Schlussbericht zum BMWI Vorhaben 50 NA 1324

Precise Point Positioning mit GPS-Einfrequenz-Empfängern und der Radom-Antenne in Raisting für das Autonome Fahren (PPP-AF)

AP 9: Bestimmung von Empfänger-Bias

Institut für Erdmessung
Leibniz Universität Hannover

Tobias Kersten · Steffen Schön

2017

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 Precise Point Positioning mit GPS-Einfrequenz-Empfängern und der Radom-Antenne in Raisting für das Autonome Fahren (PPP-AF)

AP 9: Bestimmung von Empfänger-Bias

Tobias Kersten, Steffen Schön

Förderkennzeichen
50 NA 1324

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hannover 2017

Das in diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWI) unter dem Förderkennzeichen 50 NA 1324 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

Abkürzungsverzeichnis 9

I Kurze Darstellung zum Vorhaben **11**
I.1 Aufgabenstellung 13
I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde 15
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 17
I.4 Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projektes 19
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 Auswertekonzeptes zur Bestimmung der Phasenbaises . . . 25
B Bestimmung von Phasenbiases für ausgewählte, aktuelle GNSS-Empfänger . 35
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 45
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 47
II.4 Voraussichtlicher Nutzen - insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes 49
II.5 Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 51
II.6 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens . . . 53

Abkürzungsverzeichnis

CNO	Signalstärke bzw. Carrier to noise
DCB	Differential Code Biases
EGU	European Geophysical Union
GIH	Geodätisches Institut Hannover
GNSS	Global Navigation Satellite System
HF	Hochfrequenz
IfE	Institut für Erdmessung, Hannover
IGS	International GNSS Service
MGEX	Multi-GNSS Pilotprojekt
NRCan	Natural Resources Canada
PPP	Precise Point Positioning
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QUEST	Quantum Engineering and Space Time Research
RCB	initialer (inter-frequenz) Codephasen-Bias an GNSS-Empfängern
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RPB	initialer (inter-frequenz) Trägerphasen-Bias an GNSS-Empfängern
RRSD	Empfänger-Empfänger Einfachdifferenzen
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time-Kinematic
SSR	State-Space-Repräsentation
ZB	Nullbasislinie [*zero baseline*]

Abschnitt I

Kurze Darstellung zum Vorhaben

I.1 Aufgabenstellung

Die absolute Positionierung nach dem Verfahren des Precise Point Positioning (PPP) hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Gründe sind (i) die Erschließung eines neuen Genauigkeitsbereiches zwischen dm und cm für die absolute Positionierung, d.h. ohne (direkte) Nutzung von Referenzstationen, (ii) die teils kostenlose Bereitstellung von präzisen Orbit- und Satellitenuhrprodukten in naher Echtzeit beispielsweise durch den IGS und (iii) größtenteils kostenlose webbasierte Berechnungsdienste, die dem Nutzer zeitnahe aus dessen Beobachtungsdaten die Positionslösung liefern.

Um allerdings das volle Genauigkeitspotenzial von PPP ausnutzen zu können, müssen alle systematischen Abweichungen korrigiert oder mit den Positionsparametern geschätzt werden. Dies muss konsistent zu den extern, vom IGS bestimmten Uhr- und Bahninformationen geschehen. Eine zentrale Rolle kommt hier den Baises zwischen Frequenzen, Codes und Systemen (GPS, GLONASS, Galileo) zu, insbesondere wenn nutzerseitig Einfrequenzempfänger verwendet werden. Bisherige erste Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Biases satelliten- und empfängertypabhängig sind.

Hauptziel des Vorhabens ist die Entwicklung von neuen Algorithmen zum PPP und zur Lagebestimmung mit kostengünstigen GPS-Einfrequenz-Empfängern und der Radom-Antenne (25 m Durchmesser) in Raisting für das autonome Fahren von Fahrzeugen, vgl. auch Hauptantrag.

Im vorgeschlagenen Teilprojekt sollen für ausgewählte GNSS-Empfänger die empfängerseitigen Biases für GPS und Galileo Signale in Bezug auf einen Referenzempfänger bestimmt, die Unterschiede zwischen den Empfängern quantifiziert und so aufbereitet werden dass zwischen Biases unterschiedlicher Hersteller transformiert werden kann.

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben ausgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe Positionierung und Navigation am Institut für Erdmessung, Hannover (IfE) ist durch Herrn Prof. Steffen Schön besetzt. Zentrale und aktuelle Arbeitsfelder der Gruppe sind:

- Stochastik von GNSS Beobachtungen
- Navigation und High-rate GNSS-Anwendungen
- GNSS-Antennenkalibrierung
- GNSS-Monitoring

Die Arbeitsgruppe ist hauptsächlich drittmittelfinanziert und umfasst sieben wissenschaftliche Mitarbeiter sowie einen technischen Mitarbeiter. Die interdisziplinär ausgerichtete Arbeitsgruppe unterstützt Synergien unter den einzelnen Themen, die erfolgreich genutzt und nachhaltig erweitert wurden. Die Implementierung an einer gemeinsam genutzten und entwickelten Toolbox (IfE_GNSS_Matlab Toolbox V6.1) fördert dabei die integrative Zusammenarbeit und Austauschbarkeit von Konzepten und Implementierungen.

Zu Beginn des Vorhabens stand ein GNSS-Labor mit aktueller Ausstattung sowie ein technischer Mitarbeiter (Hr. Maschke) zur Verfügung. Die am IfE entwickelte Software wird auf Grundlage eines server-orientierten Subversionsmanagements fortgeführt, um die Quellcodes der individuellen Applikationen zu harmonisieren und nachhaltig weiter zu entwickeln. Sowohl Rohdaten als auch verarbeitete Daten und Ergebnisse sind im Sinne der DFG-Voraussetzungen für nachhaltiges Forschungsdatenmanagement (FDMN) auf einem Server gespiegelt und archiviert.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

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

Das Teilvorhaben ist in 2 Arbeitspakete (A - B) untergliedert. Der Inhalt des Arbeitspaketes A umfasste die AP9.1: Entwicklung eines Auswertekonzeptes zur Bestimmung der Phasenbaises vor Allem in theoretischer Hinsicht. Im Arbeitspaket B wurden die aus Aufgabenteil A entwickelten Ansätze in der praktischen Umsetzung studiert (*AP9.2: Bestimmung von Phasenbiases für ausgewählte, aktuelle GNSS-Empfänger*).

Es wurden Konzepte entwickelt, um empfängerseitige Variationen von Phasenbiases für GPS und Galileo Signale messtechnisch separieren und in der Auswertung quantifizieren zu können. Dabei stehen zwei Ziele im Vordergrund, die die folgenden Teilaufgaben umfassen:

A Entwicklung eines Auswertekonzeptes zur Bestimmung der Phasenbaises

- Zusammenstellung der Bias-Definitionen und Umsetzungen für die Generierung globaler GNSS Produkte wie Satellitenuhren und Orbits des Internationalen GNSS Service
- Entwicklung eines Auswertekonzeptes basierend auf Empfängereinfachdifferenzen aus Beobachtungen, die im Zero Baseline-Common Clock Modus gewonnen wurden. Diese Differenzen enthalten als einzige Informationen den konstanten differentiellen Empfängeruhrfehler, die Trägerphasenmehrdeutigkeit sowie die gesuchten Biases.
- Test des Konzeptes mit existierenden Datensätzen des IFE, die 2009 im Zeitlabor der PTB gemessen wurden.

B Bestimmung von Phasenbiases für ausgewählte, aktuelle GNSS-Empfänger

- Durchführung und Auswertung weiterer Testmessungen im Zero-Baseline Common-Clock mode.
- Detailuntersuchungen für GPS
- Übersichtliche Zusammenstellung der Phasenbiases einzelner Empfängertypen und deren Umrechnung

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

Aktueller Stand der Wissenschaft Biases entstehen einerseits in den analogen und digitalen Elementen der Antennen-/Empfänger Kombination sowie am Filter in den Antennenvorverstärkern. Andererseits werden Biases während der Auswertung als *Zusatzparameter* eingeführt, um eine bessere Konsistenz der Lösung zu erreichen, insbesondere dann, wenn mehrere GNSS Systeme genutzt werden. Schaer (2012b,a) geben hierzu einen sehr guten Überblick aller zu berücksichtigenden und auftretenden Biases im Bereich des International GNSS Service (IGS), die sowohl die Phasen als auch Code-Beobachtungen beeinflussen - wobei die Phasenbeobachtungen in diesem Vorhaben im Fokus stehen. Loyer et al. (2012) beschreiben die Herausforderungen bei der ganzzahligen Mehrdeutigkeitslösung. Untersuchungen für GLONASS liegen von Wanninger (2011) oder auch von Reußner und Wanninger (2011) vor.

Weitere Effekte sind durch Kombination von GNSS Systemen zu erwarten, vgl. Steigenberger et al. (2011) für das CONGO Netzwerk, Cao et al. (2010) für die Kombination von GPS, Galileo sowie das derzeit laufende Multi-GNSS Pilotprojekt (MGEX) des IGS. Alle Ansätze bedienen sich regionaler oder globaler Netze und bestimmen die Biases zusammen mit einer Vielzahl weiterer Parameter wie Orbit, Ionosphärenmodelle und Stationskoordinaten.

Banville et al. (2008) betrachten Hardware-Verzögerungen (Code und Phase) bei PPP. Dabei wird ein Verfahren zur Kalibrierung von GPS Empfängern vorgeschlagen, das sich einem GPS Signalsimulator bedient. In seiner Publikation beschreibt Zyyryanov (2012) hingegen, dass die Biases als nicht streng konstant angenommen werden dürfen, sondern zusätzliche Variationen vor Allem für low-end Equipment zu erwarten sind. Er schlägt zudem Empfängerkalibrierungen vor, wie sie auch bei Antennen durchgeführt werden; die Kalibrierung mit Signalsimulatoren ist nach seiner Betrachtung nicht gewinnbringend, da sie ihre eigenen speziellen Phasenbiases einführen. Anforderungen im Bereich der Zeit- und Frequenzübertragung werden beispielsweise in Defraigne et al. (2010) beschrieben. Gerade dort ist die genaue Kenntnis dieser auftretenden Fehlereffekte von enormer Bedeutung.

Die Zero-Baseline Common Clock Anordnung bietet durch die Elimination der atmosphärischen Refraktion in Troposphäre und Ionosphäre einerseits und des Empfängeruhrfehlers andererseits eine innovative Messanordnung, um die Biases zu untersuchen. Dieser Ansatz soll im vorgeschlagenen Vorhaben umgesetzt werden.

Arbeiten des Antragstellers 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 Receivern im Rahmen des Vorhabens BERTA. Erste Ergebnisse zeigen die Bedeutung der Diffraktionseffekte, (Liso et al., 2012, 2013). Untersuchungen zur atmosphärischen Turbulenz werden in Rahmen von DFG-Projekten durchgeführt Vennebusch

et al. (2011). In Kube et al. (2011, 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. Arbeiten im Rahmen des Exzellenzclusters Quantum Engineering and Space Time Research (QUEST) haben den Einfluss hochgenauer Uhren auf die Positionierung mit GNSS-Trägerphasen untersucht und Konzepte der Uhrmodellierung für GNSS-Referenzstationen entwickelt. 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, (Weinbach und Schön, 2011). Anwendungen für das GRACE Satellitenpaar wurden in Weinbach und Schön (2012) gezeigt. 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 (2010b, 2011). Laufzeitverzögerungen durch die Antenne auf Code-Beobachtungen und deren Auswirkung auf die Navigation sind in Kersten und Schön (2013) vorgestellt worden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die bisherige fruchtvolle Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Neumann, Dr. Paffenholz, Dr. Alkatib (Geodätisches Institut Hannover (GIH)) konnte im Rahmen des Projektes fortgeführt werden. Ansatzpunkte waren Fragestellungen der Ausgleichungsrechnung (Schätzbarkeit und Trennbarkeit von Parametern, eventuelle Ansätze zur Kalmanfilterung oder Bayes-Schätzung).

Die Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Abteilung Optik (Zeit- und Frequenzübertragung, Dr. Bauch) konnten erfolgreich für Laboruntersuchungen und enge Kooperationen genutzt werden, wofür die Autoren Ihren ausdrücklichen Dank aussprechen. Weitere Verknüpfungen bzw. weitere Nutzungsmöglichkeiten zur nachhaltigen Verwendung der erarbeiteten Forschungsergebnisse sind in dem am IfE mit beantragten DFG-Sonderforschungsbereich (SFB-1128, geoQ) angestrebt.

Abschnitt II

Eingehende Darstellungen zum Vorhaben

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

A Entwicklung eines Auswertekonzeptes zur Bestimmung der Phasenbaises

Einführung und Motivation

Zunächst setzen wir die allgemeine GNSS-Beobachtungsgleichung der Trägerphase Φ_A^j von einem Satelliten $j$zu einer Station A an:

$$\Phi_A^j = \rho_A^j + c(\delta t_A - \delta t^j) + T_A^j - I_A^j + \lambda N_A^j + \beta_{\phi,A} + \beta_\phi^j + MP_A^j + PCC_A^j + ... + \epsilon_A^j \qquad (1)$$

wobei wir als individuelle Einflüsse die geometrische Distanz ρ_A^j, den differentiellen Empfängeruhrunterschied $c(\delta t_A - \delta t^j)$ zwischen Empfängeruhr δt_A und Satellitenuhr δt^j in [m], die troposhpärische und ionosphärische Laufzeitverzögerung (T_A^j, I_A^j), die Wellenlänge λ und die Mehrdeutigkeiten N_A^j sowie die Hardwareverzögerungen am Empfänger $\beta_{\phi,A}$ und am Satelliten β_ϕ^j, die Mehrwegeeffekten MP_A^j, die Antennenkalibrierwerte PCC_A^j und restlichen, unmodellierten Fehleranteilen mit dem allgemeinen Rauschen in der Variablen ϵ_A^j zusammenfassen. Dieses Fehlerbudget ist in der Abb. 1 anhand einer Referenzstation einmal etwas detaillierter erläutert. Insgesamt sind für die präzise Modellierung der GNSS-Beobachtungsgleichung eine Vielzahl von unterschiedlichen, variablen Faktoren zu berücksichtigen, die sich folgendermaßen noch einmal unter Berücksichtigung der Gleichung (1) wie folgt aufteilen lassen:

1. Refraktion und Fluktuation in der Atmosphäre (Troposphäre, Ionosphäre),
2. Diffraktion,
3. Mehrwegeeffekte,
4. antennenspezifische Einflussfaktoren und deren Interaktion mit Mehrwegeeffekten und direkte Umgebungseigenschaften,
5. Gezeiten, Grundwasser, atmosphärische Auflastungen,
6. Kabel- und Temperatureffekte und letztlich
7. empfängerspezifische Einflussfaktoren (Uhrfehler, Verzögerungen in Hardware, Biases, etc.).

Wichtig ist eine adäquate Modellierung aller Effekte zur optimalen Beschreibung der Stochastik von GNSS-Beobachtungen. Oftmals wird zur Anwendung der Parameterschätzung die Annahme getroffen, dass die Fehleranteile einer Normalverteilung folgen und um einen Mittelwert streuen. Diese Annahme ist bei GNSS-Beobachtungen nicht allgemein gültig und

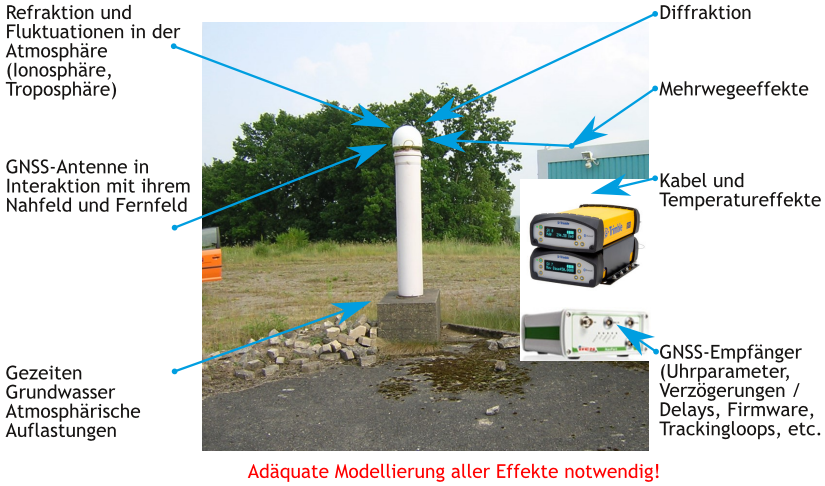


Abbildung 1: Gesamtübersicht der zu erwartenden Fehler bei GNSS Empfangsantennen, sowohl im statischen, als auch kinematischen Fall.

jeder einzelne Fehleranteil muss hinsichtlich seiner individuellen Stochastik und Charakteristik analysiert und korrekt modelliert werden. Ferner haben Kersten und Schön (2010a) gezeigt, dass sich Empfänger aufgrund ihrer spezifischen Einflussfaktoren durch proprietäre Algorithmen unterscheiden und dies deutlich während der Verwendung innerhalb der Absolutkalibrierung von Antennen zu analysieren war, (Kersten und Schön, 2012).

Aufgrund der Vielzahl von system-spezifischen Anteilen in der Multi-GNSS Prozessierung (Kersten und Schön, 2010b, 2011, 2012; Schaer und Dach, 2010; Schaer, 2012a) ist eine externe Spezifizierung der initialer (inter-frequenz) Trägerphasen-Bias an GNSS-Empfängern (RPB)und initialer (inter-frequenz) Codephasen-Bias an GNSS-Empfängern (RCB)(BIASES) notwendig. Diese Offsets sind aus der Theorie (vgl. Gleichung 1) von nicht-ganzzahliger Natur und beeinflussen:

- die durch Zumberge et al. (1997) beschriebene Prozessierung der trägerphasenbasierten Einzelpunktbestimmung mittels Precise Point Positioning (PPP) und die
- konsistente Multi-GNSS Auswertung (Schaer und Dach, 2010; Schaer, 2012a).

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Konzept studiert, um die empfängerspezifischen Trägerphasenbiases (vgl. Punkt 7 in der allgemeinen Auflistung und Abb. 2) auf Grundlage von GNSS-Empfänger-Empfänger Einfachdifferenzen (RRSD)(Leick, 1990; Hofmann-Wellenhof et al., 2008) aus Beobachtungen zu schätzen. Hierbei sind die GNSS-Empfänger auf einer Nullbasislinie [*zero baseline*] (ZB) mit einander verbunden und an ein gemeinsames, externes Frequenznormal (Common-Clock Anordnung) angeschlossen. Das Konzept der ZB und Common-Clock Ansätze konnte bereits bei vorangegangenen Vorhaben erfolgreich eingesetzt werden, (Kersten und Schön, 2012).

Zur Konsistenz und Transparenz sind in diesem Bericht die GNSS-Signalzuordnungen an die Spezifikationen des Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 3.0x angepasst. In Abb. 2 sind diese Signalzuordnungen einigen aktuell auf dem Markt vertretenen, individuellen Empfängern gegenübergestellt. Es wird sehr schnell deutlich, dass eine konsistente und umfassende Berücksichtigung der RPBs und RCBs wesentlich wichtig sind, wenn unter Verwendung und Berücksichtigung der komplexen Anzahl von Signalen und Tracking-Algorithmen präzise GNSS-Parameter geschätzt werden (siehe auch Tab. 1). Diese Herausforderung ist bereits damit gegeben, wenn die RPBs zwischen verschiedenen Empfängern für eine einzige Frequenz berücksichtigt werden sollen. Durch die aktuelle Multi-Signal und Multi-GNSS

IFEN SX_NSR_RT_800	2.4.0	G:L1C	.	G:L2D	.	G:L2X	.	.	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	.	E:L8X	E:L6X
JPS LEGACY	2.6.1 JAN,10,2008	G:L1C																	
JPS E_GGD	3.4 DEC,12,2009 P2	G:L1C	G:L1W	.	.	.	.	G:L2W	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
JAVAD TRE_G3TH DELTA	3.4.7	G:L1C	G:L1W	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	.	.	.	.
JAVAD TRE_G3TH DELTA	3.5.1B2 FEB,14,2013	G:L1C	G:L1W	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	.	.	.
JAVAD TRE_G3TH DELTA	3.5.0	G:L1C	G:L1W	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	.	.	.	.
LEICA GRX1200+GNSS	8.51/6.110	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LEICA GRX1200+GNSS	8.51/6.111	G:L1C	.	.	.	.	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	E:L8Q	.	.
LEICA GRX1200GGPRO	----------	G:L1C	.	.	.	.	G:L2P	.	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LEICA GR10	2.62/6.112	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	E:L8Q	.	.
LEICA GR25	2.62	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	E:L8Q	.	.
NOV OEM6	OEM060100RN0000	G:L1C	.	G:L2D	.	.	.	.	.G:L5Q	.	E:L1C	.	E:L5Q	.	.	.	.	.	.
SEPT POLARXS	2.3.4	G:L1C	.	.	G:L2L	.	.	G:L2W	.G:L5Q	.	E:L1C	.	E:L5Q	.	E:L7Q	.	E:L8Q	.	.
SEPT POLARX4TR	2.3	G:L1C	.	.	G:L2L	.	.	G:L2W	.G:L5Q	.	E:L1C	.	E:L5Q	.	E:L7Q	.	E:L8Q	.	.
SEPT POLARX4TR	2.3.4	G:L1C	.	.	G:L2L	.	.	G:L2W	.G:L5Q	.	E:L1C	.	E:L5Q	.	E:L7Q	.	E:L8Q	.	.
TPS E_GGD	2.6.1 JAN,10,2008	G:L1C	G:L1W	.	.	.	.	G:L2W	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TPS E_GGD	3.4 DEC,12,2009 P2	G:L1C	G:L1W	.	.	.	.	G:L2W	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TRIMBLE NETR5	4.48	G:L1C	.	.	.	.	.	G:L2W	..	G:L5X	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TRIMBLE NETR9	4.70	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	.	E:L8X	.
TRIMBLE NETR9	4.61	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TRIMBLE NETR9	4.60	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	G:L5X	.	E:L1X	.	E:L5X	.	E:L7X	.	E:L8X	.
TRIMBLE NETR9	4.61	G:L1C	.	.	.	G:L2X	.	G:L2W	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TRIMBLE 4000SSI	VERSION 7.29	G:L1C	.	G:L2D	.	.	.	.	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Abbildung 2: Zusammenstellung von Multi-GNSS Empfängern und deren verwendeten Signalen. Die Vielzahl der zur Verfügung gestellten Signale erfordert eine konsistente und adäquate Berücksichtigung bei der individuellen Eingenschaften zur Nutzung bei präzisen Navigationsanwendungen (Montenbruck et al., 2017).

Tabelle 1: Staus der Satellitensysteme für GPS, GLONASS, Galileo nach Montenbruck et al. (2017). IIR, IIR-M, IIF Satellitenbezeichner der einzelnen GPS Generationen, IOV = In-Orbit Validation, FOC= Full Operational Capability, Zahlen in Klammern geben an, dass dieser Satellit nicht in den operationellen Modus geladen wird bzw. wurde.

System	Block	Signals	Satelliten
GPS	IIR	L1 C/A, L1/L2 P(Y), 12	
	IIR-M	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M	7
	IIF	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M, L5	12
GLONASS	M	L1/L2 C/A, P	23
	M+	L1/L2 C/A & P, L3	1
	K	L1/L2 C/A & P, L3	1+(1)
Galileo	IOV	E1 E6, E5a/b/ab	3+(1)
	FOC	E1 E6, E5a/b/ab	6+(4)

Konstellation stehen mittlerweile drei Signale zur zivilen Nutzung für einige GNSS-Systeme zur Verfügung. Deren vollständige Nutzung wie z.B. für die Mehrdeutigkeitsschätzung [*ambiguity estimation*], präzise Positionierung mit PPP, Zeit- und Frequenzübertragung o.ä. ist aber begrenzt durch die vorhandenen zeitlich variablen Effekte zwischen den Frequenzen L1, L2 und L5.

Methodik zur Bestimmung der Empfänger Biases (RPB)

Ausgehend von RRSD zwischen zwei Stationen A, B und einem Satelliten j lassen sich im Bezug zur Gleichung (1) die entfernungsabhängigen Fehleranteile deutlich reduzieren und die satellitenspezifischen Fehleranteile eliminieren. Aufgrund der Tatsache, dass eine gemeinsame Empfangsantenne zur Anwendung kommt, sind auch die Antenneneffekte und Umgebungseffekte an der Station deutlich reduziert. Hierbei spielen die Trackingalgorithmen eine *wesentliche* Rolle, denn anhand der verschiedenen Signale und Signalmodulationen (Gurtner und Estey, 2015) sind Unterschiede allein durch die Signalakquisition (besonders in niedrigen Elevationen) zu erwarten. Nach Anwendung der Einfachdifferenzen auf einer ZB und im Common-Clock Modus sind die Beobachtungsgrößen (RRSD) wie folgt zu interpretieren:

$$\Delta\Phi^j_{A,B} = c(\delta t_A - \delta t_B) + \lambda(N^j_A - N^j_B) + d^j_{\Phi,A} - d^j_{\Phi,B} \tag{2}$$

Folgende Eigenschaften lassen sich feststellen:

- Der differentielle Empfängeruhrfehler $c(\delta t_A - \delta t_B)$ ist im Falle des Common-Clock Modus ein konstanter Wert (frequenzunabhängig), welcher durch die unterschiedlichen Anfangswerte der empfängerspezifischen, initialen Phasenlage verursacht wird. Dieser Wert ist von Natur aus nicht ganzzahlig [*non-integer*], aber konstant über die Zeit.
- Die differentielle Mehrdeutigkeit $\lambda(N_A^j - N_B^j)$ der Trägerphasenbeobachtung ist ganzzahlig und konstant über jeden individuellen Satellitenbogen, sofern nicht an einen der Empfänger (oder an beiden Empfängern) ein Zyklensprung [*cycle slip*] besteht.
- Die RPB $d_{\Phi,A}^j - d_{\Phi,B}^j$ sind konstant und frequenzabhängig und theoretisch pro Tracking-Kanal individuell. Die Verzögerungen [*delays*] sind nicht ganzzahlig in ihrer Natur. Zusätzlich sind sie konstant ab dem Einschalten. Untersuchungen von Wang und Gao (2007) zeigen, dass die RPBs sich auch ändern können, wenn ein Zyklensprung auftritt, das Gerät einen kompletten Signalverlust erhält [*complete loss of lock*], oder das Gerät neu eingeschaltet wird. Abhängig vom Empfängerhersteller sind diese Werte konstant im eigentlichen Sinne (unabhängig vom Ein- und Ausschalten) oder individuell pro Nutzung des Empfängers (Ein- und Ausschalten des Gerätes führt zu Änderung der RPBs). Diese Eigenschaften sollen in diesem Ansatz untersucht werden. Weiterhin ist zu analysieren, ob die Geräteeigenschaften konstant über die Zeit sind, oder Diskontinuitäten abgeleitet werden können.

In dem untersuchten Ansatz sind die Beiträge voneinander zu trennen: Der konstante, satellitenunabhängige differentielle Empfängeruhrfehler $c \cdot \Delta\delta t_{A,B}$, die differentielle Trägerphasenmehrdeutigkeit $\lambda N_{A,B}^j$ und schließlich die gesuchten RPB $\Delta d_{A,B}^j$.

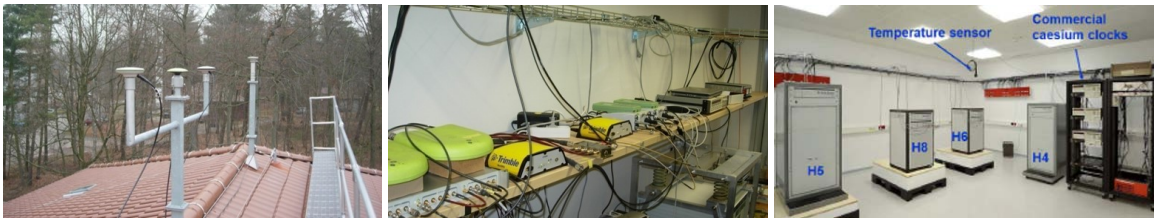
Die Bestimmung der RPB ist durch die folgenden Arbeitsschritte kurz beschrieben:

a) Eliminierung und Reduktion der meisten GNSS Fehleranteile durch Differenzbildung auf einer ZB und Common-Clock Modus,
b) Bereinigung der Messdaten von linearen und quadratischen Driften (Temperatureffekte) und Separation von:
    1. differentiellen Empfängeruhrfehler $c(\delta t_A - \delta t_B)$,
    2. differentiellen Mehrdeutigkeitsterm $\lambda(N_A^j - N_B^j)$
c) Schätzung der RPBs und adäquat zugehörigen RCBs.

Umsetzung und Anwendung des theoretischen Ansatzes in die Praxis

Der vorgestellte Ansatz ist mit einem Datensatz getestet worden, der durch das IfE im Jahr 2008 mit 4 Paar Empfängern an der PTB simultan erhoben wurde, (Weinbach und Schön, 2009, 2011). Hierbei wird die Praxistauglichkeit des vorgeschlagenen Ansatzes untersucht. In Abb. 3 ist die Messumgebung auf dem Gelände der PTB (Kopfermannbau/Uhrenraum) abgebildet.

Die Umgebung des Kopfermannbaus zeigt eingeschränkte Sichtbedingungen zu tieffliegenden Satelliten. Entsprechende Qualitätsmerkmale bezüglich der Stationsumgebung am Kopfermannbau sind anhand der IGS-Stationen `PTBB` und `PTBQ` folgend dokumentiert oder lassen sich aus den Graphiken der Abb. 5 ableiten.



(a) (b) (c)

Abbildung 3: Zero-Baseline und Common-Clock Anordnung auf dem Gelände der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Gebäude Kopfermannbau, (a) Installation der Antennen auf dem Dach (inkl. IGS-Station), (b) Anordnung der Empfänger im Kopfermannbau, (c) Bündel der Wasserstoff-Uhren (H-Maser) zur Generierung des PTB-UTC Zeitsignals.

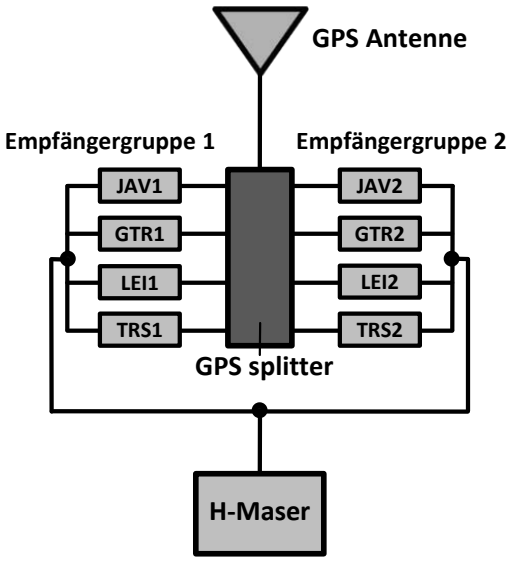
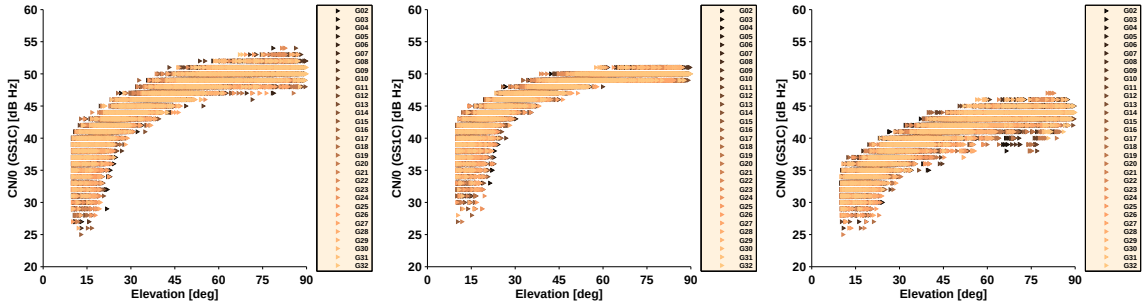


Abbildung 4: Nullbasislinienaufbau für die Bestimmung von initialer inter-frequenz Empfänger Trägerphasen-Biases (RPB)

Der konzeptionelle Aufbau des Experimentes ist der Abbildung 4 zu entnehmen. An einer Leica AX1202GG Antenne (vgl. Abb. 3(a)) sind über einen Splitter jeweils zwei Empfängergruppen mit vier unterschiedlichen Empfängern (Javad, DiCom, Leica, Trimble) angeschlossen (vgl. Abb. 3(b) und Tab. 2). Alle Empfänger sind mit einem gemeinsamen Frequenznormal verbunden (Wasserstoff-Maser bzw. H-Maser, Abb. 3(c)) und laufen daher mit demselben Zeitsignal, sodass individuelle Unterschiede und Variationen der internen Empfänger-Oszillatoren reduziert und RPBs zwischen den Empfängern bestimmt werden können.

Tabelle 2: Verwendete Empfänger zur Bestimmung von RPBs an der PTB. Die Signalspezifizierungen basieren auf den Zuordnungen im RINEX Format, (Gurtner und Estey, 2015).

Rx-Code	Empfänger	verwendetes Signal
JAV1/2	Javad Legacy	L1C, L2P
GTR1/2	DiCom GTR50	L1P, L2P
LEI1/2	Leica GRX1200GG Pro	L1C, L2P
TRS1/2	Trimble NetRS	L1P, L2P



(a) JAV1/2 (b) LEI1/2 (c) TRS1/2

Abbildung 5: Empfangseigenschaften der Empfänger am Punkt PTBQ für einen 24-h Datensatz, Kopfermannbau, PTB.

Die Aufzeichnung der Daten für fünf kontsekutive Tage Ende Dezember 2008 standen zur Verfügung (DOY359-363, 2008) wobei keiner der Empfänger ausgeschaltet wurde oder unter einem kompletten Signalverlust zu leiden hatte. Aufgrund der Zusammenhänge zwischen der Trägerphasenmessung, den simultan erhobenen Signalstärke bzw. Carrier to noise (CNO) und der Abb. 5 wird kann festgestellt werden, dass die Beobachtung von Satelliten unterhalb einer Elevation von 30° schwierig ist, da dort mit einem erhöhtem Rauschen aufgrund der näheren Stationsumgebung (Baumbewuchs etc.) zu rechnen ist.

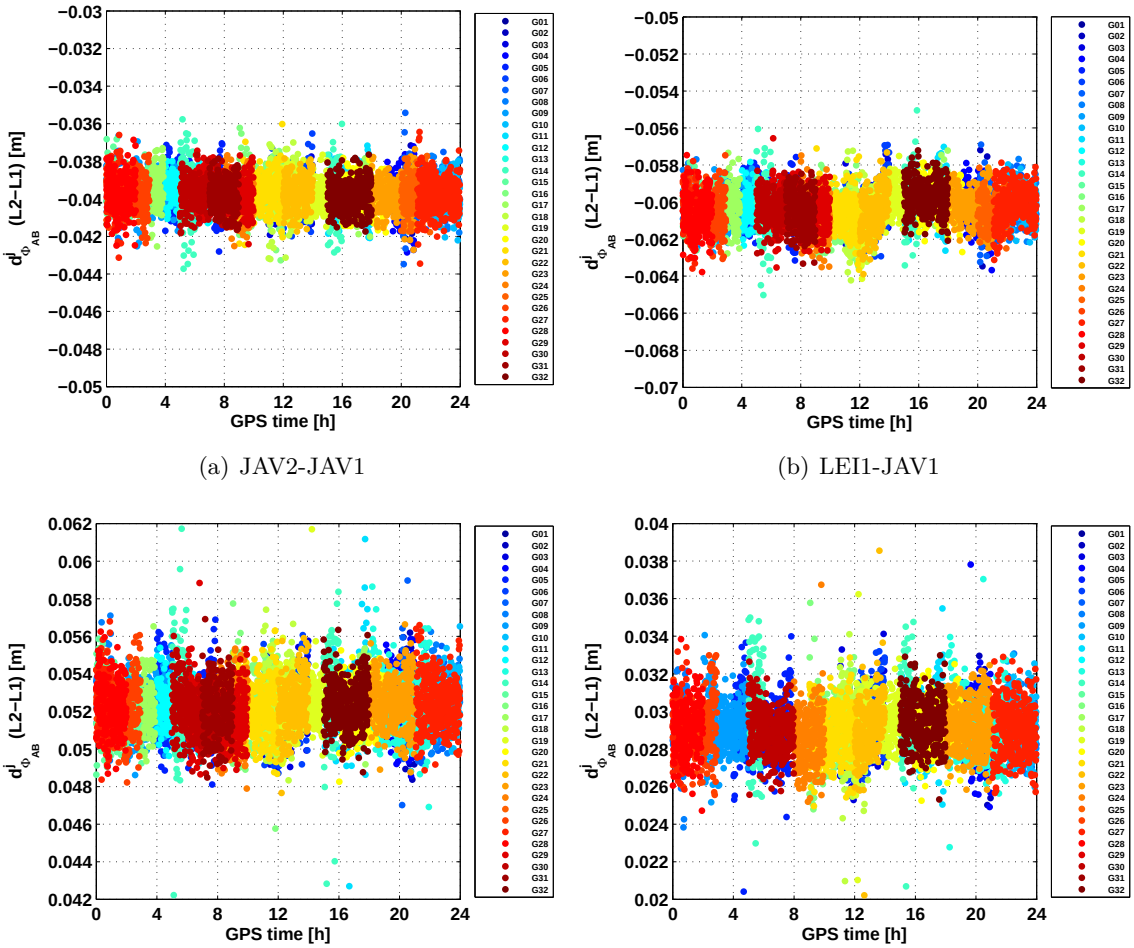
Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die RPBs wurden aus den Beobachtungsdaten mit der kleinsten Quadrate-Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen anhand zweier Ansätze kontrolliert. Die Grundlage wurde durch die Beobachtungsgleichung der RPBs nach Gleichung (1) überprüft.

1. Least Squares Adjustment (LSA) mit Schätzung eines individuellen Empfängeruhrfehlers und

2. Sequential Least Squares adjustment (S-LSA) durch Akkumulierung von Normalgleichungsmatrizen (NEQS) zur Berechnung eines einheitlichen, Empfängeruhrfehler für alle Satellitenbahnbögen.

Die Abb. 6 zeigt ausgewählte Ergebnisse einiger geschätzten RPBs, die im Rahmen des Vorhabens bestimmt wurden. Eine übersichtliche Zusammenstellung der RPBs aus allen 5 erhobenen Tagen ist in der Tab. 3 dargestellt. Das vorgestellte Konzept konnte anhand des Datensatzes intensiv studiert werden. Hierbei werden RPBs als tägliche Lösung geschätzt. Die hier vorgestellten RPBs beziehen sich zunächst nur auf GPS und aufgrund des vorliegenden RINEX 2.11 Formates zunächst nur auf $d^{j}_{\Phi_{AB}}$(L2-L1). Die zeitliche Stabilität der RPBs kann den exemplarisch abgebildeten Zeitreihen aus Abb. 6 entnommen werden. Das Rauschen ist abhängig von den individuellen Empfängerherstellern. Dennoch ist die Stabilität der RPBs für verschiedene Satelliten konstant. Individuelle Variationen von weniger als 2 mm lassen sich exemplarisch an den Abb. 6(b-c) gegen 16 Uhr GPS-Zeit feststellen. In diesem Zeitraum zeigen alle Empfängerkombinationen den gleichen Effekt bis auf die Kombination der identischen GPS-Empfänger (vgl. Abb.6(a)). Da die Variationen im gleichen Maße für alle Empfängerkombinationen festzustellen sind, wird es sich dabei sehr wahrscheinlich um eine Änderung der unmittelbaren Umgebung der GPS-Empfänger oder des Uhrkabels



(a) JAV2-JAV1

(b) LEI1-JAV1

(c) TRS1-JAV1

(d) TRS2-JAV1

Abbildung 6: Tägliche Lösungen als Tages-Batch von RPB-Beobachtungen für ausgesuchte Konfigurationen, DOY359, 2008.

handeln. Bisher lassen unsere Untersuchungen den Schluss zu, dass es sich um Temperatureffekte handelt, die sich unterschiedlich, aber ähnlich auf die Bestimmung zur Ableitung der Trägerphasenmessung bei den verschiedenen verwendeten GPS-Geräten auswirken. Die erklärt auch, warum der Effekt nicht bei der Kombination JAV1-JAV2 zu beobachten ist. Hier handelt es sich um baugleiche Empfänger, so dass sich der variable Effekt durch die Differenzbildung auf ein nicht mehr signifikantes Niveau reduzieren lässt.

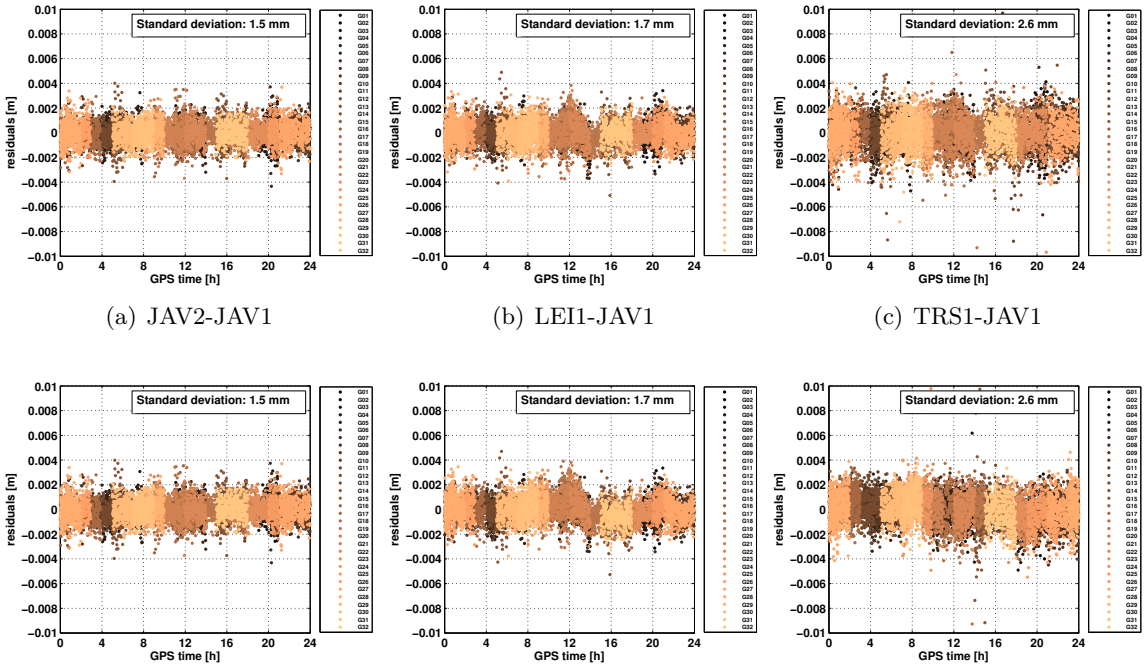
Die täglichen Lösungen der individuellen Empfängerkombinationen zeigen deutlich, dass die RPBs sich konstant und wiederholbar mit diesem Ansatz auch über mehrere Tage hinweg bestimmen lassen. Dieser Zusammenhang ist in der Tab. 3 verdeutlicht. Die Variationen der täglichen RPB-Bestimmung sind abhängig vom vorhandenen Rauschen der Beobachtungen. Dennoch sind auch hier individuelle und empfängerspezifische Variationen der RPB nicht vollkommen auszuschließen (siehe auch Abb. 8).

In Abb. 7 sind die Residuen der RPB-Schätzung zusammengestellt. Deutlich erkennbar ist, dass die Rauschanteile bei beiden Verfahren (LSA versus S-LSA) gleich verteilt sind und maximale Magnituden von ca. ±2 mm annehmen. Die durchschnittliche Standardabweichung der

Tabelle 3: Geschätzte, täglich RPBs für ausgewählte Empfängerkombinationen basierend auf einer Beobachtungsdauer von 5 Tagen, gemessen im Dezember 2008 (DOY359-363).

lfd. No.	DOY	L2-L1 Bias $\Delta d^j_{\Phi_{AB}}$			
		JAV2-JAV1 [m]	**LEI1-JAV1** [m]	**TRS1-JAV1** [m]	**TRS2-JAV1** [m]
1	359	-0.040	-0.060	+0.052	+0.029
2	360	-0.040	-0.059	+0.053	+0.030
3	361	-0.040	-0.057	+0.054	+0.030
4	362	-0.041	-0.056	+0.055	+0.030
5	363	-0.042	-0.054	+0.054	+0.029

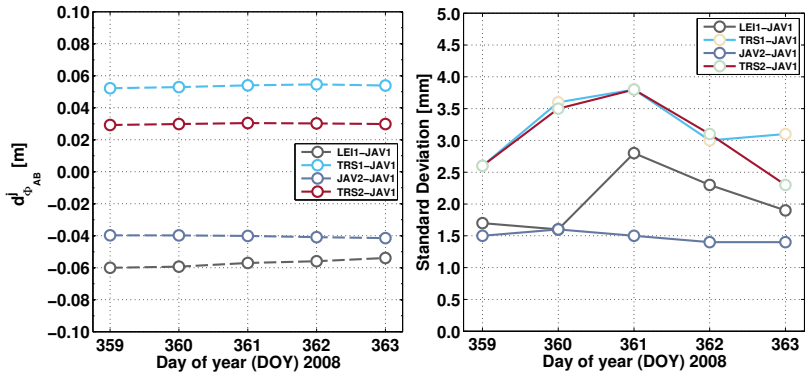
Residuen liegt bei beiden Verfahren (LSA und S-LSA) bei 1.5-1.7 mm. Die geringste Streuung der Residuen ist bei baugleichen Empfängern (vgl. Abb. 7(a,d)) zu beobachten, was jedoch zu erwarten ist, da diese Konfiguration die optimale Voraussetzung zum Vergleich bietet. Ebenfalls vergleichbare Ergebnisse liefern die Kombination Javad-Leica Empfänger (vgl. Abb. 7(b,e)), jedoch setzt sich die Variation der differentiellen Trägerphase um 16 Uhr GPS-Zeit auch in die Residuen durch. Das Streuen der Residuen nimmt bei dieser Kombination maximale Magnituden von ±2 mm an. Ein deutlich höheres Rauschen in den Residuen ist für den Trimble NetRS Empfänger zu detektieren (vgl. Abb. 7(c,f)). Dieses Verhalten zeigte sich bereits bei der Stationsanalyse und war abzusehen. Die leicht erhöhte Streuung der Residuen mit maximalen Abweichungen von ±3.5-4 mm hat aber keinen negativen Einfluss auf die Bestimmung der RPBs.



(a) JAV2-JAV1 (b) LEI1-JAV1 (c) TRS1-JAV1

(d) JAV2-JAV1 (e) LEI1-JAV1 (f) TRS1-JAV1

Abbildung 7: Residuen der geschätzten RPBs für DOY359, 2008, (a-c) ausgesuchte Empfängerkombinationen unter Verwendung des Kleinsten-Quadrate Ansatzes (LSA), (d-f) sequentieller Kleinste Quadrate Ansatz (S-LSA).



(a) (b)

Abbildung 8: Zusammenstellung von Wiederholbarkeiten der RPBs für ausgewählte Empfängerkombinationen (a) und Standardabweichungen der geschätzten RPBs (b).

Da der zur Verfügung stehende Datensatz an der PTB von 2008 sehr umfangreich war und sich über mehrere Tage erstreckte, wurden zusätzlich die Langzeitstabilitäten der RPBs studiert und analysiert. Die Abb. 8(a) stellt für alle erhobenen und untersuchten Empfänger-Kombinationen die berechneten RPBs übersichtlich zusammen. Es ist zu erwarten, dass die RPBüber die Zeit konstant sind. Dies konnte auch für die Kombinationen Javad-Javad, Javad-Trimle gezeigt werden. Hingegen zeichnete sich eine Drift von ca. 5-6 mm über 5 Tage bei der Bestimmung der RPB für die Kombination Leica-Javad ab, deren Grund abschließend noch nicht geklärt ist.

Die zugehörigen Standardabweichungen aus Abb. 8(b) der RPBs sind entsprechend den individuellen proprietären Empfängereigenschaften zuzuordnen. So zeigt sich ein Rauschen der RPBs für die Kombination Javad-Javad von durchgängig 1.5-1.7 mm für alle 5 Tage. Für die Kombination Leica-Javad gab es am DOY361 eine Verschlechterung der Standardabweichungen von 1.7 mm auf ca. 2.5 mm. Deutlich höher hingegen sind die Standardabweichungen für die Kombination Javad Trimble NetRS1/2 mit maximal zu erwartenden Standardabweichungen von ca. 4 mm. Relativ zueinander sind diese Charakteristiken aber innerhalb der Baureihe konsistent und vergleichbar.

B Bestimmung von Phasenbiases für ausgewählte, aktuelle GNSS-Empfänger

In diesem Arbeitspaket waren weitere und neue Experimente aufzusetzen, auszuwerten und RPBs für aktuelle Empfängergenerationen zu analysieren. In Erweiterung und über das Projekt hinaus hat sich ergeben, dass die RCBs mit dem in diesem Vorhaben vorgestellten Ansatz auf einer ZB und im Common-Clock Modus bestimmt werden können.

(a)

(b)

(c)

Abbildung 9: Messaufbau an der PTB am Meitnerbau (MEI1, MEI2) und Kopfermannbau (KOP1), (a) Station MEI1 mit Leica AR25 Antenne mit Radom, (b) Server-Rack mit Empfängern und Datenaufbereitung für Common-Clock Signal (UTC-PTB) aus dem Meitnerbau, (c) geographische Verteilung der Stationen, die im Rahmen des Experimentes verwendet wurden.

Im Folgenden werden daher zwei Experimente näher beschrieben, die im Rahmen dieses Vorhabens untersucht und aufgesetzt wurden.

Experiment 2 - Erweiterte Testmessungen in Zusammenarbeit mit der PTB

Es wurden insgesamt vier GNSS-Empfänger der Firmen Leica Geosystems und JAVAD GNSS eingesetzt. Dabei handelt es sich um zwei Leica GRX 1200+GNSS (SN: 5035, 5791; FW: 8.71) und zwei JAVAD Delta TRE-G3T (SN: 0081, 0082; FW: 3.4.11) die in der Tab. 4 aufgelistet

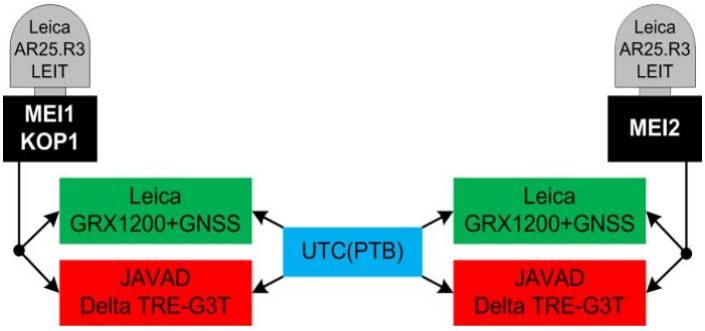


Abbildung 10: Messaufbau für Short-Baseline und Common-Clock Experiment an der PTB zwischen den Gebäuden Meitnerbau und Kopfermannbau, die mit einem gemeinsamen Zeitsignal UTC(PTB) verknüpft sind.

Tabelle 4: GNSS-Empfänger, die während des Experimentes zur Bestimmung von RPBs und RCBs auf einer ZB und im Common-Clock Modus eingesetzt wurden.

Exp.-ID	Hersteller	Board	Firm.-ID	Rec-ID
KOP1	Javad	TRE_G3T DELTA	3.4.11 Aug,14,2013	3VY2QE4B4OU883VWGJ21
	Leica	GRX1202+GNSS	8.71/6.112	495035
MEI1	Javad	TRE_G3T DELTA	3.4.11 Aug,14,2013	3VY2QE4B4OU883VWGJ21
	Leica	GRX1202+GNSS	8.71/6.112	495035
MEI2	Javad	TRE_G3T DELTA	3.4.11 Aug,14,2013	3VSLY4XRZ3OQW3VTZUD9
	Leica	GRX1202+GNSS	8.71/6.112	495791

sind. Die sich daraus ergebende Messkonfiguration ist in Abb. 10 schematisch dargestellt. Alle verwendeten GNSS Empfänger sind an dasselbe Zeitsignal UTC-PTB (Bauch et al., 2012) angeschlossen.

Die Messkampagne erstreckte sich über etwas mehr als zwei Wochen. In der ersten Messwoche (14.-23.10.2013) wurden GNSS-Messungen auf dem Meitner-Bau (MEI) auf einer ca. 5 m langen Basislinie durchgeführt (Abb. 9(c)). Danach wurde das Equipment von Station MEI1 zum Kopfermann-Bau gewechselt (KOP1), sodass in der zweiten Messwoche (23.-30.10.2013) auf einer ca. 290 m langen Basislinie gemessen wurde. Untersucht werden hierbei langzeitliche Effekte und der Einfluss äußerer Umgebungseinflüsse. Die Datenrate betrug während der gesamten Messkampagne 1 Hz. Es wurden GPS-, GLONASS- und Galileo-Beobachtungen aufgezeichnet. Für Letztgenannte waren temporär alle vier zu der Zeit aktiven Satelliten (E11, E12, E19, E20) sichtbar. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich das Galileo-System im Zeitraum der Messkampagne in der Testphase befand.

Für die hier vorgestellten RPB-Bestimmungen wurden die Daten der zweiten Messwoche ausgewertet und pro Empfängerkonfiguration die RPBs bestimmt. In dieser Konfiguration waren Empfänger unterschiedlicher Hersteller beteiligt. Ferner wurden die Messungen am Meitnerbau (MEI1 und MEI2) parallel zu denen auf dem Kopfermannbau erhoben. Mit dieser Konfiguration ist es möglich zu studieren, wie und ob die Lage der Antenne, oder der Ort der Empfangsantenne vielleicht doch noch einen Einfluss auf die Berechnung hat.

Die Detailauswertungen wurden für GPS durchgeführt. Ergebnisse der Untersuchungen sind der Abb.11 zu entnehmen. In der Abb. 11(a-b) (LEI1@KOP und LEI1@MEI1) sind empfängerspezifische Inkonsistenten auf den RRSDs zu betrachten, die auf den Konfigurationen LEI2@MEI2 für die gesamte Datenerhebung nicht mit den entsprechenden Magnituden von

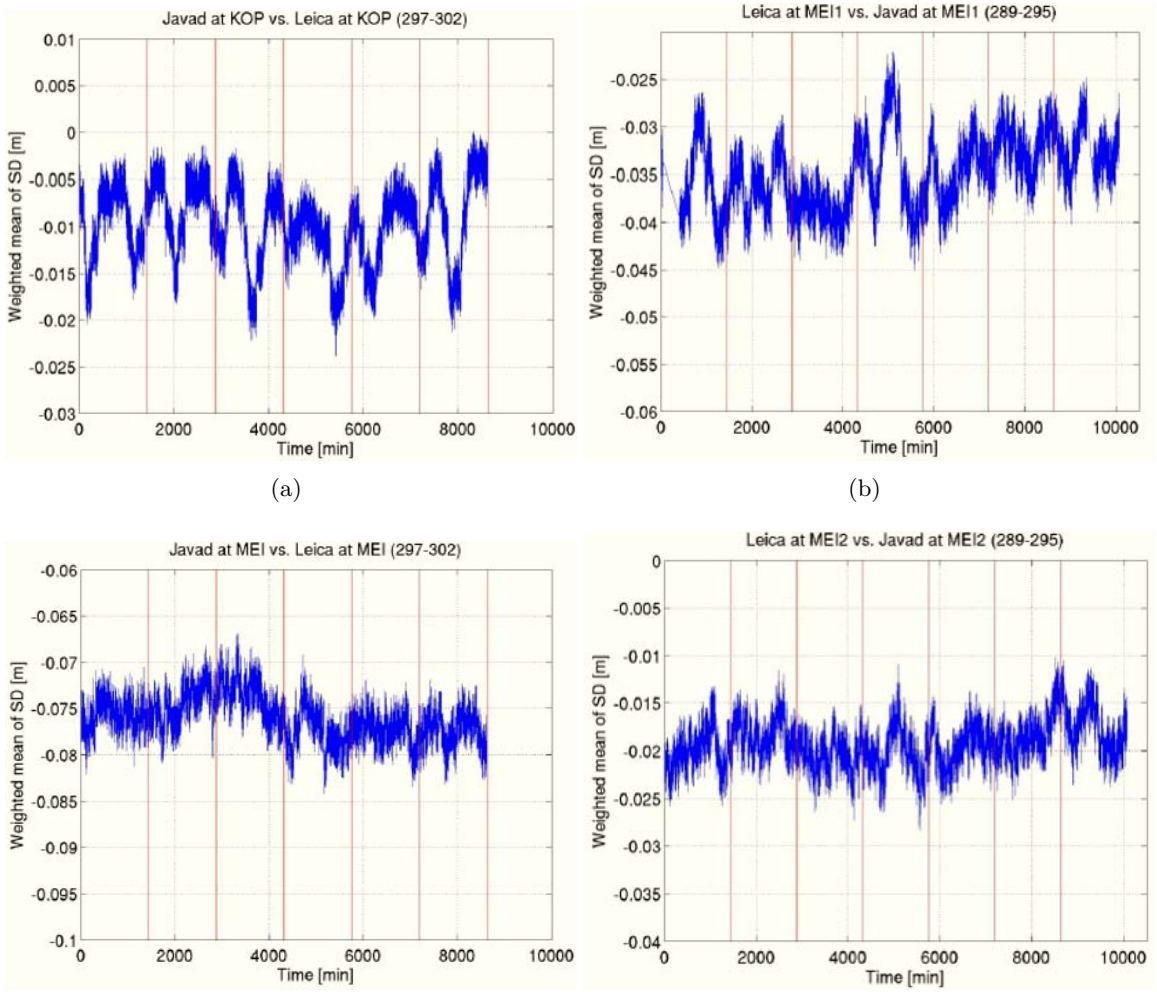


Abbildung 11: Ergebnisse des ZB, Common-Clock Experimentes. Die Datenaufzeichnung erfolgte in zwei Messwochen, (a) RRSDs verglichen an zwei Stationen und einer kurzen (ca. 250 m) Basislinie zwischen Kopfermannbau und Meitnerbau, (b) RRSDs vergleichen auf einer sehr kurzen Basislinie (ca. 5 m), Meitnerbau, PTB. In beiden Konfigurationen liegt das identische Zeitsignal UTC-PTB vor (Common-Clock Ansatz). Die Tagesgrenzen sind in den Abbildungen mit vertikalen Linien indiziert.

1.5-1.0 cm zu detektieren sind. Die Tagesgrenzen sind durch vertikale Linien markiert. Die regelmäßig auftauchenden Variationen sind den einzelnen 24 Stunden bzw. individuellen Messtagen zuzuordnen. Die Regelmäßigkeit ist bezeichnend und ist in äquidistanten Abständen sichtbar. Die Ursachen hierfür sind abschließend nicht vollständig und sicher bekannt, lassen sich aber sehr wahrscheinlich auf fehlerhaft bzw. unzulänglich isolierte Antennenkabel und Temperatureinflüsse zurückführen, da die Variationen eine deutliche und regelmäßige Struktur eines Tagesganges aufweisen.

Abschließend kann aus diesem Datensatz der Schluss gezogen werden, dass die Berücksichtigung der äußeren Einflüsse (Temperatur, Kabelverzögerungen, gleiche Kabellängen, etc.) deutlich hervortreten und die Bestimmung von RPBs mit dem in diesem Vorhaben vorgestellten Ansatz erheblich herausfordernd gestalten.

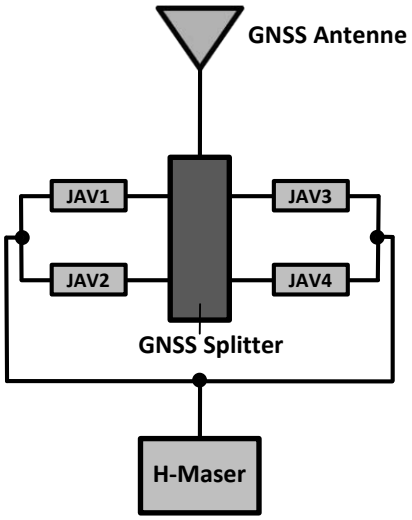


Abbildung 12: Aufbau des Experimentes No. 3 an der PTB in der Zeit vom 24. bis 28. Februar 2014 mit vier baugleichen Javad Empfängern an einer Nullbasislinie und in einer Common-Clock (PTB(UTC)) Konfiguration.

Experiment 3 - Erweiterte Testmessungen in Zusammenarbeit mit der PTB

Tabelle 5: Verwendete Javad Empfänger (baugleiche), die während des Experimentes zur Bestimmung von RPBs und RCBs eingesetzt wurden.

Exp.-ID	Hersteller	Board	Firm.-ID	Rec-ID
JAV1	Javad	TRE_G3T DELTA	3.4.14 Jan,29,2014	02RP41M1YYA712U6HVRT
JAV2				3VY2QE4B4OU883VWGJ21
JAV3				3VSLY4XRZ3OQW3VTZUD9
JAV4				3VU2LZRV53L6W3VM550V

Ein zusätzliches Experiment wurde zur Verifizierung des im Vorhaben vorgestellten Konzeptes in Kooperation mit der PTB geplant und umgesetzt. Hierbei wurden für aktuelle GNSS-Empfänger und verschiedene Signale die RPBs bestimmt und kalibriert. Der prinzipielle Messaufbau ist der Abb. 12 zu entnehmen. Dieser umfasst wiederum vier gleiche Empfänger, angeschlossen an ein gemeinsames Frequenznormal (H-Maser bzw.UTC-PTB) und an einer gemeinsamen Antenne. Es wurde darauf geachtet, gleiche Kabellängen und gleiche Kabelspezifikationen zu verwenden, damit sich eventuelle Fehleranteile durch die Kabel bei der Differenzbildung eliminieren und nicht als systematische Effekte in den Beobachtungen verbleiben.

Alle in diesem Experiment verwendeten Empfänger sind für den optimalen Vergleich mit der selben Firmware ausgestattet, wie der Tab. 5 entnommen werden kann. Aufgrund der proprietären Implementierung von Tracking-Algorithmen in den GNSS-Empfängern, ist die Analyse der verschiedenen Betriebssoftware (Firmware) sinnvoll, im Rahmen dieses Vorhabens aber nicht abbildbar gewesen. Dieser Aspekt ist zusammen mit anderen offenen Fragestellungen im Sinne der Anschlussfähigkeit des Vorhabens eine offene Forschungsfrage und ihm sollte weiterhin große Bedeutung zugemessen werden. Es ist davon auszugehen, dass die RPBs und RCBs nicht nur allein ein Hardware-Effekt sind, sondern auch höchstwahrscheinlich einem Software-Einfluss unterliegen. Weiterhin ist zu vermuten bzw. nachzuprüfen, inwiefern die Wahl der Tracking-Eingenschaften (Tracking-Loops etc.) zusätzlich die RPBs beeinflussen können.

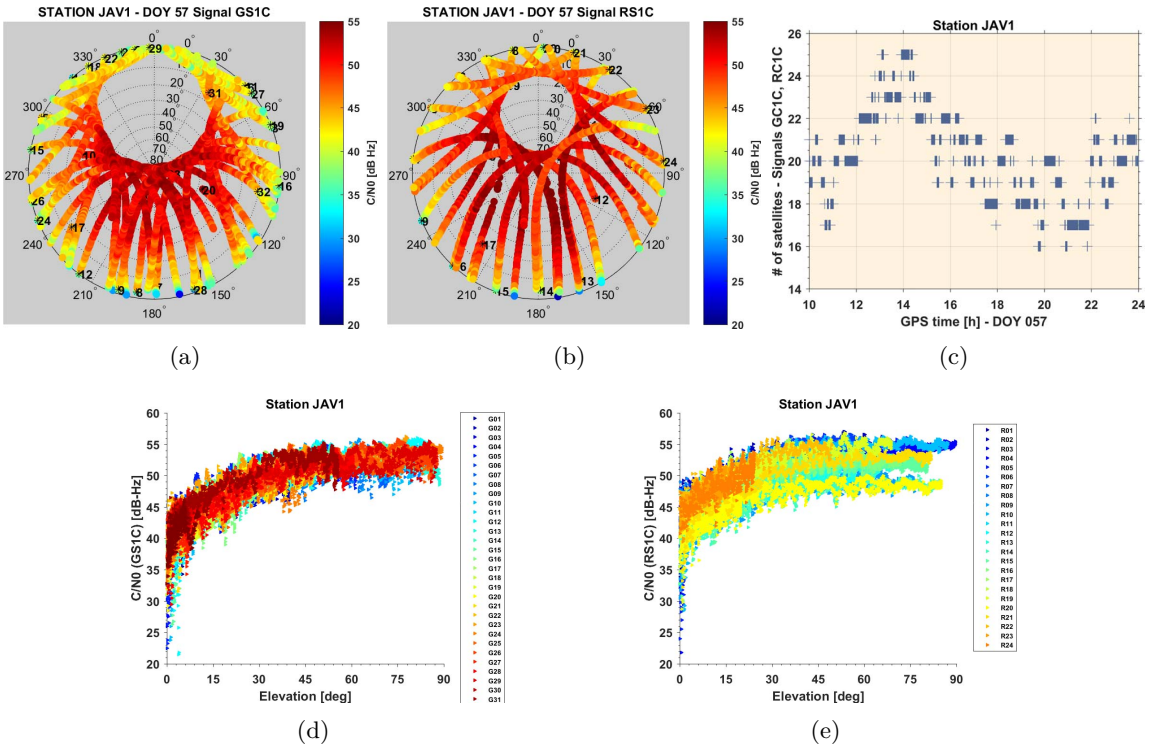


Abbildung 13: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse für GPS/GLONASS anhand des Empfängers Javad TRE_G3T, die sich entsprechend ihrer Qualität auf die anderen abugleichen drei Empfänger übertragen lassen, (a) GPS-Skyplot mit C/N0-Kodierung, (b) GLONASS-Skyplot mit C/N0-Kodierung, (c) Anzahl gemeinsam erhobenen GPS+GLONASS Satelliten, (d-e) C/N0 gegenüber der Elevation im topozentrischen System der GNSS Antenne für GPS bzw. GLONASS.

Durchführung des Experimentes

Das Experiment lässt sich folgendermaßen kurz zusammenfassen: Die Datenerhebung erfolgte an der PTB in der Zeit vom 24.02.-28.02.2014. Es wurden vier baugleiche Empfänger (gleiches Board, gleiche Firmware, gleiche Optionen, vgl. Tab. 5) verwendet. Die Datenerhebung erfolgte für die Systeme GPS, GLONASS, Galileo (2/3 Satelliten). Grundsätzlich entspricht die Messanordnung dem in diesem Vorhaben vorgeschlagenem Ansatz (ZB, alle Empfänger an der PTB-UTC Zeitskala). Die Datenverarbeitung erfolgte mit der am IfE eigens implementierten hausinternen Software (IfE-GNSS Toolbox, Version V6.1) unter Verwendung von 24 Stundenfiles bzw. expliziten Ausschnitten daraus, um RPB-Analysen durchzuführen und Stabilitäten ableiten zu können.

Experiment 3 - Diskussion der Ergebnisse

Für den als lokale Referenz verwendeten Empfänger Javad1 (JAV1) sind die stationsspezifischen Charakteristiken in der Abb. 13 dargestellt. Aufgrund der Ergebnisse des Experimentes 1 aus dem Jahr 2008 (Arbeitspaket 9.1) hat sich ergeben, dass der GNSS-Standpunkt am Kopfermannbau nur bedingt geeignet ist, da der Baumbewuchs um die Station zu nachteiligen Empfangsgeometrien führt. Daher wurde dieses Experiment am Meitnerbau durchgeführt, was in den Skyplots (vgl. Abb. 13(a-b)) dadurch zu entnehmen ist, dass stabile Beobachtungen bis in niedrige Elevationen (ca. 3° Elevation) ermöglicht werden konnten. Generell ist an

diesem Standpunkt mit einer sehr guten Satellitenabdeckung zu rechnen (durchschnittlich 22 Satelliten, GPS / GLONASS kombiniert).

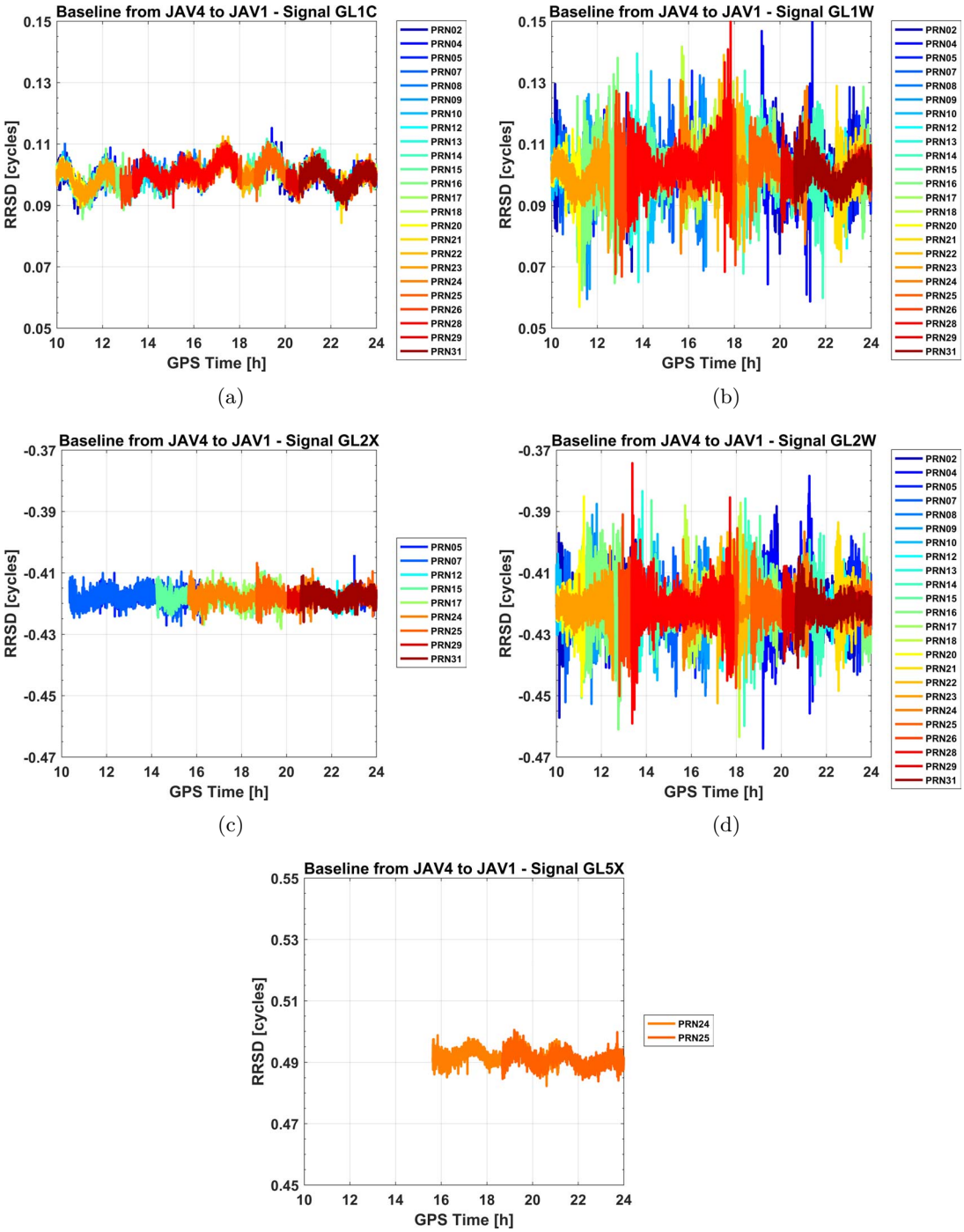


Abbildung 14: Ergebnisse der RPB-Bestimmung für aktuelle GNSS-Empfänger, exemplarisch gezeigt für verschiedene Signale des Systems GPS, (a) GPS L1C - clear access, (b)GPS L1W - Z-Tracking auf L1, (c) GPS L2X - clear access auf L2, (d) GPS L2W - Z-Tracking auf L2, (e) GPS L5X, L5 Signal.)

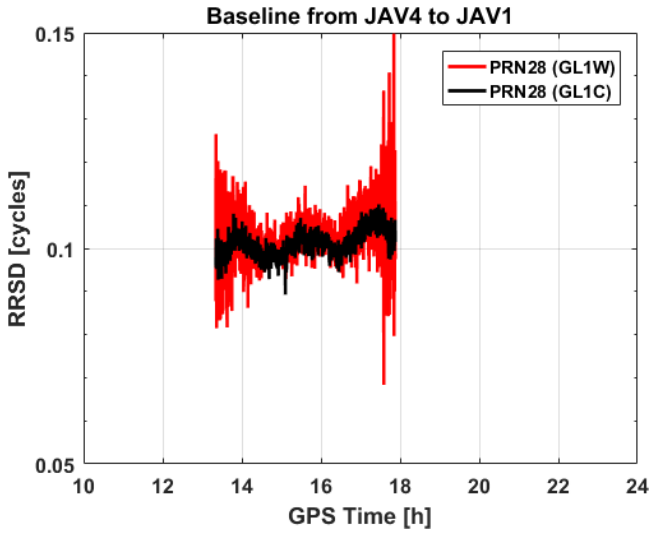


Abbildung 15: Beispiel der Elevationsabhängigkeit der RRSDs des Signals GPS L1W im Vergleich zum Signal GPS L1C für eine identische Empfängerkonfiguration im ZB und Common-Clock Modus.

Tabelle 6: Ergebnisse der Kalibrierung baugleicher GNSS-Empfänger zeigen im Mittel gute zeitliche Konsistenz und konstante inter-frequenz Phasenbiases.

Empfänger 1	Empfänger 2	Basislinie	Phasenbias	DOY056 [m]	DOY057 [m]	DOY058 [m]
JAV3	JAV1	2	GL2X - GL2W	0.0011	0.0010	0.0010
			GL1C - GL1W	0.0000	0.0000	0.0000
JAV4	JAV1	2	GL2X - GL2W	0.0025	0.0028	0.0026
		2	GL1C - GL1W	0.0003	0.0003	0.0003

Ergebnisse für das System GPS sind in der Abb. 14 und der Tab. 6 zusammengestellt. Mehrere interessante Beobachtungen lassen sich aus der Betrachtung der RRSDs ableiten. Zunächst fällt auf, dass alle Beobachtungen von systematischen Variationen mit einem Abstand von 2 h überlagert sind. Diese Variationen entsprechen Temperaturvariationen im Raum, in dem sich die GNSS-Empfänger während der Aufzeichnung befanden. Nach genauerer Prüfung konnte festgestellt werden, dass die Steuerung der Raum-Klimaanlage im Meitnerbau angepasst und optimiert werden musste.

Zusätzlich zu den festgestellten Charakteristiken der Temperaturabhängigkeit lassen sich auch weitere individuelle Beobachtungen ableiten. So sind auf den Signalen GPS L1W und GPS L2W (Z-Tracking zur Verfolgung des GPS P-Codes) ausgeprägte Elevationsabhängigkeiten und bedeutend höheres Rauschen festzustellen. Die Abb. 15 zeigt dies für alle über einen 24 h Datensatz beobachteten Satelliten. Zur Verdeutlichung, um welches Verhältnis es sich hierbei handelt ist dieser Unterschied noch einmal in der Abb. 15 für den PRN28 abgebildet. Bezugnehmend auf die Abb. 14 zeigt sich, dass das Rauschen für das Signal GPS L2W etwas kleinere Magnituden annimmt, als auf dies auf dem GPS L1W-Signal zu verzeichnen ist. Aber dennoch sind diese stärker vertreten, als auf den frei zugänglichen Signalen GPS L1C und GPS L2X. Die Temperatureffekte mit einer Periode von 2 h sind ebenfalls in GPS L5X sichtbar, doch ist hier ein geringeres Rauschen der Beobachtungen zu verzeichnen.

Trotz der unterschiedlichen Rauschanteile in den RRSDs konnten RPBs für verschiedene Signalkombinationen bestimmt werden. In der Tab. 6 sind für ausgesuchte Kombinationen die

Ergebnisse zusammengestellt. Die Wiederholbarkeit der RPB-Bestimmungen liegen im Rahmen der Phasengenauigkeit von 2 mm. Ferner kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Wiederholbarkeit sehr stabil ist und die Elevationsabhängigkeiten keinen Einfluss auf die Bestimmung der RPBs nimmt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz mit Common-Clock und Zero-Baseline eine neue Messanordnung darstellt, der zur Bestimmung der Empfängerbiases (RPBs und RCBs) exzellent geeinget ist und stabile Ergebnisse liefert. Damit stellt dieser Ansatz eine völlig unabhängige Methode bereit, um RPBs und RCBs konsistent und unabhängig von globalen Global Navigation Satellite System (GNSS)-Netzen zu bestimmen.

Ein erster Ansatz wurde im Rahmen dieses Vorhabens erfolgreich entwickelt und anhand mehrerer Datensätze und praktischen Experimenten evaluiert und auf konzeptionelle Herausforderungen hin studiert. Entsprechende Programme zur Umsetzung und Bestimmung der RPBs und RCBs wurden konzeptioniert und maßgeschneidert implementiert. Aufwendige Experimente wurden zur Validierung der Implementierung genutzt.

Abschließend kann aus den erfolgten Arbeitspaketen und der durchgeführten Konzeptanalyse und Machbarkeitsstudie für die Kalibrierung von RPB und RCB folgendes festgehalten werden:

- Die Stabilität für mehr als 24 Stunden Datensätze hängt erheblich von der Stabilität der äußeren Umgebung ab (Temperaturstabilität im Raum, Temperaturstabilität am Empfänger (individuelles Empfängerdesign), phasen-stabile Kabel).

- Die Implementierung der proprietären Tracking-Verfahren ist nicht transparent. Es gibt eine absehbare, jedoch große Vielfalt bei der Behandlung innerhalb der GNSS-Signalakquisition. Eine konsistente Modellierung der Biases ist daher sehr herausfordernd.

- Die korrekte Signalzuordnung bei der Umwandlung der binären, proprietären und herstellerspezifischen Roh-Daten ist sehr wichtig für die konsistente Berechnung. Die RINEX 2.11 Konvention ist mehrdeutig und erlaubt keine konsistente Überführung der Rohdaten speziell für die Trägerphasenbeobachtungen. Zusätzlich ist auch die Codephasenmessung auf der Frequenz L2 abhängig davon, wie der Empfänger die Codes interpretiert oder abgespeichert (L2P/L2C) hat.

  Letztendlich ist eine konsistente und korrekte Zuordnung weitestgehend nur mit RINEX 3.0x möglich.

Fazit des Vorhabens und der erarbeiteten Ergebnisse

Die Forschung an dem Vorhaben haben wesentliche Gewinne zur Kenntnis und Charakterisierung von GNSS-Biases (RPBs und RCBs) geliefert. Umfassend konnten die äußeren und inneren Einflüsse des Ansatzes und Konzeptes studiert und auf Plausibilität hin überprüft werden.

Für das Konzept der Empfänger-Kalibrierung lassen sich abschließend folgende Kriterien zusammenfassen, um eine Bias-Kalibrierung nach dem vorgestellten Ansatz durchführen zu können:

- Zero-Baseline-Ansatz
- Common-Clock Modus
- temperaturstabile Umgebung der Kabeldurchführungen und Empfängerlagerungen an der Kalibriereinrichtung
- kalibrierte Empfangseinheiten (Hochfrequenz (HF)-Steckverbindungen, Kabel, Signalsplitter),
- *optional:* Verwendung absolut-kalibrierte Timing-Empfänger (somit Möglichkeiten der Absolutkalibrierung),
- *Datenaustausch:* Rohdaten im empfängerinternen Format oder mind. RINEX 3.0x-Format (Gurtner und Estey, 2015) bzw. im Format Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)(MacLeod und Agrotis, 2014) zur konsistenten Übertragung und Speicherung von Multi-GNSS Daten.
- Auswertung der Daten nach dem entwickeltem Konzept und Vorschlag für entsprechenden Standard (ist noch nicht definiert bzw. sollte entwickelt werden).

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 Ein erfahrener Mitarbeiter (Herr Dr.-Ing. Tobias Kersten) sowie studentische Hilfskräfte konnten planmäßig zur Unterstützung der Arbeiten des Vorhabens finanziert werden.

Reisekosten Die neuen Ergebnisse und Erkenntnisse konnten wie geplant auf den nationalen und internationalen Konferenzen dem entsprechenden Fachpublikum präsentiert werden. Hierunter zählen die European Geophysical Union (EGU 2015) in Wien, der IGS Analysis Workshop 2015 in Bern. Hierzu sei auf die erfolgten Publikationen im Abschnitt II.6 verwiesen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die notwendigen finanziellen Mittel wurden entsprechend dem Vorhabenumfang und Erkenntnisgewinn angemessen verwendet. Der Aufwand, der in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten rechtfertigt sich durch den Erfolg der erreichten Ziele. Zusätzliche Fragestellungen, die im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens aufgetaucht sind, konnten in der notwendigen Tiefe nicht behandelt werden und sind entsprechend im Bericht mit der Maßgabe einer möglichen Anschlussfinanzierung zusammengestellt und dokumentiert.

Bezüglich der Arbeitspakete konnten die geplanten Arbeiten durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen werden. Im Zuge der Präsentationen auf internationalen Konferenzen zeigte sich, dass die Studien sich in die hochaktuellen Fragestellungen und notwendigen Erkenntnisgewinne einordnen und zukünftig eine wesentliche Rolle spielen werden, da die Multi-GNSS-Verarbeitung und das Zusammenfassen der verschiedenen Signale und Systeme nur basierend auf einem integrativen Ansatz und der Beschreibung und Modellierung aller beteiligten Fehleranteile durchgeführt werden kann.

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

Das Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover befasst sich seit 2009 mit Fragen der Empfänger- und Antennencharakterisierung. Als konkrete Ergebnisse des Vorhabens werden sind wesentliche Beiträge zur Quantifizierung der empfängerseitigen Biases erarbeitet worden:

Die erzielten Ergebnisse eignen sich daher für die Präsentation auf internationalen wissenschaftlichen Symposien wie der European Geophysical Union EGU und dem IGS Analysis Center Workshop.

Für die Durchführung der Experimente mit Uhren wurde auf die bewährte Technik (Zero-Baseline und Common-Clock Anordnungen) zurückgegriffen, die in enger Kooperation mit der PTB in Braunschweig durchgeführt worden sind. Umfangreiche GNSS-Auswerteprogramme, die am IfE entwickelt und erprobt wurden (GNSS_Matlab_Toolbox V6.1), stehen zur Verfügung. Alle weiteren technischen und operationellen Voraussetzungen zur Durchführung der Experimente sind am IfE gegeben und bergen keine besonderen technischen Herausforderungen.

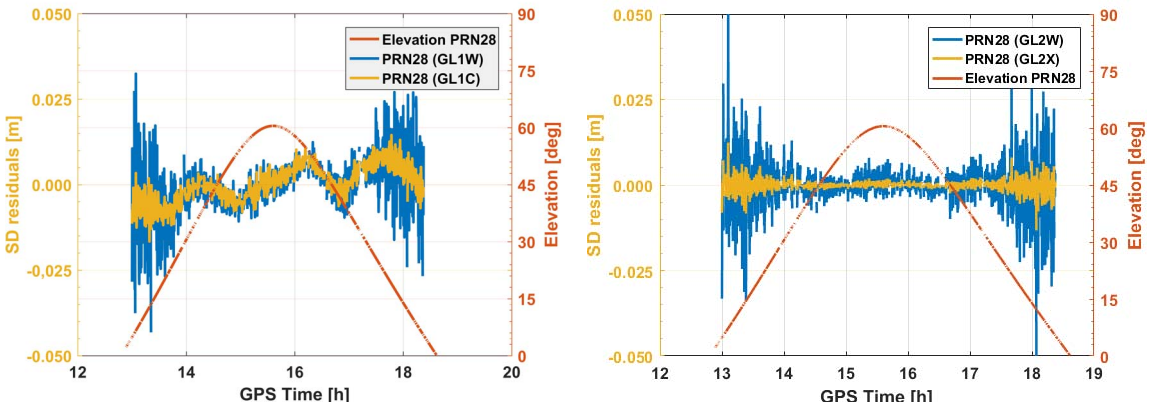
Unser Vorschlag für ein alternatives Kalibrierverfahren (Common Clock) wird von der Fach-Community positiv aufgenommen und übernommen.

Anschlussfähigkeit des Vorhabens

Aufbauend auf diesen Ergebnissen sehen wir bezüglich der Anschlussfähigkeit des Vorhabens folgende Fragestellungen bzw. Aufgabenfelder:

Temperatureinflüsse und Tracking-Algorithmen Besonders während der Bearbeitung des letzten Experimentes an der PTB (Experiment 3) hat sich gezeigt, dass bereits kleine Temperaturunterschiede zu erheblichen Einflüssen hinsichtlich der Trägerphasenstabilität führen. So lassen sich die Variationen in den RRSDs erklären, wie sie exemplarisch für den Satelliten PRN28 in Abb. 16 diskutiert sind. Aus den Abb. 16(a) ist die deutliche Temperatursensitivität zu entnehmen. Hingegen sind für die simultan aufgezeichneten Signale GPS L2X/L2W diese Eigenschaften nicht in der entsprechenden Größenordnung zu erwarten. Diese besonderen Eigenschaften sind zusätzlich durch erweiterte Experimente zu analysieren.

Gesamtsystem Antenne-Kabel-Empfänger Diese Ergebnisse zeigen ebenfalls auf, dass die Betrachtung des Gesamtsystems zwischen Antenne-Kabel-Empfänger unbedingt notwendig ist und nicht vernachlässigt werden kann. Ungeklärte Driften in einigen Zeitreihen von wenigen mm sind auch in den durchgeführten Experimenten sichtbar gewesen



(a) (b)

Abbildung 16: Unterschiedliche Tracking-Algorithmen behandeln die Trägerphasenbeobachtung verschieden, so dass ausgeprägte Elevationsabhängigkeiten auf den RRSDs zu beobachten sind; (a) GPS L1C/W, (b) GPS L2X/W. Zusätzliche Überlagerungen in Sinusform haben ihren Ursprung an der Temperaturanfälligkeit der GNSS-Empfänger (hier JAVAD TRE_G3T) bzw. deren Kanälen.

und lassen sich auf Asymmetrie des Experimentaufbaus zurückführen (unterschiedliche Steckverbindungen, Kabeleigenschaften, Kabellängen). Da die RPBs auf dem mm-Level sind, sollte der Messaufbau für gesicherte Schätzungen stabil sein und im Bereich der Pico-Sekunde (ps) liegen.

Satelliten-Abhängigkeit Abseits von der Geometrie des Messaufbaus sind ebenfalls die Eigenschaften der individuellen Satelliten zu berücksichtigen. So konnte innerhalb der umfassenden Auswertungen beobachtet werden, dass verschiedene Einzelsatelliten nicht dem Mittelwert folgen. Umfangreiche Plausibilitätsuntersuchungen sollten daher Anwendung finden, bzw. können mit diesem Vorangehen fehlerhafte Beobachtungen von der Datenverarbeitung ausgeschlossen werden.

Bestimmung der Unsicherheit Einen besonderer Fokus sollte die zusätzliche Untersuchung der Unsicherheit der RPB-Bestimmung zukommen, da die Anzahl der zu berücksichtigenden RPBs mit der Anzahl verwendbarer Signale steigt, gleichzeitig aber die Nutzung des PPP-Ansatzes in Verbindung mit der State-Space-Repräsentation (SSR) die klassische netzwerk-basierte Real-Time-Kinematic (RTK)-Anwendungen in Zukunft zusehends absetzen werden.

Absolute Kalibrierung von GNSS-Empfängern Für die absolute Kalibrierung der RPBs lohnt sich der Ansatz unter Verwendung eines klassischen Zeit-Empfängers [*timing receiver*] mit bekannten Delays und Empfängeruhrfehler. Da dieser zur Standardausrüstung von Zeit- und Frequenzlaboren gehört und die günstige Konstellation mit ZB und Common-Clock Modus vorhanden ist, ist die Umsetzung der individuellen, bzw. absoluten Kalibrierung von GNSS-Empfängern intensiv zu studieren.

II.5 Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Die Bestimmung der GNSS-Empfänger RPBs ist nach dem vorgestellten Konzept bisher einzigartig und individuell. Entsprechend gibt es derzeit nach unserer Kenntnis keine weitere Gruppe, die sich mit der Thematik in dieser Form auseinandersetzt. Bisherige Ansätze bestimmen die Trägerphasen und Codephasen Biases auf Grundlage globaler Ansätze und Stationen.

Interessant wird das vorgestellte Konzept da im Rahmen der Multi-GNSS Analyse parallel über eine Einrichtung zur Kalibrierung von GNSS-Empfängern eingerichtet wird (NRCan), wie in MacLeod (2015) beschrieben.

Die Kalibrierung der RPBs und RCBs ein aktuell wichtiges Thema, da die Multi-GNSS-Kapazitäten für viele Dienste und Anwendung verlangt und verwendet werden. Bisher lassen sich die Fortschritte auf dem Gebiet der GNSS-Empfänger RPBs und RCBs wie folgt beschreiben:

Charakterisierung GNSS Biases In den Beiträgen von Hauschild und Montenbruck (2014); Hauschild und oliver Montenbruck (2015) wurden eingehend die empfängerspezifischen Einflüsse hinsichtlich der Front-End-Charakteristiken analysiert. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Codephasenbeobachtung [*pseudo range*] und weniger auf der Trägerphasenbeobachtung, wie sie in diesem Vorhaben untersucht wurde. Dennoch zeigen sich auch hier empfängerspezifische Unterschiede. Entsprechendes wurde auch auf Basis von Widelane Analysen studiert (Loyer, 2015). Das empfängerspezifische Charakteristiken einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Schätzung von geodätischen Parametern hat (Position, Tropo- und Ionosphäre, Mehrdeutigkeiten, Empfängeruhr etc.) werden auch intensiv von den entsprechenden Herstellern studiert (Sleewagen, 2015). In diesem Zusammenhang werden auch die Abweichungen der Code-Beobachtung betrachtet, die aus dem Zusammenspiel zwischen Empfänger- und Antenne zu detektieren sind, wie Wanninger et al. (2015) zeigen. Ursprünge der Biases sind in Lestarquit (2015b,a) auf Basis der verwendeten Empfänger zurückgeführt, zusätzlich werden absolute Kalibrierungen der Differential Code Biases (DCB)s vorgeschlagen.

Verarbeitung/Handling von GNSS-Biases Zur konsistenten Verarbeitung der Bias-Daten tragen die Untersuchungen von Wübbena (2015); Laurichesse (2015) bei. Applikationen mit rechtsprechenden Ansätzen zur Verarbeitung der Biases (der Phasenbiases im Besonderen) werden durch Teunissen und Khodabandeh (2015) besprochen und analysiert. Ferner sind Ansätze und Analysen bezüglich der Phasenbiases im Zusammenhang mit PPP zusätzlich in Banville (2014) intensiv studiert.

Analysen und Studien zur Implementierung der Biases (Code und Phase) für die Multi-GNSS Software Bernese (Dach et al., 2015) sind durch Villinger (2015) umfassend dokumentiert.

Einflüsse der Code- und Trägerphasen Biases spielen zusätzlich in der Zeit- und Frequenzübertragung eine besondere Rolle (Defraigne und Sleewagen, 2015).

Zur Kalibrierung von geodätischen GNSS-Empfängern wurde durch den Natural Resources Canada (NRCan) eine Kalibriereinrichung vorgeschlagen, welche sich aktuell im Aufbau befindet,(MacLeod, 2015). Dort sind die in diesem Vorhaben entwickelten Konzepte von großem Interesse.

Standardisierung / Konzepte Bezüglich der Standardisierung sind einheitliche Austauschformate notwendig, um die Vielzahl vorhandener Biases konsistent in die Multi-GNSS Verarbeitung integrieren und berücksichtigen zu können. entsprechende Austauschformate sind für den operationellen Einsatz durch Wübbena (2015) beschrieben, konzentrieren sich für die Post-Prozessierung aber auf ein gemeinsames Format (Bias-SINEX File in Version 1) wie durch Schaer (2015a,b) dokumentiert.

II.6 Erfolgte Publikationen und Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens erfolgten Publikationen auf internationalen Konferenzen und Workshops. Gerade die Diskussion im Rahmen des Multi-GNSS-Workshops waren optimal, da global gesehen die GNSS-Fachkolleginnen und Kollegen im Rahmen der Koordinierung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft eng zusammenarbeiten. Einen abschließenden Überblick geben aktuelle Arbeiten durch Montenbruck et al. (2017). Die vorgestellten Ansätze fanden ein reges Interesse und fördern das weitere Vorgehen im Bereich der GNSS-Bias Kalibrierung.

Die konzeptionellen Entwicklungen wurden in einem Technischen Bericht (Kersten, 2015) zusammengefasst und ebenfalls zur Halbzeit des Projektes auf der European Geophysical Union (EGU) zur Diskussion in der Fachwelt zur Verfügung gestellt, (Kersten und Schön, 2015). Einige Aspekte aus diesem Arbeitspaket wurden zusammen mit Ergebnissen aus dem folgenden Arbeitspaket B (Bestimmung von Phasenbiases für ausgewählte, aktuelle GNSS-Empfänger) auf dem IGS Bias-Workshop mit der GNSS-Experten diskutiert und ausgetauscht, (Schön und Kersten, 2015).

Erfolgte Publikationen im Rahmen des Vorhabens:

Kersten, T. (2015). Entwicklung eines Auswertekonzeptes zur Bestimmung von Phasenbiases. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung - Leibniz Universität Hannover.

Kersten, T. und Schön, S. (2015). An alternative method for determining GPS receiver biases. In *EGU General Assembly 2015*, Volume 17 of *Geophysical Research Abstracts*.

Schön, S. und Kersten, T. (2015). Determination of phase biases with zero-baseline common clock setups. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases*, *Bern*, *November 05.-06*

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.

Literaturverzeichnis

Banville, S. (2014). *Improved Convergence for GNSS Precise Point Positioning.* Diss., Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 294, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. Recipient of The Institute of Navigation 2014 Bradford W. Parkinson Award.

Banville, S., Santerre, R., Cocard, M., und Langely, R. B. (2008). Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution. In *Proc. of the Institute of Navigation, National Technical Meeting.*

Bauch, A., Weyers, S., Piester, D., Staliuniene, E., und Yang, W. (2012). Generation of UTC(PTB) as a fountainclock based time scale. *Metrologia*, 49:180–188.

Cao, W., Hauschild, A., Steigenberger, P., Langely, R. B., Urquhart, L., Santos, M., und Montenbruck, O. (2010). Performance evaluation of integrated GPS/GIOVE precise point positioning. In *Proc. of the 2010 International Technical Meeting (ITM) of the Institute of Navigation.*

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., und Fridez, P. (Hrsg.) (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2.* University of Bern. User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2.

Defraigne, P., Petit, G., Uhrich, P., und Aerts, W. (2010). Requirements on GNSS receivers from the perspective of timing applications. In *Proc. EFTF 2010.*

Defraigne, P. und Sleewagen, J.-M. (2015). Correction for Code-Phase Clock Bias in PPP. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November.*

Gurtner, W. und Estey, L. (2015). RINEX - The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03. *International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104).*

Hauschild, A. und Montenbruck, O. (2014). A Study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing. *GPS Solutions.*

Hauschild, A. und oliver Montenbruck (2015). The Effect of Correlator and Front-End Design on GNS Pseudorange Biases for Geodetic Receivers. In *Proc. of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Tampa, Florida, September*, Seiten 2835–2844.

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

Kersten, T. (2015). Entwicklung eines Auswertekonzeptes zur Bestimmung von Phasenbiases. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung - Leibniz Universität Hannover.

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

Kersten, T. und Schön, S. (2010b). 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. (2011). On the Determination of Antenna Phase Center Corrections in a Multi-GNSS Multi-Frequency Approach. In *EGU General Assembly 2011*, Volume 13 of *Geophysical Research Abstracts.* Poster #EGU2011-3678.

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

Kersten, T. und Schön, S. (2015). An alternative method for determining GPS receiver biases. In *EGU General Assembly 2015*, Volume 17 of *Geophysical Research Abstracts.*

Kersten, T. und Schön, S. (2012). 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. (2011). Virtual Receiver to Enhance GNSS-based Curved Landing Approaches. In *Proc. ION GNSS 2011*, Seiten 536–545.

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

Laurichesse, D. (2015). Handling the Biases for Improved Triple-Frequency PPP Convergence. *GPS World*.

Leick, A. (1990). *GPS Satellite Surveying*. Wiley-Interscience Publication - John Wiley and Sons.

Lestarquit, L. (2015a). Absolute DCB determination. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Lestarquit, L. (2015b). Coupled satellite/receiver biases. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Liso, M., Smyrnaios, M., Schön, S., und Kürner, T. (2012). Investigation of diffraction effects in GNSS using ray tracing channel modelling: Preliminary results. In *Proc. of 6th European Conference of Antennas and Propagation (EUCAP), March 2012, Prague, Czech Republic*.

Liso, M., Smyrnaios, M., Schön, S., und Kürner, T. (2013). Ray Tracing Multipath Modelling in GNSS with a Single Reflector. In *Proc. of 7th European Conference of Antennas and Propagation (EUCAP), April 2013, Gothenburg, Sweden*.

Loyer, S. (2015). Receiver type depending part of observed satellite wide lane delays (gps l1/l2 only). In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Loyer, S., Mercier, F., Laurichesse, D., und Perosanz, F. (2012). Integer clock and integer PPP issues. In *IGS Workshop on GNSS Biases, Bern, Switzerland, January 18-19*.

MacLeod, K. (2015). GNSS Receiver Test Site at NRCan. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

MacLeod, K. und Agrotis, L. (2014). RINEX Working Group Report. In *IGS Workshop, Pasadena California, USA, Juni 23-27*.

Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., und Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) - Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 59(7):1671 – 1697.

Reußner, N. und Wanninger, L. (2011). GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. In *Proc. of ION GNSS 2011, Portland, OR*, Seiten 711–716.

Schaer, S. (2012a). Overview of GNSS Biases. In *IGS Workshop on GNSS Biases, Bern, Switzerland, January 18-19*.

Schaer, S. (Hrsg.) (2012b). *Results from IGS Workshop on GNSS Biases, January 18-19, IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland*.

Schaer, S. (2015a). Data Format Issues: Bias-SINEX 1.00. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Schaer, S. (2015b). Format Discussion Concerning Bias-SINEX 1.00 and IONEX 1.1: Genral Rules. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Schaer, S. und Dach, R. (2010). Biases in GNSS Analysis. In *IGS Workshop and Vertical Rates Symposium 2010*. Vortrag.

Schön, S. und Kersten, T. (2015). Determination of phase biases with zero-baseline common clock setups. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Sleewagen, J.-M. (2015). Code Inter-Frequency Biases in GNSS Receivers. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Steigenberger, P., Hugentobler, U., Montenbruck, O., und Hauschild, A. (2011). Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network. *Journal of Geodesy*, 85(6).

Teunissen, P. J. G. und Khodabandeh, A. (2015). Review and Principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*, 86(3):217–240.

Vennebusch, M., Schön, S., und Weinbach, U. (2011). On the temporal and spatial stochastic behaviour of high-frequency slant tropospheric delays - Results from simulations and real GNSS data. *J. Adv. Space Res.*, 47(10):1681–1690. Special Issue on GNSS.

Villinger, A. (2015). Generalized Bias Handling in the Bernese GNSS Software and First Examples. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Wang, M. und Gao, Y. (2007). An Investigation on GPS Receiver Initial Phase Bias and Its Determination. In *Proc. of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION-ITM), San Diego, CA, January*, Seiten 873–880. The Institute of Navigation.

Wanninger, L. (2011). Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. *J Geod*, 86(2):139–148.

Wanninger, L., Sumaya, H., und Beer, S. (2015). Nadir angle and elevation angle dependent GPS code delay variations. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Wübbena, G. (2015). RTCM-SSR Strategy of Bias Treatment. In Schaer, S. (Hrsg.), *IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Bern, November*.

Weinbach, U. und Schön, S. (2009). Evaluation of the clock stability of geodetic GPS receivers connected to an external oscillator. In *Proc. ION GNSS 2009*, Seiten 3317–3328.

Weinbach, U. und Schön, S. (2012). Improved GPS Receiver Clock Modeling for Kinematic Orbit Determination of the GRACE Satellites. In *Proc. of the 26th European Frequency and Time Forum (EFTF), Gothenburg, Sweden, April 24.-26.*

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

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.