalibrierung mit Prof. Dr.-Ing. Wanninger (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. Becker (Darmstadt) und Prof. Dr.-Ing. Kuhlmann (Uni Bonn), Dr.-Ing. Martin Schmitz (Geo++®) sowie im Rahmen des International GNSS Service (IGS) zum Koordinator der IGS Antenna Working Group (Dr.-Ing. Schmid, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)), den Kollegen beim National Geodetic Service (NGS) (Vereinigte Staaten von Amerika, Dr. Mader und Dr. Bilich) sowie den Kollegen der beim Geoscience Australia (GA) (Moore und Hill).

Durch Kooperationen mit der Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (LGLN) sind dem IfE die aktuellen Belange und praktischen Notwendigkeiten der Landesvermessung und des SAPOS Netzes vertraut.

Abschnitt II

Eingehende Darstellungen zum Vorhaben

II.1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

A Entwicklung eines Verfahrens zum adäquaten Vergleich von Kalibrierergebnissen

Motivation

Aktuell werden dem IGS durch 5 aktive GNSS-Antennenkalibrierinstitute die PCC für die Trägerphase bereitgestellt. Die Antennenkalibrierwerte werden im Antenna Exchange Format (ANTEX)-Format (Rothacher und Schmid, 2010) den Datenanalysezentren und internationalen Nutzern bereitgestellt. Verschiedene Ansätze zur Modellierung der GNSS-Antennenkalibrierwerte existieren und reichen von GNSS-Antennenkalibrierungen in echolosen Kammern (Zeimetz, 2010) bis hin zu Feldverfahren mit einem präzisen Roboter, (Seeber und Böder, 2002; Mader et al., 2012; Hill et al., 2013). Zusätzlich unterscheiden sich die Verfahren durch die Modellierung der Beobachtungen. In der Kammer werden die PCC durch einen Netzwerkanalysator bestimmt. Im Feldverfahren werden hingegen Satellitenmessungen über der Antennenhemisphäre verwendet und die Form des PCC-Patterns durch Kugelfunktionen approximiert.

Die verschiedenen Modellierungen machen den Vergleich der Ergebnisse schwierig, (Mader, 2011; Aerts, 2011) oder führen sogar in der Netzausgleichung zu nachweisbaren Unterschieden, (Baire et al., 2012). Ein eindeutiges und adäquates Konzept zum Vergleich der Antennenkalibrierwerte ist notwendig, um die präzisen Informationen der GNSS-Trägerphasenmessung optimal ausnutzen zu können.

Die PCC sind eine lineare Zusammenfassung der Offset des Antennen-Phasenzentrums (PCO) und PCV Komponenten,

$$\begin{aligned} PCC(\phi, e) &= -\mathbf{s^T} \cdot \mathbf{PCO} + PCV(\phi, e) + r \\ &= -\begin{bmatrix} \cos\phi\cos e \\ \sin\phi\cos e \\ \sin e \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} + PCV(\phi, e) + r \end{aligned} \tag{1}$$

die das Trägerphasen-Empfangsverhalten von GNSS-Antennen in Abhängigkeit der Horizontal- und Elevationswinkel (ϕ, e) der Sichtlinie zum Satelliten mit dem Richtungsvektor $\mathbf{s^T}$ eindeutig beschreiben. Der Parameter r ist ein unbekannter aber konstanter Wert, der in keinem der Kalibrieransätze bestimmt werden kann. Innerhalb des Feldverfahrens geht dieser Fehler in der Schätzung des Uhrfehlers auf und bei der Kammerkalibrierung ist dieser Parameter nicht von den internen Delays der Messeinrichtung selbst zu trennen. Die genaue

Kenntnis von r ist aber auch von keinem besonderen Interesse, da dieser innerhalb der GNSS-Positionierung durch seinen konstanten Charakter in der Schätzung aller konstanten Anteile, vorrangig dem Uhrfehler, aufgeht. Allerdings spielt er in der Zeit- und Frequenzübertragung eine wesentliche Rolle.

Entwicklung der Phasen-Variationen über Kugelfunktionen

Ziel ist es, ein System von Funktionen zu finden, um die Variationen, oder auch Distanzfehlerfunktion, wie sie bei Geiger (1988); Rothacher et al. (1995a) bezeichnet werden, auf der Träger- und der Codephase physikalisch sinnvoll zu modellieren. Daher ist die Parametrisierung des GNSS-Antennenpatterns anhand zweier Funktionen sinnvoll, welche die Abhängigkeiten in Azimut ($g_f(\varphi)$) und Elevation ($h_f(e)$) des eintreffenden Satellitensignals beschreiben. Somit kommen grundsätzlich folgende Modellierungen als Kombinationsmöglichkeiten in Frage, (Staats, 2005, S. 78ff):

- $g_f(\varphi)$: Cosinus- ($\cos kx$) und Sinus ($\sin kx$) Funktionen, bzw. komplexwertig (e^{ikx});
- $h_f(e)$: zugeordnete Legendreschen Funktionen (Kugelfunktionen) 1. Art ($P_n^m(\sin e)$).

Die Herleitung der Kugelfunktionen bzw. zugeordneten Legendrefunktionen als partikuläre Lösungen der Legendreschen Differentialgleichung sind in der Literatur bereits ausführlich diskutiert, (Hobson, 1931; Aleksandrov et al., 1999; Torge und Müller, 2012) bzw. Bronstein et al. (2005, S. 561f).

Aufgrund der Tatsache, dass die Koeffizienten der Kugelfunktionen für wachsendes n sehr schnell sehr groß werden können (Hobson, 1931; Hofmann-Wellenhof und Moritz, 2006), und die Berechnung aufgrund der großen Werte für $C_n^m(\varphi, e)$ und $S_n^m(\varphi, e)$ instabil wird, ist anzuraten, vollständig normierte Kugelflächenfunktionen zu nutzen, um die Handhabung der sphärisch harmonischen Funktionen zu stabilisieren, obgleich (Geiger, 1988, S. 13) innerhalb seiner Untersuchungen zu dem Schluss kommt, dass "*[...] weder auf die Orthonormierung noch auf die Harmonizität, noch auf die Vollständigkeit der Basisfunktionen zu achten [...]*", sei. Die Kugelfunktionen werden mit einem konstanten Normalisierungsfaktor N_n^m multipliziert, um auf die vollständig normalisierten Kugelfunktionen $\bar{C}_n^m(\varphi, e)$ und $\bar{S}_n^m(\varphi, e)$ zu gelangen,

$$\begin{aligned} \bar{C}_n(\varphi, e) &= \sqrt{2n+1}\ \bar{C}_n(\varphi, e) \equiv \sqrt{2n+1}\ P_n(\sin e), \\ \begin{Bmatrix} \bar{C}_n^m(\varphi, e) \\ \bar{S}_n^m(\varphi, e) \end{Bmatrix} &= \sqrt{2(2n+1)\frac{(n-m)!}{(n+m)!}}\ \begin{Bmatrix} \bar{C}_n^m(\varphi, e) \\ \bar{S}_n^m(\varphi, e) \end{Bmatrix} \quad (\mathrm{m} \neq 0). \end{aligned} \tag{2}$$

Die gesuchte Fehlerfunktion des GNSS-Antennenpattern lässt sich nach Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen durch

$$\begin{Bmatrix} GDV_f(\varphi, e) \\ PCC_f(\varphi, e) \end{Bmatrix} = \bar{A}_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} \left\{ \bar{A}_n^m\, \bar{C}_n^m(\varphi, e) + \bar{B}_n^m\, \bar{S}_n^m(\varphi, e) \right\} \tag{3}$$

pro Frequenz f angeben. Ziel ist es, aus dieser Formulierung mit Hilfe der GNSS-Beobachtungen einen konsistenten und physikalisch sinnvollen Satz von Kugelfunktionskoeffizienten A_n^m und B_n^m nach entsprechendem Grad n und Ordnung m der Entwicklung zu schätzen, (Kersten und Schön, 2012c).

Für die korrekte Parametrisierung der Beobachtungen durch SH(m,n)-Entwicklungen werden zusätzlich Forderungen an die Beobachtungen gestellt, um eine physikalisch sinnvolle

Beschreibung der Realität durch Kugelfunktionen gewährleisten zu können. So müssen die Beobachtungen sowohl homogen über der Antennenhemisphäre als auch stetig und mit ausreichender Dichte vorhanden sein.

Freiheitsgrade der GNSS-Antennenkalibrierwerte

Der Absolutterm $\bar{A}_0$ (m=0, n=0), der durch Gleichung (3) formulierten Variationen ist *nicht* schätzbar. Das bedeutet, dass sowohl die GDV als auch die PCC nur *bis auf einen konstanten Wert* bestimmt werden können. Durch den konstanten Charakter des Terms 0. Ordnung wirkt dieser wie ein zusätzlicher radialer Anteil, der durch seinen konstanten Charakter im Falle einer GNSS-Prozessierung wie ein Uhrfehler behandelt wird. Trotzdem ist der Terminus *absolute Antennenkorrekturen* gerechtfertigt, da sich die geschätzten Antennenparameter *unabhängig* von einer Referenzantenne bestimmen lassen.

Die Träger- und Codephasenvariationen enthalten in dem durch Gleichung (3) eingeführten Modell einen weiteren Freiheitsgrad, über den mit einer Zusatzbedingung verfügt werden muss. Es handelt sich dabei um die Lagerung des abgeleiteten GDV bzw. Variationen des Antennen-Phasenzentrums (PCV)-Patterns. Diese Lagerung ist gleichzusetzen mit der Suche eines *Geodätischen Datums* für dieses Punktfeld. Eine willkürliche Verfügung wird beispielsweise dadurch erreicht, die Variationen im Zenit bzw. am Horizont auf einen festen Wert zu setzen. Gewöhnlich werden im aktuellen Vorgehen Variationen mit der Restriktion

$$\Delta PCV(\varphi, e = 90^\circ) = 0 \qquad \text{bzw.} \qquad \Delta GDV(\varphi, e = 90^\circ) = 0 \tag{4}$$

belegt. Die Notwendigkeit von Beobachtungen unterhalb des Antennenhorizontes mit $e \geq -5^\circ$ zur Stabilisierung der Beobachtungen am Horizont ist bereits in Menge (2003) ausführlich untersucht worden. In dieser Quelle werden Aspekte der optimalen Lagerung speziell diskutiert. Die Frage nach der optimalen Lagerung der $\Delta PCV(\varphi, e)$ anhand der vorhandenen Freiheitsgrade ist aktuell durch Schön und Kersten (2013a) diskutiert. Es kann gezeigt werden, dass sich innerhalb der PPP-Prozessierung verschiedene PCV-Lagerungen unterschiedlich auf die abgeleiteten Parameter auswirken können. Zum einen ist dieser Effekt von der Beobachtungsmodellierung innerhalb der eingesetzten GNSS-Auswertesoftware abhängig, zum anderen treten Effekte zutage, deren Ursache noch nicht eindeutig geklärt sind. Diese werden aktuell durch weitere Forschungsarbeiten im Rahmen einer Masterarbeit, die am Institut betreut wird, analysiert.

Transformationen von GNSS-Antennenkalibrierwerte

Traditionell werden die PCC beliebig in PCV und PCO-Anteile separiert. Eine exakte Trennung bzw. Separation erfolgt jedoch nicht, so dass entweder Anteile des PCO noch im PCV-Pattern vorhanden sein können, dies gilt auch entsprechend umgekehrt, (Menge, 2003; Zeimetz, 2010). Diese Darstellung hat sich im IGS als praktisch erwiesen. Dennoch werden sehr häufig die Antennenpattern fälschlicher Weise direkt mit ihren publizierten PCO-Werten verglichen, unabhängig von den zugeordneten PCVs. Wie bereits bei Rothacher et al. (1995b) und Menge (2003) beschrieben, wird eine konsistente Transformation der Parameter durch

$$\begin{aligned} PCC(\phi, e) &= -\mathbf{s^T PCO_1} + PCV_1(\phi, e) + r_1 && (5)\\ &= -\mathbf{s^T PCO_2} + \underbrace{PCV_1(\phi, e) - \mathbf{s^T}(\mathbf{PCO_1} - \mathbf{PCO_2})}_{} + r_1 && (6)\\ &= -\mathbf{s^T PCO_2} + PCV_2(\phi, e) + r_1. && (7) \end{aligned}$$

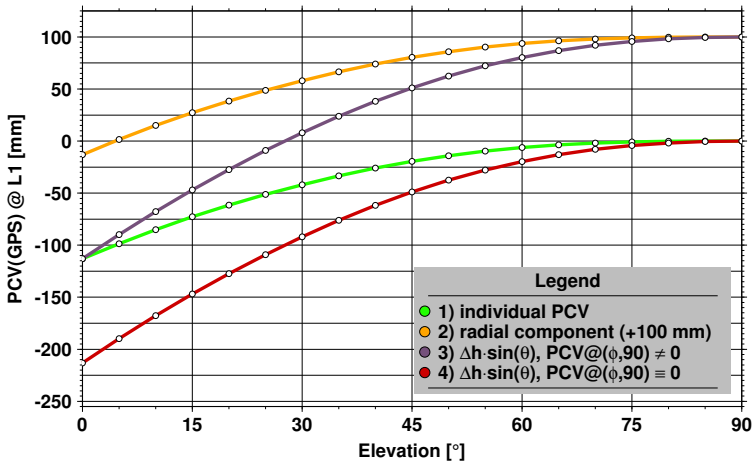


Abbildung II.1.1: Die Transformation des GNSS-Antennenpatterns wird anhand von 4 wesentlichen Schritten durchgeführt.

erreicht. Wie der Gleichung (7) entnommen werden kann, setzt sich $PCV_2(\phi, e)$ nun sowohl aus einem Offset-Anteil $\mathbf{s^T}(\mathbf{PCO_1} - \mathbf{PCO_2})$ und dem variablen Anteil $PCV_1(\phi, e)$ zusammen. Das resultierende PCV-Pattern verfügt demnach sowohl über PCV-Term als auch über einen elevationsabhängigen ΔPCO-Term.

Die vier wichtigsten Schritte einer korrekten Transformation sind der Abbildung II.1.1 exemplarisch für die Frequenz GPS L_1 zu entnehmen.

individuelles PCC Ausgehend vom ursprünglichen PCC-Pattern wird mit einem Offset von +100 mm in der Höhenkomponente das PCC-Pattern auf ein neuen PCO transformiert.

radiale Komponente Zunächst werden alle PCV-Werte mit einer radialen Komponente von +100 mm addiert.

elevationsabhängige Höheninformation Der relative Höhenunterschied von +100 mm ist über $\Delta h \sin e$ auf den Elevationsbereich zu verteilen, um die PCC-Informationen konsistent zu halten. Das Pattern befindet sich nun im Zenit auf einem Niveau von +100 mm.

Zentrierung im Zenit Die Zentrierung im Zenit zu einem festen Wert (gewöhnlich werden die Werte zu Null gesetzt) wird durch abermaliges Anbringen einer radialen Komponente erzeugt. In diesem Fall ist der relative Höhenunterschied der PCC bei Elevation $e = 90°$ abzulesen.

Konzept zum Vergleich von PCC

Für den Vergleich verschiedener PCC ist eine konsistente Fortführung von PCO und zugehörigen PCV Voraussetzung. Folgende Arbeitsschritte für den richtigen Vergleich sind unbedingt einzuhalten:

1. Die zu vergleichenden PCC-Pattern unterschiedlicher Antennen gemäß Gleichung (7) auf einen beliebigen aber gemeinsamen PCO transformieren.

2. Der Rangdefekt des PCV-Patterns ist gleichfalls mit einem beliebigen, aber identischen Verfahren zu reduzieren. Hierzu sollte entweder die Zenit-Bedingung nach Gleichung (4) verwendet werden, oder das PCV-Pattern auf den Mittelwert reduziert werden. Es ist an dieser Stelle besonders hervorzuheben, dass sich die Wahl einer geeigneten Methode zur Reduktion des Rangdefektes an die entsprechende Reduktion des Rangdefektes des originalen PCC-Patterns orientieren muss.

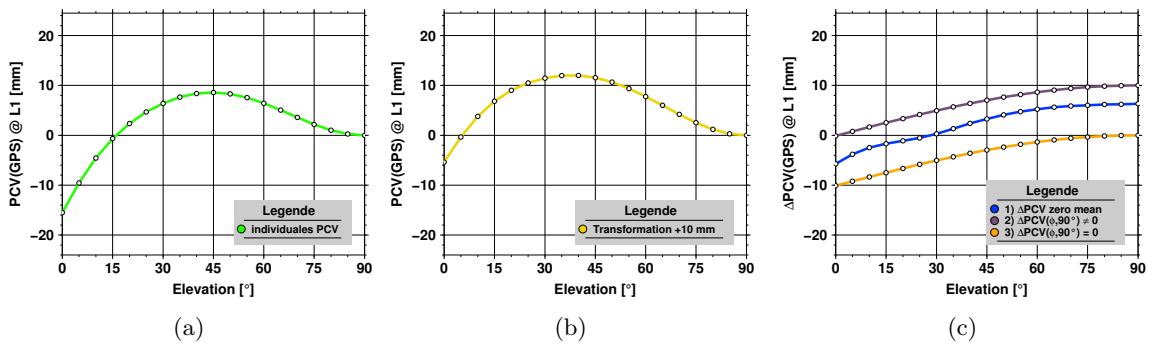
3. Bildung von PCV-Differenzen (ΔPCV) und direkter Vergleich der Pattern.

Wie noch gezeigt wird, führt der direkte Vergleich der PCC-Pattern oft zu Missverständnissen. Eine Aussage über den Einfluss der Differenzen im PCC-Pattern muss daher auch für die abgeleiteten Parameter im Parameterraum durchgeführt werden, hierunter zählen sowohl die Koordinaten, die troposphärische Verzögerung als auch der geschätzte Empfängeruhrfehler. Denn durch individuelle Parametrisierungen innerhalb der zur Berechnung verwendeten Softwarepakete kann ebenfalls ein nachweislicher Effekt hervorgerufen werden. Um die Software-bezogenen Effekte von den ΔPCC zu trennen, werden zusätzliche Analysen auf der Parameterebene diskutiert.

Die Vergleiche des Einflusses der PCC-Parameter wird auf Grundlage der PPP-Datenverarbeitung (Zumberge et al., 1997) untersucht. Dies vor dem Hintergrund, dass die Methode der PPP-Prozessierung eine sehr weite Anwendung in der Geodäsie, aber auch in der Zeit- und Frequenzübertragung mit Trägerphasen gefunden hat, (Dach et al., 2005; Defraigne und Baire, 2010; Lahaye et al., 2011).

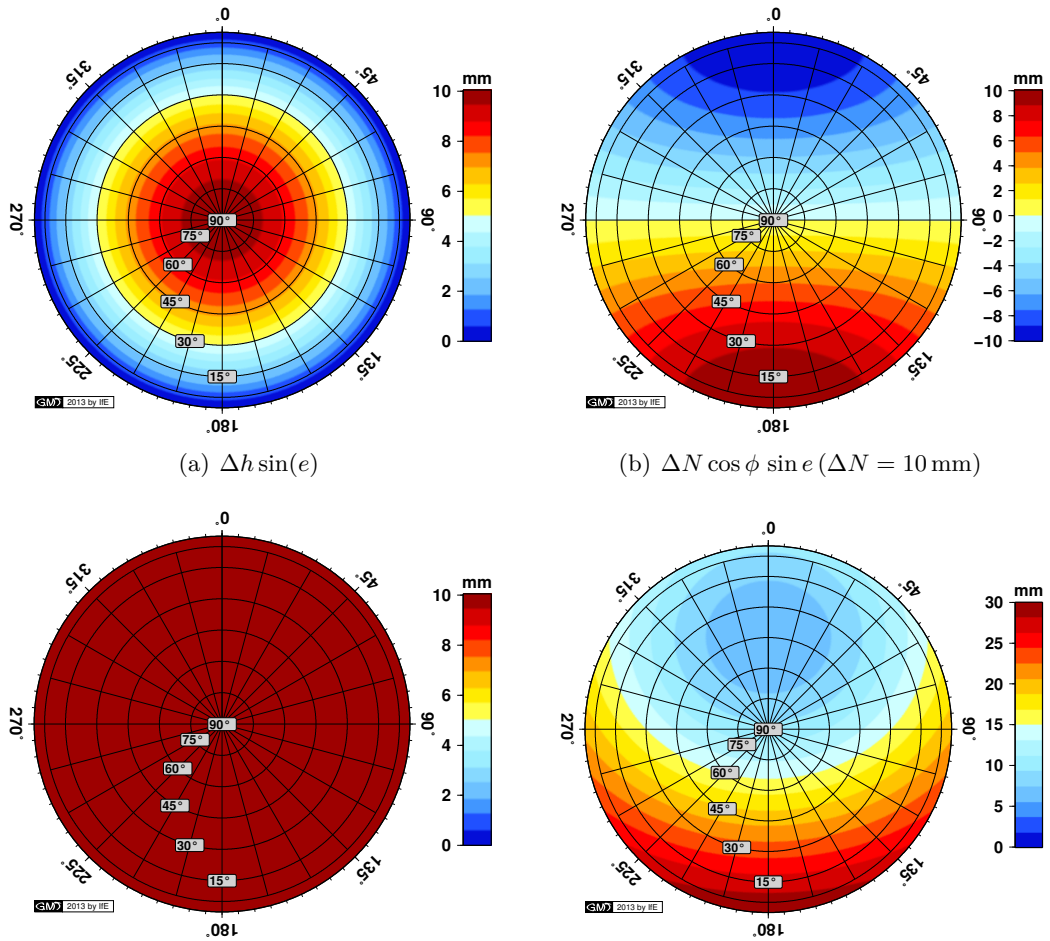
Diskussion des Ansatzes auf der Beobachtungsebene Durch den Rangdefekt des PCC-Pattern ist auch das ΔPCC-Pattern von einem Rangdefekt beeinflusst. Daher ist der direkte Vergleich von Zahlenwerten ggb. einem Elevationswert kein adäquates Vergleichsmaß und führt zu falschen Schlussfolgerungen. Es muss vielmehr die Gesamtform des Antennenpatterns verglichen werden.

Im Rahmen der aktuellen Diskussion innerhalb des IGS zeigt sich deutlich, dass ein alternativer Ansatz zum Vergleich von PCC-Pattern initiiert werden muss, um die Einflüsse der ΔPCC auf die Parameterebene in ihrer Gänze abschätzen und korrekt beurteilen zu können. Das bisherige, rein aus empirischen Werten ermittelte Signifikanzniveau von ± 1 mm Übereinstimmung der Antennenpattern ist für aktuelle Ansprüche nicht ausreichend. Wie bereits



(a) (b) (c)

Abbildung II.1.2: Beispiele der Transformation eines GPS-Antennenpatterns für eine Leica 2d Choke Ring Antenne (LEIAT504GG NONE) in (a-b) und ΔPCC-Differenzen verschiedener Lagerungen (c).



(a) $\Delta h \sin(e)$

(b) $\Delta N \cos\phi \sin e \, (\Delta N = 10\,\mathrm{mm})$

(c) $\Delta r = 10\,\mathrm{mm}$

(d) Zusammenfassung gen. Pattern

Abbildung II.1.3: Beispiele generischer Pattern für die Beschreibung eines reinen Höhenoffsets (a), für eine Lageverschiebung (b), für die Addition eines radialen Offsets und für die additive Zusammenfassung aller Anteile von (a-c) in (d).

Aerts (2011); Aerts et al. (2013) deutlich zeigen konnten ist zwar die Wiederholbarkeit des individuellen Kalibrieransatzes durch eine hohe Konsistenz von 0.2 - 0.3 mm gegeben, dennoch sind erhebliche Unterschiede zwischen den Kalibrieransätzen (echolose Kammer gegenüber Feldansatz) mit Abweichungen von über 1 mm vorhanden. Ferner ist die Konsistenz von PCC-Typmitteln einiger GNSS-Antennen nicht innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit von ±1 mm sondern variieren z.T. mit bis zu 4 mm, wie u.a. Hill et al. (2013) zeigen. Baire et al. (2012) zeigen in ihren Arbeiten deutlich, dass vorrangig in globalen und regionalen Netzen wie dem IGS-Netz oder dem EUREF European GNSS Network (EPN)-Netz systematische Fehler signifikant nachweisbar sind und die Netzqualität z.T. erheblich beeinträchtigen. Doch nicht nur die GNSS-basierte Positionierung sondern auch Zeit- und Frequenzübertragung wird durch diese Effekte beeinträchtigt werden. Ausführliche Analysen hierzu sind ein aktueller Forschungsgegenstand am IfE.

Der gewählte Ansatz basiert auf Arbeiten von Geiger (1988), der bereits Fehlerfunktionen für verschiedene GPS-Antennentypen in der Theorie vorstellte. Der Nachweis des ΔPCC Einflusses auf die Parameterebene ist aber durch die komplexen mathematischen Zusammenhänge innerhalb der Parameter-Modellierung sehr schwer abzuschätzen. Durch generische Pattern

kann ein stufenweises Auflösen der komplexen Zusammenhänge der unterschiedlichen Einflüsse erreicht werden. Diese generischen Pattern sind in der Abbildung II.1.3 dargestellt. Aus ersten Analysen diverser ΔPCC-Pattern konnte geschlussfolgert werden, dass die Hauptanteile sich meist auf die drei Einflüsse

- Offset-Unterschied Δh in der topozentrischen Höhenkomponente (Up), der sich als $\Delta h \sin e$ fortpflanzt (siehe Abbildung II.1.3(a)),
- Verschiebung der topozentrischen Lagekomponenten (North, East), z.B. der Nordkomponente um ΔN mit $\Delta N \cos\phi \sin e$ wie Abbildung II.1.3(b) zeigt sowie
- Verschiebung des Patterns mit einem konstanten Anteil Δr (siehe Abbildung II.1.3(c))

aufteilen lässt. Der Gesamteinfluss auf das Pattern ist, wie die der Abbildung II.1.3(d) entnommen werden kann, durch eine Linearkombination der drei wichtigsten Anteile beschrieben. Je nach Ausprägung des ΔPCC Patterns treten noch Verdrehungen in azimutaler Richtung auf, auch sind die einzelnen Komponenten für die analysierten Antennen mit verschiedenen Größenordnungen vertreten. Dennoch sind die wesentlichen Hauptanteile im ΔPCC bereits durch die 3 vorgestellten Einflüsse sehr genau beschrieben.

Erste empirische Studien haben gezeigt, dass sich offensichtlich anhand des ΔPCC-Patterns keine Klassen entsprechend der Güte der Antennen bilden lassen, wie es zumindest zwischen Rover- und Referenzstationsantennen zu erwarten gewesen wäre. Vielmehr treten die grundlegenden generischen Pattern in unterschiedlicher Ausprägung auf.

Diskussion des Ansatzes auf der Parameterebene Der Vorteil des vorgeschlagenen Konzeptes liegt in der Evaluierung der individuellen Einflüsse des ΔPCC-Patterns. Nach der Auflösung des ΔPCC-Patterns in die dominanten geometrischen Anteile können diese explizit auf der Parameterebene analysiert werden.

Aktuell wird in der Praxis die PPP-Datenverarbeitung intensiv verwendet. Ergebnisse, berechnet mit einem 24 h Datensatz und PPP-Prozessierung, sind in der Tabelle II.1.1 aufgeführt. Weitere Studien sind ebenfalls Dilssner (2007) und Menge (2003) zu entnehmen. Dort sind die vergleichbare Studien vor dem Hintergrund der GNSS-Antennennahfeld-Thematik und deren Auswirkung auf die Positionslösung analysiert worden. Auch Geiger (1988) zeigt Abschätzungen der Einflüsse auf die Positionsebene, jedoch an stark vereinfachten mathematischen Modellen.

Für die Analyse wurde eine Soll-Lösung mit einem individuellen PCC-Pattern verwendet. Stufenweise wurde das Pattern mit den generischen Pattern aus Abbildung II.1.3 verändert und deren Einflüsse auf die Parameter dokumentiert. Wie der Tabelle II.1.1 entnommen werden kann, bildet sich ein Fehler in der Höhenkomponente nicht direkt auf die Höhenkomponente, wie eigentlich zu erwarten wäre, sondern auch in den geschätzten Empfängeruhrfehler

Tabelle II.1.1: Diskussion der Auswirkung von PCC-Parametern auf die Parameterebene.

PCC-Pattern	ΔN	ΔE	ΔU	Uhr	Troposphäre	Mehrdeutigkeit
$\Delta \sin(e)$	-	-	Δ	$\approx 0.13\Delta$	-	-
$\Delta \cos(\phi - \phi_0) \sin(e)$	$\Delta \cos(\phi_0)$	$-\Delta \sin(\phi_0)$	-	$\approx 0.1\Delta$	-	-
Δ	-	-	-	$\approx \Delta$	-	oder $\approx \Delta$

mit $\approx 0.13\,\Delta$. Vergleichbare Ergebnisse sind für die reine Lageverschiebung festzustellen. Die Hoch-Komponente ist von der horizontalen Lageverschiebung nicht beeinträchtigt, dennoch ist der Effekt der Verschiebung auch im geschätzten Empfängeruhrfehler mit einer Magnitude von $\approx 0.1\,\Delta$ zu identifizieren. Sehr interessant und abschließend noch nicht erklärt ist der Effekt einer zusätzlichen Verschiebung des Patterns. In der Parameterebene bildet sich die Größe sowohl im geschätzten Empfängeruhrfehler ab, wie es zu erwarten wäre. Zusätzlich ist aber noch eine Veränderung in der Lösung der Mehrdeutigkeiten festzustellen.

Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern lässt zum einen auf die teilweise sehr hohe Korrelation der Parameter und zum anderen auf die nicht symmetrische Satellitenüberdeckung zurückführen. Aufgrund der hohen Korrelationen der zu schätzenden Parameter ist es notwendig, alle schätzbaren Parameter bzgl. ihres ΔPCC Einflusses zu studieren. Der Ansatz ist vielversprechend, lassen sich schließlich Größenordnungen der Variationen im Antennenpattern auf diese Weise sorgfältig analysieren.

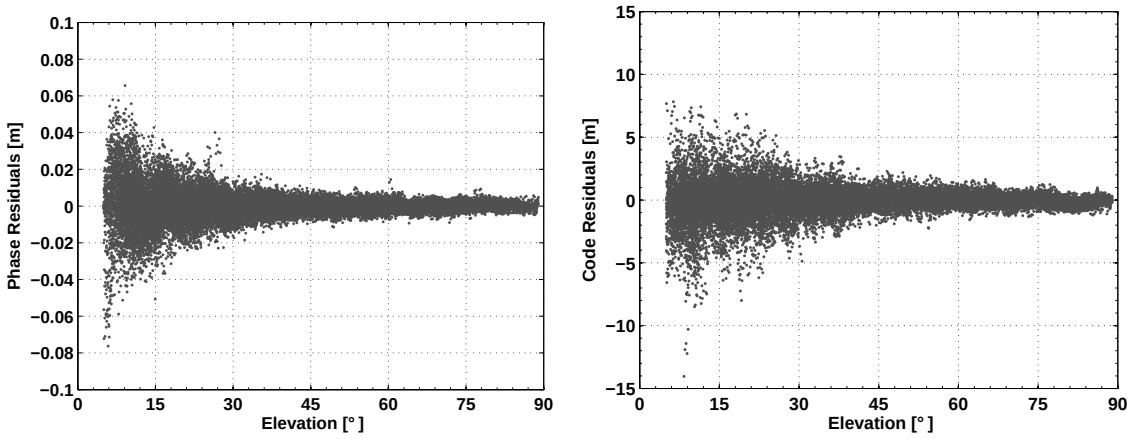
B Einfluss von Phasenzentrumsvariationen und Group Delays auf Positionierung und Navigation

B.1 Einfluss von Phasenzentrumsvariationen auf die GNSS-Prozessierung

Verschiedene Kalibriereinrichtungen wie z.B. Geo++ (Seeber und Böder, 2002), UniBonn (Zeimetz, 2010) und der NGS (Bilich und Mader, 2012) stellen absolute GNSS-Antennenkalibrierungen für den Nutzer zur Verfügung. Ringanalysen zeigen für eine Mehrzahl von GNSS-Antennen eine sehr gute Übereinstimmung mit maximalen Abweichungen von <1 mm im L_1 und L_2 Trägerphasenpattern. Dennoch treten für eine kleine Anzahl von GNSS-Antennen deutlich unterschiedliche Kalibrierergebnisse auf, die aktuell diskutiert werden, (Bilich et al., 2012).

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieses Arbeitspaketes den Einfluss der Kalibrierergebnisse auf die Positionierung im statischen Fall bei Auswertung von Multi-GNSS zu analysieren. Die Unterschiede in den Antennenkalibrierwerten bilden sich bei der GNSS-Prozessierung auf die geschätzten Parameter (Koordinate, Troposphäre, Uhr) ab. Für diese Analysen wurden Fehlerfunktionen auf die GNSS-Antennen-Pattern angewandt (Geiger, 1988), die bereits im Arbeitspaket A behandelt wurden. Für die Durchführung der Studien kamen zwei wissenschaftliche Software-Pakete zum Einsatz, zum einen die am IfE vorhandene Software (Weinbach und Schön, 2011) und zum anderen die im wissenschaftlichen Bereich weit verbreitete Bernese 5.2 Software, (Dach et al., 2007). Wesentliche Ergebnisse sind durch technische Berichte (Kersten, 2013b) sowie am IfE durchgeführte Abschlussarbeiten (Pape, 2014) dokumentiert sind.

Datensatz und Berechnung der Soll-Lösung Der zur Analyse vorhandene Datensatz wurde auf dem Labornetz des IfE im Jahre 2011 für 4 aufeinanderfolgende Tage gemessen, um zusätzlich die siderische Wiederholbarkeit zu untersuchen. Für die verwendete GNSS-Antenne Leica `LEIAT504GG LEIS` wurden zuvor individuelle PCC durch das Feldverfahren (Seeber und Böder, 2002) bestimmt. Als Empfänger dienen in einer Null-Basislinien-Konfiguration



(a) Trägerphasenresiduen (b) Codephasenresiduen

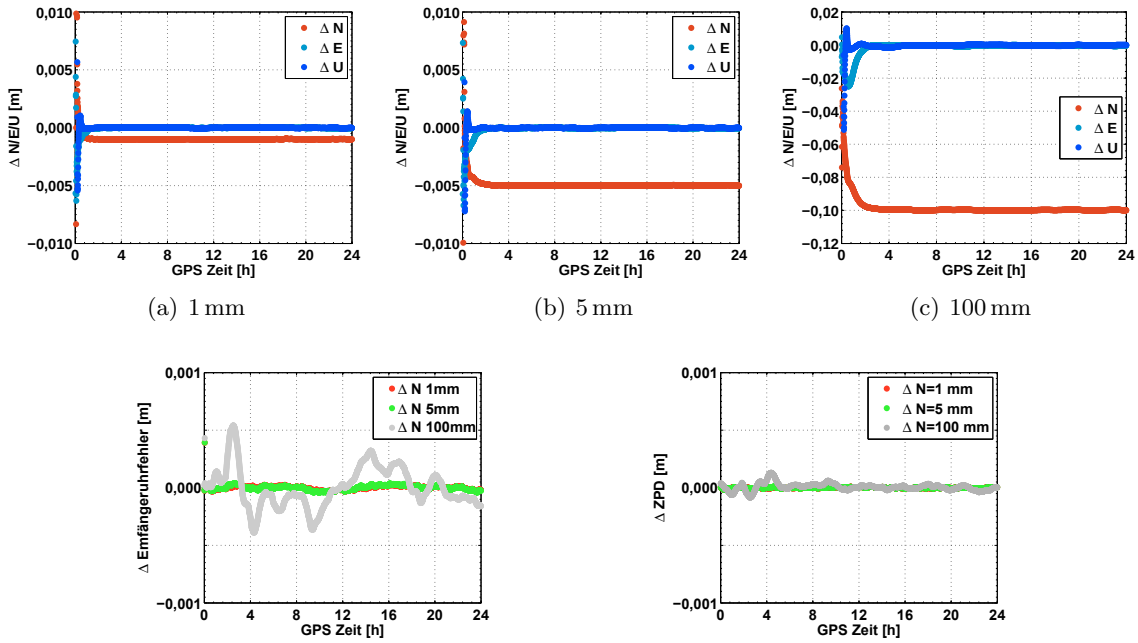
Abbildung II.1.4: Residuen der Träger- und Codephasenbeobachtungen der PPP-Soll-Lösung.

ein Javad Delta TRE_G3T sowie ein Leica GRX1200+GNSS. Ein externes Frequenznormal (FS725 Benchtop Rubidium Frequenz-Standard) liefert für beide GNSS-Empfänger ein gemeinsames und stabiles Frequenzsignal (10 MHz).

Residuen der Träger- und Codephasen der Soll-Lösung sind in der Abbildung II.1.4 zusammengestellt. Wie die Residuen der Soll-Lösung indizieren, sind diese frei von systematischen Fehlern. Im Zenit sind Abweichungen von ca. 1 cm und für die Codephasenbeobachtung unterhalb von 1 m zu identifizieren. Eine charakteristische Zunahme der Residuen in niedrigen Elevation ist zu beobachten.

Datenverarbeitung - IfE-Software In der IfE-Software werden die geschätzten Parameter über ein Kalman Filter Ansatz bestimmt. Das Beobachtungsrauschen der Trägerphase ist mit $\sigma_\phi = 0.002\,\mathrm{m}$ und für die Codephase mit $\sigma_p = 0.6\,\mathrm{m}$ modelliert. Es wurden keine GDV-Korrekturen angebracht. Eine separate Betrachtung und Analyse hierzu ist im Arbeitspaket B.3 durchgeführt.

In Abbildung II.1.5 ist am Beispiel einer fehlerhaften Nordkomponente ΔN gezeigt, dass sich bei korrekter Modellierung der PCC die eingeführten Abweichungen im Ergebnis der geschätzten Lagekomponente abbilden. Anhand der Abbildungen II.1.5(a)-II.1.5(c) ist festzustellen, dass zunächst mit größer werdender Abweichung der Lagekomponente das Kalman Filter eine längere Zeit zum Einlaufen bzw. zur Konvergenz benötigt. Während im Falle von $\Delta N = 1\,\mathrm{mm}$ die Konvergenz bereits in weniger als einer Stunde erreicht ist, muss für $\Delta N = 5\,\mathrm{mm}$ bereits mit 2 Stunden gerechnet werden. Für $\Delta N = 0.1\,\mathrm{m}$ beträgt die Konvergenzzeit ca. 3 Stunden. Dabei ist für alle drei Komponenten die verlängerte Konvergenzzeit zu beobachten, unabhängig davon, ob die Komponente verfälscht ist oder nicht. Die veänder-



(a) 1 mm (b) 5 mm (c) 100 mm

(d) Empfängeruhrfehler (e) troposphärische Verzögerung

Abbildung II.1.5: Lageänderung ohne Berücksichtigung der PCV Informationen (verfälschte PCC), berechnet mit IfE-PPP-Software.

te Nordkomponente hat zusätzlich einen Einfluss auf den geschätzten Empfängeruhrfehler z.B. mit maximalen Variationen von 0.5 mm bei einer Änderung der Lagekomponente von $\Delta N = 0.1$ m. Diese Magnituden sind jedoch deutlich geringer als 1 mm und liegen unterhalb der für die PPP-Datenverarbeitung erreichbaren Genauigkeit, die in vergleichbaren Fällen (24 Stunden statische PPP-Prozessierung) mit bis zu 4 - 5 cm abgeschätzt werden kann.

Die Variation der Höhenkomponente führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Wie bereits bei der Lagekomponente diskutiert, ist die eingeführte Abweichung in der PCO-Hoch-Komponente eindeutig in den Positionsresiduen der Hochkomponente (ΔU) zu identifizieren. Im Vergleich zur Lagekomponente sind aber die zusätzlichen Konvergenzzeiten wesentlich geringer. So sind sie für die Manipulation der Höhenkomponente von 1 mm und 10 mm innerhalb von einer Stunde erreicht, bei der Manipulation von 0.1 m bereits bei <1.5 Stunden. Durch die hohe Korrelation der Stationskoordinate und des geschätzten Empfängeruhrfehlers sind die Manipulationen des PCC-Patterns mit einem Verhältnis von 1:3 auch im geschätzten Empfängeruhrfehler zu identifizieren. Die vollständige troposhärische Laufzeitverzögerung ΔZPD bleibt davon vollständig unbeeinflusst.

Datenverarbeitung - Bernese 5.2 Software Entsprechend zu den Analysen innerhalb der IfE-PPP-Software wurden vergleichbare Studien mit der wissenschaftlichen GNSS-Software Bernese 5.2 durchgeführt, (Dach et al., 2007). Für die Berechnung der verschiedenen Antennen-Pattern wurden Kurzbezeichner verwendet, die in der Tabelle II.1.2 erläutert sind.

Die Ergebnisse der korrekten PCC-Pattern (Abbildung II.1.6(a)) sind vergleichbar mit den aus der IfE-PPP-Software erhaltenen Lösungen. Abweichungen von deutlich unter 0.1 mm sind auf interne Rundungsfehler bzw. der internen Berechnungsschärfe zurückzuführen. Die Magnituden sind vernachlässigbar und liefern identische Koordinaten.

Eine eingeführte Abweichung in der Höhenkomponente des PCC-Patterns bildet sich ebenfalls wieder in den berechneten Positionen ab (siehe Abbildung II.1.6(b)). Diese Schlussfolgerung ist identisch mit den aus der IfE-PPP-Software erhaltenen Ergebnissen (Abbildung II.1.5). Die eingeführte Höhenabweichung ist 1:1 in der Höhenkomponente der geschätzten Position zu identifizieren.

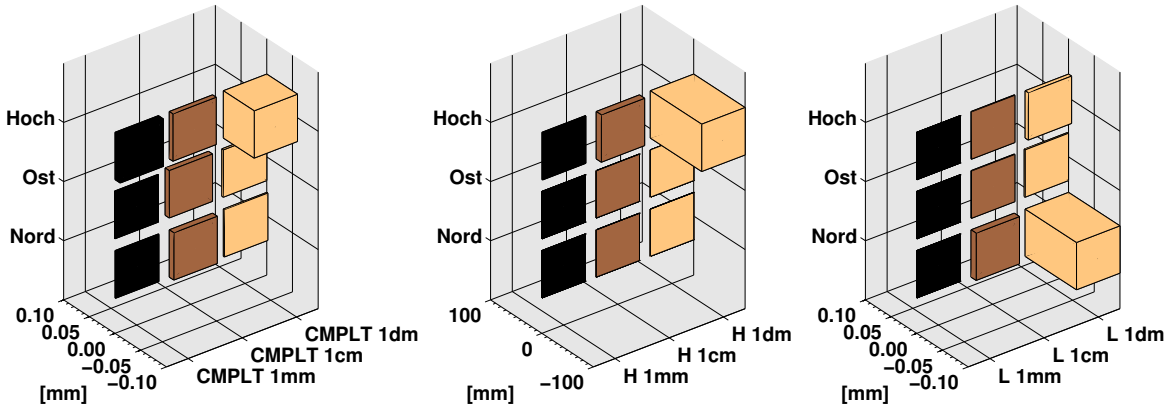
Interessant hingegen ist das Verhalten der Manipulation der Lagerung des PCC-Patterns. Entsprechend den Ergebnissen aus Abbildung II.1.6(c) kann festgestellt werden, dass die

Tabelle II.1.2: Erläuterung der Kurzbezeichner für die PPP-Prozessierung diverser PCC-Pattern innerhalb der Bernese Software.

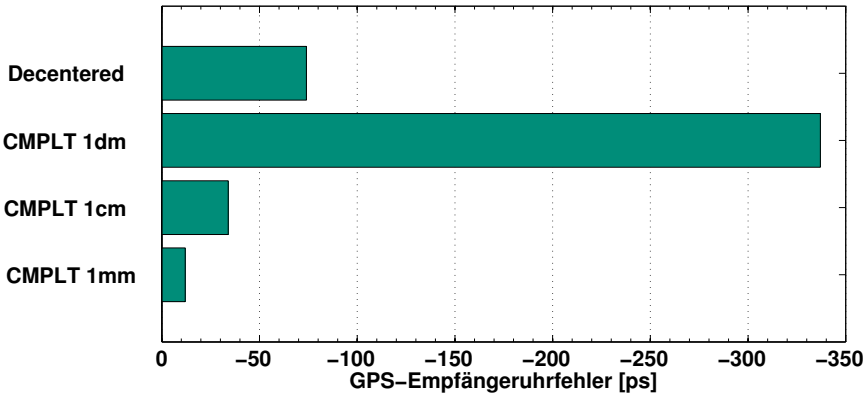
Bezeichner	Bemerkung
CMPLT 1MM	vollständige Transformation um 1 mm
CMPLT 1CM	vollständige Transformation um 1 cm
CMPLT 1DM	vollständige Transformation um 10 cm
H 1MM	Abweichungen in der Hochkomponente um 1 mm
H 1CM	Abweichungen in der Hochkomponente um 1 cm
H 1DM	Abweichungen in der Hochkomponente um 10 cm
L 1MM	Abweichungen in der Lagekomponente um 1 mm
L 1CM	Abweichungen in der Lagekomponente um 1 cm
L 1DM	Abweichungen in der Lagekomponente um 10 cm
Decentered	dezentriertes Pattern (vollständiges PCC)

Manipulation nicht 1:1 in den Koordinatenraum übertragen wird. Trotz verfälschter Lagekomponente von bis zu 100 mm konnte die identische Position errechnet werden, abgesehen von Berechnungsunschärfen, die sich im Rahmen von ca. 0.1 mm bewegen. Diese Ergebnisse sind siderisch wiederholbar, (Pape, 2014).

Zusätzlich lässt die genauere Betrachtung des geschätzten Empfängeruhrfehlers für ausgewählte PCC-Manipulationen weiteren Raum für zukünftige Diskussionen (siehe Abbildung II.1.6(d)). Da das PCC-Pattern korrekt und konsistent transformiert wurde, sollten keine Effekte in den geschätzten Parametern mehr verbleiben. Dennoch kann beobachtet werden, wie der geschätzte Empfängeruhrfehler durch die Transformation des PCC-Patterns beeinflusst wird. Bereits bei einer Transformation des Patterns von 1 mm sind -12 ps (-3.6 mm) auszumachen, der als konstanter Anteil im Empfängeruhrfehler verbleibt. Entsprechend sind für die Transformation von 10 mm und 100 mm Größenordnungen von -34 ps (-9.9 mm) bzw. -337 ps (-101 mm) zu detektieren. Dieses Verhalten ist vor dem Hintergrund der präzisen Zeit- und Frequenzübertragung mit GPS bzw. GNSS zu studieren und zu beseitigen. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass für ein dezentriertes Pattern ein Offset mit



(a) vollst. Transformation (b) Höhenvariation (c) Lagevariation



(d) Empfängeruhrfehler

Abbildung II.1.6: Vergleich der Koordinatenlösungen unter Verwendung verschiedener Transformationen. Während bei (a) die vollständige Transformation des Patterns durchgeführt wurde, ist bei (b) eine Abweichung in der Höhenkomponente eingeführt worden und in (c) handelt es sich um eine Abweichung in der Lagekomponente. Ergebnisse des aus einer PPP-Prozessierung geschätzten GPS-Empfängeruhrfehlers für ausgewählte PCC-Pattern in (d).

einer Magnitude von -74 ps (-21.9 mm) im geschätzten Empfängeruhrfehler zu identifizieren ist (Abbildung II.1.6(d)). Die Herkunft dieses Effektes ist nicht geklärt. Dennoch pflanzt sich dieser Offset kontinuierlich fort und lässt sich siderisch reproduzieren, wie dies für alle in der Abbildung II.1.6(d) vorgestellten Empfängeruhrfehler der Fall ist.

GNSS-PPP Datenverarbeitung

Nach der gesonderten Betrachtung der Auswirkungen verschiedener generischer PCC-Pattern für ein einzelnen System sind folgend die Erkenntnisse auf den Fall einer kombinierten GPS und GLONASS (GNSS) PPP-Prozessierung vorgestellt. Während bei der reinen GPS-Auswertung ca. 5 500 Beobachtungen verwendet wurden, erfolgte für die GNSS-Auswertung eine Prozessierung von ca. 10 000 Beobachtungen. Entsprechend der Abbildung II.1.7 ist festzustellen, dass die Steigerung der Beobachtungen und die zusätzliche Berücksichtigung der GLONASS PCC-Pattern keine signifikante Änderung der Ergebnisse liefert. Wie bereits für die reine GPS-Auswertung diskutiert, liegen für die ausgewählten und manipulierten PCC-Pattern die Positionen innerhalb der erreichbaren Genauigkeit. Die an dieser Stelle auftretenden Abweichungen von deutlich unterhalb 0.1 mm sind vernachlässigbar und durch Rundungsfehler bzw. Rechenunschärfe zu erklären. Diese Ergebnisse sind siderisch wiederholbar.

Bezüglich der Diskussion der Auswirkungen des PCC-Patterns auf den geschätzten Empfängeruhrfehler sind für die GNSS-Prozessierung identische Ergebnisse erhalten worden, wie bereits für die GPS-only PPP-Lösung in Abbildung II.1.6(d) diskutiert. Zukünftige Arbeiten sollten die unterschiedliche Behandlung der Antennenparameter innerhalb der GNSS-Softwarepakete berücksichtigen, denn es konnte anhand der Analysen bereits gezeigt werden, dass zusätzlich zu den individuellen, Empfänger und antennen-spezifischen Einflüsse auch sogenannte *software-based impacts* zu erwarten sind. Für die Positionierung sind diese Effekte deutlich unterhalb der detektierbaren Genauigkeit. Gleiches gibt für die geschätzten Troposphärenparameter. Für präzise Zeit- und Frequenzübertragung hingegen, die gerade durch PPP-Prozessierung eine hohe Präzision liefert, sind die hier aufgezeigten Effekte (Offsets im geschätzten Empfängeruhrfehler) nachteilig und sollten vermieden werden.

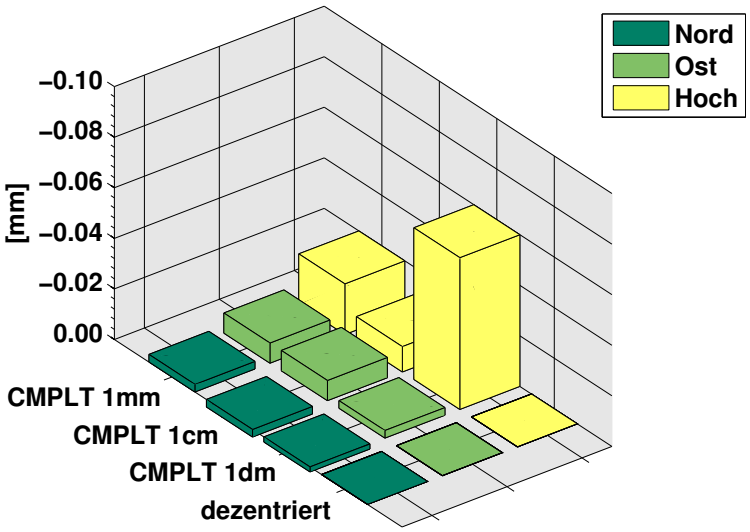


Abbildung II.1.7: Positionslösungen im Vergleich zur Soll-Lösung berechnet mit generischen PCCs im GNSS Ansatz.

Fazit

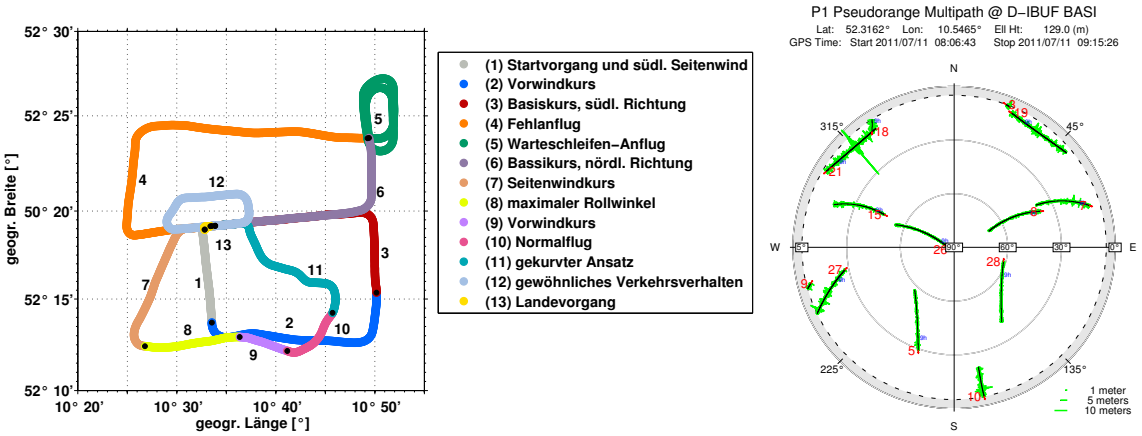
- Änderungen durch generische Pattern in Abhängigkeit der internen Software-Modellierung sind auch im Parameterraum zu identifizieren.
- Abweichungen sind in der geschätzten Empfängeruhr und den Koordinaten zu finden.
- Einfluss auf die Troposphäre ist unterhalb des Mess- bzw. Prozessrauschens und somit vernachlässigbar.
- Bei Kalman-Filter zeichnet sich eine Lageänderung des PCC-Patterns durch längere Konvergenzzeiten aus, was bei der Variation der Höhenkomponente nicht zu identifizieren ist.
- Auswirkungen eines dezentrierten PCC-Patterns sind besonders interessant für die Berechnung von Parametern der GNSS- basierten Zeitübertragung, da ein antennenspezifischer und zusätzlicher Offset eingeführt wird, der die Qualität des Zeitlinks beeinträchtigt.

B.2 Einfluss von Group Delay Variationen auf die codebasierte Navigation

Aktuelle Entwicklungen zeigen deutlich, dass den Codephasenbeobachtungen u.a. im Bereich der Luftfahrt eine zunehmende Bedeutung zukommt und daher die Analyse der Codephasenvariationen von GPS/GNSS-Antennen, (van Graas et al., 2004; Murphy et al., 2007; RTCA, 2006) wichtig ist. Gerade für Blindflüge (Instrumentenflüge) der Kategorie CAT I-III ist die Präzision der Navigation in Verbindung mit neuen Anflugverfahren von besonderem Interesse. Einige Ergebnisse wurden bereits in Kersten und Schön (2012c) publiziert. Folgend werden weitere und vor allem detaillierte Studien behandelt.

Setup und genereller Aufbau

Im Rahmen der Validierung zum Konzept eines virtuellen Empfängers (Kube et al., 2012) wurde in Zusammenarbeit mit dem IfE und dem Institut für Flugführung (IFF) der Universität Braunschweig mit dem dortigen Forschungsflugzeug (Dornier 128-6 D-IBUF) ein 70 Minuten langer Datensatz erhoben. Die für gekurvte Landeanflüge typischen Flugmanöver sind der Abbildung II.1.8(a) zu entnehmen. Der Skyplot aus Abbildung II.1.8(b), welcher ausgehend von der Startposition der Dornier im Navigationskoordinatensystem berechnet wurde, zeigt eine stabile Satellitengeometrie mit niedrig- und hochstehenden Satelliten. Auf

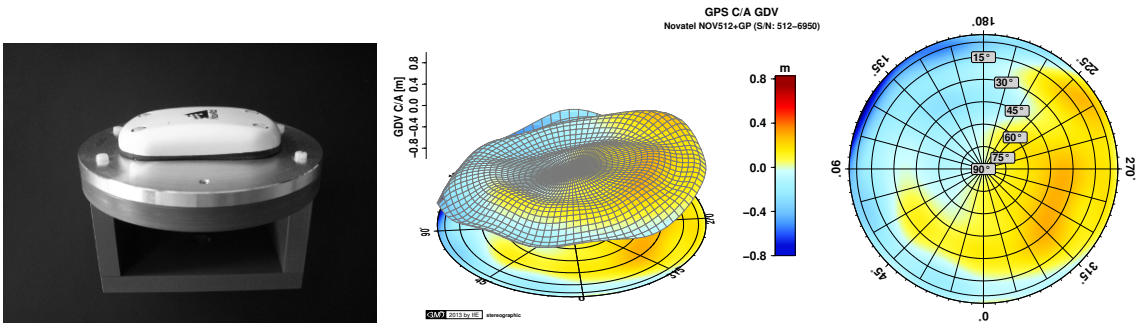


(a) (b)

Abbildung II.1.8: Skyplot der sichtbaren Satelliten innerhalb des Navigationskoordinatensystems der DO128-6 D-IBUF (a) und verschiedene Manöver während des Testfluges (b), (Kube et al., 2012).

dem vorderen Rumpf des Flugzeugs, wo nur geringe Abschattungen zu erwarten sind, wurde eine Zweifrequenzantenne Novatel NOV512 verwendet, die in der Abbildung II.1.9 mit den zugehörigen GDVs auf dem Signal GPS C/A dargestellt ist. Die am IfE bestimmten, individuellen C/A Codephasenvariationen (GDV) der Antenne wurden mit einem speziellem Unterbau kalibriert und in der Prozessierung der Flugzeugtrajektorie berücksichtigt.

Für die Navigationsantenne können GDV-Abweichungen von 0.8 m erwartet werden. Den polaren Darstellungen aus Abbildung II.1.9(a) ist ein homogen verteiltes GDV-Pattern mit geringen azimutalen Variationen zu entnehmen. Werden im Vergleich hierzu die generischen Pattern hinzugezogen, die bereits im Arbeitspaket A diskutiert wurden, so ist festzustellen, dass zusätzlich eine konstante Verschiebung des mittleren GDV Empfangszentrums in dem



(a) (b)

Abbildung II.1.9: Skyplot der sichtbaren Satelliten innerhalb des Navigationskoordinatensystems der DO128-6 D-IBUF (a) und verschiedene Manöver während des Testfluges (b), (Kube et al., 2012).

GDV-Patern vorhanden ist. Zur Erhaltung der Konsistenz verschiedener GDV-Pattern, wurde bereits durch Kersten und Schön (2012c) festgehalten, dass die GDV-Pattern nur durch die ein vollständiges Modell (bezogen auf den ARP bzw. einem mittleren Offset von 0) beschrieben werden. Auf eine explizite Trennung der konstanten und variablen Anteile wird bei der Bestimmung der GDV verzichtet, obwohl dies bei der Bestimmung der PCC traditionell durchgeführt wird. Um die Fehlinterpretationen insgesamt vorbeugen zu können, werden die GDV-Pattern als sogenanntes Vollmodell publiziert.

Prozessierung der Sollösung und Trajektorien

Die Daten wurden mit einer Datenrate von 1 Hz aufgenommen, mit einer elevationsabhängigen Gewichtung und einer Elevationsmaske von $e_{cutoff} \leq 5°$ sowie 100 Sekunden trägerphasengeglätteten Codephasenbeobachtungen innerhalb eines regulären Single Point Positioning (SPP) Algorithmus (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, S. 253f) verarbeitet. Hierzu wurde die Implementierung eines entsprechenden SPP Algorithmus die am IfE entwickelte Software notwendig.

Die Referenzlösung wurde durch eine präzise Zweifrequenz-PPP Lösung zur Verfügung gestellt, die ebenfalls mit einer am IfE entwickelten Software berechnet wurde, (Weinbach und Schön, 2011). Zur konsistenten Transformation zwischen den Earth Centered Earth Fixed (ECEF) Koordinaten und den topozentrischen Koordinaten im Flugzeugkoordinatensystem sind die Informationen der Roll-, Kipp- und Nickwinkel [roll-pitch-yaw] pro Epoche notwendig, die durch Zusatzgeräte am Flugzeug aufgenommen und in der Prozessierung entsprechend berücksichtigt wurden.

Evaluation der Trajektorien

Anschließend werden die aus dem SPP-Algorithmus erhaltenen Trajektorien zunächst um den Einfluss der Codephasenvariationen korrigiert und anschließend der Sollösung gegenübergestellt. Zur Evaluation der Güte der SPP-Lösung sei zunächst der Fokus auf den Einfluss der GDV im Positionsraum gerichtet. In Abbildung II.1.10 sind die Auswirkungen der individuellen Codephasenvariationen (GDV) für die Trajektorie dargestellt, wobei die SPP-Lösung mit Berücksichtigung der GDV-Korrekturen von der gewöhnlichen SPP-Lösung abgezogen wurde

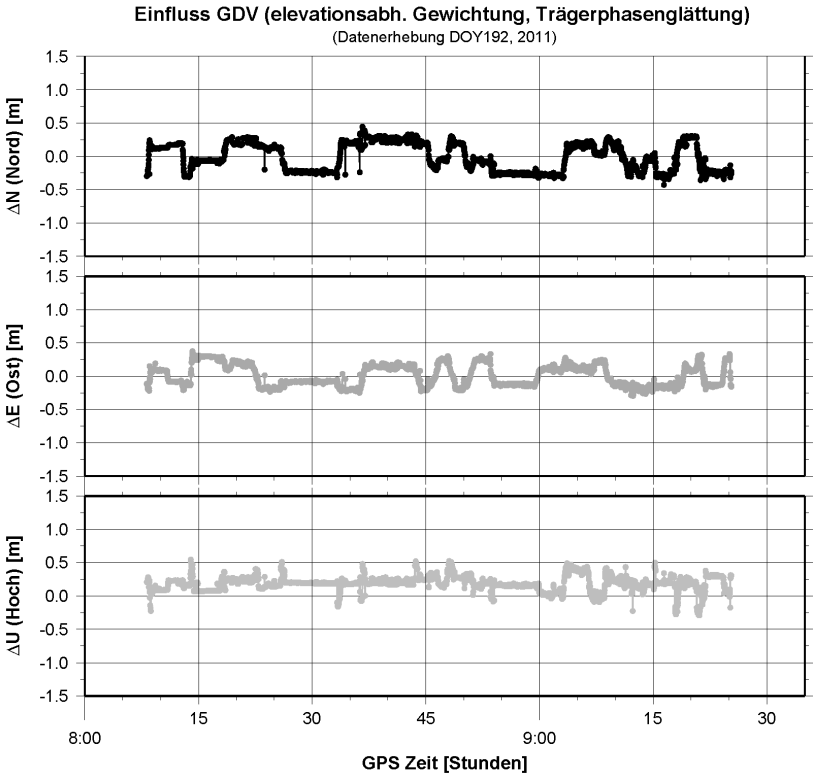
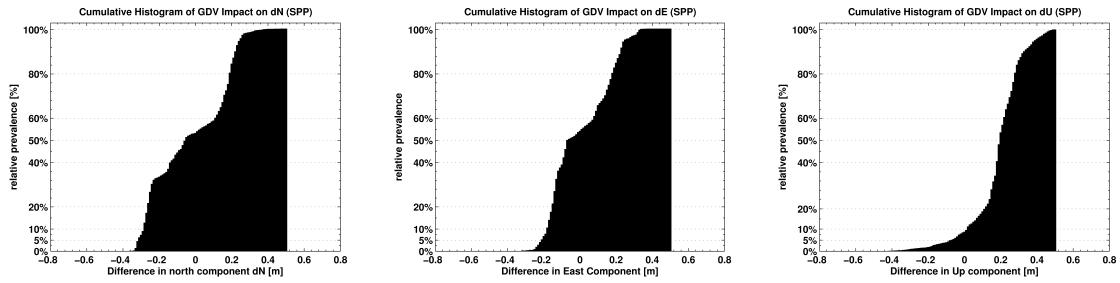


Abbildung II.1.10: Einfluss der individuellen Codephasenvariationen der NOV512+GP Antenne auf die Flugzeugtrajekorie.

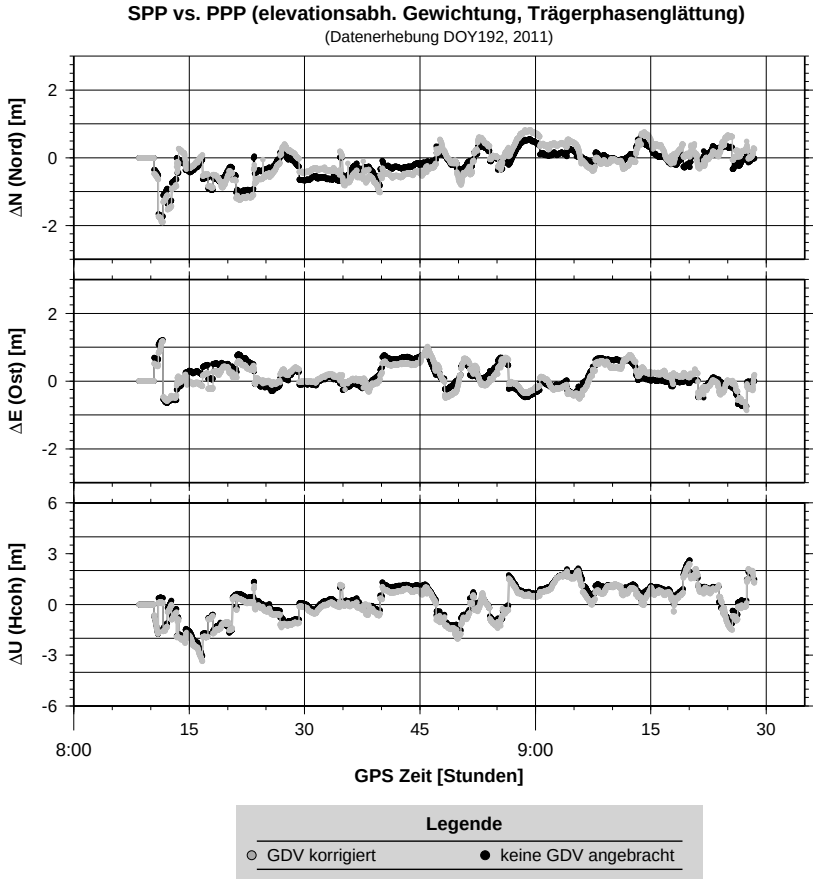
(SPP_{GDV}−SPP). Für die Nord- und Ostkomponente ist eine Variation in Abhängigkeit der Flugrichtung festzustellen. Die im Positionsraum auftretenden Größenordnungen entsprechen den individuellen GDV-Korrekturen, die pro Epoche und Ausrichtung des Flugzeugs bestimmt werden müssen und sich, wie Abbildung II.1.10 deutlich zeigt, direkt in den Positionsraum abbilden. Für die Hochkomponente ist zwar ein ähnliches Verhalten festzustellen, zeitgleich ist aber auch sichtbar, dass sich für die gesamte Trajektorie ein Offset von 0.25 m ergibt. Die zusätzlich auftretenden Variationen sind direkt den Orientierungsänderungen innerhalb der Trajektorie und der damit einhergehenden Änderung der Satellitengeometrie zuzuordnen.

Diese angesprochenen Zusammenhänge sind explizit noch einmal den kumulativen Häufigkeitsdiagrammen der Abbildung II.1.11 zu entnehmen. Für die horizontalen Komponenten zeigen die Diagramme, dass bis zu 95% der Fälle nur Variationen unterhalb von 0.3 m erfahren. In etwa vergleichbar ist die Situation für Variationen der Höhenkomponente, bei der in 90% der Fälle Variationen unter 0.3 m auftreten. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass Variationen für alle drei Komponenten unterhalb 0.5 m zu erwarten sind. Diese Untersuchungen lassen zunächst die Schlussfolgerung zu, dass die in diesen Analysen verwendete Antenne ein geringeres GDV-Pattern aufweist und daher Variationen bzw. Beeinträchtigungen der codephasenbasierten Koordinatenlösung deutlich reduziert werden.

Abschließend ist zur Evaluierung der Codephasenvariationen auf die SPP basierte Navigation in Abbildung II.1.11(d) der Vergleich gegenüber einer PPP-Soll-Lösung angegeben. Wie bereits in Abbildung II.1.11 angesprochen, sind nur geringe Variationen bzw. Verbesserungen für die in diesem Experiment verwendete Antenne zu erwarten. Verbesserungen der



(a) (b) (c)



(d)

Abbildung II.1.11: Kummulative Häufikeitsdiagramme der topozentrischen Koordinaten zum Abschätzen des Einflusses der individuellen Codephasenvariationen auf die Flugeugtrajektorie (a-c) und Vergleich der codephasen basierten SPP Lösung mit einer präzisen PPP Trägerphasen Lösung.

herkömmlichen SPP-Lösung sind durch Berücksichtigung der Codephasenvariationen nicht erkennbar. Diese Schlussfolgerungen gelten aber nicht pauschal, da in Abschnitt B.1 gezeigt wurde, dass die zu erwartenden Beeinträchtigungen im Positionsraum direkt abhängig sind von der Größenordnung der GDV.

Für jede Anwendung muss demnach eine entsprechende Antenne ausgewählt und auf Eignung hin überprüft werden. Die in diesem Experiment analysierte Antenne weist gegenüber dem Codephasen Rauschen ein sehr geringes GDV-Pattern auf und erfüllt für aktuelle GNSS-Signale die derzeitigen Anforderungen der Instrumentenlandesysteme. Künftig werden je-

doch neue Signale mit einer optimierten Architektur verwendet, die ein weitaus geringeres Rauschen aufweisen und der Berücksichtigung von GDV zukünftig ein wesentlich größeres Gewicht zukommen lassen werden.

B.3 Einfluss von Group Delay Variationen und Phasenzentrumsvariationen auf statische und kinematische Positionierung mit PPP

Einfluss auf die Mehrdeutigkeitsanalyse

Wie in Kersten und Schön (2012c,a) gezeigt, liegen für GNSS-Antennen deutliche Unterschiede für die sensorspezifischen GDV in Abhängigkeit der direkte Sichtlinie [*Line-of-Sight*] (LOS) vor. Die Kenntnis über die Ausprägung sowie die entsprechenden Größenordnungen sind vor allem für die Kombination von Code- und Trägerphasenbeobachtungen von entscheidender Bedeutung. Für eine stabile Bestimmung von Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten auf langen Basislinien (>10 km) wird die Kombination innerhalb der *Widelane-Narrowlane Methode* nach Seeber (2003) notwendig. Diese Methode ist essentiell für die robuste Berechnung der Mehrdeutigkeiten bzw. guter Anfangswerte innerhalb der meisten wissenschaftlichen als auch kommerziellen GNSS-Softwarepakete und deshalb von besonderem Interesse.

Synergien zwischen den Beobachtungstypen Codephase und Trägerphase wurden beginnend durch die Arbeiten von Hatch (1982) untersucht. Basierend darauf stellten Wübbena (1985) und Melbourne (1985) unabhängig voneinander ein Verfahren zur Bestimmung von Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten vor. Die grundlegende Idee basiert auf der Kombination von

$$MW_A^j = \Phi_w^j - P_w^j = \lambda_w(N_1^j - N_2^j) \tag{8}$$

also der Trägerphasen- (Φ_w^j) und Codephasenbeobachtung (P_w^j) von einer Station A zu einem Satelliten j sowie den Mehrdeutigkeiten N_1^j und N_2^j der L_1 bzw. L_2 Trägerphase. Das Rauschen der Kombination wird abgeschätzt zu

$$\sigma_{MW-LC} = \sqrt{\sigma_{\Phi_w}^2 + \sigma_{P_w}^2} \approx 1.722\,\mathrm{m} \tag{9}$$

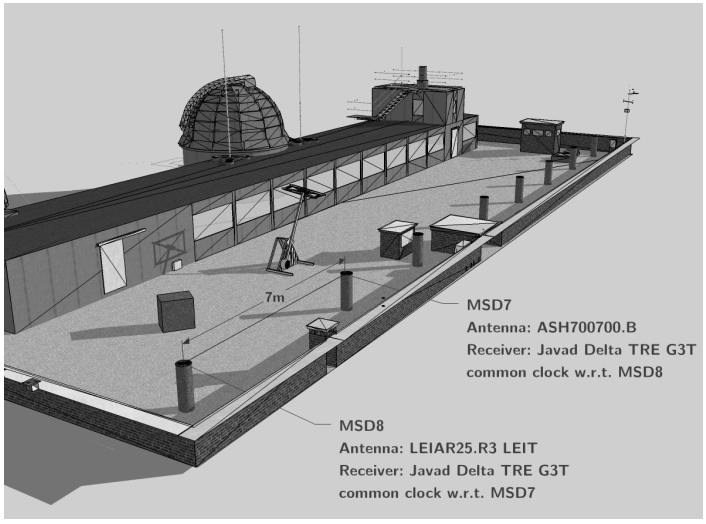


Abbildung II.1.12: Messanordnung zum Experiment, ausgeführt auf dem Labornetz des IfE (Institut für Erdmessung).

Tabelle II.1.3: Experiment zur Analyse des Einflusses der GDV auf die Melbourne-Wübbena (MW) Linearkombination und der daraus abgeleiteten MW Mehrdeutigkeiten.

Allgemein				
	DOY:	215		
	Jahr	2012		
	Aufzeichnungsrate:	30 Sekunden		
	Start	8:30	02.08.2012	
	Ende	11:00	03.08.2012	
	Dauer	28.5	Stunden	
Empfänger				
	Station	**IGS Bezeichnung**	**Frequenz**	**Signal** (messbar)
	MSD 6	`Delta TRE G3T`	GPS: L_1, L_2	L_1 C/A, L_1 P(Y), L_2C, L_2 P(Y), L_5
			GLO: L_1, L_2	L_1 C/A, L_1 P, L_2 C/A, L_2 P
	MSD 8	`Delta TRE G3T`	GPS: L_1, L_2	L_2 C/A, L_1 P(Y), L_2C, L_2 P(Y), L_5
			GLO: L_1, L_2	L_1 C/A, L_1 P, L_2 C/A, L_2 P
Antennen				
	Station	**IGS Bezeichnung**	**Frequenz**	**Signal** (analysiert)
	MSD 6	`ASH700700.B NONE`	GPS: L_1	L_1 C/A
	MSD 8	`LEIAR25.R3 LEIT`	GPS: L_1,L_2,L_5	L_1 C/A

und ist von der Unsicherheit der Widelane-Codephasenbeobachtung dominiert. Die Melbourne-Wübbena Linearkombination (MWLK) ist vollständig unabhängig von Geometrie und Ionosphäre - damit auch von der Basislinienlänge und enthält nur noch die Wide lane-Mehrdeutigkeiten N_w^j. Dieses Verfahren konnte von Seeber et al. (1985) erfolgreich zur Positionierung von großen Abraummaschinen sowie in den Anfängen der GPS-basierten Flugzeugpositionierung bestätigt werden und ist heutzutage durch die sehr günstigen Eigenschaften als auch deren einfacher Implementierung eine wichtige Methode zur primären Lösung von der Mehrdeutigkeiten. Die MWLK enthält nur noch die Widelane-Mehrdeutigkeit [ambiguity] (N_w^j) sowie empfänger- und satellitenspezifische Signalverzögerungen d_A und d_j. Diese Anteile zerstören die Ganzzahligkeit der MW_A^j Linearkombination für undifferenzierte Beobachtungen. Durch Bildung von Doppeldifferenzen von zwei Stationen A und B sowie zwei Satelliten j und k lassen sich hingegen die entsprechenden Signalverzögerungen eleminieren, wodurch die Widelane-Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten $N_{w,AB}^{jk}$ ganzzahlige Integerwerte annehmen.

Ein entsprechendes Experiment wurde auf einer kurzen Basislinie auf dem Labornetz des IfE (siehe Abbildung II.1.12) anhand eines asymmetrischen Aufbaus durchgeführt. Auf zwei koordinatenmäßig bekannten Punkten (MSD7 und MSD8) wurden zwei GNSS-Antennen mit asymmetrischem GDV-Pattern installiert. Zum einen eine `ASH700700.B NONE` Antenne, die ein markantes GDV-Pattern aufweist, zum anderen eine `LEIAR25.R3 LEIT`, welche ein geringes GDV-Pattern zeigt, (Kersten und Schön, 2012c). Der Einfluss der antennen-spezifischen GDV auf die Mehrdeutigkeitslösung mit MWLK werden analysiert und mit Hilfe einer L_1 Koordinatenlösung, validiert. Die Randparameter zum Experiment sind in der Tabelle II.1.3 zusammengefasst. Zur Analyse wurde ein Zeitraum von 8 Stunden gewählt. Für diesen Zeitraum kann eine sehr gute Geometrie bzw. geometrische Verteilung der Satelliten im Antennensystem erreicht werden. Die hierzu notwendigen und individuellen GDV für die P1(Y)

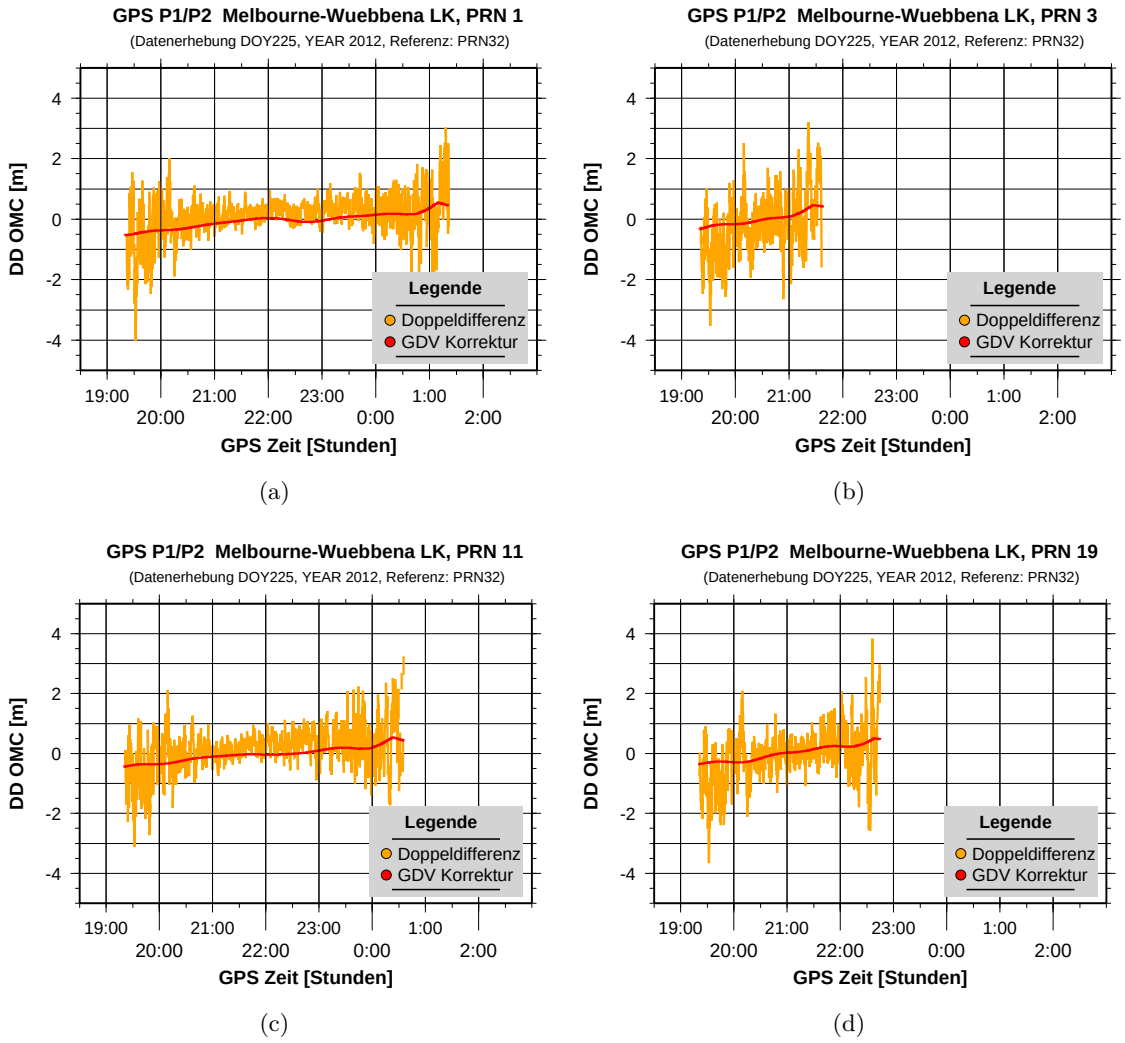


Abbildung II.1.13: Doppeldifferenzen der Melbourne-Wübbena Linearkombination für die Stationen MSD6 - MSD8 bzgl. Referenzsatellit PRN32.

und P2(Y) Signale wurden mit der am Institut vorhandenen Software (Kersten und Schön, 2012a) geschätzt. Zur Prozessierung der Daten wurde das am IfE vorhandene Softwarepaket (Weinbach und Schön, 2011) erweitert.

Studien auf der Beobachtungsebene In Abbildung II.1.13 ist der verkürzte Beobachtungsvektor (Observed Minus Computed (OMC)) der Doppeldifferenzen der MWLK (DD OMC) von verschiedenen Satelliten für einen Zeitraum von 8 Stunden aufgetragen. Gleichzeitig ist in den Abbildungen die GDV-Korrektur der MWLK entlang der LOS zum individuellen Satelliten als durchgezogener Graph gegenüber gestellt.

Aus den Graphiken ist folgendes abzuleiten: Zunächst fällt das für diese Linearkombination typisch hohe Rauschen von ±0.5-0.7 m auf. Zusätzlich ist aber den OMC noch ein systematischer Trend überlagert, der *de facto* in den Daten nicht mehr auftreten sollte, wenn alle nennenswerten Fehleranteile im funktionalen Ansatz durch Doppeldifferenzen nach Gleichung (8) beseitigt sind. Trotzdem wird dieses Phänomen für die beschriebene Antennenkonfigu-

ration durch siderische Wiederholung bestätigt. Wie den Abbildungen II.1.13(a)-II.1.13(d) ebenfalls entnommen werden kann, lässt sich der systematische Trend durch die entsprechenden GDV Korrekturen gerade bezüglich der Trends sehr gut approximieren wodurch die GDV experimentell belegt sind. Zusätzlich zeigt sich, dass ihr Einfluss größer als einer Widelane-Mehrdeutigkeit mit $\lambda_{WL} = 0.86\,\mathrm{m}$ ist.

Die auf der Beobachtungsebene auftretenden und die Beobachtungen in ihrer Genauigkeit reduzierenden GDV sind von vielerlei Faktoren abhängig, vorrangig von der Art der Beobachtungsaufbereitung und Art der GNSS-Datenprozessierung. So kann zum Einen durch geeignete Filterung (Codephasenglättung mit Trägerphasen-Beobachtungen) der Effekt der GDV verstärkt werden, da die GDV einen Trend im Beobachtungsraum hervorrufen. Zum Anderen kann der Effekt ebenfalls durch geschickte Filterung und Anpassung der Mittelungszeit entsprechend verringert werden.

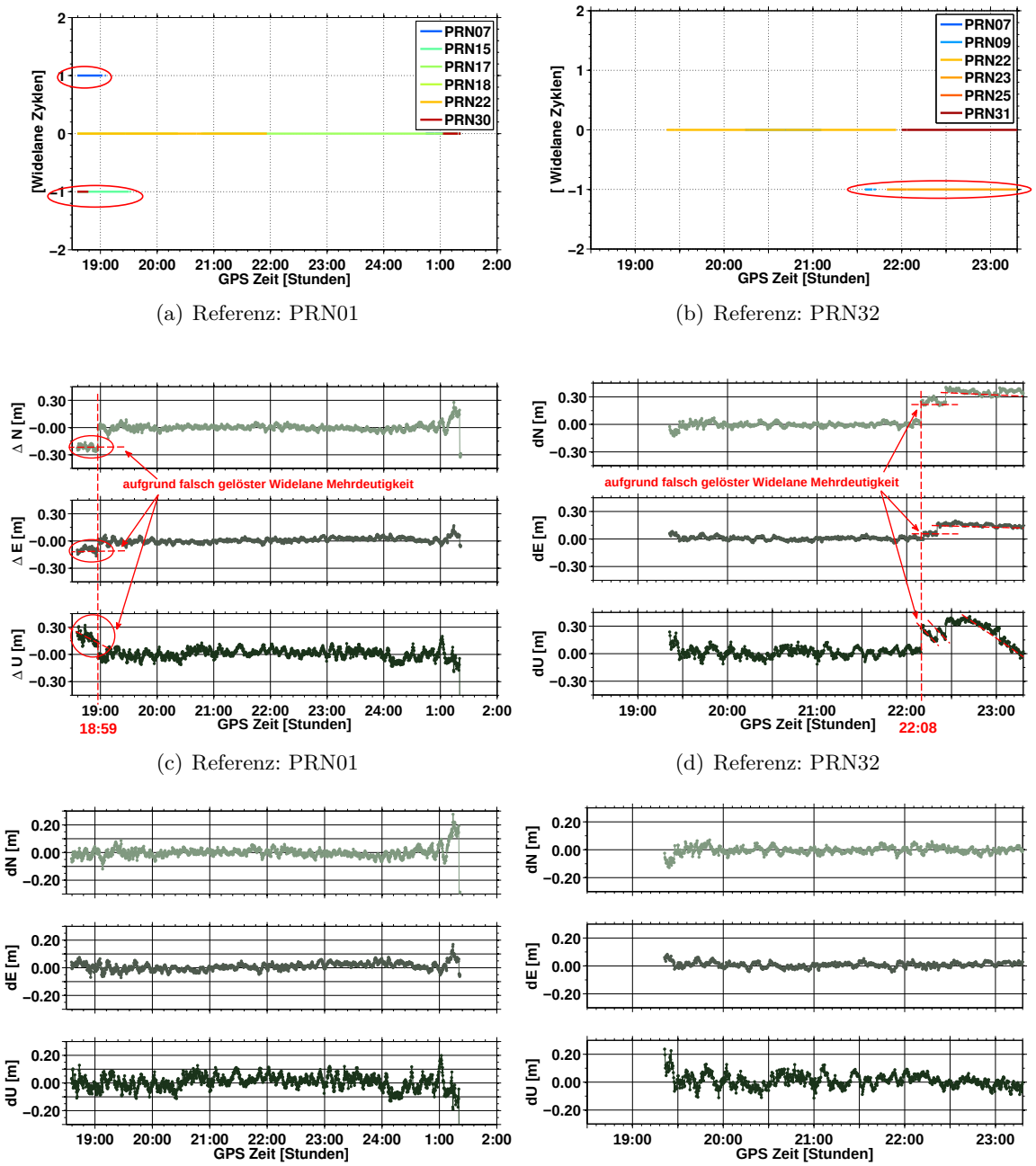
Analyse der Widelane-Koordinatenlösung Die GDV sind konstellationsabhängige Abweichungen der Codephasenbeobachtungen verursacht durch die verwendeten Antennen. Dies lässt sich durch die in Abbildung II.1.14 gezeigten Differenzen der MWLK Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeitslösung mit und ohne Berücksichtigung der GDV ablesen. In Abbildung II.1.14(a) sind für den Referenzsatelliten PRN01 die Widelane-Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten gezeigt, die einerseits mit und andererseits ohne Berücksichtigung der GDV Korrekturen auf der Codephase bestimmt wurden. Gerade am Anfang der Zeitreihe ist erkennbar, dass für drei Satelliten (PRN07, PRN18, PRN30) eine falsche Widelane-Mehrdeutigkeit bestimmt wurde. Entsprechendes ist auch für den Referenzsatelliten aus Abbildung II.1.14(b) erkennbar, wo die falschen Mehrdeutigkeiten für bis zu zwei Satelliten (PRN09, PRN23) am Ende der Zeitreihe zu identifizieren sind.

Werden die Koordinaten mit der Widelane-Linearkombination mit Hilfe der entsprechenden MWLK Mehrdeutigkeiten gelöst, so fällt zunächst das erhöhte Rauschen für die topozentrischen Komponenten (dN, dE, dU) von insgesamt 0.08 m in Abbildung II.1.14(e) und II.1.14(f) auf. Weiterhin ist aber eindeutig sichtbar, dass in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation im Antennenkoordinatensystem die falsch gelösten MWLK Doppeldiffferenz-Mehrdeutigkeiten eine typische Signatur in der Koordinatenebene (siehe Abbildung II.1.14(c)-II.1.14(d)) hervorruft. Daraus kann abgeleitet werden, dass GDV mit Magnituden von bereits ca. 0.6 m pro Frequenz die korrekte Lösung der Widelane-Mehrdeutigkeit beeinträchtigen.

Durch Berücksichtigung der GDV Korrekturen für die Codephasenbeobachtung für den Referenzsatelliten PRN01 werden die Driften und Sprünge auf der Widelane-Doppeldifferenzlösung in Abbildung II.1.14(e) korrigiert. Vergleichbare Resultate werden auch für die Widelane-Doppeldifferenzlösung aus Abbildung II.1.14(f) erhalten. Die Zeitpunkte, an denen die MWLK Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten auftreten, korrespondieren mit den Auf- bzw. Untergängen der entsprechenden Satelliten, also gerade in den Bereichen, wo das individuelle GDV Pattern mit den größten Magnituden zu erwarten sind.

Analyse der Narrowlane und L_1-Koordinatenlösung Nachdem die Widelane-Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten $N^{jk}_{w,AB}$ gelöst sind können anhand des Zusammenhangs aus Gleichung (8) und der ionospärenfreien Linearkombination L_3 zunächst die L_1 Mehrdeutigkeiten geschätzt werden. Die anschließende Berechnung der entsprechenden L_2 Mehrdeutigkeiten ergibt sich direkt aus dem einfachen Zusammenhang

$$N^j_{w,A} = \lambda_w (N^j_1 - N^j_2). \tag{10}$$



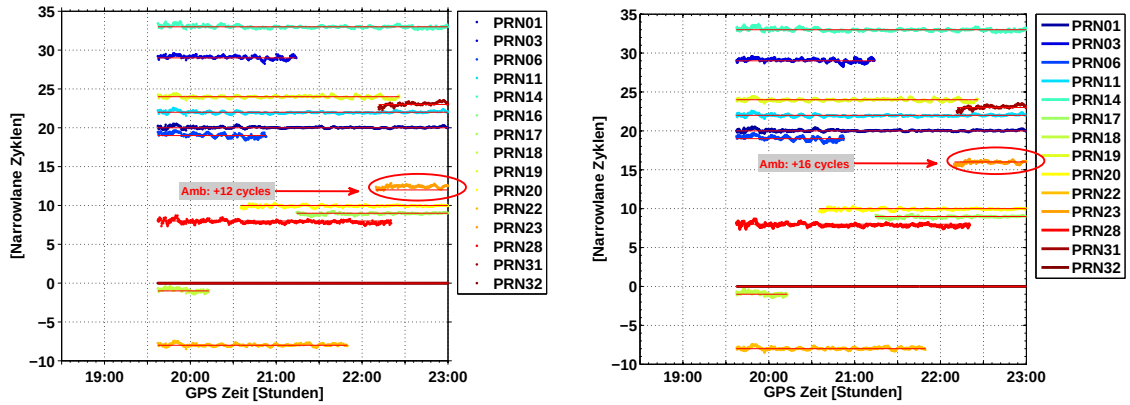
(a) Referenz: PRN01 (b) Referenz: PRN32

(c) Referenz: PRN01 (d) Referenz: PRN32

(e) Referenz: PRN01 (f) Referenz: PRN32

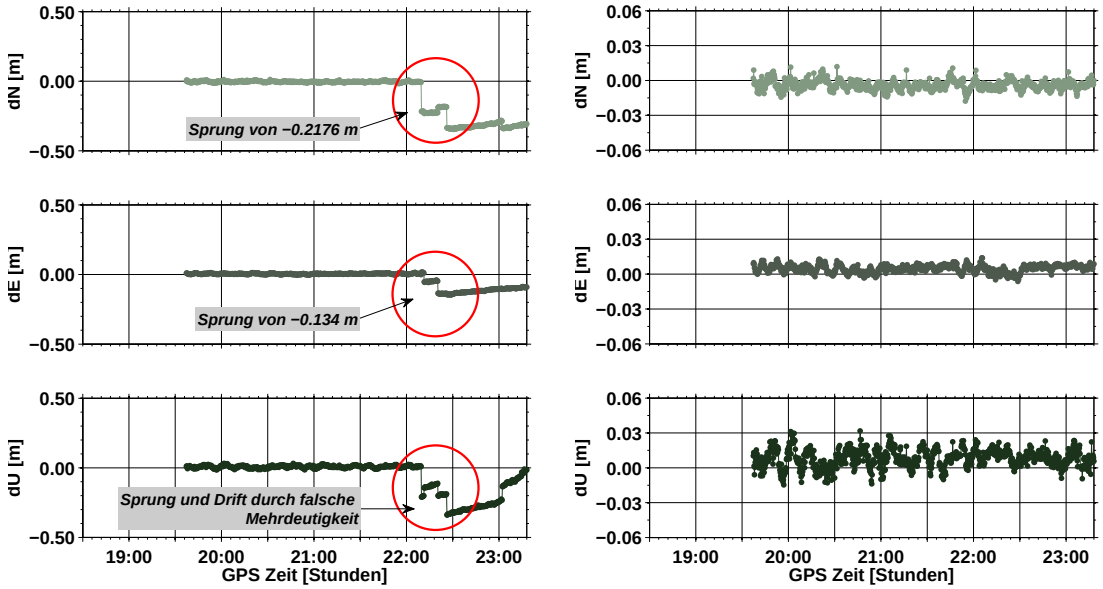
Abbildung II.1.14: Beeinträchtigung der Widelane-Mehrdeutigkeitsanalyse und der Widelane-Koordinatenbestimmung durch GDV für zwei verschiedene Referenzsatelliten (a-d) sowie Korrektur der Koordinatenlösung durch Berücksichtigung der GDV Korrekturen (e-f).

In Abbildung II.1.15 sind am Beispiel der Doppeldifferenzlösung bezüglich des PRN32 die bestimmten Narrowlane-Mehrdeutigkeiten aufgezeigt. Deutlich festzustellen ist die um 4 Narrowlane-Zyklen falsche Mehrdeutigkeit des Satelliten PRN23, die in Abbildung II.1.15(a) (GDV Korrekturen berücksichtigt) eine Größe von 12 und in Abbildung II.1.15(b) (ohne Berücksichtigung der GDV Korrekturen) eine Größe von 16 annimmt. Die ursächlich durch GDV falsch gelöste Widelane-Mehrdeutigkeit bildet sich schließlich direkt auf die Lösung



(a) (b)

Abbildung II.1.15: Einfluss der GDV Magnituden auf die Narrowlane Mehrdeutigkeitslösung am Beispiel der Doppeldifferenzlösung mit PRN32 als Referenzsatellit, (a) ohne GDV Korrektur, (b) mit Berücksichtigung der GDV Korrektur.



(a) (b)

Abbildung II.1.16: GPS L_1 Koordinatenlösung mit (a) und ohne (b) GDV Korrektur. Der Einfluss der antennen-spezifischen GDV auf die Widelande-Mehrdeutigkeiten beeinflusst direkt die Bestimmung der Narrowlane-Mehrdeutigkeiten (a). Durch Anbringung der GDV-Korrekturen ist die Bestimmung der Narrowlane-Mehrdeutigkeiten fehlerfrei und zeigt zu erwartende L_1 Koordinatenzeitreihen (b).

der Narrowlane-Mehrdeutigkeiten ab. Der Zeitraum, an der die falsch gelöste Mehrdeutigkeit auftritt korrespondiert exakt mit dem Beginn der falsch gelösten Widelane-Mehrdeutigkeit aus Abbildung II.1.14(d).

Die endgültigen L_1 Doppeldifferenz-Trägerphasen Koordinatenzeitreihen bestätigen abschließend die zuvor diskutierten Studien. Abbildung II.1.16 zeigt die Wirkung einer falsch gelösten Widelane-Mehrdeutigkeit für die L_1 Doppeldifferenz-Trägerphasen-Lösung. In allen drei to-

pozentrischen Koordinatenkomponenten (dN, dE, dU) sind Signaturen zu identifizieren, die im Zusammenhang mit falsch aufgelösten Mehrdeutigkeiten auftauchen. Diese Signaturen zeichnen sich durch plötzliche Sprünge von ganzzahligen Wellenlängen und Driften aus. Die Zeitpunkte, an denen die Sprünge zu beobachten sind korrespondieren mit den Zeitpunkten, ab denen die Widelane-Mehrdeutigkeit nicht korrekt gelöst wurde. Werden die antennenspezifischen GDV hingegen korrekt angebracht, so sind die Sprünge und Driften in den Koordinatenzeitreihen eliminiert, wie Abbildung II.1.16(b) deutlich zeigt.

Es lässt sich an dieser Stelle abschließend festhalten, dass GDV von bereits 0.6 m das Potential besitzen, die Widelane-Mehrdeutigkeitsbestimmung negativ zu beeinträchtigen.

Einfluss GDV auf PPP Prozessierung

Die Kombination von Träger- und Codephase wird nicht nur allein bei der Mehrdeutigkeitsanalyse nach der Melbourne-Wübbena Methode verwendet, sondern auch bei der PPP-Datenverarbeitung (Zumberge et al., 1997) ist die Kombination eine wesentliche Voraussetzung. Notwendig hierfür sind Zweifrequenz-Codephasenmessungen. Das Rauschen der Beobachtungsgröße ist hängt von den Performanz-Parametern der GNSS-Antenne in Verbindung mit dem entsprechendem Empfänger ab, wie bereits in Kersten und Schön (2012c) beschrieben, aber auch durch den jährlich herausgegebenen GNSS-Antennenreport gezeigt, (GPS World, 2014).

Da durch die Bildung der ionosphärenfreien Codephasen-Linearkombination (P3) die Abweichungen auf beiden Frequenzen P1 und P2 verknüpft werden (Seeber, 2003) muss bei der PPP-Prozessierung mit einer Verstärkung der GDV gerechnet werden.

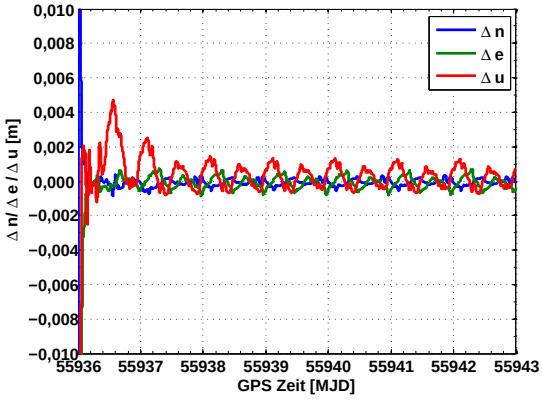
Instrumentarium und Datensatz Zum Studium der Effekte wurden reale Daten der Fundamentalstation in Wetzell (WTZS) in Bayern verwendet (siehe Abbildung II.1.17). Diese Station ist von besonderem Interesse, da der geodätische GNSS-Empfänger (Septentrio PolaRx2) zum einen an einem sehr frequenz-stabilen Wasserstoff-Maser (H-Maser, EFOS-39) anschlossen ist und zum andern sich in einem temperaturstabilisierten Raum befindet, (Grünreich, 2009, S. 70f). Als GNSS-Empfangsantenne wird eine Leica `LEIAR25.R3 LEIT` 3d Choke Ring Antenne verwendet. In dieser Konstellation können die instrumentenspezifische Einflüsse auf ein Minimum reduziert werden, so dass sich die GDV-Analyse losgelöst von anderen, äußeren Faktoren studieren lassen. Die PPP-Prozessierung wurde mit einer am IfE entwickelten Software (Weinbach und Schön, 2011) mit einem implementierten Kalman-Filter Ansatz durchgeführt. Zusätzlich wurden Routinen implementiert, um die GDV während der Prozessierung zu berücksichtigen. Die präzisen Orbits, Satellitenuhren und Erdrotationsparameter für die berechneten tage DOY010-DOY016 des Jahres 2001 wurden durch den IGS bereitgestellt, (Dow et al., 2009). Die ebenfalls zur Berechnung notwendigen Auflasteffekte sind durch das Modell FES2004 vom Onsala Space Observatory (OSO) vorhanden, (Scherneck, 1991).

Für die verwendete Leica LEIAR25.R3 LEIT Antenne wurden die GDV am IfE bestimmt (Kersten und Schön, 2012c,a) und im Rahmen der PPP-Datenverarbeitung angebracht. Zusätzlich wurden für eine Zweifrequenz-Antenne (ASH700700.B), die ursprünglich in marinen Applikationen Anwendung findet, angebracht. Das zugehörige GDV-Pattern wurde ebenfalls am IfE aus Wiederholungskalibrierungen bestimmt, Kersten und Schön (2012).

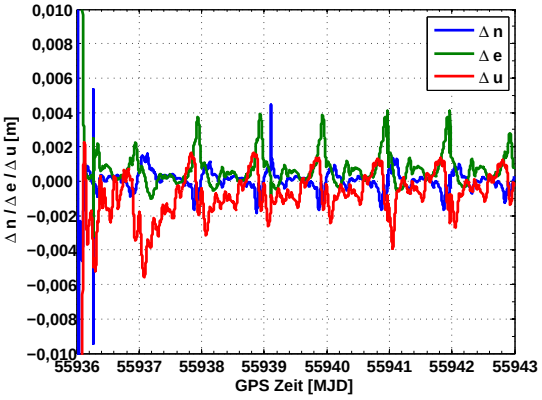
Diskussion der Ergebnisse Ergebnisse der PPP-Prozessierung über 7 Tage sind in der Abbildung II.1.18 zusammengestellt. Der Einfluss der GDV auf die Positionslösung ergibt sich durch Differenzbildung ggb. einer Soll-Lösung ohne Anbringung der Korrekturen, so wie es aktuelle der Stand der Technik ist.

(a) EFOS18 und EFOS39 (b) GNSS-Empfänger (c) Antenne

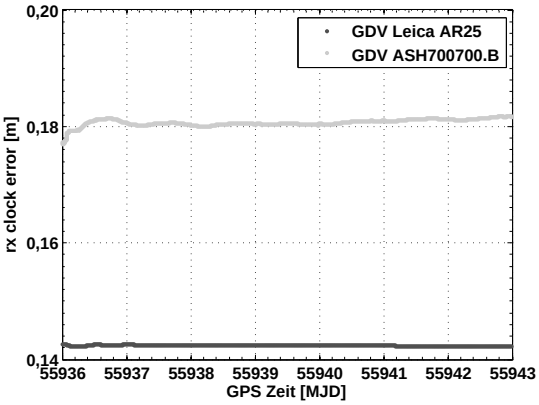
Abbildung II.1.17: Infrastruktur an der Fundamentalstation in Wettzell, Bayern (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - BKG) mit den Wasserstoffmasern EFOS18 und EFOS39 (a), dem GNSS-Empfänger (b) und der Montierung der GNSS-Antenne (c).



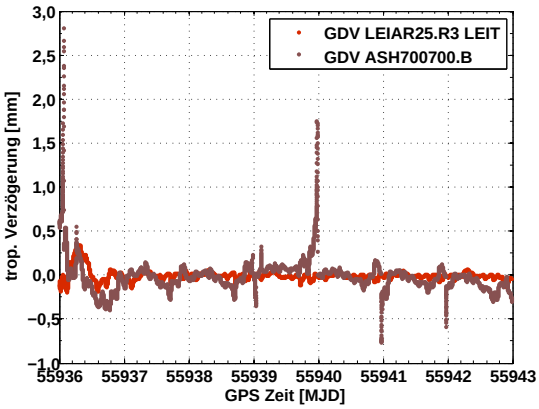
(a) Einfluss GDV Leica AR25



(b) Einfluss GDV Ashtech



(c) Empfängeruhrfehler



(d) troposphärische Verzögerung

Abbildung II.1.18: Ergebnisse der PPP-Prozessierung mit und ohne GDV-Pattern für die Positionslösung (a-b), den geschätzten Empfängeruhrfehler (c) sowie der troposphärischen Verzögerung (d).

Die Positionslösung mit Berücksichtigung des originären GDV-Pattern ist in der Abbildung II.1.18(a) dargestellt. Die wiederkehrende Struktur auf den differentiellen Positionslösungen der Nord-, Ost- und Hochkomponente (Δn, Δe, Δu) sind auf die sich siderisch wiederholende Geometrie der GPS-Satelliten zurückzuführen. Nach Einlaufen des Filters sind maximale Abweichungen in der Δu-Komponente von ± 2 mm zu identifizieren. Deutlich geringer hingegen sind die Abweichungen auf der Δn sowie der Δe Komponente, wo Einflüsse der GDV mit ca. ± 1 mm ablesbar sind. Die Struktur ist stabil und wiederholbar.

Die geringen Variationen im Positionsraum sind auf die geringen GDV der Leica `LEIAR25.R3 LEIT` Antenne selbst zurückzuführen, die mit maximalen Magnituden von 0.3 m sich nah am Codephasenrauschen der P1- bzw. P2-Beobachtung befinden, (Kersten und Schön, 2012c).

Wird ein deutlich markanteres GDV-Pattern angesetzt, so sind deutlichere Einflüsse im Positionsraum zu erwarten, wie es der Abbildung II.1.18(b) für die GDV einer ASH700700.B zu entnehmen ist. In diesem Fall sind sowohl die Δu als auch die Δe Komponente mit Variationen von bis zu 4 mm beeinträchtigt. Die Struktur ist siderisch wiederholbar.

Zusätzlich zur Auswirkung der GDV im Positionsraum ist ebenfalls die Auswirkung auf den geschätzten Empfängeruhrfehler und die troposphärische Verzögerung interessant. Der geschätzte Empfängeruhrfehler ist für beide zuvor vorgestellten Konfigurationen in der Abbildung II.1.18(c) dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die individuellen GDV einen individuellen Offset in den geschätzten Empfängeruhrfehler einbringen. Diese Ergebnisse bestätigen die abgeschlossenen Arbeiten, die im Rahmen der Analyse von PPP-Zeitlinks durchgeführt wurden, (Kersten und Schön, 2012c). Zusätzliche Variationen, unabhängig zum eingeführten Offset, können nicht bestätigt werden. Interessant in diesem Zusammenhang ist der Offset zwischen den GDV-beeinflussten Empfängeruhrfehler, die sich um ca. 4 cm unterscheiden. In Verbindung der Erkenntnisse aus den Analysen aus Abschnitt A sowie B.1 wäre ein konstanter Offset im geschätzten Empfängeruhrfehler durch einen Höhenoffset in der topozentrischen Hochkomponente Δu zu erklären. Berücksichtigt man aber die für die GDV-Bestimmung erreichbare Genauigkeit von ca. $\pm 0.05 - 0.10$m (Kersten und Schön, 2012c), so ist auch dieser Offset im geschätzten Empfängeruhrfehler erklärbar.

Im Rahmen der Analysen hat sich gezeigt, dass die GDV auf die Schätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung, wie in Abbildung II.1.18(d) gezeigt, einen untergeordneten Einfluss ausüben. Die Variationen, hervorgerufen durch das Pattern der Leica `LEIAR25.R3 LEIT` Antenne sind deutlich zu vernachlässigen. Die Variationen, hervorgerufen durch die `ASH700700.B NONE` Antenne, sind nur bedingt zu vernachlässigen. Zwar liegen für den größten Teil der analysierten Zeit die auftretenden Variationen unterhalb von 0.5 mm, dennoch sind, abhängig von der topozentrischen Satellitengeometrie, tlw. kurzere Variationen und Driften bis hin zu 1 - 1.5 mm zu beobachten.

Fazit GDV Variationen haben in Abhängigkeit ihrer auftretenden Magnituden einen bisher geringen Einfluss innerhalb der PPP-Datenprozessierung. Die in diesen Analysen festgestellten geringen Variationen der GDV auf die Positionierung, den geschätzten Empfängeruhrfehler und die troposphärischen Laufzeitverzögerungen sind auf die Modellierung der Codephasenbeobachtung innerhalb der PPP-Routinen zurückzuführen. Für die hier gewählten Studien wurden ein gewöhnliches Rauschen der Codephasenbeobachtungen von $\sigma_P = 0.6$ m angesetzt. Die GDV der Leica Antenne sind mit ca. 0.3 m pro Frequenz (P1 bzw. P2) deutlich

innerhalb des Beobachtungsrauschens. Sofern jedoch ein markanteres GDV-Pattern vorhanden ist, wie es z.B. für die Ashtech Antenne `ASH700700.B` der Fall ist, sind auch Variationen in den abgeleiteten Parametern zu detektieren.

Für die Prozessierung neuer Signalstrukturen wie z.B. dem AltBOC-Signal wie sie bei Galileo (E_{5a}, E_{5b} und E_{5ab}) oder auch dem chinesischem System Beidou (B_3) verwendet werden, (Hein und Aviala-Rodriguez, 2006; Eisfeller et al., 2007) ist ein deutlich geringeres Rauschen zu erwarten. Dieses verminderte Rauschen wird zum einen die absolute Positionslösung deutlich verbessern, zum anderen aber auch die sensorspezifischen Einflüsse der GNSS-Antenne in den Vordergrund rücken, so dass eine zukünftige Berücksichtigung der GDV notwendig sein wird.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gegenüberstellung des Gesamtfinanzierungsplanes und der abgerufenen Mittel

Die beantragten Mittel wurden gemäß der Planung erfolgreich eingesetzt und für folgende Positionen verwendet.

Personalmittel Es konnte planmäßig der Mitarbeiter Herr Dipl.-Ing. Tobias Kersten sowie studentische Hilfskräfte zur Unterstützung der Arbeiten des Vorhabens finanziert werden.

Reisekosten Die neuen Ergebnisse und Erkenntnisse konnten planmäßig dem nationalen und internationalen Fachpublikum auf verschiedenen Konferenzen vorgestellt werden. Hierunter zählen die Geodätischen Woche 2012 in Hannover, die European Navigation Conference (ENC) 2013 in Österreich, Scientific Assembly der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) sowie die American Geophysical Union (AGU) im Dezember 2013. Darüber hinaus wurden aus Institutsmitteln zusätzliche Beiträge zu nationalen Konferenzen finanziert, wie zum Beispiel der Navitech 2012 in Noordwijk und dem IGS Workshop 2012 in Olsztyn. Hierzu sei auch auf die erfolgten Publikationen verwiesen, die im Abschnitt II.6 aufgelistet sind.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit Abschluss des Vorhabens 50 NA 0903 (Kersten und Schön, 2012c) sind Themenfelder eröffnet worden, die im Rahmen dieses Anschlussvorhabens abschließend erfolgreich beantwortet wurden. Dies betrifft zum einen die Kalibrierung der Codephasenbeobachtung und deren Relevanz für die Positionierung, Navigation sowie Zeit- und Frequenzübertragung mit GNSS. Zum anderen ist die Relevanz bezüglich der Kombination zwischen Träger- und Codephasenbeobachtung ein wesentlicher Schritt im Rahmen dieses Vorhabens gewesen, der abschließend erfolgreich beantwortet werden konnte.

Ferner wurden durch das Vorhaben 50 NA 1216 neue Anknüpfungspunkte für zukünftige Vorhaben geschaffen. Dies betrifft auf der einen Seite die kommerzielle Umsetzung des GDV-Kalibrierverfahrens wie es im Vorhaben 50 NA 0903 entwickelt und im Anschlussvorhaben 50 NA 1216 ausführlich getestet wurde und in dem die Relevanz der GDV-Kalibrierwerte herausgearbeitet werden konnte. Auf der anderen Seite konnten aktuelle Fragen der konsistenten Fortführung der PCC-Kalibrierwerte analysiert werden. Es zeigt sich, dass aktuelle Unsicherheiten der PCC-Kalibrierwerte sich signifikant und erheblich auf die geschätzten Parameter auswirken. Gerade in globalen Netzen, wo GNSS-Antennen durch ihre geographische Lage erheblich unterschiedliche topozentrische Satellitengeometrien vorweisen, sind systematische Abweichungen festzustelllen, die zu Skalierungsfehlern führen und die Präzision der GNSS-Trägerphase erheblich beeinträchtigen.

Diskussionen gerade im Bereich der Kalibrierung von GNSS-Codephasenbeobachtung spiegeln die Relevanz des Vorhabens 50 NA 1216 wider.

Seit dem Abschluss des Vorhabens mit der Fördernummer 50 NA 9809 / 8 führten die Ergebnisse der Antennenkalibrierung beim Fachpublikum für zunächst kontroverse Diskussionen. Nach dem Durchbruch zur internationalen Akzeptanz und einen weltweiten Paradigmenwechsel seitens des IGS ist das Hannoversche Verfahren weltweit führend.

Parallel dazu entwickelten sich aber die bestehenden GNSS (GPS und GLONASS) weiter und neue Systeme (Galileo, BeiDou) kamen hinzu. Seitens des Verfahrens sind keine grundlegenden Änderungen zu erwarten. Jedoch sind auf der Seite der Modellierung der Beobachtungsgleichung neue Ansätze zu untersuchen, vor Allem vor dem Hintergrund neuer Signalstrukturen wie dem AltBOC Signal bei Galileo und Beidou, (Hein und Aviala-Rodriguez, 2006; Eisfeller et al., 2007). Die neuen Signalstrukturen unterstützen ein deutlich stabilere bzw. robustere Signalarchitektur, so dass das Codephasenrauschen deutlich bis zu einer Größenordnung geringer ausfallen wird, wodurch sich die instrumenten- bzw. sensorspezifischen Fehler (vorrangig induziert durch die GNSS-Antenne) deutlich in den messbaren Signifikanzbereich begeben werden.

Der Aufwand, der in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten, rechtfertigt sich durch den Erfolg der erreichten Ziele.

Zur Durchführung der Arbeiten war das IfE als öffentliche Einrichtung auf die finanzielle Zuwendung angewiesen. Für die beantragten und aufgeführten Kosten besaß das Institut nicht die notwendigen finanziellen Haushaltsmittel, sodass die Förderung des Vorhabens im beantragten Umfang notwendig war. Das IfE stellte mit dem Roboter eine an einer deutschen Universität einzigartige Infrastruktur für das Projekt zur Verfügung. Neben dem Roboter selbst stellte das Institut externe Rubidium Frequenzormale, GNSS-Empfänger sowie verschiedenes Hochfrequenzzubehör (Kabel, Signalteiler, Adapter etc.) sowie einen technischen Mitarbeiter für die notwendigen Adaptionen und zur Unterstützung des Wissenschaftlichen Mitarbeiters zur Verfügung.

Die notwendigen finanziellen Mittel wurden entsprechend dem Vorhabenumfang und Erkenntnisgewinn angemessen verwendet.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen - insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes

Dem Vorhabenplan folgend wurden grundlegende Konzepte zur Antennenkalibrierung untersucht. Parallel zum derzeit bestehenden operationellen Ansatz nach dem Hannoverschen Verfahren, (Seeber und Böder, 2002), wurde durch den Antragsteller eine Matlab basierte Toolbox entwickelt, die als Testumgebung die Analyse und Untersuchung während der Modellierung und Erweiterung des Verfahrens ermöglicht. Somit können Ansätze der Modellierung im Post-Prozessing angewendet und untersucht werden, bevor die Umsetzung in ein operationelles Verfahren durchgeführt wird.

Mittelfristig ist die Optimierung des Verfahrens beabsichtigt, um auch im operationellen Verfahren die Erkenntnisse dieses Vorhabens einfließen zu lassen.

Die Untersuchungen haben eindeutig gezeigt, dass die GDV-Kalibrierung prinzipiell möglich und für unterschiedliche GNSS-Antennen nach dem Hannoverschen Verfahren durchführbar ist. Dies zunächst auf Grundlage eines im Rahmen des Vorhabens entwickelten Post-Prozessors. Die Integration in eine Echtzeit-Kalibrierung ist anvisiert und verspricht einen wirtschaftlichen sowie wissenschaftlichen Mehrwert für die Berechnung der GDV hinsichtlich im Rahmen eines operationellen Ansatzes, der mit erheblich kürzeren Berechnungs- und Arbeitszeiten einhergeht.

Die aus dem Vorhaben resultierenden Ergebnisse und theoretischen Kenntnisse sind bereits in die Lehre eingeflossen. Aufgrund des komplexen Themas werden vorrangig die Studenten im Masterstudium und hier speziell im Fach *Ausgewählte Kapitel der Navigation* hiervon direkt profitieren, da Erkenntnisse von Forschungsarbeiten in die Lehrveranstaltung integriert werden. Ebenfalls widmen sich aktuell ausgewählte Bachelor- und Master-Arbeiten kleineren Fragestellungen, die sich durch das Vorhaben im Bereich der Antennenkalibrierung ergaben.

II.5 Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Arbeiten am Vorhaben gab es bei anderen Stellen ebenfalls relevante Forschungsarbeiten und Publikationen, die sich thematisch folgend zusammenfassen lassen:

Absolute Roboter-Antennenkalibrierung Das aus dem Vorgänger-Vorhaben 50 NA9809/8 (Seeber und Böder, 2002) entwickelte und marktreife Produkt der absoluten Antennenkalibrierung wurde bereits mehrfach an interessierte Institutionen durch die Firma Geopp® verkauft. Die entsprechenden Robotereinheiten werden anhand ihrer Entwicklung entweder mit MPx oder PCVx bezeichnet. Folgende Institutionen verfügen über eine feldbasierte Robotereinheit die nach dem Hannoverschen Konzept nach Seeber und Böder (2002) arbeiten:

- Geo++® (MP1, PCV5)
- Institut für Erdmessung (IfE): MP2
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (SenStadtUm): PCV3, PCV6
- Geoscience Australia: PCV7

Während die aufgelisteten administrativen und wirtschaftlichen Institutionen das Kerngeschäft der GNSS-Antennenkalibrierung auf der kommerziellen Ebene verfolgen, zielen am Institut für Erdmessung die Interessen hauptsächlich auf den Einsatz in Forschung und zu besonderen Teilen auch in der Lehre (Bachelor- und Master-Arbeiten im Bereich der Antennenkalibrierung) ab. Das IfE besitzt aktuell eine besondere Stellung, die in zukünftigen Vorhaben ausgebaut werden soll.

Absolute Roboter-Antennenkalibrierung Einen leicht abgewandelten Ansatz zur Roboterkalibrierung nach Seeber und Böder (2002) unter Verwendung eines FANUC LR Mate 200iC Roboters wurde durch Chen et al. (2013) vorgestellt. In diesem Paper werden auch erste Vergleichsanalysen diskutiert, die aber nur auf kurzen, zeitlichen Ausschnitten von 2h beruhen. Trotzdem kann eine gute Überdeckung oberhalb der Antennenhemisphäre erreicht werden.

Vergleichbarkeit von Antennenkalibrierwerten Vor dem Hintergrund der sich neu ent wickelnden Kalibriereinrichtungen (Zeimetz, 2010; Bilich und Mader, 2012; Chen et al., 2013) hat die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einen wesentlichen Stellenwert in der nationalen und internationalen Diskussion zum Austausch von GNSS-Antennenkorrekturen eingenommen, (Bilich et al., 2012; Görres und Mayer, 2013). Diese Entwicklung hebt die Ziele des Arbeitspaketes A deutlich hervor und setzt diese in einen völlig neuen und aktiv diskutierten Kontext.

IGS Reprozessierung Die Analysezentren des IGS bereiten die Reprozessierung des gesamten Netzes vor, um daraus Parameter eines neuen global-konsistenten Referenzsystems abzuleiten. Hierzu sind konsistente GPS- und GLONASS-Antennenkalibrierwerte von erheblichen Interesse. Leider fehlt hierzu bislang ein adäquater Evaluationsansatz, Baire et al. (2012). Das bisherige Vorgehen zum Vergleich von Antennenkalibrierwerten führt bereits bei regionalen Netzen wie z.B. dem EPN zu Inkonsistenzen, wie Baire et al. (2012) zeigen.

GDVs bei Analysezentren Die European Space Agency (ESA) verlangt für neu angeschaffte GNSS-Antennen seit kurzem Kalibrierungen auch für die Codephasenbeobachtung (GDV). Es ist noch erheblicher Aufwand von Seiten der Analysezentren notwendig, um die zur Verfügung stehenden Korrekturdaten in die Prozessierung der GNSS-Beobachtungen einzupflegen. Aber die Relevanz der GDV wurde bereits durch das Vorhaben 50NA0903 (Kersten und Schön, 2012c) sowie dem aktuellen Studien deutlich hervorgehoben und in der relevanten Literatur dem Fachpublikum zur Verfügung gestellt.

II.6 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Publikation aktueller Teile des Gesamtvorhabens auf unterschiedlichen nationalen und internationalen Konferenzen. Gerade die Vorstellung der Arbeiten im Bereich der Zeit- und Frequenzübertragung fand ein reges Interesse und förderte das weitere Vorgehen im Vorhaben durch neue Ansätze.

Erfolgte Publikationen

Kersten, T. (2013a). Group Delay Variationen und Melbourne-Wübbena Linearkombinationen. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung.

Kersten, T. (2013b). PPP Analysen mit modifizierten bzw. transformierten ANTEX Eingabedateien. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung.

Kersten, T. und Schön, S. (2013). Analysis of IfE-Robot based Group Delay Variations for the Positioning and Navigation of Mobile Platforms. In *Proceedings of the European Navigation Conference (ENC), April 23-25, Vienna, Austria*, Seitenanzahl 10.

Kersten, T. und Schön, S. (2012a). ACA_IfE - Ein Matlab Post-Prozessor zur Bestimmung von Antennenspezifischen GPS Code-Phasen Variationen (GDV). In Weisbrich, S. und Kahden, R. (Hrsg.), *Entwicklerforum Geodäsie und Geoinformationstechnik, September 27-28, 2012, Berlin, Deutschland*, Seiten 3–17.

Kersten, T. und Schön, S. (2012b). Antenna specific IfE-Robot based Code Phase Delays and its Impact on Positioning and Navigation. In *Proceedings of the 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, ESA ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*, Seitenanzahl 8. Online verfügbar unter DOI: 10.1109/NAVITEC.2012.6423088.

Kersten, T. und Schön, S. (2013a). Impact of Individual Receiver Antenna Code Phase Variations on the Ambiguity Resolution. In *AGU Fall Meeting, December 9-13, San Francisco, USA*, Nummer #G53b-0920 in Geophysical Research Abstracts. Poster.

Kersten, T. und Schön, S. (2013b). The Impact of Group Delay Variations on Wide- and Narrowlane Linear Combinations. In *IAG Scientific Assembly 2013, 150 years International Association of Geodesy (IAG), September 01.-06., GfZ - Potsdam, Germany.*

Schön, S. und Kersten, T. (2013). On Adequate Comparisons of Antenna Phase Center Variations. In *AGU Fall Meeting, December 9-13, San Francisco, USA*, Nummer #G13B-0950 in Geophysical Research Abstracts. Poster.

Schutzrechte

Während der Durchführung der Analysen und Erweiterungen des Ansatzes der absoluten Antennenkalibrierung nach dem Hannoverschen Verfahren sind keine Schutzrechte entstanden. Die neu gewonnen Erkenntnisse werden den wissenschaftlichen Nutzern zur Verfügung stehen, wie bereits durch die angegebenen Publikationen geschehen ist.

Literatur

Aerts, W. (2011). Comparison of UniBonn and Geo++® Calibration for LEIAR25.R3 antenna 09300021. Technischer Bericht, Royal Observatory of Belgium.

Aerts, W., Baire, Q., Bilich, A., Bruyninx, C., und Legrand, J. (2013). On the Error Sources in Absolute Individual Antenna Calibrations. In *Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-6113, EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria.*

Aleksandrov, A. D., Kolmogorov, A., und M.A.Lavrent'ev (Hrsg.) (1999). *Mathematics - Its Content, Methods, and Meaning*, Volume 3. The M.I.T. Press Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Baire, Q., Pottiaux, E., Bruyninx, C., Defraigne, P., Aerts, W., Legrand, J., Bergeot, N., und Chevalier, J. (2012). Impact of Individual GNSS Antenna Calibration Used in the EPN on Positioning. In *EUREF Symposium, Reference Frame Sub-commission for Europe.* Vortrag.

Bilich, A. und Mader, G. (2010). GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Seiten 1369 – 1377.

Bilich, A. und Mader, G. (2012). GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In *IGS Workshop.* Poster.

Bilich, A., Schmitz, M., Görres, B., Zeimetz, P., Mader, G., und Wübbena, G. (2012). Three-method absolute antenna. calibration comparison. In *IGS Workshop 2012, University of Warmia and Mazury (UWM), July 23-27, Olsztyn, Poland.*

Bock, H., Jäggi, A., Meyer, U., Dach, R., und Beutler, G. (2011). Impact of GPS antenna phase center variations on precise orbits of the GOCE satellite. *Advances in Space Research*, 47(11):1885–1893.

Bronstein, I., Semendjajew, K., Musiol, G., und Mühlig, H. (2005). *Taschenbuch der Mathematik.* Hari Deutsch Publishing Company.

Chen, T., HU, Z., und Li, T. (2013). Experimental Studies of precise Calibration of GPS Antenna Phase Center Variation. *Seismology and Geology*, 35(2):380–387. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.02.016.

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., und Meindl, M. (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0.* Astronomical Institute, University of Berne.

Dach, R., Hugentobler, U., Schildknecht, T., und Bernier, H. (2005). Precise continuous time and frequency transfer using GPS carrier phase. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, August 29-31, Vancouver, BC*, Seiten 329–336. 10.1109/FREQ.2005.1573954.

Dach, R., Schmid, R., Schmitz, M., Thaller, D., Lutz, S., Steigenberger, P., und Wübbena, G. (2011). Improved antenna phase center models for GLONASS. *GPS Solut*, 15(1):49–65. Online verfügbar unter DOI: 10.1007/s10291-010-0169-5.

de Galisteo, J. P. O., Cachorro, V., Toledano, C., Torres, B., Laulainen, N., Bennouna, Y., und de Frutos, A. (2011). Diurnal cycle of precipitable water vapor over Spain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(657):948–958. Online verfügbar unter DOI: 10.1002/qj.811.

Defraigne, P. und Baire, Q. (2010). Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer. *Advances in Space Research, Elsevier*, 47(2):265–275. DOI: 10.1016/j.asr.2010.07.003.

Dilssner, F. (2007). *Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung.* Diss., Leibniz Universität Hannover.

Dilssner, F., Seeber, G., Wübbena, G., und Schmitz, M. (2008). Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution. *ION GNSS 2008*, Seiten 612–624.

Dow, J. M., Neilan, R., und Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geod*, 83:191–198.

Eisfeller, B., Irsigler, M., Aviala-Rodriguez, J.-A., Schüler, E., und Schüler, T. (2007). Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO - Entwicklungsstand. *AVN*, (2):42–55.

Geiger, A. (1988). *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*, Volume Nr. 43, Seitenanzahl 66. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.

Görres, B. (2010). Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst? *ZfV*, 135(4):256–267.

Görres, B. und Mayer, M. (2013). *GNSS 2013: Schneller. Genauer. Effizienter*, Volume 70, Kapitel Referenzsysteme und -rahmen für GNSS-Vermessungen, Seiten 223–246. Deutscher Verein für Vermessungswesen (DVW) Schriftenreihe, Wißner-Verlag Augsburg.

GPS World (2014). GPS World Antenna Survey. *GPS World*, 25(2):37–57. online verfügbar unter url: http://editiondigital.net/publication/?i=193710 [17.05.2014].

Grünreich, U. P. D.-I. (2009). *Bericht über die Tätigkeit des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie 01. Juli 2007 - 31. Dezember 2008.* Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Deutschland.

Hatch, R. (1982). The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. In Peat, R. P. (Hrsg.), *Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Feburary, 8-12, Las Cruces, NM, USA*, Volume 2, Seiten 1213–1231. Defense Mapping Agency and National Ocean Survey.

Hein, G. W. und Aviala-Rodriguez, J.-A. (2006). Combining Galileo PRS and GPS M-Code. *Inside GNSS*, 1(1):48–56.

Hill, A., Moore, M., und Dawson, J. (2013). GNSS Antenna Calibration at Geoscience Australia. In *American Geophysical Union, Fall Meeting, December 09-13, San Francisco, CA, USA*, Nummer #G53B-0909 in Geophysical Research Abstracts.

Hirth, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.-H., und Seeber, G. (2011). Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solut*, 15(2):149–159. Online verfügbar unter DOI: 10.1007/s10291-010-0179-3.

Hobson (1931). *The Theory of spherical and ellipsoidal Harmonics.* Cambridge, University Press.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., und Wasle, E. (2008). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS Galileo and more.* Springer Wien - New York.

Hofmann-Wellenhof, B. und Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy.* Springer Berlin.

Jäggi, A., Dach, R., Montenbruck, O., Hugentobler, U., Bock, H., und Beutler, G. (2009). Phase center modeling for LEO GPS receiver antennas and its impact on precise orbit determination. *J Geod*, 83(12):1145 – 1162.

Kersten, T. (2013b). PPP Analysen mit modifizierten bzw. transformierten ANTEX Eingabedateien. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung.

Kersten, T. und Schön, S. (2009). Zum Einfluss von Nahfeldeffekten des Unterbaus FG ANA100B. In *Geodätische Woche 2009, Universität Karlsruhe.* Vortrag.

Kersten, T. und Schön, S. (2010b). On the Receiver's Impact on Phase Center Variations. In *IGS Workshop and Vertical Rates Symoposium 2010.* Poster.

Kersten, T. und Schön, S. (2010d). PCV Estimation of Receiver Antennae Revisited. In *IGS Workshop and Vertical Rates Symoposium 2010.* Poster.

Kersten, T. und Schön, S. (2010e). Towards Modeling Phase Center Variations for Multi-Frequency and Multi-GNSS. In *5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*, Seiten 1–8. ISBN: 978-1-4244-8739-4.

Kersten, T. und Schön, S. (2011a). GNSS Group Delay Variations - Potential for improving GNSS based Time and Frequency Transfer? In *Proceedings of the 43rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, Seiten 255–270.

Kersten, T. und Schön, S. (2012). Current Research Activities at the IfE Antenna Calibration Facility. In *IGS Workshop.* Poster.

Kersten, T. und Schön, S. (2012a). ACA_IfE - Ein Matlab Post-Prozessor zur Bestimmung von Antennenspezifischen GPS Code-Phasen Variationen (GDV). In Weisbrich, S. und Kahden, R. (Hrsg.), *Entwicklerforum Geodäsie und Geoinformationstechnik, September 27-28, 2012, Berlin, Deutschland*, Seiten 3–17.

Kersten, T. und Schön, S. (2012c). Von der Komponentenkalibrierung zur Systemanalyse: Konsistente Korrekturverfahren von Instrumentenfehlern für Multi-GNSS - Schlussbericht zum BMBF/DLR Vorhaben 50NA0903. *Institut für Erdmessung*, Seitenanzahl 105.

Kube, F., Schön, S., und Feuerle, T. (2012). GNSS-based Curved Landing Approaches with a Virtual Receiver. In *Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium (ION-PLANS), 2012 IEEE/ION, April 23-26, SC, USA*, Seiten 188 – 196. Institute of Navigation (ION).

Lahaye, F., Ceretto, G., und Tavella, P. (2011). GNSS geodetic techniques for time and frequency transfer Applications. *Advances in Space Research, Elsevier*, 47(2):253–264. DOI: 10.1016/j.asr.2010.05.032.

Liso, M., Jacob, M., Smyrnaios, M., Schön, S., und Kürner, T. (2011). Basic Concepts for the Modeling and Correction of GNSS Multipath Effects using Ray Tracing and Software Receivers. In *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, September, 12-16, Torino, Italy*, Seiten 890–893. Online verfügbar unter DOI: 10.1109/APWC.2011.6046810.

Mader, G., Bilich, A., und Geoghegan, C. (2012). Absolute GNSS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In *European Geophysical Union General Assembly 2012*, Volume 14 of *Geophysical Research Abstracts #EGU2012-3080*. Poster.

Mader, G. L. (2011). NGS absolute results. *[IGS Antenna Working Group Email-252]*.

Melbourne, W. G. (1985). The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems. In Goad, C. C. (Hrsg.), *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, April 15-19, Rockville, MD, USA*, Volume 1, Seiten 373–386. International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Geodesy, U.S. Department of Defense and U.S. Department of Commerce.

Menge, F. (2003). *Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*. Diss., Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 247.

Montenbruck, O., Garcia-Fernandez, M., Yoon, Y., Schön, S., und Jäggi, A. (2009). Antenna Phase Center Calibration for precise position of LEO Satellites. *GPS Solut*, 13(1):23–34.

Murphy, T., Geren, P., und Pankaskie, T. (2007). GPS Antenna Group Delay Variation Induced Errors in a GNSS Based Precision Approach and Landing Systems. In *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, Seiten 2974 – 2989.

Pape, W. (2014). Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Antennenkalibrierungen auf die Positionsbestimmung mittels Precise Point Positioning. Bachelorarbeit am Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.

Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., alf Schmid, Collilieux, X., und Garayt, B. (2012). IGS08: the IGS realization of ITRF2008. *GPS Solut*, 16(4):483–494. Online verfügbar unter DOI: 10.1007/s10291-011-0248-2.

Rothacher, M., Gurtner, W., Schaer, S., Weber, R., Schlüter, W., und Hase, H. (1995a). Azimut and Elevation-Dependent Phase Center Corrections for Geodetic GPS Antennas Estimated from GPS Calibration Campaigns. In *GPS Trends in Precise Terrestrial Airborne, and Spaceborne Applications, International Association o, G. Beutler, G. W. Hein, G. Seeber, W. G. Melbourne (Hrsg.)*, Volume 115, Seiten 333–338.

Rothacher, M., Schaer, S., Mervat, L., und Beutler, G. (1995b). Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data. In *IGS Workshop 1995*, Seiten 205–220.

Rothacher, M. und Schmid, R. (2010). ANTEX: The Antenna Exchange Format Version 1.4. *IGS Publications, Source: ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex14.txt*.

RTCA (2006). Minimum Operational Performance Standards for Global Navigation Satellite System (GNSS) Airborne Active Antenna Equipment for the L1 Frequency Band. *RTCA/DO-301*. Inc. Washington DC, Issued: 12/13/2006.

Scherneck, H.-G. (1991). A parameterized Solid Earth Tide Model and Ocean Tide Loading Effects for global geodetic baseline measurements. *Geophys. J. Int.*, 106(3):677–694. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06339.x.

Schön, S. und Kersten, T. (2013a). On adequate Comparison of Antenna Phase Center Variations. In *American Geophysical Union, Annual Fall Meeting 2013, December 09.-13., San Francisco, CA, USA*, Geophysical Abstracts #G13B-0950.

Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin. DOI: 10.1515/9783110200089.

Seeber, G. und Böder, V. (2002). Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur hochpräszisen Kalibrierung von GPS Antennenaufstellungen - Schlussbericht zum BMBF/DLR Vorhaben 50NA9809/8. *Institut für Ermdessung*.

Seeber, G., Egge, D., Schuchard, A., Siebold, J., und Wübbena, G. (1985). Experiences with the TI 4100 NAVSTAR Navigator at the University of Hannover. In Goad, C. C. (Hrsg.), *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, April 15-19, Rockville, MD, USA*, Volume 1, Seiten 215–225. International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Geodesy, U.S. Department of Defense and U.S. Department of Commerce.

Staats, G. (2005). *Mehrstrahlantennen für Basisstationen*. Diss., Technische Universität Dresden.

Steigenberger, P., Hugentobler, U., Montenbruck, O., und Hauschild, A. (2011). Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network. *J Geod*, 85(6):357–365. DOI: 10.1007/s00190-011-0443-5.

Torge, W. und Müller, J. (2012). *Geodesy*, Volume 3. 4. Auflage, Walter de Gruyter Berlin/Boston.

van Graas, F., Bartone, C., und Arthur, T. (2004). GPS Antenna Phase and Group Delay Corrections. In *Institute of Navigation (ION), National Technical Meeting (NTM) 2004, January 26 - 28, San Diego, CA, USA*, Seiten 399–408. Institute of Navigation (ION).

Vennebusch, M., Schön, S., und Weinbach, U. (2011). Temporal and spatial stochastic behaviour of high-frequency slant tropospheric delays from simulations and real GPS data. *J. Adv. Space Res.*, 47(10):1681–1690. Online verfügbar unter DOI: 10.1016/j.asr.2010.09.008.

Wübbena, G., Schmitz, M., und Matzke, N. (2010). On GNSS In-Situ Station Calibration of Near-Field Multipath. In *International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications*, Seiten 1–4.

Weinbach, U. und Schön, S. (2011). GNSS receiver clock modeling when using high Precision oscillators and its impact on PPP. *ASR*, 47(2):229–238. DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.031.

Wübbena, G. (1985). Software Developments for Geodetic Positioning with GPS using TI 4100 Code and Carrier Measurments. In Goad, C. C. (Hrsg.), *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, April 15-19, Rockville, MD, USA*, Volume 1, Seiten 403–412. International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Geodesy, U.S. Department of Defense and U.S. Department of Commerce.

Zeimetz, P. (2010). *Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS Antenennkalibrierung im HF Labor*. Diss., Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Zeimetz, P., Becker, M., Kuhlmann, H., Schön, S., und Wanninger, L. (2011). Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen. *DVW Merkblatt*, (1):1–10.

Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., und Webb, F. H. (1997). Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3):5005–5017. DOI: 10.1029/96JB03860.