

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Umweltwissenschaften

Die GLONASS-Mehrdeutigkeitslösung beim Precise Point Positioning (PPP)

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Nico Reußner

geboren am 18. September 1981 in Zeulenroda

Gutachter:

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger
Technische Universität Dresden

Herr Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker
Technische Universität Darmstadt

Herr Dr.-Ing. Mirko Scheinert
Technische Universität Dresden

Dresden, 28. September 2015

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Die GLONASS-Mehrdeutigkeitslösung beim Precise Point Positioning (PPP)“

wird hiermit bestätigt.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Precise Point Positioning (PPP) ermöglicht eine präzise Positionsbestimmung mittels globaler Satellitennavigationssysteme (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) ohne die direkte Verwendung der Beobachtungsdaten von regionalen Referenzstationen. Die wesentlichste Einschränkung von PPP im Vergleich zu differenziellen Auswertetechniken (*Real-Time Kinematic*, RTK) ist die deutlich längere Konvergenzzeit. Voraussetzung für die Verkürzung der Konvergenzzeit ist die Festsetzung der geschätzten Mehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte. Die Mehrdeutigkeitslösung verlangt ein robustes funktionales Modell und beruht auf einem zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren, welches frei von ionosphärischen Einflüssen 1. Ordnung ist. Die sowohl auf Code als auch auf Phasenbeobachtungen basierende Melbourne-Wübbena-Linear kombination erlaubt hierbei eine einfache Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten. Infolgedessen kann zur Berechnung der ionosphären-freien Linear kombination die im Vergleich zur Wellenlänge der ionosphären-freien Linear kombination deutlich größere *Narrowlane*-Wellenlänge verwendet werden.

Zur Stabilisierung des im Normalfall lediglich auf den Beobachtungsdaten des amerikanischen *Global Positioning System* (GPS) beruhenden funktionalen Modells können die Beobachtungsdaten des russischen *GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) beitragen. Aufgrund der Technik, die GLONASS zur Identifizierung der einzelnen Satelliten einsetzt (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA), unterscheiden sich die Frequenzen der einzelnen Satelliten. Die leicht unterschiedlichen Frequenzen erschweren die Modellierung und Korrektur der instrumentell bedingten Signalverzögerungen (z. B. *Fractional-Cycle Biases* (FCB)). Vor diesem Hintergrund kann das konventionelle Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren nur bedingt für GLONASS verwendet werden.

Die Untersuchung der instrumentell bedingten GLONASS-Signalverzögerungen sowie die Entwicklung einer alternativen Methode zur Festsetzung der GLONASS-Mehrdeutigkeiten mit dem Ziel einer kombinierten GPS/GLONASS-Mehrdeutigkeitslösung sind die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit. Die entwickelte alternative Mehrdeutigkeitsfestsetzungsstrategie baut auf der reinen *Widelane*-Linear kombination auf, weshalb globale Ionosphärenmodelle unabdingbar sind. Sie eignet sich sowohl für GLONASS als auch für GPS und zeigt gleichwertige Ergebnisse für beide GNSS, wengleich im Vergleich zur konventionellen Methode mit geringeren Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquoten zu rechnen ist.

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) allows for accurate Global Navigation Satellite System (GNSS) based positioning without the immediate need for observations collected by regional station networks. The fundamental drawback of PPP in comparison to differential techniques such as Real-Time Kinematic (RTK) is a significant increase in convergence time. Among a plurality of different measures aiming for a reduction of convergence time, fixing the estimated carrier phase ambiguities to integer values is the key technique for success. The ambiguity resolution asks for a robust functional model and rests upon a two-stage method ruling out first-order ionospheric effects. In this context the Melbourne-Wübbena linear combination of dual-frequency carrier phase and code measurements leverages a simple resolution of widelane ambiguities. As a consequence the in comparison to the wavelength of the ionosphere-free linear combination significantly longer narrowlane wavelength can be used to form the ionosphere-free linear combination.

By default the applied functional model is solely based on observations of the Global Positioning System (GPS). However measurements from the *GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) can contribute to improve the model's stability significantly. Due to the technique used by GLONASS to distinguish individual satellites (Frequency Division Multiple Access, FDMA), the signals broadcast by those satellites differ in their frequencies. The resulting slightly different frequencies constitute a barricade for both modelling and correcting any device-dependent signal delays, e.g. fractional-cycle biases (FCB). These facts limit the applicability of the conventional ambiguity-fixing approach when it comes to GLONASS signals.

The present work puts a focus both on investigating the device-dependent GLONASS signal delays and on developing an alternative method for fixing GLONASS ambiguities with the ultimate objective of a combined GPS/GLONASS ambiguity resolution. The alternative ambiguity resolution strategy is based on the pure widelane linear combination, for which reason ionospheric corrections are indispensable. The procedure is applicable for GLONASS in the first instance but reveals equivalent results for both GPS and GLONASS. The disadvantage relative to the conventional approach is the reduced ambiguity fixing success rate.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 GNSS	7
2.1.1 GPS	7
2.1.2 GLONASS	9
2.1.3 Vergleich von GPS und GLONASS	10
2.1.4 Weitere Systeme	11
2.2 Positionsbestimmung	12
2.2.1 <i>Single Point Positioning</i> (SPP)	13
2.2.2 <i>Precise Point Positioning</i> (PPP)	14
2.2.3 <i>Real-Time Kinematic</i> (RTK)	15
2.3 Messabweichungen und andere Einflüsse	17
2.3.1 Satellit	19
2.3.2 Signalausbreitung in der Atmosphäre	20
2.3.3 Signalausbreitung in Stationsumgebung	22
2.3.4 Station	23
2.3.5 Instrumentelle Verzögerungen	25
2.4 Linearkombinationen	28
2.5 Ausgleichung	34
2.5.1 Funktionales Modell und Linearisierung	35
2.5.2 Stochastisches Modell	36
2.5.3 Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate	38
2.5.4 Eliminierung von Parametern	39
2.5.5 Sequentielle Ausgleichung	40
2.5.6 Varianzkomponentenschätzung	41
2.6 Statistik	42
3 Precise Point Positioning (PPP)	45
3.1 Allgemein	45

3.2	Korrekturen	46
3.2.1	<i>International GNSS Service</i> (IGS)	46
3.2.2	Korrekturen am Satelliten	46
3.2.3	Atmosphärische Korrekturen	50
3.2.4	Korrekturen an der Station	54
3.2.5	Instrumentelle Verzögerungen	56
3.3	Ausgleichung	61
3.3.1	Beobachtungsgleichungen	61
3.3.2	Funktionales Modell	63
3.3.3	Stochastisches Modell	65
3.3.4	Sequentielle Ausgleichung	70
3.3.5	Singularitäten	70
3.4	Mehrdeutigkeitslösung	71
3.4.1	Linearkombinationen	72
3.4.2	Methoden zur Beseitigung der <i>Fractional-Cycle Bias</i> (FCB)	72
3.4.3	Methoden der Mehrdeutigkeitslösung	76
3.5	Kombinierte GPS- und GLONASS-PPP-Auswertung	81
3.5.1	Konzept	82
3.5.2	WaPPP	85
3.5.3	IntAR	86
4	Voruntersuchungen	89
4.1	GLONASS-Frequenznummern	89
4.2	Daten	96
4.2.1	Datensatz 1	96
4.2.2	Datensatz 2	96
4.3	Phase	98
4.3.1	<i>Fractional-Cycle Biases</i> (FCB)	98
4.3.2	<i>Inter-Frequency Biases</i> (IFB)	102
4.4	Code	110
4.4.1	Satellit	111
4.4.2	<i>Inter-Frequency Biases</i> (IFB)	113
5	Untersuchungen zu Codeverzögerungen	119
5.1	Daten	119
5.2	Codeabweichungen (<i>Code Delay</i> , CD)	121
5.3	<i>Differential Code Biases</i> (DCB)	125
5.3.1	Allgemein	125
5.3.2	DCB_{P1C1}^{CODE} des <i>Center for Orbit Determination in Europe</i> (CODE)	127
5.3.3	Stationsspezifische DCB_{P1C1}^{TUD}	130
5.4	Melbourne-Wübbena-Linear kombination	138
5.4.1	Berechnung	139
5.4.2	<i>Fractional-Cycle Biases</i> (FCB)	140
5.4.3	A priori-Korrekturen	143
5.4.4	Lösungstyp A und B	146

5.4.5	Lösungstyp C bis H	151
5.4.6	Langzeitstabilität	152
6	Verwendung von verschiedenen Orbit- und Uhrkorrekturen	157
6.1	Übersicht	157
6.2	Daten	160
6.3	Ergebnisse	162
6.3.1	Koordinaten	162
6.3.2	<i>Fractional-Cycle Biases</i> (FCB)	163
6.3.3	<i>Fractional Part</i> (FP)	165
6.3.4	<i>Inter-Frequency Biases</i> (IFB)	166
6.3.5	Mehrdeutigkeiten	167
7	Zusammenfassung und Ausblick	173
	Literaturverzeichnis	177

Abbildungsverzeichnis

2.1	Arten der Positionsbestimmung	13
2.2	<i>Single Point Positioning</i> (SPP)	13
2.3	<i>Precise Point Positioning</i> (PPP)	14
2.4	<i>Real-Time Kinematic</i> (RTK)	16
2.5	Messabweichungen bei der absoluten Positionierung nach dem PPP-Prinzip	18
2.6	Messabweichungen bei der relativen Positionierung nach dem RTK-Prinzip	19
2.7	Anzahl an Sonnenflecken zwischen 1900 und 2014	21
2.8	Mehrwegeausbreitung	22
2.9	Signalbeugung	23
2.10	Geometrie des Antennenphasenzentrums des Empfängers	24
2.11	Gegenüberstellung der Differenz aus <i>Widelane</i> - und Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten und dem <i>Differential Code Bias</i> DCB_{P1P2}	33
3.1	TEC-Charakteristika für die Jahre 2000 bis 2013	51
3.2	TEC-RMS-Charakteristika für die Jahre 2000 bis 2013	52
3.3	IFB_{Φ} der Originalsignale G1 und G2	58
3.4	GLONASS-FPs der <i>Widelane</i> -Linearkombination ohne und mit Verwendung der a priori-Korrekturen	59
3.5	Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination	67
3.6	Coderesiduen der ionosphären-freien Code-Linearkombination	68
3.7	Phasenresiduen der <i>Widelane</i> -Linearkombination	68
3.8	Phasenresiduen der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	69
3.9	Methoden zur Beseitigung der <i>Fractional-Cycle Bias</i> (FCB)	73
3.10	<i>Fractional-Cycle Bias</i> (FCB)-Methode	74
3.11	<i>Integer Phase Clock</i> (IPC)-Methode	75
3.12	<i>Decoupled Clock Model</i> (DCM)-Methode	75
3.13	Ablauf der Mehrdeutigkeitslösung	77
3.14	Mehrdeutigkeitslösung nach <i>Integer Rounding</i> (IR)	78
3.15	Mehrdeutigkeitslösung nach <i>Integer Bootstrapping</i> (IB)	79
3.16	Mehrdeutigkeitslösung nach <i>Integer Least-Squares</i> (ILS)	80
3.17	FP der Melbourne-Wübbena- und <i>Widelane</i> -Linearkombination	83
3.18	Ansätze für PPP mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung	85
4.1	GLONASS-Frequenznummern	90
4.2	Standardabweichungen von epochenweise berechneten Frequenznummern	93
4.3	Standardabweichungen von gemittelten Frequenznummern	94
4.4	Detektion von fehlerhaften GLONASS-Frequenznummern in den <i>Broadcast-Ephemeriden</i>	95

4.5	Stationen von Datensatz 2	97
4.6	GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	100
4.7	Häufigkeitsverteilung der Differenzen aufeinanderfolgender GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	101
4.8	Wiederholgenauigkeit von GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	101
4.9	Häufigkeitsverteilung der Differenzen von einstündigen GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination und dem 14-tägigen Mittel von 24-stündigen GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	102
4.10	Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen am Beispiel der Station DIEP	104
4.11	Abweichungen zwischen den absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen	105
4.12	Standardabweichungen der Abweichungen zwischen den absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen	105
4.13	Langzeitstabilität der absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination am Beispiel der Station DIEP	106
4.14	Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination der Station HEL2 in Abhängigkeit der installierten Firmware-Version	108
4.15	Wiederholgenauigkeiten der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination	111
4.16	Differenz der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination von GLONASS-Satelliten mit derselben Frequenznummer	112
4.17	$IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination	113
4.18	Wiederholgenauigkeiten der $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination	114
4.19	GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. bzw. 2. Grades	115
4.20	Häufigkeitsverteilung der Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination	116
5.1	Stationen	120
5.2	Stationsspezifische GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination von acht Empfängerherstellern	122
5.3	$IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination	123
5.4	Standardabweichungen der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. Grades und Verhältnis der Standardabweichungen der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. bzw. 2. Grades	124
5.5	DCB_{P1C1}^{CODE} des <i>Center for Orbit Determination in Europe</i> (CODE) für Mai 2012	128
5.6	Mittlere DCB_{P1C1}^{CODE} des <i>Center for Orbit Determination in Europe</i> (CODE) (Januar 2010 bis Oktober 2013)	129
5.7	Stationsspezifische Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1}^{TUD1}	133
5.8	DCB_{P1C1}^{TUD1} von vier Empfängerherstellern in Abhängigkeit von der Satellitennummer	135
5.9	RMS der Differenzen zwischen DCB_{P1C1}^{CODE2} und DCB_{P1C1}^{TUD1}	136

5.10	GLONASS- DCB_{P1C1}^{TUD1} von vier Empfängerherstellern in Abhängigkeit von der Frequenznummer	137
5.11	Stationsspezifische $IFB_{DCB,P1C1}$ der GLONASS- DCB_{P1C1}^{TUD1}	138
5.12	Herstellerspezifische GPS-FCB der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	141
5.13	Herstellerspezifische FCB der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der GPS-Satelliten G11 und G17	142
5.14	Ableitung von a priori-Korrekturen der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A	144
5.15	Häufigkeitsverteilung von FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A	145
5.16	Festsetzungsquoten der GLONASS-Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten der Lösungstypen A und B	147
5.17	Festsetzungsquoten der GLONASS-Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten der Lösungstypen A und B mit identischen Tageslösungen	148
5.18	Relative $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen A und B	149
5.19	Relative $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination aller acht Lösungstypen	151
5.20	Langzeitstabilität der relativen $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	154
5.21	Wiederholgenauigkeit der relativen $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	155
6.1	Abweichungen und Standardabweichungen der AC-Orbitkorrekturen in Bezug auf das IGS-Produkt	159
6.2	Abweichungen und Standardabweichungen der AC-Uhrkorrekturen in Bezug auf das IGS-Produkt	160
6.3	Stationen	161
6.4	Wiederholgenauigkeiten der AC-spezifischen Koordinaten	162
6.5	Standardabweichungen der AC-spezifischen Koordinatenabweichungen	163
6.6	GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination	164
6.7	Häufigkeitsverteilung der GPS- und GLONASS-FPs der Melbourne-Wübbena- und <i>Widelane</i> -Linearkombination unter Verwendung der ESA-Orbit- und Uhrkorrekturen	165
6.8	Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination	167
6.9	Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS in Abhängigkeit des MW- und WL-Ansatzes	168
6.10	Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS	169
6.11	Festsetzungsquoten der IF-Mehrdeutigkeiten von GPS, unterschieden in reine GPS- und kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung	170

Tabellenverzeichnis

2.1	Messabweichungen und andere Einflüsse auf GNSS-Messungen und Datenauswertung	17
2.2	Eigenschaften der wichtigsten Phasen-Linearkombinationen	30
2.3	Wellenlängenfaktoren f_λ und effektive Wellenlängen λ_{eff} der wichtigsten Phasen-Linearkombinationen nach nach Festsetzung der <i>Widelane</i> -Mehrdeutigkeit	34
3.1	IGS-Produkte für GPS	47
3.2	IGS-Produkte für GLONASS	47
3.3	IGS-Produkte für Ionosphäre	47
3.4	Ionosphärische Laufzeitverzögerung 1. Ordnung	50
3.5	A priori-Korrekturen des IFB_Φ der Originalsignale G1 und G2	59
3.6	Stationen	84
4.1	Stationen	92
4.2	Stationen von Datensatz 1	96
4.3	Stationen von Datensatz 2	99
4.4	Absolute $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination der Station HOBU	107
4.5	Änderungen der absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel	107
4.6	Absolute $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination verschiedener Stationen mit Septentrio-Empfängern	109
4.7	Änderungen der $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel	114
5.1	Stationen	120
5.2	Einteilung von GNSS-Empfängern	126
5.3	P1C1-Korrekturen	127
5.4	Stationen	132
5.5	Herstellerspezifische Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1}^{TUD1}	133
5.6	Herstellerspezifische $IFB_{DCB,P1C1}$ der GLONASS- DCB_{P1C1}^{TUD1}	138
5.7	Lösungstypen	139
5.8	Standardabweichungen der FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A	146
5.9	Relative $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen A und B für Stationspaare mit identischen Empfängertypen	150
5.10	Relative $IFB_{\Phi,MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen C bis H für Stationspaare mit identischen Empfängertypen	153
6.1	IGS ACs mit GPS- und GLONASS-Orbit- und Uhrkorrekturen vom Typ <i>final</i>	158
6.2	Stationen	161

6.3	Merkmale der GPS- und GLONASS-FPs der Melbourne-Wübbena- und <i>Widelane</i> - Linearkombination	166
6.4	Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS in Abhängigkeit des MW- und WL-Ansatzes	168
6.5	Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS . . .	169

Abkürzungsverzeichnis

AC	Analysis Center
ANTEX	ANTenna EXchange Format
AR	Ambiguity Resolution
ARP	Antennenreferenzpunkt
BDS	BeiDou Satellite Navigation System
CD	Code Delay
CDMA	Code Division Multiple Access
CM	Center of Mass
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CPB	Code-Phase Bias
DCB	Differential Code Bias
DCM	Decoupled Clock Model
DD	Double Difference
DOP	Dilution Of Precision
DOY	Day Of Year
DSP	Digital Signal Processing
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPN	EUREF Permanent Network
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operations Centre
FCB	Fractional-Cycle Bias
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FOC	Full Operational Capability
FP	Fractional Part
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation
GEO	Geostationary Earth Orbit
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum
GIM	Global Ionospheric Map
GLONASS	GLOBAL'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRAPHIC	GRoup And PHase Ionospheric Correction
GRAF	Integriertes Geodätisches Referenznetz Deutschlands
IAC	Information and Analysis Center of Navigation
IB	Integer Bootstrapping
IFB	Inter-Frequency Bias

IF	Ionosphären-freie Linearkombination
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined GeoSynchronous Orbit
ILS	Integer Least-Squares
IONEX	IONosphere map EXchange Format
IPC	Integer Phase Clock
IR	Integer Rounding
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISB	Inter-System Bias
LAMBDA	Least-quares AMBiguity Decorrelation Adjustment
MEO	Medium Earth Orbit
MF	Mapping Function
MGEX	Multi-GNSS Experiment
MkQ	Methode der kleinsten Quadrate
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MSTID	Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances
MW	Melbourne-Wübbena-Linearkombination
NL	Narrowlane-Linearkombination
NMF	Niell Mapping Function
NRCan	Natural Resources Canada
PPP	Precise Point Positioning
PRN	Pseudo Random Noise
PZ-90	Parametry Zemli 1990 Goda
PZO	Phasenzentrumsoffset
PZV	Phasenzentrumsvariationen
QZSS	Quasi-Zenit Satellite System
RCP	right circularly polarized
RINEX	Receiver INdependent EXchange Format
RMS	Root Mean Square
RNSS	Regional Navigation Satellite System
RTK	Real-Time Kinematic
SAIF	Submeter-class Augmentation with Integrity Function
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SDMC	System for Differential Correction and Monitoring
SD	Single Difference
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPP	Single Point Positioning
SVN	Space Vehicle Number
TEC	Total Electron Content
UCD	Uncalibrated Code Delay
UFO	Uncalibrated Fractional Offset
UHD	Uncalibrated Hardware Delay
UPD	Uncalibrated Phase Delay
URE	User Range Error
USD	Uncalibrated Signal Delay

UTC	Coordinated Universal Time
VMF1	Vienna Mapping Function 1
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS-84	World Geodetic System 1984
WL	Widelane-Linearkombination

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme der ersten globalen Satellitennavigationssysteme (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde die Möglichkeit geschaffen, dass jedermann, zu jeder Zeit, bei jedem Wetter und an (fast) jeden Ort der Welt seine Position bestimmen kann. Seither unterliegen sowohl die GNSS selbst als auch die Techniken zur präzisen Koordinatenberechnung einem stetigen Wandel. Die Weiterentwicklung verfolgt dabei nur ein Ziel: die satellitengestützte Bestimmung möglichst genauer Koordinaten in möglichst kurzer Zeit.

Zu den GNSS gehören in erster Linie das amerikanische *Global Positioning System* (GPS) und in der Zwischenzeit auch wieder das russische *GLobal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS). Während das amerikanische Militär als der Betreiber von GPS hauptsächlich seine Satelliten und deren Signalstruktur einer Modernisierung unterzogen hat und weiterhin unterzieht, hat die russische Regierung nach Jahren der Vernachlässigung zu Beginn des Jahrtausends einen Neuaufbau des Raumsegments beschlossen und vollzogen. Zwei weitere globale Satellitennavigationssysteme, zum einen das chinesische BeiDou und zum anderen das europäische GALILEO, verschiedene regionale Satellitennavigationssysteme, sowie zahlreiche Ergänzungssysteme (*Satellite Based Augmentation System*, SBAS) befinden sich entweder in der Aufbau- und Erprobungsphase oder sind schon voll funktionsfähig. Das Zusammenwirken der globalen und regionalen Satellitennavigationssysteme sowie der Ergänzungssysteme erleichtert einerseits das Erreichen des oben genannten Ziels und führt andererseits aber auch dazu, dass immer mehr Faktoren bei der Datenauswertung zu beachten sind.

Für geodätische Anwendungen, die präzise Koordinaten auf cm-Niveau oder weniger benötigen, sind spezielle Verfahrenweisen notwendig, da GNSS im Allgemeinen und GPS im Speziellen in seinem ursprünglichen Sinn gar nicht für eine solch hohe Genauigkeit konzipiert wurde. Zur Koordinatenberechnung auf dem Niveau von einigen Millimetern hat sich die *Real-Time Kinematic* (RTK)-Technik etabliert. RTK benötigt neben den Beobachtungsdaten der Roverstation auch Beobachtungsdaten von einer Referenzstation, deren Koordinaten auf mm-Niveau vorliegen und als fest angenommen werden. Im Idealfall sind die Beobachtungsdaten von mehreren, sich um Umkreis der Roverstation befindlichen Referenzstationen verfügbar (Netz-RTK). Bei den Beobachtungsdaten handelt es sich um die Code- und Phasenbeobachtungen der von den Satelliten ausgesendeten Signale. Stehen simultane Beobachtungsdaten für die Rover- und mindestens eine Referenzstation zur Verfügung, können abgeleitete Beobachtungsgrößen in Form von einfachen oder doppelten Differenzen gebildet werden. Vor diesem Hintergrund lässt sich eine Vielzahl von Fehlereinflüssen reduzieren oder sogar eliminieren. Jedoch ist dafür ein relativ dichtes Netz von Referenzstationen mit maximalen Abständen von wenigen 10er Kilometern notwendig.

Mit wesentlich grobmaschigeren Netzen von Referenzstationen kommt dagegen die absolute Positionierung auf Basis von *Precise Point Positioning* (PPP) aus. Anstelle der originären Beobachtungsdaten von Referenzstationen werden bei PPP daraus abgeleitete Korrekturen, wie z. B. Orbit- und Uhrkorrekturen, zur Berechnung von präzisen Koordinaten herangezogen. Zur Berechnung derartiger Korrekturen reicht bestenfalls ein Netz von wenigen, global verteilten Stationen aus. Voraussetzung für die Berechnung von PPP-Koordinaten auf dem Niveau der relativen Positionierung sind kontinuierliche Zweifrequenz-Phasen- und Codebeobachtungen. Eine weitere und nicht weniger wichtige Bedingung betrifft den „Zustand“ der Mehrdeutigkeiten.

Hochgenaue Koordinaten sind sowohl bei der relativen Positionierung als auch bei PPP nur zu erreichen, wenn die Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen nicht als reelle Werte geschätzt werden (*float*-Lösung), sondern auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden können (*fixed*-Lösung). Während bei der relativen Positionierung eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf Basis von Einfach- oder Doppel-Differenzen bei einer entsprechenden Basislinienlänge kein Problem darstellt, sind im Fall von PPP neben den schon erwähnten Orbit- und Uhrkorrekturen weitere Korrekturen notwendig. Bestenfalls stammen diese aus dem gleichen Netz von Stationen, welches bereits für die Berechnung der Orbit- und Uhrkorrekturen verwendet wurde. Vordergründig zu nennen sind hier sogenannte *Fractional-Cycle Biases* (FCB), d. h. Informationen über die Bruch- oder Reststücke (engl. *Fractional Parts*, FP) der Mehrdeutigkeiten.

Durch die gleichzeitige Verarbeitung von Beobachtungen, die einerseits von unterschiedlichen GNSS stammen und sich andererseits auf den Code bzw. die Trägerphase der Satellitensignale beziehen, ist zudem noch eine Vielzahl an Signalverzögerungen zu berücksichtigen:

- frequenzabhängige instrumentelle Verzögerungen (*Inter-Frequency Biases*, IFB) im Fall von GLONASS-Beobachtungen,
- *Inter-System Biases* (ISB) zwischen den Beobachtungen verschiedener GNSS,
- *Differential Code Biases* (DCB) zwischen den unterschiedlichen Code-Beobachtungen eines GNSS und
- Codeabweichungen (*Code Delay*, CD) der Code-Beobachtungen eines GNSS.

Sind die genannten Verzögerungen und Korrekturen hinreichend genau bestimmt, können einerseits die Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden und ist andererseits mit einer Verkürzung der Konvergenzzeit zu rechnen. Gelingt dies, stellt die absolute Positionierung im PPP-Modus eine ernst zu nehmende Alternative zur relativen Positionierung dar. Der Vorteil von PPP gegenüber Auswertungen im RTK-Modus ist eine Koordinatenberechnung ohne die mögliche Einwirkung von fehlerhaften Beobachtungen der Referenzstationen bzw. ohne den Einfluss der insbesondere entfernungsabhängig wirkenden Messabweichungen. Zudem wäre ein gegenüber dem derzeitigen Stand weitmaschigeres Netz von Referenzstationen ausreichend.

1.2 Stand der Forschung

Kombinierte GPS/GLONASS-PPP-Auswertung

Die lediglich auf GPS-Beobachtungen beruhenden Untersuchungen von Kouba und Heroux (2001) zeigen bereits in einem sehr frühen Stadium das Potential von Auswertungen, die auf der PPP-Technik (Zumberge u. a. 1997) basieren. Aufbauend auf der zunehmenden Anzahl an GLONASS-

Satelliten und den damit einhergehenden Vorteilen hat die kombinierte PPP-Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen über die Jahre immer mehr an Bedeutung gewonnen (Cai und Gao 2007, 2013b; Heßelbarth 2009; Li u. a. 2009). Die Auswirkung der zusätzlichen GLONASS-Signale ist umso ausgeprägter, je weniger GPS-Beobachtungen zur Auswertung zur Verfügung stehen. Der positive Effekt, der durch die Zunahme von GLONASS-Beobachtungen entsteht, ist insbesondere bei kurzen Beobachtungszeiten ersichtlich. Doch nicht nur die Koordinatengenauigkeit verbessert sich, vielmehr verkürzt sich gegenüber einer reinen GPS-PPP-Auswertung die Zeit, bis bestimmte Genauigkeitsniveaus erreicht werden.

Sowohl im Satelliten als auch im Empfänger auftretende instrumentelle Verzögerungen bewirken eine Veränderung der Phasenmehrdeutigkeit und zerstören insbesondere deren Ganzzahligkeit. Aufgrund dessen sind kontinuierliche Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen von zum Teil mehreren Stunden unabdingbar. Das Potential von PPP kann weiter erhöht werden, wenn die Koordinatenlösung auf festgesetzten Mehrdeutigkeiten basiert. Verschiedene Forschergruppen haben sich daher seit Mitte des letzten Jahrzehnts intensiv mit der Fragestellung beschäftigt, welche Möglichkeiten es zur Korrektur bzw. Beseitigung der sogenannten *Fractional-Cycle Biases* (FCB) gibt.

Methoden zur Beseitigung der FCB

Den klassischen Weg bestreiten die Ansätze von Ge u. a. (2008) und Geng u. a. (2009). Aufbauend auf den Beobachtungsdaten eines Stationsnetzes bilden sie Einfach-Differenz-Beobachtungen zwischen Satelliten und leiten sowohl Korrektionswerte für die Melbourne-Wübbena-Linear kombination als auch für die ionosphären-freie Linear kombination ab. Während die Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten eine Wiederholgenauigkeit von zum Teil mehreren Wochen besitzen, weisen die Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien (IF) Linear kombination eine deutlich schlechtere Stabilität auf. Entsprechend gering ist mit 15 min die zeitliche Auflösung der von Ge u. a. (2008) bestimmten IF-FCBs. Geng u. a. (2009) zeigen, dass IF-FCBs aber auch anhand der Beobachtungen von kompletten Satellitenbögen berechnet werden können.

Eine alternative Herangehensweise kennzeichnen die Ansätze von Collins (2008) und Laurichesse u. a. (2008), die beide auf undifferenzierten Beobachtungsdaten eines Stationsnetzes basieren. Wie Ge u. a. (2008) und Geng u. a. (2009) leiten auch Laurichesse u. a. (2008) MW-FCBs ab. Statt separaten IF-FCBs schätzen sie aber Uhrparameter, die die entsprechenden Korrekturen für die ionosphären-freie Linear kombination beinhalten (*Integer Phase Clock*, IPC). Ausschließlich Uhrkorrekturen bestimmt Collins (2008). Im Vergleich zu den Korrekturen von Ge u. a. (2008), Geng u. a. (2009) und Laurichesse u. a. (2008) beinhaltet das *Decoupled Clock Model* (DCM) auch Korrektionswerte für die ionosphären-freie Code-Linear kombination.

GLONASS IFB

Die zuvor genannten Ansätze zur Ableitung von Korrekturen zur Beseitigung der FCBs haben den entscheidenden Nachteil, dass sie ausschließlich für GPS gelten. Eine Eins-zu-Eins-Erweiterung auf GLONASS ist aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen, die GLONASS zur Identifizierung der einzelnen Satelliten einsetzt (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA), und den daraus resultierenden frequenzabhängigen instrumentellen Verzögerungen (*Inter-Frequency Bias*, IFB) (Sleewaegen u. a. 2012b) nur bedingt möglich.

Ausschließlich auf Phasenbeobachtungen beruhende Linear kombinationen stellen in diesem Zusammenhang das kleinere Problem dar. Reußner und Wanninger (2011) zeigen am Beispiel der *Wide-*

lane-Linearkombination, dass den frequenzabhängigen Effekten auf vergleichbare Art und Weise wie im Fall von RTK (Wanninger 2012a) entgegengewirkt werden kann. Deutlich komplizierter ist die Behandlung des frequenzabhängigen Einflusses, sobald GLONASS-Codebeobachtungen Teil der PPP-Auswertung sind (Banville u. a. 2008, 2013b; Yamada u. a. 2010; Al-Shaery u. a. 2012; Reußner und Wanninger 2012; Chuang u. a. 2013; Aggrey und Bisnath 2014). Dementsprechend schwierig ist die Ableitung von Korrekturen zur Beseitigung der FCBs.

PPP mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung

Die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten stellt sowohl bei RTK- als auch bei PPP-Auswertungen ein Schlüsselement dar, wenn trotz geringer Beobachtungsdauer Positionsgenauigkeiten auf dem Niveau von Zentimetern erreicht werden sollen. Voraussetzung für die PPP-Mehrdeutigkeitsfestsetzung ist die Beseitigung der FCBs anhand einer der drei oben genannten Methoden. Ist dies der Fall, können mit jedem Ansatz deutliche Verbesserungen sowohl in der Positionsgenauigkeit als auch in Bezug auf die Konvergenzzeit erzielt werden (Laurichesse u. a. 2009; Collins u. a. 2010; Geng u. a. 2010b; Zhang u. a. 2013). Dennoch ist eine Beobachtungsdauer zwischen 30 min bis 60 min notwendig, um Positionsgenauigkeiten auf dem cm-Niveau zu erreichen.

Nur wenige Untersuchungen beschäftigen sich im Zusammenhang mit der PPP-Mehrdeutigkeitsfestsetzung auch mit GLONASS-Beobachtungen. Allerdings führen die genannten Probleme im Umgang mit dem IFB zu Koordinatenlösungen, die nur teilweise auf festgesetzten Mehrdeutigkeiten beruhen. Aufgrund der fehlenden Korrekturen zur Beseitigung der FCBs bleiben die GLONASS-Mehrdeutigkeiten ungelöst. Trotzdem führt die Hinzunahme von GLONASS-Beobachtungen zu einer Verbesserung der Konvergenzzeit. Jokinen u. a. (2012) können die Konvergenzzeit um 10 % verkürzen. Eine Reduzierung der Konvergenzzeit um 30 % erreichen Li und Zhang (2014).

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, hat *Precise Point Positioning* (PPP) einerseits das Potential, dem Nutzer hoch genaue Positionsangaben bereitzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen sind andererseits eine Vielzahl an Messabweichungen sowie Verzögerungen unterschiedlichster Natur zu modellieren bzw. zu bestimmen und entsprechende Korrekturen notwendig. In Kontext der GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzung sind hierbei vordergründig die *Fractional-Cycle Biases* (FCB), die *Inter-Frequency Biases* (IFB) sowie *Code Delays* (CD) zu nennen. Deren exakte Handhabung ist wesentliche Voraussetzung für GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquoten auf vergleichbarem Niveau wie im Fall von GPS. Von signifikanter Bedeutung sind dabei das auf den Stationen verbaute Equipment (Empfänger- und Antennentyp) sowie die innerhalb einer PPP-Auswertung verwendeten Orbit- und Uhrkorrekturen.

Das der Einleitung folgende Kapitel 2 befasst sich in den ersten vier Abschnitten mit den für das Verständnis der Arbeit grundlegenden Aspekten zum Thema GNSS. Insbesondere werden die Unterschiede, die sich aus den beiden Techniken RTK und PPP in Bezug auf die Messanordnung und beeinflussenden Messabweichungen ergeben, herausgearbeitet. Die beiden letzten Abschnitte des Kapitels widmen sich den grundlegenden Aspekten der Ausgleichsrechnung und Statistik.

Kapitel 3 erläutert einerseits die notwendigen Korrekturen und Modellierungen der Messabweichungen, die eine kombinierte GPS/GLONASS-PPP-Auswertung mit Festsetzung sowohl der GPS-

als auch der GLONASS-Mehrdeutigkeiten ermöglichen. Andererseits beschäftigt sich das Kapitel mit der Festsetzung der reell-wertigen Mehrdeutigkeiten auf einen ganzzahligen Wert (Mehrdeutigkeitslösung) sowie den Unterschieden im Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren für GPS- und GLONASS-Beobachtungen und deren Umsetzung in den verwendeten Softwaremodulen.

Die Langzeitstabilität des frequenzabhängigen Effektes auf GLONASS-Beobachtungen ist Voraussetzung für die Anwendung von linearen Modellen als auch von a priori-Korrekturen. Dieser Sachverhalt gilt sowohl für RTK als auch für PPP. Aufbauend auf den Beobachtungsdaten von mehr als zwei Dutzend deutschen Referenzstationen der Jahre 2010 bis 2012 steht im Kapitel 4 die Untersuchung der Langzeitstabilität der oben genannten Messabweichungen (FCB, IFB und CD) im Vordergrund.

Den Schwerpunkt in Kapitel 5 bilden Untersuchungen zu den GPS- und GLONASS-Codebeobachtungen im Hinblick auf die verschiedenen Signalverzögerungen (CBs, DCB und FCBs). Insbesondere die Analyse der GLONASS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination soll zeigen, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit für GLONASS die gleiche Mehrdeutigkeitsfestsetzungsstrategie wie im Fall von GPS angewendet werden kann. Als Datengrundlage dienen die Beobachtungsdaten von mehr als 160 EUREF *Permanent Network* (EPN)-Stationen von zwei aufeinanderfolgenden Wochen im Jahr 2012. Auf den Stationen waren 20 unterschiedliche Empfängertypen von acht Empfängerherstellern installiert, sodass die Untersuchungen Rückschlüsse hinsichtlich des Verhaltens einzelner Empfänger ermöglichen.

Jedes vom *International GNSS Service* (IGS) zur freien Verfügung gestellte Produkt, u. a. auch Orbit- und Uhrkorrekturen, setzt mehrere Einzellösungen voraus. Diese Einzellösungen werden von IGS-Analysezentren (*Analysis Center*, AC) berechnet. Allerdings existieren zwischen GLONASS-Uhrkorrekturen der verschiedenen ACs deutliche Differenzen, sodass seitens des IGS keine kombinierten GLONASS-Uhrkorrekturen angeboten werden. Im Fall einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung muss folglich auf AC-spezifische Produkte zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund liegt der Schwerpunkt in Kapitel 6 auf der Verwendung AC-spezifischer GPS/GLONASS-Orbit- und Uhrkorrekturen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse von GLONASS (WL-Ansatz) den Resultaten von GPS (MW- und WL-Ansatz) gegenübergestellt.

Abschließend werden im Kapitel 7 die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

Die Bestimmung genauer dreidimensionaler kartesischer Koordinaten mittels globaler Satellitennavigationssysteme (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) basiert auf der Messung von Pseudostrecken auf Grundlage der Code- und Phasendaten, die durch die Satelliten auf mindestens zwei Frequenzen im L-Band ausgesendet werden. Die beiden am weitesten verbreiteten GNSS, einerseits das amerikanische *Global Positioning System* (GPS) und andererseits sein russisches Pendant *GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), haben beide einen militärischen Hintergrund. Dennoch kann jeder zivile Nutzer, der mit der entsprechenden Messausrüstung ausgestattet ist, anhand der Code- und/oder Phasenbeobachtungen seine aktuelle Position bestimmen. Unter Anwendung von speziellen Verfahren, Modellen und Korrekturen sind Genauigkeiten auf dem Niveau von Zentimetern oder besser erreichbar. Unter anderem deshalb ist die satellitengestützte Positionsbestimmung aus der Geodäsie nicht mehr wegzudenken.

Einleitend geht Abschnitt 2.1 auf die beiden wichtigsten GNSS näher ein. Außerdem wird ein kurzer Abriss über die weiteren Satellitennavigations- und Ergänzungssysteme gegeben. Bei der Positionierung mittels GNSS unterscheidet man mehrere Arten der Positionsbestimmung, wobei der Schwerpunkt in Abschnitt 2.2 auf den für das Verständnis der Arbeit relevanten Verfahren *Real-Time Kinematic* (RTK) und *Precise Point Positioning* (PPP) liegt. Aufgrund der unterschiedlichen Messanordnung wirken Messabweichungen und andere Einflüsse auf beide Verfahren in anderer Art und Weise. In Abhängigkeit der Fehlerquelle kategorisiert Abschnitt 2.3 die verschiedenen Messabweichungen und sonstigen Einflüsse. Hierbei wird deutlich, dass an Stelle der originären Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen mit Linearkombinationen gearbeitet werden muss. Abschnitt 2.4 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der gängigsten Linearkombinationen. Die beiden letzten Abschnitte des Kapitels widmen sich den grundlegenden Aspekten der Ausgleichsrechnung (Abschnitt 2.5) und Statistik (Abschnitt 2.6).

2.1 GNSS

Nach einer kurzen Einführung zu GPS und GLONASS in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 werden im Abschnitt 2.1.3 die Vor- und Nachteile einer kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung einander gegenüber gestellt. Abschließend gibt Abschnitt 2.1.4 einen Überblick über die weiteren globalen und regionalen Satellitennavigationssysteme sowie die bestehenden und geplanten Ergänzungssysteme.

2.1.1 GPS

Das vom amerikanischen Militär ab den 1970er Jahren aufgebaute *Global Positioning System* (GPS) wurde am 6. Januar 1980 offiziell in Betrieb genommen. Die volle Betriebsbereitschaft (*Full Opera-*

tional Capability, FOC) mit 24 operationellen Satelliten war jedoch erst am 17. Juli 1995 erreicht (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

Um eine weltweite Verfügbarkeit zu gewährleisten, ist das GPS-Satellitensegment auf 6 Bahnebenen mit je 4 Satelliten ausgelegt. Die Bahnen haben eine Höhe von ca. 20 200 km (*Medium Earth Orbit*, MEO) und sind gegenüber dem Erdäquator um 55° geneigt. Aus diesem Grund gibt es Schattengebiete¹, die als Nord- bzw. Südloch bezeichnet werden und aus denen keine Signale zur Verfügung stehen. Jeder Satellit vollzieht innerhalb eines Sternentages (23 h 56 min) zwei Umläufe, infolgedessen sich die Satellitenkonstellation jeden Sonntag vier Minuten früher wiederholt.

Im September 2014 bilden 31 funktionsfähige Satelliten und sieben Reservesatelliten das GPS-Satellitensegment. Hierbei handelt es sich um Satelliten verschiedener Generationen (5 Block IIA, 12 Block IIR, 7 Block IIR-M und 7 Block IIF) und damit unterschiedlichen Alters sowie mit zum Teil sehr unterschiedlichen Spezifikationen (insb. Satellitensignale). Die Satelliten vom Typ Block IIA (A: *advanced*) haben zum jetzigen Zeitpunkt ein durchschnittliches Alter von 20 Jahren (Cooley 2014). Zusammen mit den Block IIR-Satelliten (R: *replenishment*) bildeten sie lange Zeit das Rückgrat des GPS-Satellitensegments. Mit dem Start des ersten Satelliten vom Typ Block IIR-M (M: *modernized*) im September 2005 begann die Anfang 1999 verkündete Modernisierung² des GPS-Satellitensegments. Seit der Inbetriebnahme der Block IIR-M-Satelliten steht mit L2C neben dem zivilen Signal auf der ersten Frequenz nun ein zweites ziviles Signal zur Verfügung. Die 19 Satelliten vom Typ Block IIR und Block IIR-M bilden aktuell das Rückgrat des GPS-Satellitensegments (Cooley 2014). Ein zusätzliches drittes ziviles Signal (L5) senden Satelliten vom Typ Block IIF (F: *follow-on*) aus. Der erste von geplanten 12 Block IIF-Satelliten wurde im Mai 2010 ins All geschossen. Sie sollen die Block IIA-Satelliten ersetzen. Für Anfang 2016 ist der Start des ersten Satelliten vom Typ Block III geplant. Block III-Satelliten senden mit L1C ein weiteres ziviles Signal aus, sodass dann vier zivile Signale zur Verfügung stehen (Cooley 2014).

Die Signale der Satelliten müssen derartig konzipiert sein, dass ein Empfänger die Signale verschiedener Satelliten unterscheiden kann. Hierfür gibt es mehrere Varianten der Vielfachnutzung. GPS nutzt das *Code Division Multiple Access* (CDMA)-Verfahren, d. h. alle GPS-Satelliten senden auf den gleichen nominellen Frequenzen, aber mit unterschiedlichen *Pseudo Random Noise* (PRN)-Codes. Folglich gibt es pro Trägersignal nur eine Frequenz:

$$f_{G,1} = 1\,575,420\,0 \text{ MHz} = 154 \cdot 10,23 \text{ MHz} \quad \text{und} \quad (2.1a)$$

$$f_{G,2} = 1\,227,600\,0 \text{ MHz} = 120 \cdot 10,23 \text{ MHz} \quad (2.1b)$$

GPS verwendet eine eigene Zeitskala, die GPS-Systemzeit. Sie wird durch Atomuhren des Kontrollsegments erzeugt und stimmte am 6. Januar 1980 mit der *Coordinated Universal Time* (UTC) überein. Die GPS-Systemzeit ist eine kontinuierliche Zeitskala, d. h. es werden keine Schaltsekunden eingeführt, sodass der Abstand zu UTC immer größer wird. Aktuell beträgt die Differenz 16 s.

Die Bodenstationen des Kontrollsegments sind die Fundamentalstationen des von GPS genutzten Koordinatensystems, dem *World Geodetic System 1984* (WGS-84). Die aktuelle Version des WGS-84 (GPS-Woche 1150) stimmt mit dem ITRF2005 auf dem Niveau von wenigen Zentimetern überein.

¹Die Größe der Schattengebiete steht in Abhängigkeit zur geographischen Breite des Nutzers.

²Das GPS-Modernisierungsprogramm umfasst sowohl eine Erneuerung des Satelliten- als auch des Kontrollsegments und die Einführung neuer Signale (GPS 2000; Prasad und Ruggieri 2005).

Das WGS-84 wird durch die *Broadcast*-Ephemeriden realisiert, die ihrerseits das Phasenzentrum der Satellitenantenne koordinatenmäßig beschreiben. Da sich die Code- und Phasemessungen auf das Phasenzentrum beziehen, erhält der Nutzer Koordinaten im WGS-84. Eine nachträgliche Transformation in das lokale Gebrauchssystem ist daher in vielen Fällen notwendig.

2.1.2 GLONASS

*GL*Obal'*na*ya *NA*vigatsioannaya *S*putnikovaya *S*istema (GLONASS) ist das russische GNSS und hat ebenfalls einen militärischen Ursprung. In Bezug auf das Boden-, Kontroll- und Satellitensegment sowie die Funktionsweise zeigen sich große Ähnlichkeiten mit GPS. Dennoch gibt es auch zum Teil signifikante Unterschiede zwischen beiden GNSS.

Nach einem kontinuierlichen Aufbau des GLONASS-Satellitensegments bis Mitte der 1990 Jahre fiel die Zahl der operationellen Satelliten innerhalb weniger Jahre von 24 auf unter 10. Eine im Vergleich zu GPS-Satelliten relativ kurze Lebensdauer der GLONASS-Satelliten sowie Schwierigkeiten bei der Finanzierung waren die Gründe. 2002 begann der allmähliche Wiederaufbau des Weltraumsegments (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Ein präsidentialer Erlass im Jahr 2007 beschleunigte die Modernisierung, sodass Ende 2011 mit 24 operationellen Satelliten abermals eine vollständige Konstellation erreicht wurde. Das Rückgrat des aktuellen GLONASS-Satellitensegments bilden GLONASS-M-Satelliten. Die Satelliten der neusten Generation (GLONASS-M sowie GLONASS-K1 und GLONASS-K2) zeichnen sich durch eine im Vergleich zu ihren Vorgängern bessere Stabilität der Uhr und insbesondere längere Lebenszeit³ aus. Letztere wird für GLONASS-K1- und K2-Satelliten, die ebenso wie die neueren GPS-Satelliten Signale auf drei Frequenzen aussenden, mit 10 Jahren angegeben (Revnivykh 2012).

Das GLONASS-Satellitensegment besteht aus drei gleichabständigen Bahnebenen, wobei jede Bahnebene acht Satelliten umfasst und um $64,8^\circ$ gegenüber dem Erdäquator geneigt ist. Folglich gibt es auch bei GLONASS Schattengebiete (Nord- bzw. Südloch), jedoch von geringerem Ausmaß als bei GPS. Die Satelliten benötigen für einen Umlauf etwas mehr als 11 Stunden. Ihre MEO-Orbits haben eine Höhe von ca. 19 100 km.

Bei der Technik, die zur Identifizierung der einzelnen Satelliten eingesetzt wird, nutzt GLONASS das *Frequency Division Multiple Access* (FDMA)-Verfahren (Ipatov und Shebshaeovich 2010; Gibbons 2008). Alle GLONASS-Satelliten übertragen ihre Signale mit den gleichen PRN-Codes, jedoch auf leicht voneinander abweichenden Frequenzen. Mit der Inbetriebnahme der GLONASS-K2-Satelliten werden erstmals GLONASS-Signale ausgesendet, die nach CDMA erzeugt werden⁴. Nichtsdestotrotz senden K2-Satelliten aber auch weiterhin FDMA-Signale aus.

Die spezifischen Frequenzen eines Satelliten ergeben sich nach

$$f_{R,1,k} = f_{R,1,0} + k \cdot \Delta f_{R,1} = 1\,602,000\,0 \text{ MHz} + k \cdot 0,562\,5 \text{ MHz} \quad \text{und} \quad (2.2a)$$

$$f_{R,2,k} = f_{R,2,0} + k \cdot \Delta f_{R,2} = 1\,246,000\,0 \text{ MHz} + k \cdot 0,437\,5 \text{ MHz} \quad (2.2b)$$

³Revnivykh (2012) gibt für die GLONASS-Satelliten der ersten Generation eine Lebensdauer von 3 Jahren an.

⁴Ursprünglich war der erste Start eines voll einsatzfähigen GLONASS-K2-Satelliten für 2014 geplant (Revnivykh 2012). Aufgrund von Verzögerungen beim Bau der Satelliten werden stattdessen vermehrt Starts von GLONASS-K1-Satelliten stattfinden.

mit

k	- Frequenznummer,
$f_{R,i,0}$	- Grundfrequenz (Frequenzband i) [MHz],
$\Delta f_{R,i}$	- Frequenzintervall (Frequenzband i) [MHz].

Insgesamt gibt es 14 Frequenznummern im Intervall $[-7,6]^5$, wobei je zwei Satelliten dieselbe Frequenznummer besitzen⁶. Damit ergeben sich nach Gleichung 2.2 Frequenzbänder mit Bereichen zwischen 1 598,062 5 MHz und 1 605,375 0 MHz (L1) sowie zwischen 1 242,937 5 MHz und 1 248,625 0 MHz (L2). Beide Frequenzbänder liegen leicht neben den Grundfrequenzen von GPS (vgl. Gleichung 2.1), sodass die GLONASS-Frequenzbänder zur besseren Abgrenzung gegenüber den GPS-Frequenzbändern auch mit G1 und G2 gekennzeichnet sind.

Die GLONASS-Systemzeit wird durch einen *Zentralen Synchronisierer* erzeugt und ist eine Realisierung der Moskauer UTC-Zeit (UTC_{SU}) (GLONASS 2008), weshalb ein Zeitoffset von drei Stunden bezüglich $UTC_{Greenwich}$ besteht. Der Bezug zu UTC schließt zudem die Einführung von Schaltsekunden ein (Roßbach 2001; GLONASS 2008). Dadurch weichen GPS- und GLONASS-Systemzeit immer weiter voneinander ab. Während die Uhren der GLONASS-M-Satelliten eine Stabilität von $1 \cdot 10^{-13}$ s pro Tag haben, wird für die K1-Satelliten eine Stabilität von $10 \dots 5 \cdot 10^{-14}$ s pro Tag und für K2-Satelliten eine Stabilität von $5 \dots 1 \cdot 10^{-14}$ s pro Tag erwartet (Revnivykh 2012).

Das den *Broadcast-Ephemeriden* zugrunde liegende Koordinatensystem trägt den Namen *Parametry Zemli 1990 Goda* (PZ-90), welches auf einigen wenigen und nur auf russischem Territorium liegenden Bodenstationen basiert. Im Rahmen der GLONASS-Modernisierung wurde 2007 eine verbesserte Version des PZ-90, PZ-90.02 genannt, mit dem Ziel einer besseren Übereinstimmung mit ITRF2005 eingeführt. Allerdings bewegen sich die Differenzen zwischen PZ-90.02 und ITRF2005 auf dem Niveau von Dezimetern.

2.1.3 Vergleich von GPS und GLONASS

Eine kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung hat gegenüber einer reinen GPS-Auswertung mehrere Vorteile. Ausgehend von einem 60 Satelliten umfassenden Raumsegment steigt die Anzahl an sichtbaren Satelliten je nach Abschattung annähernd um den Faktor 2. Aufgrund der unterschiedlichen Konstellationen verteilen sich die Satelliten auf mehrere und verschieden stark geneigte Bahnebenen. Beides hat positive Auswirkungen auf die Empfänger-Satelliten-Geometrie (*Dilution Of Precision*, DOP) (Springer und Dach 2010). Gleichzeitig haben GPS- und GLONASS-Satelliten einen anderen Wiederholzyklus. Die zusätzlichen GLONASS-Daten verbessern nicht nur die Genauigkeit der Positionsbestimmung, sondern haben insbesondere Einfluss auf das Verhalten der Positionslösung (Heßelbarth 2011; Cai und Gao 2013b; Li und Zhang 2014).

⁵Das Intervall der Frequenznummern hat sich aufgrund von Überlappungen mit anderen Disziplinen und den daraus resultierenden gegenseitigen Signalstörungen in den letzten zwei Jahrzehnten mehrfach geändert. Während vor 1998 Frequenznummern aus dem Intervall $[1,24]$ genutzt wurden, kamen zwischen 1998 und 2005 nur Frequenznummern aus dem Intervall $[1,12]$ zum Einsatz. Seit 2005 werden Frequenznummern aus dem Intervall $[-7,6]$ verwendet (GLONASS 2008). Infolgedessen gibt es Empfänger, die nur die Signale von Satelliten mit positiven Frequenznummern verarbeiten können.

⁶Ein entsprechendes Vorgehen ist unproblematisch, da es sich hierbei um einander gegenüberliegende Satelliten handelt, deren Signale durch einen auf der Erdoberfläche befindlichen Empfänger nie gleichzeitig empfangen werden können. Folglich beschränkt sich die maximale Anzahl an operationellen GLONASS-Satelliten auf 28.

Es gibt aber auch Nachteile, die aus einer kombinierten Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen resultieren. Einerseits müssen die Referenzsysteme, d. h. das Koordinatensystem und die Zeitskalen, einander angepasst werden. Zur Koordinatentransformation von PZ-90.02 nach WGS-84 ist eine 7-Parameter-Transformation notwendig. Zahlreiche Forschergruppen haben sich in der Vergangenheit mit der Berechnung der erforderlichen Transformationsparameter beschäftigt (Roßbach 2001; Zinoviev 2005). Hinsichtlich der Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen den beiden UTC-Realisierungen sind nach Roßbach (2001) verschiedene Herangehensweisen denkbar. Zumeist wird jeder Zeitskala einzeln Rechnung getragen bzw. wird eine der beiden Zeitskalen in Relation zur anderen Zeitskala gesetzt, wobei GPS meist das Referenzsystem darstellt und die sich ergebende Zeitdifferenz den *Inter-System Biases* (ISB) widerspiegelt.

Andererseits sind Signale unterschiedlicher Frequenzen miteinander zu verarbeiten. Als Folge des von GLONASS verwendeten FMDA-Verfahrens variieren auch die Frequenzen der einzelnen GLONASS-Satelliten. Letztlich führt dies zu Verzögerungen zwischen den GPS- und GLONASS-Beobachtungen sowie zwischen den Beobachtungen der einzelnen GLONASS-Satelliten (*Inter-Frequency Biases*, IFB). Durch die unterschiedlichen Frequenzen der GLONASS-Satelliten können zudem nicht die gleichen Algorithmen für GPS und GLONASS verwendet werden. Vielmehr sind die Wellenlängen-Differenzen explizit zu berücksichtigen, wenn GLONASS-Satelliten mit ungleichen Frequenzen beteiligt sind (z. B. Umrechnung von *Fractional-Cycle Biases* (FCB), Mehrdeutigkeitsfestsetzung).

Weitere Unterschiede zwischen GPS und GLONASS bestehen hinsichtlich den zur Verfügung stehenden Orbit- und Uhrinformationen. Zum einen haben die GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden im Vergleich zu den Orbit- und Uhrinformationen der GPS-Navigationsnachricht eine schlechtere Genauigkeit. Durch Abgewichtung der GLONASS-Beobachtungen kann dem entgegengewirkt werden, jedoch sollten Beobachtungen gleichen Typs - unabhängig von weiteren Faktoren - grundsätzlich dasselbe Gewicht erhalten. Eine Alternative wird mit der Varianzkomponentenschätzung zur Verfügung gestellt. Hierfür sind zunächst unterschiedliche Beobachtungsgruppen i (z. B. GPS ($i = 1$) und GLONASS ($i = 2$)) und dazugehörige Varianzkomponenten $\sigma_{0,i}^2$ zu definieren. Eine mögliche Anpassung von $\sigma_{0,i}^2$ an die tatsächlichen Gegebenheiten erfolgt dann über Varianzfaktoren.

Zum anderen stehen für GLONASS im Gegensatz zu GPS keine präzisen Orbit- und Uhrinformationen seitens des *International GNSS Service* (IGS) als kombiniertes Produkt zur Verfügung. Der Anwender hat lediglich die Möglichkeit, auf die Produkte einiger weniger IGS-Analysezentren (*Analysis Center*, AC) zurückzugreifen. Er verliert damit aber die Redundanz der offiziellen IGS-Lösung, die durch die Kombination der Produkte mehrerer einzelner ACs besteht (Wanninger 2008; Springer und Dach 2010; Wanninger 2011).

2.1.4 Weitere Systeme

Globale Satellitennavigationssysteme

Neben den beiden voll einsatzfähigen GNSS GPS und GLONASS wird es in Zukunft noch zwei weitere globale Satellitennavigationssysteme geben: zum einen das chinesische *BeiDou Satellite Navigation System* (BDS) und zum anderen das europäische GALILEO. Beide Systeme befinden sich noch im Aufbau, doch erlaubt die aktuelle BDS-Konstellation bereits Positionsbestimmungen, die nur auf BDS-Beobachtungsdaten beruhen (Li u. a. 2013; Luo u. a. 2014). Während die GPS-,

GLONASS- und GALILEO-Konstellationen nur aus MEO-Satelliten besteht, umfasst das BDS-Satellitensegment auch *Inclined GeoSynchronous Orbit* (IGSO)- und *Geostationary Earth Orbit* (GEO)-Satelliten. Zum Zeitpunkt des vollständigen Ausbaus aller vier GNSS werden mehr als 120 Satelliten im Weltraum sein (Becker 2009).

Regionale Satellitennavigationssysteme

Neben den vier genannten globalen Satellitennavigationssystemen haben verschiedene Länder regionale Satellitennavigationssysteme (*Regional Navigation Satellite System*, RNSS) aufgebaut, um zusätzliche Satellitensignale nutzen zu können. Beispiele für RNSS sind IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*, Indien) und QZSS (*Quasi-Zenit Satellite System*, Japan).

Ergänzungssysteme

Vor allem in sensiblen Bereichen wie der Luftfahrt und insbesondere während des Landeanfluges fehlen wichtige Informationen hinsichtlich der Verlässlichkeit der von GNSS ausgesendeten Signale. Aus diesem Grund sind zahlreiche satellitenbasierte Ergänzungssysteme (*Satellite Based Augmentation System*, SBAS) in Planung oder schon in Betrieb. Die von GEO-Satelliten ausgesendeten SBAS-Signale liefern Beobachtungskorrekturen zur Genauigkeitssteigerung und Informationen zur Steigerung der Integrität, die allerdings nur eine regionale Gültigkeit besitzen.

Aufgrund dieser Beschränkung auf ein bestimmtes Servicegebiet handelt es sich bei SBAS um einen regionalen Dienst. Es gibt folgende Einzelsysteme: EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*, Europa), GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*, Indien), MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*, Japan), QZSS-SAIF (*QZSS-Submeter-class Augmentation with Integrity Function*, ebenfalls Japan), SDMC (*System for Differential Correction and Monitoring*, Russland) und WAAS (*Wide Area Augmentation System*, Nordamerika).

Jedoch können die Code- und Phasenmessungen auch als Beobachtungen eines zusätzlichen GNSS angesehen und als solche genutzt werden (Wanninger 2008).

2.2 Positionsbestimmung

Die satellitengestützte Positionsbestimmung schafft die Möglichkeit, dass jedermann, zu jeder Zeit, bei jedem Wetter und an (fast) jeden Ort der Welt seine Position bestimmen kann.

Zur Berechnung der dreidimensionalen kartesischen Koordinaten werden die von den Satelliten auf mindestens zwei Frequenzen ausgesendeten Signale zur Pseudostreckenmessung genutzt. Bei den zur Verfügung stehenden Signalen wird zwischen dem Code, der auf das Trägersignal aufmoduliert ist und die „eigentlichen“ Informationen enthält, und dem Trägersignal (Phase) selbst differenziert. Entsprechend unterscheidet man zwischen Code- und Phasenbeobachtungen.

Bei den Codemessungen handelt es sich um ein eindeutiges Signal, das im Vergleich zur Phasenmessung aber eine um den Faktor 100 schlechtere Genauigkeit besitzt. Dem gegenüber steht allerdings die Mehrdeutigkeit der Phasenmessung, deren Festsetzung erst den Weg für Genauigkeiten auf cm-Niveau ebnet. Vor diesem Hintergrund haben sich letztlich mehrere Varianten zur Positionsbestimmung entwickelt (Abbildung 2.1). Im Kontext dieser Arbeit und zur besseren Einordnung von *Precise Point Positioning* (PPP) werden im Folgenden neben der absoluten Positionsbestimmung

nach dem PPP-Prinzip auch die absolute Positionsbestimmung nach dem *Single Point Positioning* (SPP)-Prinzip sowie die relative Positionsbestimmung nach dem *Real-Time Kinematic* (RTK)-Prinzip diskutiert.

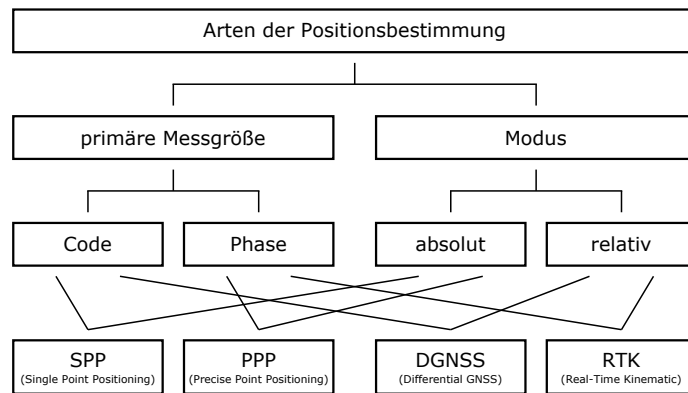


Abb. 2.1: Arten der Positionsbestimmung

2.2.1 *Single Point Positioning* (SPP)

Den klassischen Ansatz der Positionsbestimmung mittels GNSS bildet die absolute Positionsbestimmung, bei der lediglich die Codebeachtungen zur Koordinatenberechnung genutzt werden (Abbildung 2.2). Die absolute Positionsbestimmung mit Codebeobachtungen als der primären Messgröße wird auch als *Single Point Positioning* (SPP) bezeichnet.

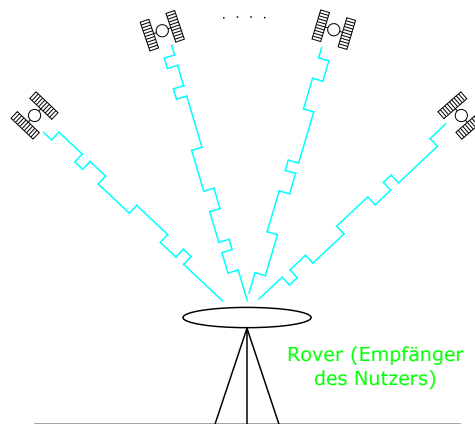


Abb. 2.2: *Single Point Positioning* (SPP)

Die Beobachtungsgleichung einer undifferenzierten Codemessung zwischen Satellit i und Antenne a lautet (Wanninger 2000)

$$C_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a^{\text{System}} + h_{a,C} - \delta t^i - h_C^{i,\text{System}} \right) + I_a^i + T_a^i + O_a^i + M_a^i + A_a^i + \epsilon_{a,C}^i \quad (2.3)$$

mit

$$R_a^i = \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| = \sqrt{(X^i - X_a)^2 + (Y^i - Y_a)^2 + (Z^i - Z_a)^2} \quad (2.4)$$

und

- C_a^i - Codemessung [m],
- R_a^i - berechnete geometrische Entfernung zwischen Satellit und Antenne [m],
- c_0 - Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s],
- δt_a - Empfängeruhrabweichung [s],
- h_C - instrumentelle Signalverzögerung des Codes [s],
- δt^i - Satellitenuhrrestabweichung [s],
- I_a^i - ionosphärische Laufzeitverzögerung [m],
- T_a^i - troposphärische Laufzeitverzögerung [m],
- O_a^i - Orbitabweichung [m],
- M_a^i - Abweichung durch Mehrwegeausbreitung [m],
- A_a^i - Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m],
- $\epsilon_{a,C}^i$ - zufällige Messabweichungen der Codemessung [m],
- \vec{X} - Vektoren globaler kartesischer Koordinaten [m].

Vertiefende Literatur zu Beobachtungsgleichungen im Allgemeinen und zur Herleitung im Speziellen findet sich u. a. in Teunissen und Kleusberg (1998) und Leick (2004).

Zur Bestimmung der Stationskoordinate $\vec{X}_a = [X_a, Y_a, Z_a]$ sind simultane Messungen zu drei Satelliten erforderlich. Da aber Empfänger- und Satellitenuhr nicht miteinander synchronisiert sind, muss im Auswerteprozess pro GNSS die Empfängeruhrabweichung δt_a^{System} mit geschätzt werden. Daher ist pro GNSS eine zusätzliche Messung zu einem Satelliten des jeweiligen GNSS notwendig. Im Fall einer kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung sind folglich simultane Messungen zu fünf Satelliten erforderlich.

Die resultierenden Genauigkeiten einer auf den Codedaten basierenden absoluten Positionierung liegen bei ca. 10 m.

2.2.2 Precise Point Positioning (PPP)

Eine Art Sonderfall der absoluten Positionsbestimmung stellt das *Precise Point Positioning* (PPP) (Zumberge u. a. 1997; Bisnath und Gao 2009; Kouba 2009a) dar (Abbildung 2.3).

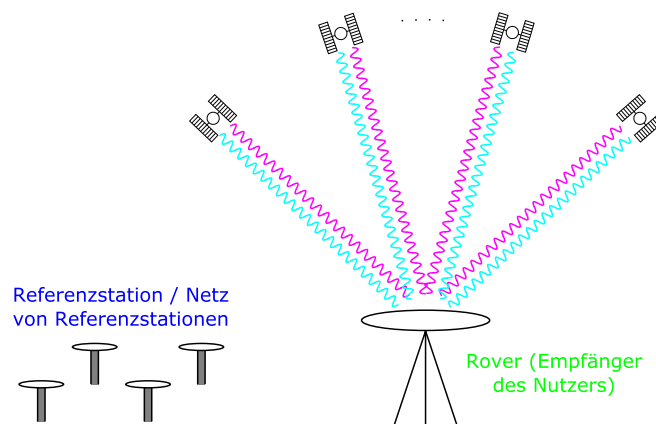


Abb. 2.3: *Precise Point Positioning* (PPP)

Während die absolute Positionsbestimmung im herkömmlichen Sinne lediglich die Codebeobachtungen nutzt, beruht PPP im Wesentlichen auf der Verarbeitung der genaueren Phasendaten. Die ungenaueren Codebeobachtungen werden vornehmlich nur zur Berechnung der notwendigen Näherungslösung verwendet. Eine wesentlich größere Bedeutung kommt ihnen bei der Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination zu.

Die Beobachtungsgleichung einer undifferenzierten Phasenmessung zwischen Satellit i und Empfänger a lautet (Wanninger 2000)

$$\begin{aligned} \Phi_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a^{System} + h_{a,\Phi}^{i, System} - \delta t^i - h_{\Phi}^{i, System} \right) - I_a^i + T_a^i + O_a^i + M_a^i + A_a^i \\ + \lambda N_a^i + \epsilon_{a,\Phi}^i \end{aligned} \quad (2.5)$$

mit

- Φ_a^i - Phasenmessung [m],
- h_{Φ} - instrumentelle Signalverzögerung der Phasenmessung [s],
- λ - Wellenlänge [m],
- N_a^i - Phasenmehrdeutigkeit [-],
- $\epsilon_{a,\Phi}^i$ - zufällige Messabweichungen der Phasenmessung [m].

Neben den drei Komponenten der Stationskoordinate \vec{X}_a (vgl. Gleichung 2.4) und den Empfängeruhrfehler δt_a sind nun auch die Mehrdeutigkeiten N Teil der Unbekannten.

Um mit PPP Genauigkeiten auf dem Niveau von Zentimetern zu erreichen, sind zum einen präzise Angaben zu den Satellitenbahnen sowie Satellitenuhrkorrekturen und zum anderen eine Vielzahl weiterer Korrekturen notwendig. Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf ihre wahren, ganzzahligen Werte spielt eine zentrale Rolle, wenn es um die Verkürzung der Konvergenzzeit geht. Kapitel 3 setzt sich vertiefend mit PPP auseinander.

2.2.3 Real-Time Kinematic (RTK)

Um auch ohne präzise Satellitenorbit- und uhrkorrekturen Koordinatengenauigkeiten im Zentimeterbereich generieren zu können, ist eine gegenüber der absoluten Positionsbestimmung veränderte Messanordnung erforderlich (Abbildung 2.4). Die Idee der relativen Positionsbestimmung mit Phasenbeobachtungen als der primären Messgröße beruht auf der Berechnung eines hochgenauen Basislinienvektors $\Delta\vec{X}_{a,b}$ zwischen der Referenzstation a und der Roverstation b , wobei die Koordinaten der Referenzstation als bekannt vorausgesetzt werden. Im Gegensatz zur absoluten Positionierung, wo die drei Komponenten der gesuchten Stationskoordinate \vec{X}_b als primäre Unbekannte in den Ausgleichungsprozess einfließen und sich sofort absolute Koordinaten ergeben, werden bei der relativen Positionierung lediglich die drei hochgenauen Komponenten des Basislinienvektors $\Delta\vec{X}_{a,b} = [\Delta X_{a,b}, \Delta Y_{a,b}, \Delta Z_{a,b}]$ als primäre Unbekannte bestimmt. Die absoluten Koordinaten $\vec{X}_b = [X_b, Y_b, Z_b]$ ergeben sich durch Addition von \vec{X}_a und $\Delta\vec{X}_{a,b}$.

Die relative Positionierung erfordert auf beiden Stationen simultane Messungen zu mindestens zwei identischen Satelliten. Auf die Weise können Differenzen zwischen Stationen und/oder Satelliten gebildet werden. Man unterscheidet zwei Varianten von einfachen Differenzen (*single difference*, SD):

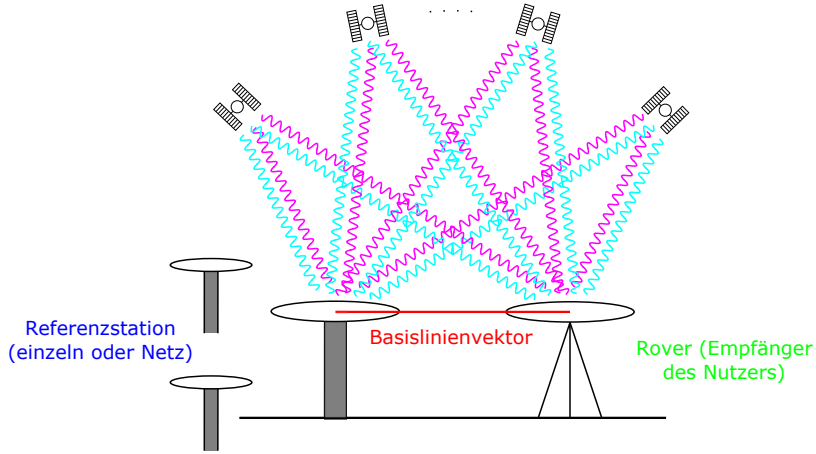


Abb. 2.4: Real-Time Kinematic (RTK)

zum einen die SD zwischen einem Satelliten i und zwei Stationen a und b (Δ -Operator) und zum anderen die SD zwischen zwei Satelliten i und j und einer Station a (∇ -Operator). Die Kombination aus beiden Operatoren ($\nabla\Delta$ -Operator), d. h. die Differenz von simultanen Beobachtungen zwischen zwei Satelliten i und j sowie zwei Stationen a und b , wird als doppelte Differenz (*double difference*, DD) bezeichnet.

Um die geforderten Genauigkeiten zu erreichen, sind die Phasendaten in Form von doppelten Differenzen auszuwerten. Die Beobachtungsgleichung einer Doppel-Differenz-Phasemessung ergibt sich zu (Wanninger 2000):

$$\begin{aligned}\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} &= \Phi_b^i - \Phi_a^i - \Phi_b^j + \Phi_a^j \\ &= \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta I_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta T_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta G_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta O_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta M_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta A_{a,b}^{i,j} \\ &\quad + \lambda \nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} + \epsilon_{a,b,\nabla\Delta\phi}^{i,j}\end{aligned}\quad (2.6)$$

mit

$$\begin{aligned}\nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} &= \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| - \left| \vec{X}^i - (\vec{X}_a + \Delta\vec{X}_{a,b}) \right| - \left| \vec{X}^j - \vec{X}_a \right| \\ &\quad + \left| \vec{X}^j - (\vec{X}_a + \Delta\vec{X}_{a,b}) \right|.\end{aligned}\quad (2.7)$$

Die Bildung von doppelten Differenzen hat zwei entscheidende Vorteile: zum einen werden Messabweichungen minimiert (iono- und troposphärische Refraktion) bzw. eliminiert (Empfänger- und Satellitenuhrabweichung) und zum anderen können die Mehrdeutigkeiten $\nabla\Delta N_{a,b}^{i,j}$ auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden (*fixed-Lösung*).

Der hier beschriebene Ansatz, d. h. die relative Positionsbestimmung auf der Basis von Phasendaten bei gleichzeitiger Minimierung bzw. Eliminierung von Messabweichungen durch die Bildung von einfachen oder doppelten Differenzen, wird als *Real-Time Kinematic* (RTK)-Technik bezeichnet. Inwieweit bei RTK vorhandene Messabweichungen reduziert oder eliminiert werden können, hängt vorrangig von der Länge der Basislinie (Basislinienvektor $\Delta\vec{X}_{a,b}$) ab. Dies gilt insbesondere für die

entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse der iono- und troposphärischen Refraktion sowie Orbitabweichungen. Die simultanen Beobachtungen von Referenz- und Roverstation werden umso einheitlicher beeinflusst, je dichter beide Stationen beieinanderliegen. Verbleibende Messabweichungen wirken sich negativ auf die Bestimmung sowie Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten aus und können die Positionsgenauigkeit in erheblichen Maße verschlechtern (Wanninger 2006).

Eine Erweiterung der RTK-Technik ist Netz-RTK. Es setzt voraus, dass sich in der Umgebung der Roverstation mindestens drei Referenzstationen befinden (Wanninger 2000). Bei den aus einem Netz von Referenzstationen berechneten Korrekturen, den Korrekturmodellparametern, unterscheidet man zwischen einem geometrischen und einem dispersiven Term. Der geometrische Term umfasst die Korrekturen der troposphärischen Refraktion und für die Satellitenbahn, während der disperse Term die Korrekturen der ionosphärischen Refraktion beinhaltet (Wanninger 2006). Voraussetzung für die Berechnung von Korrekturen ist die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten, sodass sich die simultanen Beobachtungen der beteiligten Referenzstationen auf dem selben Mehrdeutigkeitsniveau befinden. Im Vergleich zum mit 20 km relativ geringen Abstand zwischen Referenz- und Roverstation bei RTK, ist es bei Netz-RTK möglich, mit Referenzstationsabständen von 50 km zu arbeiten (Wanninger 2006). Im Gegensatz verlangt Netz-RTK einen wesentlich größeren Aufwand bei der Datenverarbeitung, woraus sich drei verschiedene Konzepte entwickelt haben. Weiterführende Informationen hinsichtlich der notwendigen Schritte bei der Datenverarbeitung und den verwirklichten Konzepten sowie den Anforderungen der Datenübertragung finden sich in der Literatur, z. B. Wanninger (2006) und Takac und Zelzer (2008).

2.3 Messabweichungen und andere Einflüsse

Das im Satelliten erzeugte GNSS-Signal wird auf dem Weg vom Satelliten bis zur Verarbeitung im Empfänger durch eine Vielzahl an Faktoren in negativer Art und Weise beeinflusst. Zudem wirken geodynamische Prozesse auf den Standort der Empfängerantenne. Die daraus resultierenden Messabweichungen auf GNSS-Messungen sowie alle weiteren bei der Datenauswertung zu berücksichtigenden Einflüsse lassen sich entsprechend ihrer Quelle in vier Kategorien einteilen (Tabelle 2.1). Je nach Art der Positionsbestimmung ergeben sich Abhängigkeiten zum Satelliten und zur Station sowie im Fall der relativen Positionsbestimmung auch zur Länge der Basislinie.

Tab. 2.1: Messabweichungen und andere Einflüsse auf GNSS-Messungen und Datenauswertung

Quelle	Messabweichung bzw. Einfluss
Satellit	Orbit, Uhr, Antennenphasenzentrum, <i>Phase Wind-Up</i> , Signalverzögerungen
Signalausbreitung	ionosphärische Refraktion, troposphärische Refraktion, Mehrwege, Signalbeugung
Empfänger	Uhr, Antennenphasenzentrum, Signalverzögerungen, Messrauschen
Geodynamik	Erdgezeiten, atmosphärische Auflasten, ozeanische Auflasten, Erdrotationsparameter

Bei der absoluten Positionierung nach dem PPP-Prinzip wird zwischen satelliten- und stationsabhängigen Fehlerquellen unterschieden (Abbildung 2.5). Bei den satellitenabhängigen Messabweichungen handelt es sich um die Messabweichungen, die in Bezug zum Satelliten stehen, d. h. Bahn- und Uhrabweichungen, Phasenzentrumsoffset und -variationen der Satellitenantenne, *Phase Wind-Up* sowie Signalverzögerungen in der Satellitenantenne. Die bei der Signalausbreitung entstehenden Messabweichungen sind den stationsabhängigen Fehlerquellen zuzuordnen, da troposphärische und ionosphärische Refraktion sowie Mehrwege und Signalbeugung vom Standpunkt des Nutzers und dessen Umgebung abhängig sind.

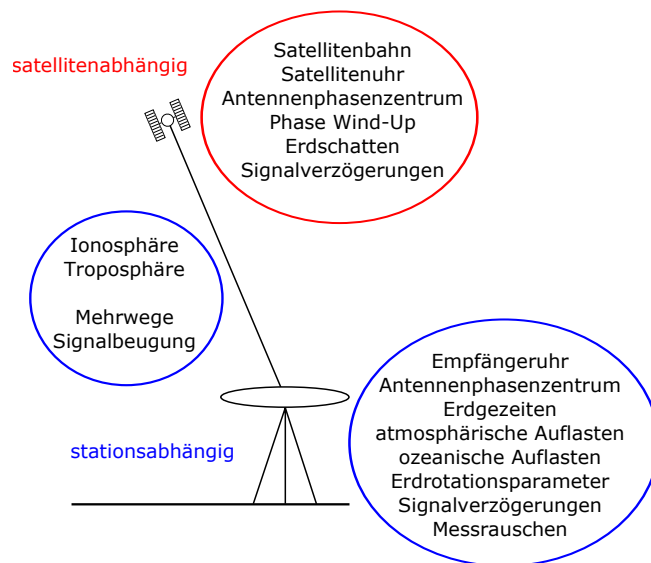


Abb. 2.5: Messabweichungen bei der absoluten Positionierung nach dem PPP-Prinzip

Im Gegensatz zur absoluten Positionierung wird bei der relativen Positionierung zwischen entfernungs- und stationsabhängigen Fehlerquellen differenziert (Abbildung 2.6). Zu den entfernungsabhängigen Fehlerquellen zählen neben den satellitenabhängigen Fehlerquellen auch die bei der Signalausbreitung entstehenden Messabweichungen in Folge von atmosphärischer Refraktion. Die beiden anderen, die Signalausbreitung betreffenden Messabweichungen, d. h. Mehrwegeausbreitung und Signalbeugung, gehören indes weiterhin zur Gruppe der stationsabhängigen Fehlerquellen.

Es sei an dieser Stelle wiederholt, dass der Abstand zwischen Referenz- und Roverstation bei der relativen Positionierung (RTK bzw. Netz-RTK) in Bezug auf die Modellierung von Messabweichungen eine wichtige Rolle spielt. Die entfernungsabhängig wirkenden Messabweichungen haben einen umso größeren Anteil am Fehlerhaushalt, je länger die Basislinie ist. Umgekehrt gilt: je dichter Referenz- und Roverstation beieinanderliegen, desto einheitlicher werden die simultanen Beobachtungen beider Stationen beeinflusst und umso besser werden sie durch einfach oder doppelt differenzierte Beobachtungen reduziert oder sogar eliminiert. Bei der absoluten Positionierung ist ein solches Vorgehen nicht möglich, sodass die resultierenden Fehler durch Korrekturen und Modelle bestmöglich zu minimieren sind.

Im Folgenden werden die einzelnen Messabweichungen diskutiert, ohne dabei näher auf deren Korrektur einzugehen. Die Möglichkeiten zur Korrektur der genannten Messabweichungen im Rahmen einer PPP-Auswertung sind Thema von Abschnitt 3.2.

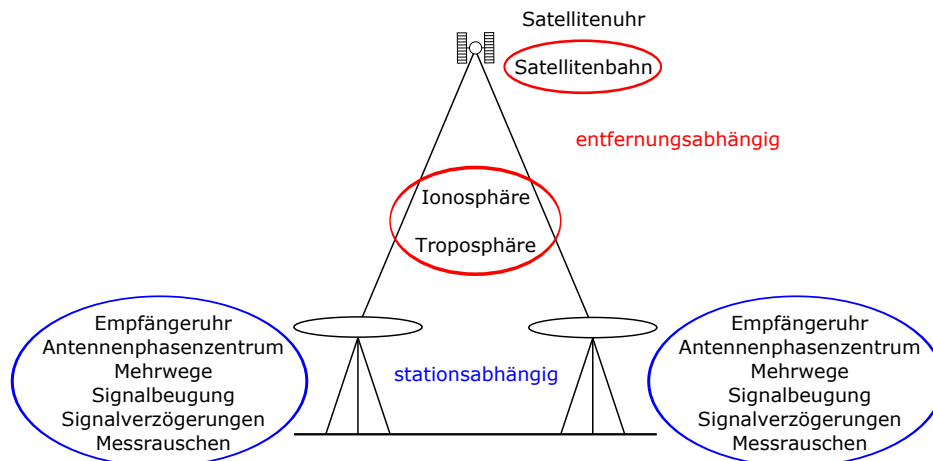


Abb. 2.6: Messabweichungen bei der relativen Positionierung nach dem RTK-Prinzip

2.3.1 Satellit

Orbit und Uhr

Infolge der Abweichung der gerechneten von einer tatsächlichen Satellitenposition kommt es zu Differenzen in der Strecke zwischen Empfänger- und Satellitenantenne. Diese (Un-)Genauigkeit der Pseudoentfernung wird Nutzer-Streckenfehler (*User Range Error*, URE) genannt und setzt sich aus zwei Teilen zusammen (Wanninger 2011). Die Orbitabweichung gibt die Abweichung der Satellitenorbits von der tatsächlichen Satellitenbahn an, wobei die radiale Komponente den größten Einfluss hat. Als Uhrabweichung wird die Abweichung der Satellitenuhrkorrektur vom tatsächlichen Uhrverhalten bezeichnet. Beide Abweichungen sind im allgemeinen Sinn keine Messabweichungen, aber durch ihre Einführung in die GNSS-Auswertung wirken beide sowohl auf die Datenauswertung als auch auf die Koordinatenlösung (Wanninger 2012b).

Antennenphasenzentrum

Die Beschreibung von Satellitenbahnen erfolgt durch die Dokumentation des Massenzentrums (*Center of Mass*, CM). Aufgrund dessen ist der Satellitenschwerpunkt gleichzeitig Bezugspunkt für die präzisen Orbit- und Uhrkorrekturen des IGS. Die Pseudostreckenmessungen der Empfänger als auch die *Broadcast*-Ephemeriden haben jedoch das Phasenzentrum als Bezugspunkt. Durch die Differenzierung zwischen Phasenzentrum der Satellitenantenne und dem Massenzentrum des Satelliten besteht die Notwendigkeit zur Einführung eines Vektors, der die beiden Referenzpunkte miteinander verknüpft (Phasenzentrumsoffset, PZO). Die Lage des Phasenzentrums ist jedoch eine Funktion der Abstrahlrichtung, die zu richtungsabhängigen Abweichungen des tatsächlichen vom sogenannten mittleren Phasenzentrum führen (Phasenzentrumsvariationen, PZV).

Phase Wind-Up

Die von den Satelliten ausgesendeten Signale sind rechts-zirkular polarisierte (*right circularly polarized*, RCP) elektromagnetische Wellen⁷. Dies führt zur Abhängigkeit der gemessenen Trägerphase von der gegenseitigen Orientierung von Satelliten- und Empfängerantenne (Wu u. a. 1993).

⁷Eine kurze Einführung zu elektromagnetischen Wellen im Allgemeinen und zu den von GNSS-Satelliten ausgesendeten elektromagnetischen Wellen im Speziellen gibt (Bisnath 2007).

Aus Sicht des Satelliten kommt es zu Änderungen innerhalb des beschriebenen Systems, weil Satelliten durch eine kontinuierliche und langsame Drehung ihre Sonnensegel zur Sonne ausrichten. Aus der Drehung der Satellitenantenne um ihre vertikale Achse resultiert eine Änderung der Trägerphase von maximal einer Wellenlänge (Kouba 2009a).

Die Korrektur des Antennenphasenzentrums und des *Phase Wind-Up*-Effektes sowie die Berechnung der Satellitenbahnen setzt eine bekannte Orientierung des Satelliten voraus. Die nominelle Lage (engl. *attitude*) eines Satelliten ergibt sich aus zwei Bedingungen. Zum einen soll die Sendeantenne in Richtung Erde zeigen und zum anderen müssen die Sonnensegel rechtwinklig zur Sonneneinstrahlung ausgerichtet sein. Zur Einhaltung der beiden Forderungen führt der Satellit eine konstante Drehung, d. h. eine Rotation um die Z-Achse, durch (Bar-Sever 1996). Befindet sich der Satellit aber im Erdschatten (engl. *eclipsing season*), verliert er den Kontakt zur Sonne. Eine Änderung des Rotationsverhaltens und der Rotationsgeschwindigkeit ist die Folge. Beide sind vom GNSS und den jeweiligen Satellitentypen abhängig (GPS Block II/IIA: Bar-Sever (1996); GPS Block IIR: Kouba (2009b); GLONASS-M: Dilssner u. a. (2010)).

2.3.2 Signalausbreitung in der Atmosphäre

GNSS-Satelliten umkreisen die Erde in einer Höhe zwischen 20 000 und 25 000 km. Auf dem Weg vom Satelliten zum auf der Erdoberfläche befindlichen Empfänger passieren GNSS-Signale daher die verschiedenen Schichten der Erdatmosphäre. Sie umgeben ähnlich einer Kugelschale die Erde und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften zum Teil erheblich voneinander. Es gibt diverse Klassifikationen dieser Schichten, jedoch ist eine Differenzierung in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. vom Grad der Ionisation am gebräuchlichsten.

Im Hinblick auf die Ausbreitung von GNSS-Signalen, d. h. von elektromagnetischen Wellen, teilt man die Atmosphäre in zwei Schichten auf: die neutrale Atmosphäre, die bis in eine Höhe von ca. 50 km reicht, und die darüberliegende Ionosphäre, welche die Region zwischen 50 und 1 000 km Höhe umfasst. Die neutrale Atmosphäre setzt sich aus der Troposphäre und der Stratosphäre zusammen. Dies führt dazu, dass vielfach anstatt neutraler Atmosphäre von Troposphäre und infolgedessen auch von troposphärischer Laufzeitverzögerung gesprochen wird (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

Ionosphäre

Der Name der Ionosphäre ist auf die Ionisation zurückzuführen, die durch die Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne verursacht wird. Dadurch kommt es zur Aufspaltung der sonst neutralen Bestandteile in positiv geladene Ionen und freie Elektronen. Die größte Elektronendichte ist in einer Höhe zwischen 350 km und 450 km in der sogenannten F2-Schicht zu finden, sodass vielfach von einer mittleren Ionosphärenhöhe von 400 km ausgegangen wird (Seeber 2003).

Die Ionosphäre ist für Mikrowellen ein dispersives Medium, d. h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit die Signallaufzeit der GNSS-Signale ist frequenzabhängig. Die ionosphärische Refraktion ist für Code und Phase unterschiedlich, wobei die Codebeobachtungen verzögert (engl. *code delay*) und die Phasenbeobachtungen beschleunigt (engl. *phase advance*) werden. Bei Approximation auf das Glied erster Ordnung zeigt sich ein identischer, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen wirkender Einfluss (Seeber 2003).

Der Einfluss der Ionosphäre auf ein Signal ist vordergründig von der entlang des Signalwegs vom Satelliten zum Empfänger integrierten Elektronendichte abhängig⁸. Das Integral der Elektronendichte entspricht dem absoluten Elektronengehalt (*Total Electron Content*, TEC). Der TEC wird in Einheiten von Elektronen pro m^2 (TEC *unit*, TECU) angegeben, wobei 1 TECU = 10^{16} Elektronen pro m^2 entsprechen. Die größten TEC-Werte sind entlang des magnetischen Äquators zu beobachten (Seeber 2003). Die Variationen des TEC sind räumlicher und zeitlicher Natur. Sie besitzen tages- sowie jahreszeitliche Schwankungen und werden vom Magnetfeld der Erde beeinflusst.

Es ist ersichtlich, dass die Aktivität der Sonne eine große Rolle spielt. Ein Maß für die Sonnenaktivität sind die Sonnenflecken, im Speziellen deren monatliche bzw. jährliche Häufung. Aus den seit Mitte des 19. Jahrhunderts vorliegenden Zeitreihen wurde ein 11-jähriger Zyklus abgeleitet, der in Abbildung 2.7 deutlich erkennbar ist.

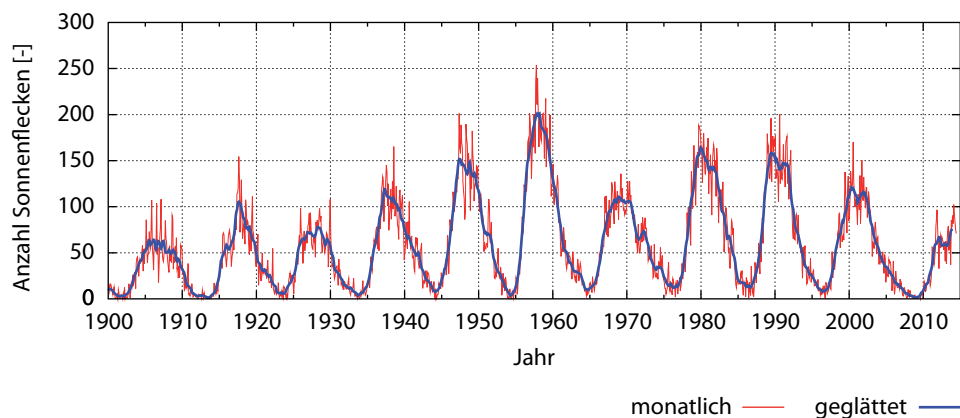


Abb. 2.7: Anzahl an Sonnenflecken zwischen 1900 und 2014 (nach SIDC 2014)

Troposphäre

Die Troposphäre (inkl. Stratosphäre) ist der untere Teil der Atmosphäre und enthält so gut wie keine freien Elektronen und Ionen (Bauer 2011). Im Gegensatz zur Ionosphäre stellt die Troposphäre ein für Mikrowellen nicht-dispersives Medium dar. Die Frequenzunabhängigkeit ist gleichbedeutend mit der identischen Wirkung der troposphärischen Laufzeitverzögerung auf Code und Phase. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind Temperatur, Druck und Wasserdampfgehalt.

Die troposphärische Laufzeitverzögerung hat zwei Bestandteile, die jedoch in sehr unterschiedlich starkem Maße zur Gesamtverzögerung beitragen. Die trockene Komponente, auch hydrostatische Komponente genannt, ist maßgeblich von Luftdruck und Temperatur abhängig. Ihr Anteil an der troposphärischen Refraktion beträgt 90%. Die feuchte Komponente wird hauptsächlich vom räumlich und zeitlich sehr stark variierenden Wasserdampfgehalt bestimmt. Sie ist daher nur schwer modellierbar (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

⁸Nach Wanninger (2012b) gibt es neben dem absoluten Elektronengehalt drei weitere Eigenschaften der Ionosphäre, die zu Messabweichungen führen können: großräumige Gradienten, ionosphärische Störungen mittlerer Größe (*Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances*, MSTIDs) und kleinräumige ionosphärische Störungen.

2.3.3 Signalausbreitung in Stationsumgebung

Neben iono- und troposphärischer Refraktion in Folge der Signalausbreitung in der Atmosphäre kommt es auch zu einer negativen Beeinflussung der Signalausbreitung in Abhängigkeit von der Stationsumgebung. Außer den direkten können zusätzliche und/oder indirekte Satellitensignale die Empfangsantenne erreichen. Sie haben gegenüber den direkten Signalen eine längere Laufzeit. Es wird zwischen Mehrwegeausbreitung und Signalbeugung differenziert.

Mehrwegeausbreitung

Mit Mehrwegeausbreitung (engl. *multipath*) wird die Überlagerung des direkten Satellitensignals mit einem indirekten Signal bezeichnet. Die indirekten Signale entstehen durch Reflexion der direkten Signale an Objekten in der unmittelbaren Umgebung der Empfangsantenne. Sowohl das direkte als auch das indirekte Signal erreichen die Antenne, sodass im Empfänger ein Mischsignal verarbeitet wird (Abbildung 2.8) (Wanninger 2012b).

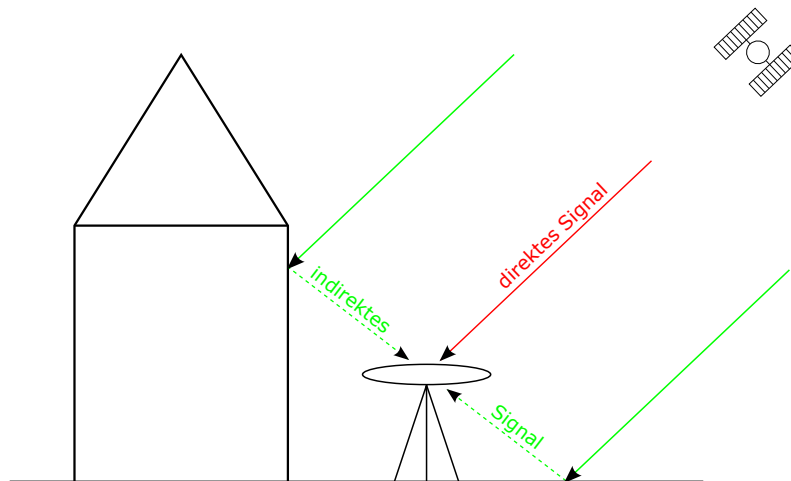


Abb. 2.8: Mehrwegeausbreitung

Die reflektierten Signale haben gegenüber dem direkten Signal einen Umweg zurückgelegt, was sich in einer längeren Signallaufzeit widerspiegelt, und weisen aufgrund der Reflexion eine geringere Amplitude auf. Die Umweglänge des indirekten Signals ist korreliert mit der Geometrie, die zwischen Satellit, Reflektor und Antenne besteht (Wanninger und Wildt 1997). Diese ändert sich umso schneller, je kürzer die Distanz zwischen Reflektor und Antenne ist. Aufgrund der Bewegung der Satelliten besitzen die resultierenden Mehrwegeeffekte einen periodischen Charakter. Die sich daraus ergebenden Nahfeld-Effekte sind typischerweise durch Perioden von Stunden charakterisiert. Von kurzperiodischer Natur hingegen sind die Fernfeld-Effekte. Das Nahfeld umfasst alle Reflektoren mit einem Abstand zur Antenne von weniger als einem Meter, während alle anderen Reflektoren dem Fernfeld zugeordnet werden (Wanninger 2003; Wübbena 2003). Die Mehrwegeausbreitung beeinflusst sowohl die Code- als auch die Phasenmessungen, wobei die Unterschiede um zwei Größenordnungen (Code: dm - m, Phase: mm - cm) differieren.

Signalbeugung

Indirekte Signale können aber auch dann die Antenne erreichen, wenn zwischen Antenne und Satellit kein „Sichtkontakt“ besteht (Abbildung 2.9). Ursächlich für diese indirekten Signale ist die Signal-

beugung (engl. *signal diffraction*) des direkten Satellitensignals an Objekten über dem Antennenhorizont (Brunner u. a. 1999).

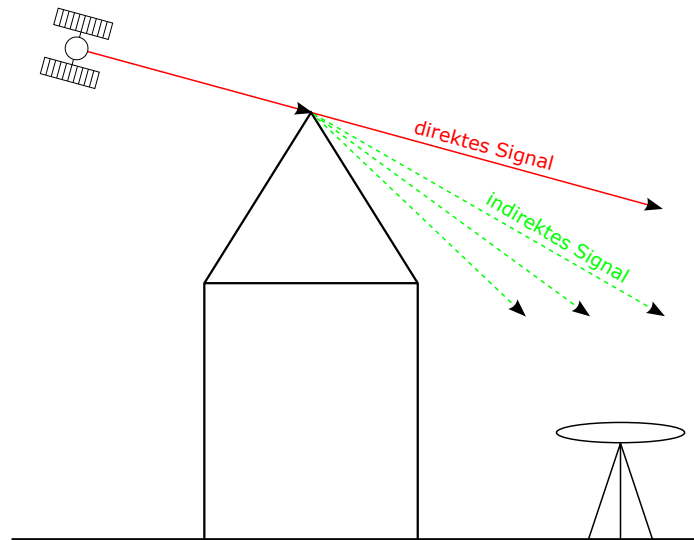


Abb. 2.9: Signalbeugung

Im Gegensatz zur Mehrwegeausbreitung erreichen bei der Signalbeugung aber nur die indirekten Signale die Antenne, sodass es zu keiner Überlagerung mit den direkten Satellitensignalen kommt. Die gebeugten Signale weisen wie die reflektierten (Mehrwege-)Signale eine längere Signallaufzeit auf, wobei der zurückgelegte Umweg der Messabweichung entspricht. Charakteristisch für Signalbeugung ist die stark verringerte Signalstärke, die durch das Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) ausgedrückt wird (Brunner u. a. 1999; Wanninger u. a. 2000).

2.3.4 Station

Die stationsabhängigen Messabweichungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen: zum einen in Messabweichungen aufgrund von Einflüssen von Empfänger (Uhr) und Antenne (Antennenphasenzentrum) und zum anderen in Messabweichungen aufgrund von Einflüssen im erdfesten System (Erdzeiten, ozeanische und atmosphärische Auflasten sowie Erdrotationsparameter), die zu Stationsbewegungen führen.

Uhr

Wie die Satellitenuhr weicht auch die Empfängeruhr von der GNSS-Systemzeit ab. Infolgedessen sind Empfängeruhrzeit und GNSS-Systemzeit nicht miteinander synchron. Die Differenz zwischen Empfängeruhrzeit und GNSS-Systemzeit wird als Empfängeruhrabweichung δt_a^{System} bezeichnet.

Antennenphasenzentrum

Nach Hofmann-Wellenhof u. a. (2008) beziehen sich alle Messungen von GNSS-Signalen auf das elektrische Phasenzentrum der Empfangsantenne. Unter idealen Bedingungen würde es sich um ein punktförmiges Phasenzentrum handeln, welches im besten Fall mit dem mechanischen Phasenzentrum, dem Antennenreferenzpunkt (*Antenna Reference Point*, ARP), zusammenfällt. Unter

realen Bedingungen sind elektrisches und mechanisches Phasenzentrum allerdings nicht identisch. Zudem wird von einem mittleren elektrischen Phasenzentrum gesprochen, da das elektrische Phasenzentrum eine Funktion der Richtung (Azimut und Elevation) ist, aus der das Satellitensignal eintrifft (Abbildung 2.10).

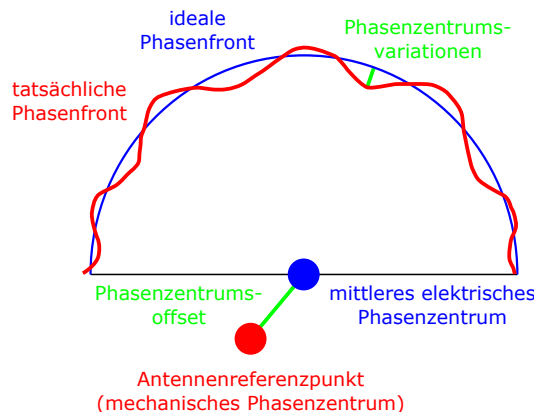


Abb. 2.10: Geometrie des Antennenphasenzentrums des Empfängers

Der Phasenzentrumsoffset (PZO) bezeichnet den Abstand zwischen mittlerem elektrischem und mechanischem Phasenzentrum. Er wird als dreidimensionaler Vektor, der die Koordinatenunterschiede in Ost/Nord/Höhe beschreibt, abgebildet. Der Richtungsabhängigkeit des mittleren elektrischen Phasenzentrums ist die Einführung der elevations- und azimutabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PZV) geschuldet. Die Phasenzentrumskorrekturen PZO und PZV sind voneinander abhängig und müssen daher stets zusammen angegeben werden.

Erd- und Polgezeiten

Die Massenanziehungen und die damit verbundenen Gravitationskräfte zwischen Sonne und Erde sowie zwischen Mond und Erde bewirken eine ständige Verformung der festen, aber nicht völlig starren Erde, die als Gezeiten der festen Erde (engl. *solid Earth tides*) bezeichnet wird (Torge 2003). Die ständige Verformung der Erde führt zudem zu einer Veränderung der Stellung der Erdachse (Polschwankung), die als Polgezeiten (engl. *pole tides*) bezeichnet wird.

Ozeanische Auflasten

Im Zusammenhang mit den Gezeiten der festen Erde (Erdgezeiten) aufgrund der Anziehungskräfte von Mond und Sonne auf die Erde kommt es außerdem zu einem indirekten Gezeiteneffekt, der Ozeanauflast (engl. *ocean loading*). Ozeanische Auflasten sind eine Folge der Verlagerung von enormen Wassermassen durch die von Sonne und Mond verursachten Meeresgezeiten. Bei Flut belasten die Wassermassen die Erdkruste und drücken die Kontinentalplatten nach unten. Die Ebbe führt zu einer Entlastung der Platten. Insbesondere küstennahe Stationen unterliegen den wechselnden Einflüssen von Hebung und Senkung. Der Rhythmus der Meeresgezeiten wirkt sich aber bis weit ins Landesinnere aus.

Atmosphärische Auflasten

Ähnlich dem Auflasteffekt durch Wassermassen verursacht die Masse der Atmosphäre ebenfalls Deformationen der Erdkruste (engl. *atmospheric loading*). Vergleichbar der Hebung und Senkung aufgrund von Ebbe und Flut reagiert die Erde auf den Druck, der durch Tief- oder Hochdruckgebiete

entsteht. Im Gegensatz zu den ozeanischen Auflasten, die lokal sehr unterschiedlich sein können, sind die Auflasteffekte durch die Atmosphäre wesentlich großräumiger. Zudem wirken sie vor allem auf kontinentale Gebiete, da küstennahe Gebiete dem inversen Barometer-Effekt unterliegen.

Weitere Effekte

Neben den genannten ozeanischen und atmosphärischen Auflasten gibt es noch weitere Auflasteffekte, z. B. infolge von Grundwasser, Bodenfeuchte oder Schnee. Postglaziale Landhebungen (engl. *postglacial rebound*) spielen vor allem in solchen Gebieten eine Rolle, die durch eiszeitliche Gletscher bedeckt waren (z. B. Skandinavien und Kanada). In Gebieten mit Permafrostboden (z. B. Sibirien) kommt es durch das Auftauen zu Setzungen.

2.3.5 Instrumentelle Verzögerungen

Durch die Signalgenerierung im Satelliten und Signalverarbeitung im Empfänger unterliegen die Code- und Phasenbeobachtungen instrumentellen Verzögerungen. Aus ihnen resultieren einerseits Abweichungen zwischen den Beobachtungen von Satelliten desselben GNSS und andererseits Abweichungen zwischen den Beobachtungen von GPS und GLONASS. Auf sie soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Fractional-Cycle Biases (FCB)

Phasenbeobachtungen beschreiben die Distanz zwischen Satellit und Empfänger in Form von Zyklen einer bestimmten Wellenlänge. Die endgültige Distanz ergibt sich aus den vollen Zyklen und einem entsprechenden Bruchstück. Allerdings ist nicht die exakte Anzahl an Zyklen bekannt, sondern nur eine Differenz an Zyklen, die sich auf einen beliebigen, aber ganzzahligen Startwert bezieht, weshalb Phasenbeobachtungen mehrdeutig sind. Die Startwerte werden als Mehrdeutigkeiten bezeichnet und ändern sich mit jedem Signalverlust, sodass die einzelnen Bögen eines Satelliten normalerweise unterschiedliche Mehrdeutigkeiten besitzen (Blewitt 1989).

Aufgrund von Verzögerungen, die ihren Ursprung im Satelliten und im Empfänger haben, weichen die geschätzten Mehrdeutigkeiten um einen gewissen Betrag von diesem Startwert ab. Die geschätzte und zugleich nicht-ganzzahlige Mehrdeutigkeit B_a^i zwischen einem Satelliten i und einem Empfänger a ergibt sich zum einen aus der ganzzahligen Mehrdeutigkeit N_a^i und zum anderen aus den instrumentellen Verzögerungen b_a und b^i (Gabor und Nerem 1999):

$$\begin{aligned} B_a^i &= N_a^i + \frac{c_0 \left(h_{a,\Phi}^{i, System} - h_{\Phi}^{i, System} \right)}{\lambda} \\ &= N_a^i + b_a - b^i. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Die ganzzahligen Anteile der aus b^i und b_a resultierenden Verzögerungen sind unbekannt und für die weitere Betrachtung ohne Bedeutung. Bekannt hingegen sind die nicht-ganzzahligen Anteile der Verzögerungen. Ihnen gleichzusetzen sind die Abweichungen der geschätzten Mehrdeutigkeiten von der Ganzzahligkeit, d. h. die Bruch- bzw. Reststücke der Mehrdeutigkeiten (engl. *Fractional Part*, FP). Da es sich bei den FPs um eine Abweichung infolge von instrumentellen Verzögerungen handelt, werden die FPs als *Fractional-Cycle Biases* (FCB) bezeichnet. Gleichzeitig wird damit deutlich, dass es sich bei den FPs um relative und nicht um absolute Angaben handelt. Während sich die ganz-

zahligen Mehrdeutigkeiten N_a^i mit jedem Phasensprung⁹ ändern können, sollten die Verzögerungen b^i und b_a lediglich systematisch mit der Zeit variieren (Gabor und Nerem 1999).

Inter-Frequency Biases (IFB)

Im Abschnitt 2.1 wurde die Technik, die zur Erkennung eines individuellen Satellitensignals genutzt wird, als einer der wesentlichsten Unterschiede zwischen GPS und GLONASS identifiziert. Aus dem von GLONASS verwendeten FDMA-Verfahren resultiert, dass die GLONASS-Satelliten innerhalb der einzelnen Frequenzbänder G1 und G2 auf leicht voneinander abweichenden Frequenzen senden, die zudem nicht mit den GPS-Frequenzbändern L1 und L2 übereinstimmen (vgl. Gleichungen 2.1 und 2.2).

Sowohl GPS- als auch GLONASS-Signale unterliegen der Beeinflussung durch instrumentelle Verzögerungen. Im Vergleich der beiden GNSS wird aber deutlich, dass CDMA (GPS) und FDMA (GLONASS) zu einer unterschiedlichen Beeinflussung durch instrumentelle Verzögerungen führen. Die instrumentellen Verzögerungen, die GLONASS-Signale erfahren, besitzen aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen der Signale eine Abhängigkeit von der Frequenz und werden folglich als *Inter-Frequency Biases* (IFB) bezeichnet. Selbiges gilt im Grunde auch für die Signale von GPS-Satelliten. Jedoch unterliegen alle GPS-Signale den gleichen instrumentellen Verzögerungen, sodass der Einfluss lediglich zu einer Änderung der GPS-Empfängeruhrabweichung führt. Auf sie wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

Die instrumentellen Verzögerungen sind für Code- und Phasenbeobachtungen unterschiedlich, sodass zwischen dem Einfluss von instrumentellen Verzögerungen auf Codebeobachtungen ($h_{a,C}^R$) und dem Einfluss von instrumentellen Verzögerungen auf Phasenbeobachtungen ($h_{a,\Phi}^R$) zu trennen ist (vgl. Gleichungen 2.3 und 2.5).

Die Ursache für die instrumentellen Verzögerungen der Phasenbeobachtungen $h_{a,\Phi}^R$ war lange unbekannt bzw. konnten die Hintergründe nicht umfassend geklärt werden. Die typische Annahme war, dass die Verzögerungen durch die Hardware (HW) der Empfänger hervorgerufen werden. Sleewaegen u. a. (2012b) beweisen jedoch, dass die digitale Signalverarbeitung (*Digital Signal Processing*, DSP) die weitaus dominantere Quelle darstellt. Es gilt:

$$h_{a,\Phi}^R = h_{a,\Phi,HW}^R + h_{a,\Phi,DSP}^R. \quad (2.9)$$

Sleewaegen u. a. (2012b) zeigen, dass die durch die analoge Hardware hervorgerufenen Abweichungen $h_{a,\Phi,HW}^R$ zwar ihren Teil zu $h_{a,\Phi}^R$ beitragen, allerdings auf dem Niveau von Millimetern. Von daher sind sie zu klein, um für Abweichungen auf dem Niveau von Zentimetern zu sorgen (vgl. Zinoviev u. a. (2009); Wanninger (2012a)). Zudem geben Sleewaegen u. a. (2012b) weitere Gründe an, die gegen die Filter in der analogen Hardware als dem wesentlichen Verursacher der Verzögerungen sprechen: zum einen würden analoge Filter nicht zu ähnlichen und zudem linearen Verzögerungen in den beiden Frequenzbändern führen und zum anderen sind sie sensitiv gegenüber Temperaturänderungen.

⁹Phasensprünge (engl. *Cycle-Slips*) sind Unterbrechungen in den kontinuierlichen Beobachtungen eines Satelliten durch einen Empfänger, die verschiedene Ursachen haben können. In erster Linie treten sie auf, wenn Satelliten untergegangen sind und erneut aufgehen („natürlicher“ *Cycle-Slip*). Weitere Gründe sind Signalverluste infolge von Sichtbehinderungen und Probleme des Empfängers bei der Detektierung des Satellitensignals.

Die digitale Signalverarbeitung stellt die zweite und vor allem deutlich dominantere Komponente dar (Sleewaegen u. a. 2012b). DSP induziert verschiedene Verzögerungen, die durch zwei Mechanismen hervorgerufen werden. Zum einen erfolgt eine Angleichung der Codebeobachtungen in jedem der beiden Frequenzbänder, wobei auf alle Codebeobachtungen eines Frequenzbandes ein konstanter Wert addiert wird. Erfolgt eine entsprechende Angleichung der Phasenbeobachtungen nicht, ergeben sich dadurch Unterschiede zwischen Code und Phase. Zum anderen existieren Verzögerungen hinsichtlich Code und Phase, die dem Korrelationsprozess zwischen dem ankommenden Satellitensignal und dem intern im Empfänger erzeugten Replikat entstammen. Infolgedessen sind Code- und Phasenbeobachtungen nicht zueinander synchron und werden die resultierenden Verzögerungen als Code-Phasen-Verzögerungen (*Code-Phase Bias*, CPB) bezeichnet. Es wird zwischen verschiedenartigen Code-Phasen-Verzögerungen in den beiden Frequenzbändern G1 und G2 differenziert. Es zeigt sich, dass die durch DSP verursachten Verzögerungen in linearem Zusammenhang mit der Frequenznummer k und der Code-Phasen-Verzögerung CPB_{G_i} (in [m]) stehen:

$$\begin{aligned} h_{a,\Phi,DSP,G1}^{R,k} &= k \cdot \frac{CPB_{G1}}{2848} = k \cdot IFB_{G1} \quad \text{und} \\ h_{a,\Phi,DSP,G2}^{R,k} &= k \cdot \frac{CPB_{G2}}{2848} = k \cdot IFB_{G2}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Laut Sleewaegen u. a. (2012b) können die Code-Phasen-Verzögerungen CPB_{G_i} Werte von mehreren hundert Metern annehmen. Gleichung 2.10 zufolge ist dies gleichbedeutend mit IFB_{G_i} auf dem Niveau von einigen Zentimetern. Die Differenzen zwischen CPB_{G1} und CPB_{G2} hingegen betragen typischerweise weniger als 10 m, weshalb IFB_{G1} und IFB_{G2} nahezu identisch sein oder lediglich Differenzen im Bereich weniger Millimeter aufweisen sollten. Vernachlässigbar sind die resultierenden Differenzen zwischen $h_{a,\Phi,DSP,C/A}^{R,k}$ und $h_{a,\Phi,DSP,P}^{R,k}$, da die Unterschiede zwischen $CPB_{C/A}$ und CPB_P wenige Meter nicht überschreiten.

Abschließend verweisen Sleewaegen u. a. (2012b) darauf, dass die durch DSP verursachten Code-Phasen-Verzögerungen sowohl temperaturunabhängig als auch zeitlich stabil sind. Sie hängen nur von der Bauweise des digitalen Signalprozessors ab und variieren demnach nicht zwischen Empfängern eines Herstellers.

Inter-System Biases (ISB)

Jedes GNSS beruht auf einer eigenständigen Zeitskala, die durch die Uhren der Bodenstationen repräsentiert wird (vgl. Abschnitt 2.1). Der Empfänger oder genauer die Empfängeruhr hat jedoch ein anderes Zeitsystem, weshalb im Abschnitt 2.3.4 die Empfängeruhrabweichung als Differenz zwischen Empfängerzeit und GNSS-Systemzeit eingeführt wurde. Die Differenz zwischen den Empfängeruhrabweichungen von GPS und GLONASS beschreibt die Unstimmigkeit der Empfängeruhr bzgl. den Systemzeiten und wird als *Inter-System Biases* (ISB) bezeichnet.

Differential Code Biases (DCB)

GPS- und GLONASS-Satelliten senden auf den beiden Frequenzbändern L1/G1 und L2/G2 Signale aus, die sowohl Code- als auch Phasenbeobachtungen beinhalten. Hinsichtlich des Codes wird zwischen dem groben C/A (*coarse/acquisition*)-Code und dem präzisen P (*precise*)-Code unterschieden. Für beide GNSS gilt, dass der P-Code sowohl auf L1 als auch auf L2 verfügbar ist. Während alle GLONASS-Satelliten den C/A-Code ebenfalls in beiden Frequenzbändern zur Verfügung stellen,

hängt die Ausstrahlung des C/A-Codes im Fall von GPS vom Satellitentyp ab. Die älteren GPS-Satelliten (Block IIA und Block IIR) können den C/A-Code lediglich auf L1 aussenden. Die neueren der aktuell in Betrieb befindlichen GPS-Satelliten (Block IIR-M und Block IIF) strahlen mit L2C ein zweites ziviles Signal aus, mit dem C/A-Codebeobachtungen auch auf L2 zur Verfügung stehen. Daraus ergeben sich nach Schaer (2012b) folgende Typen von Codebeobachtungen: C_1 , C_2 , P_1 und P_2 sowie $P'_2 = X_2 = C_1 + (P_2 - P_1) = P_2 + (C_1 - P_1)$.

Infolge von Verzögerungen bei der Signalgenerierung und -verarbeitung sind die Codebeobachtungen verfälscht und bestehen zwischen den einzelnen Codebeobachtungen satellitenabhängige Differenzen (*Differential Code Biases*, DCB). Nach Schaer (2012b) differenziert man zwischen P1P2-DCB, P1C1-DCB und P2C2-DCB. Es ist ersichtlich, dass es zwei Arten von DCBs zu unterscheiden gilt (Leandro u. a. 2007). Einerseits gibt es die Gruppe der DCBs, die zwischen den Codebeobachtungen auf der gleichen Frequenz (*intra-frequency* DCB) existieren. Hierzu gehören die P1C1- und P2C2-DCBs. Andererseits gibt es die Klasse der DCBs, die zwischen den Codebeobachtungen auf unterschiedlichen Frequenzen (*inter-frequency* DCB) bestehen. Hierzu gehören die P1P2-DCBs.

Hinweis

Für die im Wesentlichen aus der Signalgenerierung im Satelliten und der Signalverarbeitung im Empfänger resultierenden instrumentellen Verzögerungen gibt es in der Literatur eine Vielzahl an Begriffen und Abkürzungen. Zum Teil sind diese 1-zu-1 übertragbar auf die in der vorliegenden Arbeit verwendete Nomenklatur. So werden die *Fractional-Cycle Biases* (FCB)¹⁰ von Ge u. a. (2008) als *Uncalibrated Phase Delays* (UPD), von Geng u. a. (2009) als *Uncalibrated Hardware Delays* (UHD) und von Li und Zhang (2012) als *Uncalibrated Fractional Offsets* (UFO) bezeichnet. Allgemeiner und doch umfassender sind die von Schönemann (2013) eingeführten *Uncalibrated Phase Delays* (UPD) und *Uncalibrated Code Delays* (UCD). Die Verschiebungen (*displacement*) der Phasen- und Codebeobachtungen fasst er zu *Uncalibrated Signal Delays* (USD) zusammen und bezeichnet damit die Ansammlung einer Vielfalt von untrennbaren Effekten (Hardware, Modellungenauigkeiten, Mehrwegeausbreitung, usw.), infolgedessen USDs in Abhängigkeit zum Empfänger/Satellit/Signal zu sehen sind.

2.4 Linearkombinationen

Wie einführend festgestellt, senden alle GNSS auf mindestens zwei Frequenzen f_1 und f_2 und ermöglichen damit Zweifrequenz-Messungen. Liegen Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen vor, können aus den Originalsignalen L_1 und L_2 unendlich viele Linearkombinationen gebildet werden. Sinngemäß gilt dies auch für Zweifrequenz-Codebeobachtungen. Der Darstellung von Wübbena (1989) folgend ergeben sich Phasen-Linearkombinationen auf der Basis von Zweifrequenz-Phasenmessungen nach

$$\phi_{n,m} = n\phi_1 + m\phi_2, \quad (2.11)$$

wobei

¹⁰Der Begriff *Fractional-Cycle Biases* (FCB) wurde vermutlich von Geng u. a. (2010a) eingeführt, wenngleich bereits Gabor und Nerem (1999) von *fractional bias* in Bezug auf Hardware-Effekte im Satelliten und Empfänger gesprochen haben.

- $\phi_{n,m}$ - Phasenbeobachtung der Linearkombination [cy],
- n, m - Linearkoeffizienten [-],
- ϕ_1, ϕ_2 - Phasenmessung auf L_1 bzw. L_2 [cy].

Generell können nach Gleichung 2.11 auch die beiden Originalsignale als Linearkombination bezeichnet werden. Weil einer der beiden Linearkoeffizienten jeweils den Wert Null einnimmt, stellen die beiden Originalsignale in diesem Sinne zwei besondere Linearkombinationen dar.

Entgegen ihrer eigentlichen Natur werden Phasenmessungen vielfach in metrischen Einheiten dargestellt (vgl. Beobachtungsgleichungen in Abschnitt 2.2). In diesem Fall gilt

$$\Phi_{\alpha,\beta} = \alpha \Phi_1 + \beta \Phi_2, \quad (2.12)$$

wobei

- $\Phi_{\alpha,\beta}$ - Phasenbeobachtung der Linearkombination [m],
- α, β - Linearkoeffizienten [-],
- Φ_1, Φ_2 - Phasenmessung auf L_1 bzw. L_2 [m].

Die Linearkoeffizienten α und β müssen einerseits die Restriktion

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2.13)$$

erfüllen und stehen andererseits über die Wellenlänge der Linearkombination $\lambda_{n,m}$ und den Wellenlängen der Originalsignale (λ_1, λ_2) in direkter Verbindung mit den Linearkoeffizienten n und m :

$$\alpha = n \cdot \frac{\lambda_{n,m}}{\lambda_1} \quad \text{und} \quad \beta = m \cdot \frac{\lambda_{n,m}}{\lambda_2}. \quad (2.14)$$

Das Messrauschen $\sigma_{n,m}$ der Phasen-Linearkombination $\phi_{n,m}$ ergibt sich durch Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes auf Gleichung 2.11 zu

$$\sigma_{n,m} = \lambda_{n,m} \cdot \sqrt{n^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2} = \lambda_{n,m} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \sigma_\phi, \quad (2.15)$$

wobei die Phasenbeobachtungen ϕ_1 und ϕ_2 als gleich genau ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ rad (Wübbena 1989)) und unkorreliert betrachtet werden.

Grundsätzlich können aufbauend auf Gleichung 2.11 unendlich viele Linearkombinationen gebildet werden. Die Beurteilung, welche der Linearkombinationen als sinnvoll einzustufen sind, erfolgt anhand weniger Auswahlkriterien, die vor allem frequenzabhängige Eigenschaften der Linearkombinationen berücksichtigen. Hierzu zählen die Wellenlänge (möglichst groß), der Einfluss der Ionosphäre (bestenfalls eliminiert) und das Messrauschen (möglichst klein). Bestimmte Linearkombinationen sind bezüglich dieser Merkmale durch teilweise günstigere Eigenschaften als die ursprünglichen Signale charakterisiert. Das wichtigste Merkmal stellt in diesem Zusammenhang jedoch die Ganzzahligkeit der resultierenden Mehrdeutigkeit dar. Um diese Anforderung zu erfüllen, müssen die beiden Linearkoeffizienten n und m ganzzahlig sein. Die Mehrdeutigkeit $N_{n,m}$ der Linearkombination $\phi_{n,m}$ ergibt sich nach

$$N_{n,m} = n N_1 + m N_2 \quad (2.16)$$

mit N_1 und N_2 als den Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen ϕ_1 und ϕ_2 .

Aus der unendlichen Anzahl an Linearkombinationen der Trägerphasen sind für die präzise Positionsbestimmung nur einige wenige Linearkombinationen von primärer Bedeutung (Tabelle 2.2). Sie sollen im Folgenden näher behandelt werden. Eine Sonderstellung nimmt hierbei die Melbourne-Wübbena-Linear kombination ein, da zu ihrer Bildung sowohl Phasen- als auch Codebeobachtungen notwendig sind. Weitere Linearkombinationen und Kriterien, nach denen sie beurteilt werden können, sind der Literatur zu entnehmen (z. B. Seeber 2003).

Tab. 2.2: Eigenschaften der wichtigsten Phasen-Linear kombinationen

Signal	GPS						GLONASS ($k = 0$)					
	n	m	α	β	λ [cm]	σ [mm]	n	m	α	β	λ [cm]	σ [mm]
L ₁	1	0	1,00	0,00	19,0	3,0	1	0	1,00	0,00	18,7	3,0
L ₂	0	1	0,00	1,00	24,4	3,9	0	1	0,00	1,00	24,1	3,9
L _{IF}	77	-60	2,55	-1,55	0,6	9,8	9	-7	2,53	-1,53	5,3	9,6
L _{WL}	1	-1	4,53	-3,53	86,2	19,4	1	-1	4,50	-3,50	84,2	19,0
L _{NL}	1	1	0,56	0,44	10,7	2,4	1	1	0,56	0,44	10,5	2,4

Die in Tabelle 2.2 dargestellten signalspezifischen GLONASS-Wellenlängen sind für die Frequenznummer $k = 0$ angegeben. Aufgrund des direkten Zusammenhanges zwischen Wellenlänge und Frequenz ergeben sich für die einzelnen Frequenznummern leicht unterschiedliche Wellenlängen¹¹. Selbiges gilt nicht für die Linearkoeffizienten α und β , die unabhängig von der Frequenznummer sind.

Ionosphären-freie Linear kombination

Die in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Frequenzabhängigkeit der ionosphärischen Refraktion hat eine unterschiedliche ionosphärische Beeinflussung der Originalsignale zur Folge. Umgekehrt können die Phasenbeobachtungen der Originalsignale zur Erzeugung der ionosphären-freien (IF) Linear kombination genutzt werden, die im Wesentlichen vom ionosphärischen Effekt befreit ist:

$$\Phi_{IF,f_1,f_2} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_2. \quad (2.17)$$

Dem Vorteil der fast vollständigen Elimination des ionosphärischen Einflusses - es verbleiben Restfehler infolge der ionosphärischen Effekte höherer Ordnung - stehen jedoch zwei nicht unbedeutende Nachteile entgegen: zum einen erhöht sich das Messrauschen im Vergleich zum Messrauschen der Originalsignale um den Faktor 3 und zum anderen ist die ionosphären-freie Linear kombination durch eine verhältnismäßig kleine Wellenlänge charakterisiert. Letzteres gilt insbesondere im Fall von GPS. Im Vergleich zwischen GPS und GLONASS stellt die Wellenlänge der ionosphären-freien Linear kombination in Bezug auf die Kennzahlen in Tabelle 2.2 das Charakteristikum mit dem größten Unterschied dar.

¹¹Für $k_{min} = -7$ und $k_{max} = 6$ lauten die Wellenlängen $\lambda_{Signal,k}$ (in [cm]): $\lambda_{1,-7} = 18,8$, $\lambda_{1,6} = 18,7$; $\lambda_{2,-7} = 24,1$, $\lambda_{2,6} = 24,0$; $\lambda_{IF,-7} = 5,3$, $\lambda_{IF,6} = 5,3$; $\lambda_{WL,-7} = 84,4$, $\lambda_{WL,6} = 84,0$; und $\lambda_{NL,-7} = 10,6$, $\lambda_{NL,6} = 10,5$.

Insbesondere die Eigenschaft der Wellenlänge erschwert eine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten und verhindert eine einfache Koordinatenbestimmung auf Basis der ionosphären-freien Linearkombination. Mittels eines zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahrens versucht man dies zu umgehen, um dennoch mit der ionosphären-freien Linearkombination präzise Koordinaten zu bestimmen.

Widelane-Linear-kombination

Die aufgrund ihrer Linearkoeffizienten $n = 1$ und $m = -1$ auch als Differenzsignal bezeichnete *Widelane* (WL)-Linear-kombination Φ_{WL}

$$\Phi_{WL,f_1,f_2} = \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_2 \quad (2.18)$$

besitzt die mit Abstand größte Wellenlänge. In einem ähnlichen Verhältnis wie die Wellenlängen ($\lambda_1 : \lambda_{WL} \approx 1 : 4$) vergrößert sich aber auch das Messrauschen. Im Vergleich zur ionosphären-freien Linearkombination wird der Einfluss der ionosphärischen Refraktion jedoch nicht eliminiert bzw. drastisch reduziert, sondern ist mittels Modellen zu korrigieren. Letztlich ist die *Widelane*-Linear-kombination zu ungenau für die präzise Positionsbestimmung, durch ihre verhältnismäßig große Wellenlänge ist sie aber für die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten von besonderem Interesse.

Narrowlane-Linear-kombination

Die aufgrund ihrer Linearkoeffizienten $n = 1$ und $m = 1$ auch als Summensignal bezeichnete *Narrowlane* (NL)-Linear-kombination Φ_{NL}

$$\Phi_{NL,f_1,f_2} = \frac{f_1}{f_1 + f_2} \cdot \Phi_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot \Phi_2 \quad (2.19)$$

besitzt eine Wellenlänge, die ungefähr halb so groß wie die Wellenlängen der Originalsignale ist. Die Besonderheit der *Narrowlane*-Linear-kombination ist ihr Messrauschen, welches unter dem der Originalsignale liegt.

Melbourne-Wübbena-Linear-kombination

Die Melbourne-Wübbena (MW)-Linear-kombination Φ_{MW} (Melbourne 1985; Wübbena 1989) stellt eine spezielle Form der *Widelane*-Linear-kombination dar. Zusätzlich zu den Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen werden auch die dazugehörigen Codebeobachtungen verwendet. Mit ihnen wird die Code-*Narrowlane*-Linear-kombination C_{NL} gebildet. Φ_{MW} ergibt sich aus der Differenz von Φ_{WL} und C_{NL} :

$$\begin{aligned} \Phi_{MW,f_1,f_2} &= \Phi_{WL,f_1,f_2} - C_{NL,f_1,f_2} \\ &= \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_2 \right) - \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} \cdot C_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot C_2 \right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Daher teilt sie sich mit der *Widelane*-Linear-kombination die Wellenlänge. Allerdings unterliegt sie nicht dem gesamten ionosphärischen Einfluss, sondern nur den ionosphärischen Effekten höherer Ordnung, da der ionosphärische Einfluss 1. Ordnung auf Φ_{WL} und C_{NL} mit umgekehrtem Vorzeichen wirkt. Durch die Differenzbildung entfällt zudem der Einfluss der Troposphäre und es wirken keine Fehler als Folge von ungenauen Satellitenorbits und Satellitenuhrkorrekturen. Nicht zuletzt spielt die Qualität der Codebeobachtungen, die insbesondere vom Einfluss durch Mehrwegeausbreitung

abhängt, eine entscheidende Rolle. Genaue Codebeobachtungen sind Voraussetzung, um mittels der Melbourne-Wübbena-Linear kombination die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten zu bestimmen und festsetzen zu können. Im Allgemeinen gelingt dies besser als mit der normalen *Widelane*-Linear kombination.

Vergleich von *Widelane*- und Melbourne-Wübbena-Linear kombination

Die *Widelane*- und Melbourne-Wübbena-Linear kombination unterscheiden sich in erster Linie durch die zusätzliche Verwendung der Codebeobachtungen im Fall der Melbourne-Wübbena-Linear kombination. Der Vergleich von Phasen- und Codebeobachtungen erlaubt eine einfache Möglichkeit zur Bestimmung der *Widelane*-Mehrdeutigkeit.

Allerdings ergibt sich im Fall der Melbourne-Wübbena-Linear kombination durch die Subtraktion der *Narrowlane*-Code-Linear kombination von der *Widelane*-Phasen-Linear kombination eine *Widelane*-Mehrdeutigkeit N_{MW} , die nicht der *Widelane*-Mehrdeutigkeit N_{WL} der *Widelane*-Phasen-Linear kombination entspricht. Nach Banville u. a. (2008) besteht zwischen beiden *Widelane*-Mehrdeutigkeiten eines Satellitenpaares ein konstanter Unterschied $\nabla N^{i,j}$, der durch die Differenz der präzisen Codebeobachtungen der beiden Originalsignale $DCB_{P_1P_2}^{i,j}$ ausgedrückt werden kann:

$$\begin{aligned}\nabla N^{i,j} &= N_{MW}^{i,j} - N_{WL}^{i,j} \\ &= f_{WL} \cdot (P_2^{i,j} - P_1^{i,j}) \\ &= f_{WL} \cdot DCB_{P_1P_2}^{i,j}\end{aligned}\tag{2.21}$$

mit

$$f_{WL} = \frac{1}{\lambda_{WL}} \cdot \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \approx 2,3.\tag{2.22}$$

Inwieweit eine Umrechnung der beiden *Widelane*-Mehrdeutigkeiten N_{MW} und N_{WL} nach Gleichung 2.21 möglich ist oder ob verbleibende Resteinflüsse (z. B. ionosphärische Refraktion, Mehrwegeabweichung) eine Umrechnung erschweren, wurde anhand der Beobachtungsdaten von mehr als 160 EUREF *Permanent Network* (EPN)-Stationen der GPS-Wochen 1688 und 1689 (vgl. Abschnitt 5.1) untersucht. Die notwendigen *Differential Code Biases* ($DCB_{P_1C_1}$ und $DCB_{P_1P_2}$) stammen vom *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE). Zur Minimierung des ionosphärischen Einflusses auf die *Widelane*-Linear kombination wurde auf die Modelle des IGS zurückgegriffen. Aufgrund der Tatsache, dass GLONASS-Mehrdeutigkeiten durch Code- und Phasenverzögerungen in negativer Art und Weise beeinflusst sind (vgl. Abschnitt 5.4), beschränkt sich die Untersuchung auf die Auswertung von GPS-Beobachtungen.

Als Ergebnis der Prozessierung stehen pro Station und Satellitenbogen zwei Einfach-Differenz-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten ($N_{a,MW}^{i,j}$ und $N_{a,WL}^{i,j}$) bzw. die Mehrdeutigkeitsdifferenz $\nabla N_a^{i,j}$ zur Verfügung. In allen drei Fällen fungiert der GPS-Satellit G14 als Referenzsatellit. Die satelliten-spezifischen Differenzen $\nabla N_a^{i,j}$ wurden zunächst stationsweise gemittelt ($\nabla N_a^{i,j}$), wobei 95 % aller $\nabla N^{i,j}$ Tag-zu-Variationen aufweisen, die kleiner als eine *Widelane*-Wellenlänge sind. Im Mittel ergibt sich eine Wiederholgenauigkeit von 0,41 cy bzw. 0,35 m.

Zur Beantwortung der eingangs formulierten Fragestellung ist abschließend für jeden Satelliten eine mittlere satellitenspezifische Differenz $\nabla \bar{N}_k^{i,j}$ berechnet worden. In Abbildung 2.11 sind $\nabla \bar{N}_k^{i,j}$ und $\nabla \bar{N}_k^{i,j}$, nachfolgend als Istwert bezeichnet, dem skalierten $DCB_{P_1P_2}^{i,j}$ (Sollwert) gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass zwischen Ist- und Sollwert eine Abweichung besteht, die im Mittel 0,15 cy beträgt. Unter Berücksichtigung dieser mittleren Abweichung ergeben sich Restabweichungen auf dem Niveau von 0,11 cy. Zudem bleibt festzuhalten, dass keine Notwendigkeit für eine Unterscheidung hinsichtlich der verschiedenen Typen von GPS-Satelliten besteht.

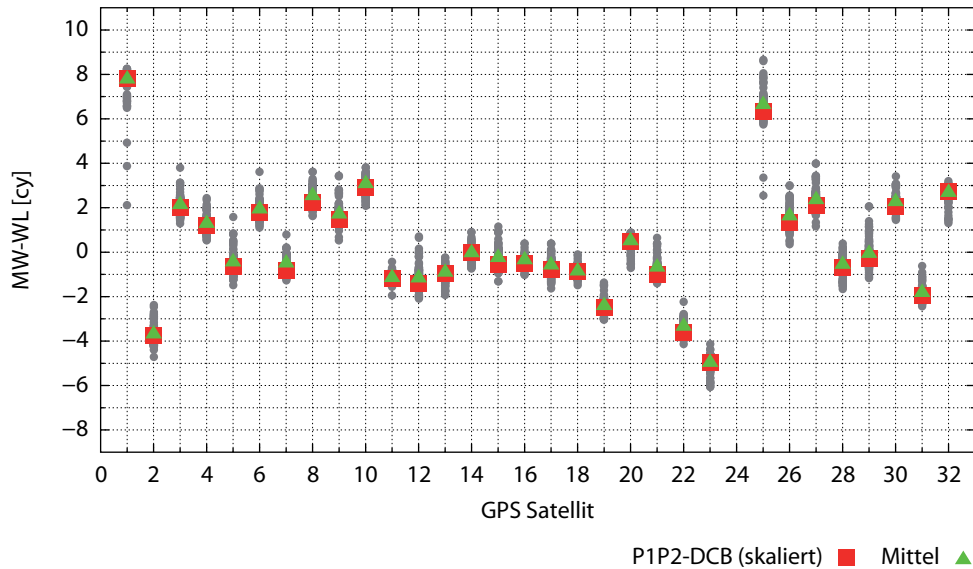


Abb. 2.11: Gegenüberstellung der Differenz aus *Widelane*- und *Melbourne-Wübbena*-Mehrdeutigkeiten und dem *Differential Code Bias* $DCB_{P_1P_2}$

Die Ergebnisse bestätigen die Untersuchungen von Banville u. a. (2008), die die Beobachtungsdaten von vier kanadischen IGS-Stationen von drei aufeinanderfolgenden Tagen im Januar 2007 für ihre Analyse verwendet haben, wenngleich Banville u. a. (2008) keine statistischen Kenngrößen angeben, sondern nur von einer 'guten Übereinstimmung' sprechen.

Effektive Wellenlänge und Wellenlängenfaktor

Ausgehend von Gleichung 2.16 gilt für die Mehrdeutigkeiten $N_{i,j}$ und $N_{k,l}$ der beiden Linearkombinationen $\Phi_{i,j}$ und $\Phi_{k,l}$ (Collins 1999):

$$N_{i,j} = i N_1 + j N_2 \quad \text{und} \quad (2.23a)$$

$$N_{k,l} = k N_1 + l N_2. \quad (2.23b)$$

Es ist ersichtlich, dass die Festsetzung der Mehrdeutigkeit in einer Linearkombination (hier $N_{i,j}$) eine Auswirkung auf die Mehrdeutigkeit in den anderen Linearkombinationen (hier $N_{k,l}$) haben kann. Man spricht in solchen Fällen von einem Zwang, der aus der Mehrdeutigkeitsfestsetzung in einer Linearkombination resultiert Wanninger (2000). Die Einschränkung hat zur Folge, dass für die zweite Linearkombination nicht mehr alle in Frage kommenden Mehrdeutigkeiten auch ganzzahlige Mehrdeutigkeiten sind. Nur noch bestimmte Vielfache von $N_{k,l}$ sind einerseits ganzzahlig und erfüllen andererseits zugleich auch noch Gleichung 2.23b. Die Multiplikatoren bezeichnet man als

Wellenlängenfaktor f_λ . Die resultierenden Linearkombinationen werden nunmehr mit einer von der ursprünglichen Wellenlänge abweichenden Wellenlänge, der effektiven Wellenlänge λ_{eff} , gebildet (Wübbena 1988; Seeber 2003).

Vor diesem Hintergrund wird insbesondere den Linearkombinationen eine entscheidende Rolle zu Teil, die durch eine verhältnismäßig große Wellenlänge charakterisiert sind und eine einfache Festsetzung der Mehrdeutigkeiten erlauben, d. h. Φ_{WL} bzw. Φ_{MW} . Die Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeit N_{WL} oder N_{MW} bedeutet eine Veränderung der Phasenbeobachtung auf der zweiten Frequenz um den Wert der *Widelane*-Mehrdeutigkeit, weshalb die Mehrdeutigkeiten der beiden Originalsignale (theoretisch) nun denselben Wert haben (Wanninger 2000). Die in diesem Fall geltenden Wellenlängenfaktoren und effektiven Wellenlängen der wichtigsten Phasen-Linear kombinationen sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Die Wellenlänge der ionosphären-freien GPS-Linear kombination erfährt durch die Festsetzung der *Widelane*- oder Melbourne-Wübbena-Linear kombination die größte Vervielfachung ($f_\lambda = 17$). Dies ist für die Koordinatenberechnung von entscheidender Bedeutung, da sich die Mehrdeutigkeiten der nun auf der *Narrowlane*-Wellenlänge aufbauenden ionosphären-freien Linear kombination deutlich einfacher festsetzen lassen.

Tab. 2.3: Wellenlängenfaktoren f_λ und effektive Wellenlängen λ_{eff} der wichtigsten Phasen-Linear kombinationen nach Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeit (vgl. Wübbena 1988; Collins 1999; Wanninger 2000)

GNSS	f_λ [-]				λ_{eff} [cm]			
	L ₁	L ₂	L _{IF}	L _{NL}	L ₁	L ₂	L _{IF}	L _{NL}
GPS	1	1	17	2	19,0	24,4	10,7	21,4
GLONASS ($k = 0$)	1	1	2	2	18,7	24,1	10,5	21,0

Im Gegensatz zu PPP- kann es bei RTK-Auswertungen in Abhängigkeit von der Basislinienlänge unter Umständen von Vorteil sein, zuerst die Mehrdeutigkeiten einer anderen Linear kombination festzusetzen. Entsprechend gelten dann für die Berechnung der zweiten Linear kombination von Tabelle 2.3 abweichende Wellenlängenfaktoren f_λ und effektive Wellenlängen λ_{eff} . Übersichten mit den in diesen Fällen gültigen Wellenlängenfaktoren f_λ und effektive Wellenlängen λ_{eff} enthalten u.a. Wübbena (1988), Wübbena (1989), Collins (1999) und Wanninger (2000).

2.5 Ausgleichung

Basierend auf den Code- und Phasenbeobachtungen erfolgt die GNSS-Positionsbestimmung mittels einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (MkQ), auch Gauß-Markov-Modell oder Schätzung nach L2-Norm genannt, wobei die Summe der Quadrate der Verbesserungen minimal sein soll. Die Code- und Phasenbeobachtungen zu den einzelnen Satelliten sowie von mehreren Epochen bilden die zur Verfügung stehenden Messwerte. Sie werden zum Beobachtungsvektor \mathbf{L} , der n Zeilen mit n gleich der Anzahl an Gesamtbeobachtungen besitzt, zusammengefasst (Niemeier 2008):

$$\mathbf{L}_{n,1}^T = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & \cdots & L_n \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Die gesuchten Unbekannten werden ihrerseits im Parameter- bzw. Unbekanntenvektor \mathbf{X} , der u Zeilen mit u gleich der Anzahl an Unbekannten besitzt, zusammengefasst (Niemeier 2008):

$$\mathbf{X}_{u,1}^T = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_u \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Beobachtungsvektor \mathbf{L} und Parametervektor \mathbf{X} stehen über ein funktionales und stochastisches Modell im unmittelbaren Zusammenhang. Beide, d. h. \mathbf{L} und \mathbf{X} , weichen aufgrund von Verbesserungen \mathbf{v} von den wahren Werten $\tilde{\mathbf{L}}$ und $\tilde{\mathbf{X}}$ ab. Das Ergebnis der Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen sind die Schätzwerte $\hat{\mathbf{L}}$ und $\hat{\mathbf{X}}$ sowie die Verbesserungen. Eine Ausgleichung im eigentlichen Sinne liegt jedoch nur dann vor, wenn die Anzahl an Beobachtungen n größer der Anzahl an Unbekannten u ist. Nur unter der Maßgabe der Überbestimmung kann eine sichere Qualitätsbeurteilung anhand eindeutiger Genauigkeitsangaben zur Ausgleichung im Allgemeinen (siehe Gleichung 2.50) als auch zu den Unbekannten im Speziellen (siehe Gleichung 2.51) durchgeführt werden.

Soweit nicht anders angeführt, beruhen die folgenden Ausführungen auf Niemeier (2008).

2.5.1 Funktionales Modell und Linearisierung

Voraussetzung einer Ausgleichung ist die Tatsache, dass es einen sachlogischen Zusammenhang zwischen den Messgrößen und den zu bestimmenden Parametern gibt. Diese Beziehung wird durch das funktionale Modell hergestellt. Können die Beobachtungen als die „wahren“ Beobachtungen angesehen werden, kann das funktionale Modell wie folgt interpretiert werden:

$$\tilde{L}_i = f_i (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3, \dots, \tilde{X}_u) \quad (2.26)$$

Da es sich aber bei den Messgrößen um „tatsächliche“ Beobachtungen handelt, von denen jede um einen anderen Wert von der „wahren“ Beobachtung abweicht, und auch die Unbekannten nicht mit ihren wahren, sondern nur mit einem geschätzten Wert vorliegen, ist Gleichung 2.26 auf die tatsächlichen Verhältnisse anzupassen:

$$L_i + v_i = f_i (\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \dots, \hat{X}_u) \quad (2.27)$$

Je nach Art der Positionsbestimmung (vgl. Abschnitt 2.2) bilden die Beobachtungsgleichungen 2.3, 2.5 und 2.6 das Modell zwischen den Messgrößen und den gesuchten Unbekannten einer GNSS-Auswertung ab. Wie aus Gleichung 2.4 bzw. 2.7 ersichtlich, handelt es sich bei dem beschriebenen Modell aber um eine nichtlineare Beziehung, welche durch Linearisierung in eine lineare Beziehung zu wandeln ist. Hierfür bietet sich die Tayler-Reihenentwicklung an. Mit ihr kann ein Funktionswert f an einer Stelle $X^0 + x$ bestimmt werden, wenn die Funktion f^0 in X^0 bekannt ist und ein hinreichend gleichmäßiger Funktionsverlauf gewährleistet ist bzw. der Fortschritt x klein ist. Der gesuchte Funktionswert $f(X^0 + x)$ ergibt sich nach

$$f(X^0 + x) = f(X^0) + \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right)_{X=X^0} \cdot x + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \right)_{X=X^0} \cdot x^2 + \dots \quad (2.28)$$

Gemäß Gleichung 2.26 und mit Beschränkung von Gleichung 2.28 auf die Glieder 1. Ordnung ergibt sich nach der Erweiterung auf u Ableitungen für diesen mehrdimensionalen Fall die Darstellung

$$L_i + v_i = f_i (X_1^0, X_2^0, \dots, X_u^0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_1} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_2} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_u} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_u, \quad (2.29)$$

wobei die partiellen Ableitungen in Gleichung 2.29 durch

$$a_{ij} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j} \right)_{X^0}, \quad (2.30)$$

abgekürzt werden können und zusammen die Koeffizienten- bzw. Design-Matrix \mathbf{A} bilden:

$$\mathbf{A}_{n,u} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1u} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nu} \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Mit

$$L_i^0 = f_i (X_1^0, X_2^0, X_3^0, \dots, X_u^0) \quad (2.32)$$

können die Näherungswerte \mathbf{L}^0 der Messgrößen anhand der Näherungswerte der Unbekannten \mathbf{X}^0 ermittelt und damit der Vektor der verkürzten Beobachtungen \mathbf{l} nach

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}^0 \quad (2.33)$$

berechnet werden.

Die Zuschläge zu den Näherungswerten der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ lassen sich mit Hilfe der endgültigen, linearisierten Form des funktionalen Modells ermitteln:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}. \quad (2.34)$$

Die ausgeglichenen Unbekannten $\hat{\mathbf{X}}$ ergeben sich abschließend aus den Näherungswerten der Unbekannten \mathbf{X}^0 und den Zuschlägen zu den Näherungswerten der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ nach

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}}. \quad (2.35)$$

2.5.2 Stochastisches Modell

Neben dem im Abschnitt 2.5.1 eingeführten und linearisierten, sachlogischen Zusammenhang zwischen den Messgrößen und den Unbekannten sind außerdem die Genauigkeiten der eingeführten

Beobachtungen zu berücksichtigen. Diesem zweiten wichtigen Aspekt der Parameterschätzung trägt das stochastische Modell Rechnung.

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung in diesem Abschnitt dient die Kovarianzmatrix Σ_{ll} :

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

deren Hauptdiagonalen-Elemente in Form von Varianzen σ_i^2 die Genauigkeiten der Beobachtungen L_i wiedergeben. Die weiteren Elemente bilden die Kovarianzen $\sigma_{i,j}^2$ ab, die sich aus den Korrelationen (Korrelationskoeffizient $\rho_{i,j}$) zwischen den einzelnen Beobachtungen ergeben. In Falle des Verzichtes von Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen folgt aus Gleichung 2.36

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Normalerweise wird nur mit Schätzwerten bzw. Näherungen für die Varianzen statt mit den eigentlichen Varianzen gearbeitet, sodass Gleichung 2.37 in

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll} \quad (2.38)$$

zerlegt werden kann, wobei \mathbf{Q}_{ll} die Kofaktormatrix darstellt und σ_0^2 die Varianz der Gewichtseinheit wiedergibt.

Aus der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} ergeben sich letztendlich die Gewichte der einzelnen Beobachtungen, welche noch zur Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate fehlen. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P} berechnet sich aus der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} durch Inversion derselbigen:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{Q}_{ll})^{-1}. \quad (2.39)$$

Zur Veranschaulichung der Gewichte p_{ii} hilft

$$\mathbf{P} = (\mathbf{Q}_{ll})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2/\sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_0^2/\sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_0^2/\sigma_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & & & 0 \\ & p_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Mit der oft benutzten Annahme, dass $\sigma_0^2 = 1$ ist, ergibt sich nach Gleichung 2.40 für die Beobachtung L_i das Gewicht $p_{ii} = 1/\sigma_i^2$, d. h. Beobachtungen mit einer großen Standardabweichung σ_i besitzen nur ein geringes Gewicht p_{ii} und umgekehrt.

2.5.3 Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate

In den beiden vorangegangenen Unterabschnitten wurden alle Sachverhalte, die zur Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate notwendig sind, eingeführt. Das linearisierte Modell in Form der Koeffizientenmatrix \mathbf{A} beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen den Messgrößen \mathbf{L} und den ausgeglichenen Unbekannten $\hat{\mathbf{X}}$. Die Angaben zu den Genauigkeiten der einzelnen Beobachtungen sind Bestandteil der Gewichtsmatrix \mathbf{P} .

Aufbauend auf der Ausgleichungsforderung, dass die Summe der Quadrate der Verbesserungen minimal sein soll, gilt der Grundsatz:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min. \quad (2.41)$$

Stellt man Gleichung 2.34 nach \mathbf{v} um und setzt das Ergebnis dieser Umstellung in Gleichung 2.41 ein, folgt:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = (\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}^T - \mathbf{l}^T) \mathbf{P} (\mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}) \rightarrow \min. \quad (2.42)$$

Zur Bestimmung des Minimums einer Funktion muss deren erste Ableitung zu Null gesetzt werden. Den weiteren Ausführungen von Niemeier (2008) folgend, ergibt sich schlussendlich eine Formel, deren Ergebnis der Vektor $\hat{\mathbf{x}}$ mit den Zuschlägen zu den Näherungswerten der Unbekannten ist:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}). \quad (2.43)$$

Führt man zum einen die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} mit

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (2.44)$$

und zum anderen das Absolutglied des Normalgleichungssystems \mathbf{n} mit

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (2.45)$$

ein, vereinfacht sich die rechte Seite von Gleichung 2.43 zu

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n}. \quad (2.46)$$

Zudem lässt sich durch Inversion der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} die Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} , die zentraler Bestandteil der Berechnung von Genauigkeitsmaßen ist, bestimmen:

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{N}^{-1}. \quad (2.47)$$

Abschließend kann der Vektor der Verbesserungen \mathbf{v} mittels der schon erwähnten Umstellung von Gleichung 2.34 berechnet werden:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}. \quad (2.48)$$

Das Genauigkeitsmaß der Ausgleichung im Allgemeinen und die Genauigkeiten der geschätzten Unbekannten im Speziellen stehen in Relation mit der Verbesserungsquadratsumme Ω und dem Freiheitsgrad f der Ausgleichung. Letzterer ergibt sich aus der Differenz der Anzahl an Gesamtbeobachtungen n und der Anzahl an Unbekannten u :

$$f = n - u. \quad (2.49)$$

Die Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 als Genauigkeitsmaß der Ausgleichung basiert auf der Verbesserungsquadratsumme Ω und dem Freiheitsgrad f nach

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u} = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{f} = \frac{\Omega}{f}. \quad (2.50)$$

Durch Multiplikation der Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 mit der Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} ergibt sich die Kovarianzmatrix der Unbekannten Σ_{xx} , deren Hauptdiagonalelemente die Varianzen der ausgeglichenen Unbekannten beinhalten:

$$\Sigma_{xx} = s_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{xx}. \quad (2.51)$$

Sowohl die Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 als auch die Varianzen der ausgeglichenen Unbekannten $\Sigma_{xx_{ii}}$ können aber auch in Form von Standardabweichungen¹² dargestellt werden. Für die empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit gilt:

$$s_0 = \sqrt{s_0^2}. \quad (2.52)$$

2.5.4 Eliminierung von Parametern

Die Eliminierung von Unbekannten im Zuge des Ausgleichungsprozesses verfolgt das Ziel, alle nicht relevanten Unbekannten (Anzahl q) vor der Schätzung der primären Unbekannten (Anzahl p) zu entfernen. Bei einer PPP-Auswertung sind dies hauptsächlich die systemspezifischen Empfängeruhrabweichungen, sodass im Falle einer gemischten GPS/GLONASS-Auswertung $q = 2$ ist¹³.

Ausgangspunkt der blockweisen Reduktion, auch Blockzerlegung genannt, sind die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} und der gekürzte Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$, die beide jeweils in zwei Submatrizen und -vektoren unterteilt werden können

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.53)$$

¹²Die Standardabweichung ist definiert als die positive Wurzel aus der Varianz.

¹³Im ersten Berechnungsschritt einer kinematischen GPS/GLONASS-PPP-Auswertung gehören auch die Zuschläge zu den Näherungskordinaten zu den zu eliminierenden Unbekannten.

wobei \mathbf{A}_1 und $\hat{\mathbf{x}}_1$ die Informationen der primären Unbekannten enthalten. Wird Gleichung 2.53 in Gleichung 2.46 eingesetzt

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

und Gleichung 2.54 nach \mathbf{n}_1 aufgelöst, folgt

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_1 &= \mathbf{N}_{11}\hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_2 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_{21}\hat{\mathbf{x}}_1 \\ &= (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21})\hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_2 \\ (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21})\hat{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{n}_1 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_2 \\ \bar{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{x}}_1 &= \bar{\mathbf{n}}. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Aus dem reduzierten Modell (Gleichung 2.55) lassen sich sowohl die Kofaktormatrix $\bar{\mathbf{Q}}_{11}$

$$\bar{\mathbf{Q}}_{11} = (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21})^{-1} = \bar{\mathbf{N}}^{-1} \quad (2.56)$$

als auch der Vektor der ausgeglichenen Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}_1$

$$\hat{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{N}}^{-1}\bar{\mathbf{n}} = \bar{\mathbf{Q}}_{11}\bar{\mathbf{n}} \quad (2.57)$$

ableiten.

Innerhalb des reduzierten Modells bestimmen sich die reduzierte Koeffizientenmatrix $\bar{\mathbf{A}}$

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21} \quad (2.58)$$

sowie der reduzierte Beobachtungsvektor $\bar{\mathbf{l}}$

$$\bar{\mathbf{l}} = \mathbf{l} - \mathbf{A}_2\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_2 \quad (2.59)$$

und lassen sich abschließend zur Berechnung der Verbesserungen \mathbf{v} heranziehen:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}_1 - \bar{\mathbf{l}}. \quad (2.60)$$

Die Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 als Genauigkeitsmaß der Ausgleichung definiert sich nach Gleichung 2.50. Die Varianzen der ausgeglichenen Unbekannten ergeben sich entsprechend Gleichung 2.51 durch Multiplikation der Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 mit der Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} .

2.5.5 Sequentielle Ausgleichung

Von ebenso wichtiger Bedeutung wie die im Abschnitt 2.5.4 beschriebene Eliminierung von Parametern ist die Möglichkeit, Beobachtungen nicht im vollen Umfang einer Ausgleichung unterziehen zu

müssen, da es sich dabei in der Regel um eine enorme Datenmenge handelt. Wesentlich effizienter ist die sequentielle Ausgleichung, die eine sukzessive Verarbeitung der Beobachtungen ermöglicht, ohne dass dabei die Informationen der schon prozessierten Daten verloren gehen.

Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen in diesem Abschnitt sind das funktionale Modell nach Gleichung 2.34 und das stochastische Modell nach Gleichung 2.38. Des weiteren wird angenommen, dass die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} nach Gleichung 2.44 und das Absolutglied des Normalgleichungssystems \mathbf{n} nach Gleichung 2.45 auf der Basis bereits prozessierter Beobachtungen vorliegen. Das beschriebene Modell soll nun um zusätzliche Beobachtungen (Beobachtungsvektor \mathbf{l}_z) erweitert werden, wobei die Anzahl der auszugleichenden Unbekannten unverändert bleibt. Die Erweiterung des Modells wird durch

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l} \\ \mathbf{l}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_z \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \quad (2.61)$$

sowie

$$\Sigma_{ll,z} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll,z} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{ll} & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_{zz} \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{zz}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

beschrieben und führt zur Aufaddierung der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} bzw. des Absolutgliedes des Normalgleichungssystems \mathbf{n} nach

$$\mathbf{N}_{zz}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T & \mathbf{A}_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_z \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P}_{zz} \mathbf{A}_z = \mathbf{N} + \mathbf{N}_{zz} \quad (2.63)$$

und

$$\mathbf{n}_z^* = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T & \mathbf{A}_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{l} \\ \mathbf{l}_z \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P}_{zz} \mathbf{l}_z = \mathbf{n} + \mathbf{n}_z. \quad (2.64)$$

Folglich ergibt sich der gekürzte Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}_z^*$ zu

$$\hat{\mathbf{x}}_z^* = (\mathbf{N}_{zz}^*)^{-1} \mathbf{n}_z^*. \quad (2.65)$$

2.5.6 Varianzkomponentenschätzung

Entsprechend den bisherigen Betrachtungen des funktionalen Modells nach Gleichung 2.34 und des funktionalen Modells nach Gleichung 2.38 wird sowohl eine (einzige) Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 angenommen als auch nur eine (einzige) empirische Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 bestimmt. Dieser Ansatz kann zu Problemen führen, wenn es sich bei den Messgrößen um Beobachtungen unterschiedlicher Beobachtungsgruppen (z. B. Code, Phase; GPS, GLONASS) handelt.

Abhilfe schafft in solchen Fällen die Varianzkomponentenschätzung, die mögliche Genauigkeitsdifferenzen der einzelnen Beobachtungsgruppen i durch die Einführung von Varianzkomponenten $\sigma_{0,i}^2$ berücksichtigt:

$$\Sigma_{ll} = \sum_{i=1}^k \Sigma_i = \sigma_{0,1}^2 \mathbf{Q}_1 + \sigma_{0,2}^2 \mathbf{Q}_2 + \cdots + \sigma_{0,k}^2 \mathbf{Q}_k. \quad (2.66)$$

Mit der Kovarianzmatrix Σ_{ll} aus Gleichung 2.66 wird eine Ausgleichung nach Abschnitt 2.5.3 gerechnet. Ein Ergebnis dieser Ausgleichung ist die Kofaktormatrix der Verbesserungen \mathbf{Q}_{xx} , mit deren Hilfe sich die Redundanzmatrix \mathbf{R} bestimmen lässt:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P} \\ &= (\mathbf{Q}_{ll} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T) \mathbf{P} \\ &= \mathbf{I} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \\ &= \mathbf{I} - \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \end{aligned} \quad (2.67)$$

Die Redundanzmatrix \mathbf{R} enthält die Redundanzanteile r_j aller Beobachtungen. Der Redundanzanteil einer Beobachtung beschreibt den Anteil einer Beobachtung an der Gesamtredundanz¹⁴. Die Redundanzanteile r_j jeder Beobachtungsgruppe i werden zu einem Redundanzwert r_i aufaddiert und in Relation zur Verbesserungsquadratsumme Ω_i gesetzt:

$$s_{0,i}^2 = \frac{\Omega_i}{r_i} = \frac{\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i}{r_i}. \quad (2.68)$$

Die geschätzten Varianzkomponenten $s_{0,i}^2$ sind abschließend einem Test zu unterziehen. Fällt dieser negativ aus, kommt es zur Anpassung der Varianzkomponenten $\sigma_{0,i}^2$ mit

$$\sigma_{0,i}^2 = \sigma_{0,i}^2 \cdot s_{0,i}^2. \quad (2.69)$$

Der beschriebene Prozess erfolgt iterativ, solange bis der Test ein positives Ergebnis hat. Sowohl die Unbekannten als auch die Standardabweichungen sollten nun realistischer sein als das Ergebnis ohne Varianzkomponentenschätzung.

2.6 Statistik

Die im Abschnitt 2.5.3 eingeführten Varianzen, d. h. die Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 (vgl. Gleichung 2.50) und die Varianzen der ausgeglichenen Unbekannten $\Sigma_{xx_{ii}}$ (vgl. Gleichung 2.51), bzw. die daraus abgeleiteten Standardabweichungen sind Genauigkeitsmaße, die Angaben zur inneren Genauigkeit einer einzelnen GNSS-Auswertung darstellen. Wie aus Gleichung 2.50 ersichtlich, stehen die abgeleiteten Standardabweichungen in engen Zusammenhang mit der Anzahl an Gesamtbeobachtungen n . Unter Annahme, dass die Anzahl an Unbekannten u im weitesten Sinne gleich ist,

¹⁴Die Redundanz entspricht der Überbestimmung, die ein Gleichungssystem besitzt. Mit Gleichung 2.49 wurde für die Überbestimmung der Freiheitsgrad f eingeführt.

folgt, dass PPP-Auswertungen mit weniger Beobachtungen im Vergleich zu PPP-Auswertungen mit mehr Beobachtungen zumeist schlechtere, d. h. größere Standardabweichungen besitzen. Eine Identifikation von Ausreißern ist dennoch möglich, aufgrund der genannten Relation aber nicht empfehlenswert.

Von größerer Bedeutung ist allerdings die äußere Genauigkeit. Hierzu werden die Ergebnisse von PPP-Auswertungen mit Sollwerten verglichen. Die aus den Differenzen abgeleiteten Genauigkeitsmaße geben die äußere Genauigkeit einer oder mehrerer PPP-Auswertungen an. Zur Berechnung derartiger Angaben werden statistische Methoden verwendet, die auf der Mittelwertberechnung (L2-Norm-Schätzung) beruhen. Zudem spielt die Identifikation von Ausreißern (L1-Norm-Schätzung) eine entscheidende Rolle.

Berechnung von Standardabweichungen

Die Abschätzung von Genauigkeiten basiert auf der Verwendung von Abweichungen, d. h. den Differenzen zwischen einer vorgegebenen Größe (Sollwert) und den Beobachtungen \mathbf{l} . In den meisten Fällen ist der wahre Wert \tilde{X} einer Zufallsgröße unbekannt, sodass der „beste“ Wert für eine Zufallsvariable zunächst zu bestimmen ist. Vielfach wird das arithmetische Mittel (Mittelwert) \bar{x} verwendet, um den „besten“ Wert zu beschreiben. Der Mittelwert einer Messreihe mit Beobachtungsgrößen l_i ergibt sich nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i = \frac{1}{n} (l_1 + l_2 + \dots + l_n). \quad (2.70)$$

Bei den Abweichungen unterscheidet man zwischen wahren Residuen (wahren Abweichungen) ϵ und Verbesserungen v . Von wahren Residuen ϵ spricht man, wenn der wahre Wert \tilde{X} einer Zufallsgröße bekannt ist:

$$\epsilon_i = l_i - \tilde{X}. \quad (2.71)$$

Liegt stattdessen lediglich der Mittelwert \bar{x} vor, ergeben sich Verbesserungen v :

$$v_i = \bar{x} - l_i. \quad (2.72)$$

Die genannte Differenzierung zwischen wahren Residuen ϵ bzw. Verbesserungen v und der Tatsache, dass im Falle eines unbekanntes wahren Wertes mit dem arithmetische Mittel \bar{x} ein Kennwert aus den Beobachtungen vorab bestimmt wurde, hat zur Folge, dass die Berechnung der empirischen Standardabweichung s_0 mit unterschiedlichen Freiheitsgraden f erfolgt. Einerseits ist die Anzahl an Freiheitsgraden f gleich der Anzahl an Beobachtungen n und andererseits ist $f = n - 1$. Bei Vorliegen eines wahren Wertes \tilde{X} gilt

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}, \quad (2.73)$$

wobei s_0 dann oftmals als *Root Mean Square* (RMS) bezeichnet wird, und bei Vorliegen von Verbesserungen v gilt

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}. \quad (2.74)$$

Zeigen die Differenzen zwischen dem Sollwert und den Beobachtungen I eine systematische Abweichung auf, so sind sie zunächst um diese zu korrigieren. Die Berechnung der empirischen Standardabweichung s_0 erfolgt dann nach Gleichung 2.74. Zugleich ist die systematische Abweichung als weitere Kenngröße mit anzugeben.

Identifikation von Ausreißern

Die Mittelwertberechnung sowie der Vergleich mit Sollwerten und darauf aufbauend die Berechnung von Genauigkeitsmaßen wie der empirischen Standardabweichung s_0 sollten mit Beobachtungen einhergehen, die frei von groben Fehlern (sowie systematischen Abweichungen) sind und folglich nur noch von zufälligen Abweichungen beeinflusst sind. Vor allem das Aufdecken von groben Fehlern spielt bei der Analyse von Daten eine entscheidende Rolle. Hierbei helfen robuste Verfahren der Parameterschätzung. Eine Einführung in die Thematik der robusten Parameterschätzung (Eigenschaften, Verlust-, Einfluss- und Gewichtsfunktion) sowie einen Überblick über die verschiedenen Modellansätze (L-, LS- und M-Schätzer) gibt Niemeier (2008). Im Folgenden wird sich nur auf die Gruppe der LS-Norm-Schätzer beschränkt.

Der bekannteste LS-Norm-Schätzer ist die Methode der kleinsten Quadrate (MkQ), die auch als L2-Norm-Schätzung bezeichnet wird (vgl. Abschnitt 2.5.3). Eine Vielzahl geodätischer Ausgleichsaufgaben (u. a. PPP-Auswertungen, Mittelwertberechnung) sind mittels MkQ durchführbar. Die Parameterschätzung erfolgt dabei unter der Maßgabe, dass die Summe der Quadrate der Verbesserungen minimal sein soll. MkQ hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: ihr Bruchpunkt¹⁵ liegt bei 0%, d. h. die Parameterschätzung ist nicht robust. Schon ein einziger grober Fehler beeinflusst das Ergebnis der Parameterschätzung in negativer Weise.

Eine Alternative stellen Schätzungen nach der L1-Norm dar. Sie haben im Vergleich zu den L2-Norm-Schätzungen den Vorteil, dass sie gegenüber Ausreißern robust sind; gleichzeitig aber auch den Nachteil, dass ihr Ergebnis nicht der optimalen Lösung¹⁶ entspricht. Durch die Kombination von L2- und L1-Norm-Schätzungen können die Vorteile beider LS-Norm-Schätzer genutzt werden, um den Bruchpunkt von Ausgleichungen nach MkQ auf wenige % zu erhöhen (Niemeier 2008).

¹⁵Der Bruchpunkt eines Schätzverfahrens ist der Prozentsatz von fehlerhaften Daten beliebiger Größe, der erlaubt ist, bevor das Schätzverfahren falsche Werte liefert bzw. zusammenbricht (Niemeier 2008).

¹⁶Als optimale Lösung einer Parameterschätzung gilt das Ergebnis einer L2-Norm-Schätzung, d. h. der Ergebnis der Methode der kleinsten Quadrate (Niemeier 2008).

3 Precise Point Positioning (PPP)

3.1 Allgemein

Globale Satellitennavigationssysteme wie GPS und GLONASS ermöglichen eine satellitengestützte Positionsbestimmung, wobei in der ursprünglichen Konzeption für den zivilen Nutzer Genauigkeiten auf Meter-Niveau vorgesehen waren. Vor allem der Übergang von der absoluten Positionierung mit den Codebeobachtungen als den primären Messgrößen (vgl. Abschnitt 2.2.1) hin zur relativen Positionierung mit den Phasenbeobachtungen als den primären Messgrößen (vgl. Abschnitt 2.2.3) brachte eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 100. Damit war erstmals eine satellitengestützte Positionsbestimmung mit Genauigkeiten auf dem Niveau von Zentimetern und besser möglich. Allerdings sind bei der differenziellen Positionierung zusätzlich zu den Beobachtungen der Roverstation auch simultane Beobachtungen von mindestens einer Referenzstation notwendig. Im Gegensatz zu den unbekanntem Koordinaten der Roverstation sind deren Koordinaten bekannt. Eine weitere Einschränkung der relativen Positionierung stellt die Distanz zwischen Referenz- und Roverstation dar. Je weiter die beiden Stationen voneinander entfernt sind, desto unterschiedlicher sind die auf die Beobachtungen wirkenden Messabweichungen und umso größer sind die verbleibenden Restabweichungen, was sich wiederum negativ auf die Mehrdeutigkeitsfestsetzung auswirkt. Die Länge der Basislinie sollte nicht mehr als wenige 10er Kilometer betragen.

Diesen Nachteil umgeht die Auswertetechnik des *Precise Point Positioning* (PPP) (Zumberge u. a. 1997), die bereits im Abschnitt 2.2.2 kurz betrachtet wurde. Gleichwohl werden bei dieser Art der absoluten Positionierung Phasenbeobachtungen als primäre Messgröße genutzt und können vergleichbare Positionsgenauigkeiten wie bei der relativen Positionierung erzielt werden. Letzteres setzt neben der Korrektur und Modellierung von Messabweichungen, die auch bei der relativen Positionsbestimmung zu berücksichtigen sind, auch die Korrektur und Modellierung von Messabweichungen voraus, die bei der differenziellen Positionsbestimmung aufgrund ihres gleichen oder ähnlichen Einflusses auf beide Stationen unberücksichtigt bleiben. Von ebenso großem Interesse sind kontinuierliche Zweifrequenz-Beobachtungen sowie eine gute Verteilung der Satelliten. Die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten spielt gleichermaßen eine wichtige Rolle, da die reell-wertigen Mehrdeutigkeiten nicht nur untereinander, sondern auch mit anderen Unbekannten korreliert sind. Erst festgesetzte Mehrdeutigkeiten erlauben eine schnelle Konvergenz der Koordinatenschätzung.

Nach dieser Einführung beschäftigt sich Abschnitt 3.2 mit den notwendigen Korrekturen und Modellierungen der Messabweichungen. Daran anschließend behandelt Abschnitt 3.3 das Ausgleichungsverfahren einer kombinierten GPS- und GLONASS-PPP-Auswertung. Die Mehrdeutigkeitslösung, d. h. die Festsetzung der reell-wertigen Mehrdeutigkeiten auf einen ganzzahligen Wert, bildet den Schwerpunkt von Abschnitt 3.4. Im letzten Abschnitt wird einerseits auf die Softwaremodule, die im Rahmen dieser Arbeit zur kombinierten GPS- und GLONASS-PPP-Auswertung verwendet wurden, eingegangen und andererseits ein abschließender Überblick über den Berechnungsablauf gegeben.

3.2 Korrekturen

3.2.1 *International GNSS Service* (IGS)

Satellitenbahn- und Satellitenuhrabweichungen (und atmosphärische Einflüsse) sind die limitierenden Faktoren hinsichtlich der zu erwartenden Positionsgenauigkeit mit PPP (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Entsprechend konnte PPP erst entwickelt und in der Praxis eingesetzt werden, als die notwendigen Standards im Hinblick auf präzise Ephemeriden geschaffen waren. Präzise Orbit- und Uhrkorrekturen und eine Vielzahl weiterer Produkte mit höchster Genauigkeit zur Verfügung zu stellen, ist das Ziel des *International GNSS Service* (IGS) (Dow u. a. 2009).

Der IGS ist eine Gemeinschaft von mehr als 200 Organisationen und Behörden, die weltweit mehr als 400 Referenzstationen betreiben. Die im *Receiver INdependent EXchange* (RINEX)-Format (Gurtner und Estey 2007) vorliegenden Beobachtungen dieser Stationen werden von knapp einem Dutzend Analysezentren (*Analysis Center*, AC) ausgewertet. Der Einsatz verschiedener Software-Produkte einerseits und zum Teil unterschiedliche Strategien (z. B. Art der Differenzbildung, Elevationswinkel, Troposphäre, usw.) andererseits gewährleisten eine unabhängige Prozessierung der Beobachtungen. Daraus resultieren eigenständige und AC-spezifische Produkte, die abschließend gewichtet kombiniert werden und schlussendlich jedem GNSS-Nutzer als präzise IGS-Produkte kostenfrei zur Verfügung stehen.

Bei den Produkten wird zwischen Ephemeriden, Stationskoordinaten, Erdrotationsparametern und atmosphärischen Parametern klassifiziert. Sie liegen in unterschiedlichen Genauigkeiten und erst nach einer zeitlichen Verzögerung, die von wenigen Stunden (*ultra-rapid*) bis zu zwei Wochen (*final*) reicht, vor. Eine Zusammenfassung über die IGS-Produkte geben Dow u. a. (2009). Einen Überblick über die für eine PPP-Auswertung wichtigsten Produkte verschaffen die Tabellen 3.1 (GPS), 3.2 (GLONASS) und 3.3 (Ionosphäre). Zum Vergleich sind im Fall von GPS außerdem die Kennzahlen der *Broadcast*-Ephemeriden mit angegeben.

3.2.2 Korrekturen am Satelliten

Orbit und Uhr

Die am weitesten verbreiteten und meistgenutzten Ephemeriden sind die *Broadcast*-Ephemeriden, die Teil der Navigationsnachricht eines jeden Satelliten sind. Sie enthalten sowohl Orbit- als auch Satellitenuhrinformationen, die vom Kontrollsegment anhand aktueller Beobachtungsdaten der Monitorstationen durch Prädiktion in die Zukunft vorab berechnet und anschließend zu den Satelliten gesendet werden (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Die Uhrparameter werden sowohl für GPS- als auch GLONASS-Satelliten durch Koeffizienten eines Polynoms 2. Grades abgebildet. Hinsichtlich der Darstellung der Bahndaten gibt es Unterschiede zwischen beiden GNSS. Entweder stehen die Bahndaten in Form von Keplerelementen sowie deren zeitlichen Variationen (z. B. GPS) oder in Form von gleichabständigen Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren (z. B. GLONASS) zur Verfügung (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Aufgrund der abweichenden Darstellung gibt es für jedes der beiden GNSS eine eigene Navigationsdatei (Gurtner und Estey 2007). Die Genauigkeiten der aktuellen *Broadcast*-Orbitinformationen werden für GPS mit 1 m (vgl. Tabelle 3.1) bzw. für GLONASS mit 1,6 m (Revnivkyh 2012) angegeben.

Tab. 3.1: IGS-Produkte für GPS (IGS 2015)

	Typ	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Veröffentlichung	Auflösung
<i>Broadcast</i>	Orbits	≈ 100 cm	Echtzeit	—	2 h
	Sat.-Uhr	$\approx 2,5$ ns			
<i>ultra-rapid</i> (<i>predicted half</i>)	Orbits	≈ 5 cm	Echtzeit	3 / 9 / 15 / 21 UTC	15 min
	Sat.-Uhr	$\approx 1,5$ ns			
<i>ultra-rapid</i> (<i>observed half</i>)	Orbits	≈ 3 cm	3-9 h	3 / 9 / 15 / 21 UTC	15 min
	Sat.-Uhr	$\approx 0,05$ ns			
<i>rapid</i>	Orbits	$\approx 2,5$ cm	17-41 h	17 Uhr UTC	15 min
	Sat.-Uhr	$\approx 0,025$ ns			5 min
<i>final</i>	Orbits	$\approx 2,5$ cm	12-18 d	jeden	15 min
	Sat.-Uhr	$\approx 0,02$ ns		Donnerstag	5 s - 5 min

Tab. 3.2: IGS-Produkte für GLONASS (IGS 2015)

	Typ	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Veröffentlichung	Auflösung
<i>final</i>	Orbits	≈ 3 cm	12-18 d	jeden Donnerstag	15 min

Tab. 3.3: IGS-Produkte für Ionosphäre (IGS 2015)

	Typ	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Veröffentlichung	Auflösung
<i>rapid</i>	2-9 TECU	< 24 h	täglich	2 h; $5^\circ \times 2,5^\circ$ (Länge x Breite)	
<i>final</i>	2-8 TECU	11 d	wöchentlich	2 h; $5^\circ \times 2,5^\circ$ (Länge x Breite)	

Ephemeriden mit deutlich besserer Genauigkeit werden seit einigen Jahren vom IGS angeboten (vgl. Tabelle 3.1 und 3.2). Die Genauigkeit der Orbitkorrekturen ist im Vergleich zu den *Broadcast*-Ephemeriden um den Faktor 40 besser (GPS: $\approx 2,5$ cm, GLONASS: ≈ 3 cm). Aufgrund der guten Modellierung von Satellitenbahnen erfahren die *final*- gegenüber den *ultra-rapid* Orbits nur eine geringfügige Genauigkeitssteigerung. Eine deutliche Genauigkeitssteigerung ist hingegen bei den wesentlich schlechter zu modellierenden Uhrkorrekturen zu erkennen. Uhrkorrekturen vom Typ *final* besitzen eine Genauigkeit von unter 1 cm, während die Standardabweichung der in den *Broadcast*-Ephemeriden enthaltenen Uhrkorrekturen bei über 70 cm liegt.

Zur Speicherung der präzisen Ephemeriden werden zwei Formate genutzt. Orbitkorrekturen stehen lediglich im SP3-Format (Hilla 2010) und mit einem Intervall von 15 min zur Verfügung. In Abhängigkeit der Auflösung werden Uhrkorrekturen sowohl im SP3-Format als auch in einem speziell für Uhrkorrekturen entwickelten RINEX-Format, dem RINEX-CLK (Ray und Gurtner 2010), abgespeichert. RINEX-CLK kann beliebige Epochenabstände verarbeiten. Der IGS und die AC berechnen präzise Uhrkorrekturen mit Intervallen zwischen 5 s und 15 min. Die präzisen Uhrkorrekturen vom Typ *final* haben entweder ein Intervall von 30 s oder 5 min. Eine Interpolation sowohl der Orbitals als auch der Uhrkorrekturen ist notwendig, sobald die Beobachtungsdaten ein kleineres Intervall als die Korrekturen besitzen. Hierbei spielt die Stabilität der Satellitenuhren eine wichtige Rolle (Heßelbarth und Wanninger 2008).

Wie aus Tabelle 3.2 ersichtlich, stehen für GLONASS zum jetzigen Zeitpunkt lediglich Orbitkorrekturen zur Verfügung. Gegenwärtig berechnen fünf ACs präzise GLONASS-Uhrkorrekturen: CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*, Schweiz/Deutschland), ESA/ESOC (*European Space Agency/European Space Operations Centre*, Deutschland), GFZ (Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Deutschland), IAC (*Information and Analysis Center of Navigation*, Russland) und NRCan (*Natural Resources Canada*, Kanada). Mit Ausnahme der GLONASS-Uhrprodukte von CODE sind die GLONASS-Uhrkorrekturen der anderen ACs für jedermann frei zugänglich. Obwohl mit den Lösungen von mehr als drei ACs eine Kombination möglich wäre, stehen keine offiziellen GLONASS-Uhrkorrekturen des IGS zur Verfügung. Als Grund sind normalerweise nur Unstimmigkeiten zwischen den Lösungen der fünf AC denkbar. Als eine mögliche Ursache für die Diskrepanz haben Dach u. a. (2012) die Nichtberücksichtigung des *Inter-Frequency Biases* (IFB) identifiziert. Demnach reduzieren sich die Differenzen zwischen den verschiedenen Lösungen erheblich, wenn der IFB bei der Berechnung der Uhrkorrekturen als zusätzliche Unbekannte Berücksichtigung findet.

Es ist aber ebenso möglich, die *Broadcast*-Ephemeriden eigenständig oder in Verbindung mit SBAS-Korrekturen innerhalb einer PPP-Auswertung zu verwenden. SBAS-Korrekturen besitzen zwar einerseits nicht die hohe Genauigkeit der IGS-Produkte und kommen daher normalerweise für PPP nicht in Betracht, andererseits können mit ihnen dennoch Positionsgenauigkeiten auf dem Niveau von wenigen Dezimetern und besser erreicht werden (Rho und Langley 2007; Heßelbarth und Wanninger 2013). Im Gegensatz zu den zuvor genannten IGS-Produkten stehen SBAS-Korrekturen in Echtzeit zur Verfügung. Vergleichbar den IGS-Produkten stellt die Mehrheit der SBAS zum jetzigen Zeitpunkt nur Korrekturen für GPS bereit. Korrekturen sowohl für GPS als auch für GLONASS stehen lediglich vom russischen *System for Differential Correction and Monitoring* (SDMC) zur Verfügung. Abhängig vom SBAS gelten die Bahn- und Satellitenuhrinformationen nur für ein bestimmtes Servicegebiet (Europa, Indien, Japan, Russland und Nordamerika), sodass derartige Berechnungen nur mit den Beobachtungsdaten einiger weniger Regionen möglich sind.

Der Referenzpunkt im Satelliten, auf den sich die Orbitkorrekturen beziehen, stellt neben den Differenzen in den erreichbaren Positionsgenauigkeiten einen weiteren wesentlichen Unterschied zwischen den IGS-Produkten und den *Broadcast*-Ephemeriden dar. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Verwendung der Antennenphasenzentrumskorrekturen aus.

Antennenphasenzentrum

Innerhalb eines Satelliten gibt es zwei Bezugspunkte (vgl. Abschnitt 2.3.1): zum einen das Massenzentrum des Satelliten und zum anderen das (mittlere) Phasenzentrum der Satellitenantenne. Der Phasenzentrumsoffset (PZO) ist die Differenz zwischen beiden Bezugspunkten. Die Abweichung des

tatsächlichen vom mittleren Phasenzentrum wird durch nadir- und azimutabhängige Phasenzentrumsvariationen (PZV) wiedergegeben. Zusammen bilden sie die Phasenzentrumskorrekturen. Zur Speicherung und Verarbeitung der block- oder satellitenspezifischen Phasenzentrumskorrekturen wird eine Antennenkorrektionsdatei genutzt. Hierfür wurde das *ANTenna EXchange* (ANTEX)-Format (Rothacher und Schmid 2010) entwickelt.

Im Zusammenhang mit der Umstellung des IGS auf absolute Phasenzentrumskorrekturen für Empfangsantennen im November 2006 war es erstmals möglich, konsistente Phasenzentrumskorrekturen für Satellitenantennen zu bestimmen. Schmid u. a. (2007) berechneten für GPS-Satelliten blockspezifische und nadirabhängige PZVs sowie satellitenspezifische PZO in z-Richtung und führten diese zusammen mit den aus den Herstellerangaben entnommenen Werten für die x- und y-Komponente des PZO ein. Dach u. a. (2011) bestimmten Phasenzentrumskorrekturen für GLONASS-Satelliten. Weitere Informationen hierzu finden sich in Rothacher und Schmid (2010). Probleme bezüglich Phasenzentrumskorrekturen für Satellitenantennen ergeben sich bei Neustarts von Satelliten und im Fall von signifikanten Unterschieden der Phasenzentrumskorrekturen eines Satelliten gegenüber den blockspezifischen Werten.

Innerhalb einer PPP-Auswertung sind Korrekturen für das Antennenphasenzentrum der Satelliten stets in Abhängigkeit von den verwendeten Orbitkorrekturen zu berücksichtigen. Da es sich beim Phasenzentrum bereits um den Bezugspunkt der *Broadcast*-Ephemeriden handelt, ist lediglich bei Verwendung der präzisen Ephemeriden eine Korrektur hinsichtlich des Referenzpunktes im Satelliten notwendig. Die Korrektur einer einzelnen Beobachtung erfolgt in zwei Teilschritten (Rothacher und Schmid 2010). Einerseits erfolgt der Übergang vom Massen- auf das mittlere Phasenzentrum. Andererseits sind die Beobachtungen durch das Anbringen der interpolierten PZVs zu korrigieren. Es ist darauf zu achten, dass der PZO und die PZVs der Frequenz verwendet werden, auf die sich die Beobachtung bezieht.

Phase Wind-Up

Die Verdrehung der Trägerphase resultiert aus der kontinuierlichen Rotation des Satelliten, die zu einer ständigen Änderung der Orientierung zwischen Satellit und Empfänger führt (vgl. Abschnitt 2.3.1). Auf eine Herleitung der Verdrehung der Trägerphase wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Literatur, u. a. Wu u. a. (1993) und Kouba (2009a), verwiesen. Eine Modellierung des Effektes ist insbesondere für solche Satelliten schwierig, die sich im Erdschatten befinden oder diesen soeben verlassen haben.

Befinden sich Satelliten im Erdschatten, führt dies zu Änderungen im Rotationsverhalten, da der Satellit versucht, seine Sonnensegel zur Sonne auszurichten (vgl. Abschnitt 2.3.1). Das Rotationsverhalten während des Erdschattendurchganges und danach ist vom GNSS und dem jeweiligen Satellitentyp abhängig. Vor allem die Beobachtungen von GPS-Satelliten vom Typ Block IIA und von GLONASS-M-Satelliten während des Erdschattendurchganges und den nachfolgenden 30 min sollten bei PPP-Auswertungen ausgeschlossen werden. Selbiges gilt nicht für die neueren GPS-Satelliten (Block IIR und Block IIR-M), da ihr Rotationsverhalten aufgrund des nicht vorhandenen horizontalen PZO keine Anomalien zeigt.

3.2.3 Atmosphärische Korrekturen

Ionosphäre

Entsprechend Abschnitt 2.3.2 stellt die Ionosphäre für GNSS-Signale ein dispersives Medium dar. Deshalb ist die ionosphärische Refraktion nicht nur frequenzabhängig, sondern für Code und Phase unterschiedlich. Bei Beschränkung auf den Effekt 1. Ordnung ergibt sich ein identischer, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen wirkender Einfluss.

Entscheidenden Anteil an der ionosphärischen Refraktion hat der absolute Elektronengehalt (*Total Electron Content*, TEC), der in TECU (1 TECU = 10^{16} Elektronen pro m^2) angegeben wird. In Tabelle 3.4 ist die nur vom TEC abhängige ionosphärische Laufzeitverzögerung 1. Ordnung für die Originalsignale L_1 und L_2 sowie für die *Widelane*- und *Narrowlane*-Linearkombination einander gegenübergestellt, die durch 1 TECU hervorgerufen wird. Es zeigt sich, dass zwischen dem Elektronengehalt und der Verfälschung der Originalsignale eine direkte Beziehung besteht. Entsprechend den Linearkoeffizienten α und β (vgl. Tabelle 2.2) ergibt sich für die *Widelane*- und *Narrowlane*-Linearkombination ein identischer, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen wirkender Einfluss.

Tab. 3.4: Ionosphärische Laufzeitverzögerung 1. Ordnung (mit $TEC = 1$ TECU)

Signal	Ionosphärische Laufzeitverzögerung	
	[m]	[cy]
L_1	0,163	0,855
L_2	0,268	1,098
L_{WL}	-0,209	-0,242
L_{NL}	0,209	1,953

Beobachtungen auf zwei Frequenzen vorausgesetzt, kann die genannte Frequenzabhängigkeit zum einen zur Bestimmung und zum anderen durch die Bildung des ionosphären-freien Signals L_{IF} zur praktisch vollständigen Beseitigung des ionosphärischen Einflusses genutzt werden. Von einer praktisch vollständigen Beseitigung der ionosphärischen Refraktion spricht man, weil die Linearkombination lediglich der Einfluss 1. Ordnung eliminiert. Dessen Anteil an der gesamten Messabweichung beträgt aber 99,8% (Bassiri und Hajj 1993). Die ionosphären-freien Linearkombination des Codes C_{IF} und der Phase Φ_{IF} lauten (beide in [m])

$$C_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot C_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot C_2 \quad (3.1a)$$

und

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_2. \quad (3.1b)$$

Der Vorteil der Zweifrequenz-Korrektur geht einher mit dem Nachteil, dass insbesondere die Mehrwegeausbreitung verstärkt wird. Zudem besitzt das ionosphären-freie Signal ein um den Faktor 3 erhöhtes Messrauschen.

Insbesondere zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten werden jedoch innerhalb einer PPP-Auswertung weitere Linearkombinationen, namentlich die *Widelane*-Linearkombination Φ_{WL} und die Melbourne-Wübbena-Linearkombination Φ_{MW} , genutzt (vgl. Abschnitt 2.4). Während auf die Melbourne-Wübbena-Linearkombination Φ_{MW} lediglich der Einfluss der höheren Ordnungen wirkt, unterliegt die *Widelane*-Linearkombination Φ_{WL} dem gesamten Einfluss, d. h. auch dem ionosphärischen Effekt 1. Ordnung. Zur Minimierung des ionosphärischen Effekts 1. Ordnung wird auf Modelle zurückgegriffen, die die Ionosphäre als zweidimensionales Ein-Schicht-Modell in Form einer Kugelschale beschreiben. Dabei wird angenommen, dass sich alle freien Elektronen (Elektronengehalt TEC) in einer infinitesimal dünnen Schicht befinden, deren Höhe der mittleren Ionosphärenhöhe entspricht. Auf der Basis solcher Modelle werden globale Ionosphärenkarten (*Global Ionospheric Maps*, GIM) erzeugt und im *IONosphere map EXchange* (IONEX)-Format (Schaer u. a. 1998b) abgespeichert. GIMs gehören zu dem vom IGS bereitgestellten Produkten (vgl. Tabelle 3.3). Sie stehen mit einer zeitlichen Auflösung von 2 h sowie einer räumlichen Auflösung von $5^\circ \times 2,5^\circ$ (Länge x Breite) zur Verfügung¹⁷.

Die zeitliche Variabilität des Elektronengehalts im Zeitraum von Januar 2000 bis Dezember 2013 veranschaulicht Abbildung 3.1. Neben dem mittleren TEC sind auch die beiden Extremwerte dargestellt. Insbesondere die täglichen Maxima lassen zusätzlich zum 11-jährigen Zyklus weitere Spektren, z. B. halbjährliche und jährliche Schwingungen, erkennen (Schaer u. a. 1998a). Der mittlere TEC schwankt zwischen 6 TECU im Sonnenfleckenminimum 2008 und 55 TECU im Sonnenfleckenmaximum 2001/2002. Im Sonnenfleckenmaximum 2001/2002 konnten L_1 -Beobachtungen aufgrund von ionosphärischer Refraktion um mehr als 150 cy verfälscht sein.

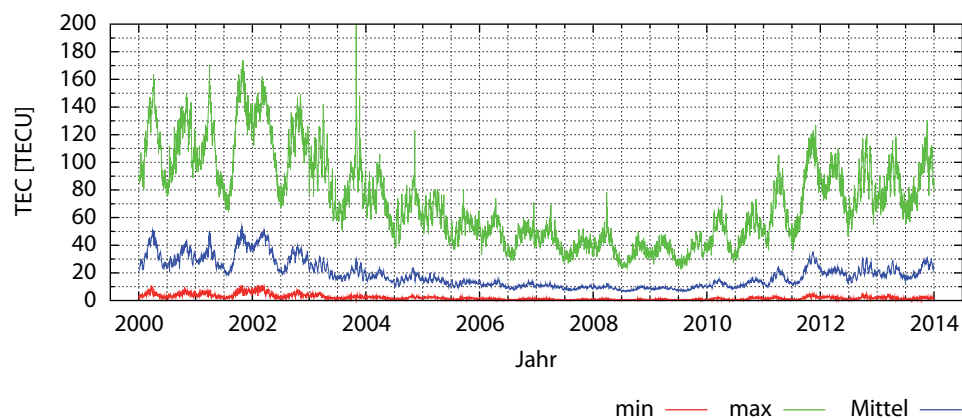


Abb. 3.1: TEC-Charakteristika für die Jahre 2000 bis 2013

Trotz der Korrektur des dominierenden ionosphärischen Einflusses 1. Ordnung mittels GIM-Informationen verbleiben Restabweichungen, die unmittelbar in die PPP-Auswertung einfließen. Deren Größenordnung ist in erster Linie davon abhängig, inwieweit die GIM-Informationen in Anbetracht der begrenzten zeitlichen als auch räumlichen Auflösung die tatsächlichen ionosphärischen Bedingungen widerspiegeln. In Abhängigkeit der geographischen Breite können ionosphärische Störungen mittlerer Größe (MSTIDs) und kleinräumige ionosphärische Störungen daher zu erheblichen Restabweichungen führen. Zudem können die TEC-Werte selbst nur mit einer gewissen Genauigkeit

¹⁷Das *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) generiert seine AC-spezifischen GIM-Modelle mit Beginn der GPS-Woche 1815 (19.10.2014, Tag des Jahres (*Day of Year*, DoY) 292/2014) mit einer zeitlichen Auflösung von 1 h (Schaer 2014).

bestimmt werden. Dies verdeutlichen die formalen Fehler der TEC-Karten, die in Form von RMS-Karten ebenso im IONEX abgespeichert sind. In Abbildung 3.2 sind die mittleren als auch maximalen täglichen RMS-Werte des o.g. Untersuchungszeitraums dargestellt. Es zeigt sich, dass die TEC-Werte eine relative Genauigkeit zwischen 5 und 15 % aufweisen. Insbesondere während Perioden mit einer hohen Sonnenaktivität ist jedoch mit schlechter bestimmten TEC-Werten zu rechnen.

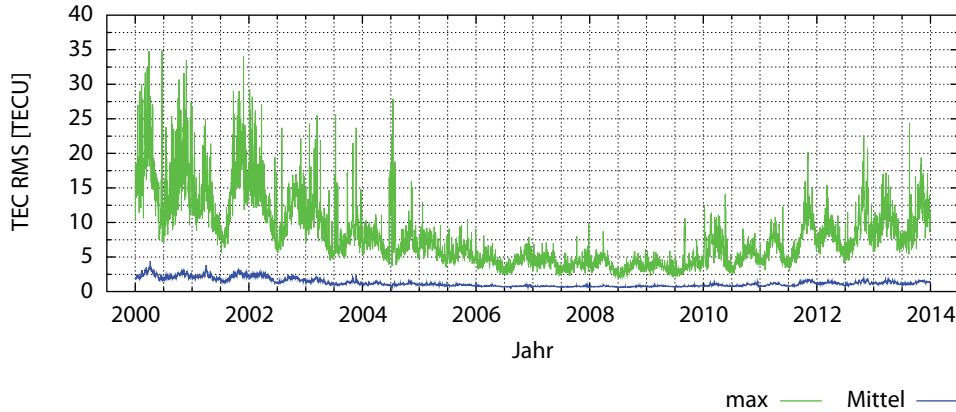


Abb. 3.2: TEC-RMS-Charakteristika für die Jahre 2000 bis 2013

Ergänzend sei hinzugefügt, dass es für Einfrequenz-Beobachtungen einen zur Zweifrequenz-Korrektur vergleichbaren Ansatz gibt, der als *GRoup And PHase Ionospheric Correction* (GRAPHIC) (Yunck 1993) bezeichnet wird. Aufgrund der fehlenden Beobachtung auf der zweiten Frequenz kann jedoch keine ionosphären-freie Phasenlinearkombination gebildet werden. Stattdessen wird der oben genannte Effekt ausgenutzt, dass die ionosphärische Refraktion zu einer Verzögerung des Codes und zu einer Beschleunigung der Phase führt. Die resultierende ionosphären-freie Code/Phasen-Linear-kombination (Gao und Shen 2001; Choy 2011)

$$\Phi'_{IF} = \frac{C_1 + \lambda_1 \cdot \Phi_1}{2} \quad (3.2)$$

ist mehrdeutig und wird vom Rauschen des Codes dominiert. Sowohl die Wellenlänge der Mehrdeutigkeit als auch das Rauschen sind halb so groß bzw. stark wie dieselben Größen der originalen Beobachtungen.

Troposphäre

Nach Abschnitt 2.3.2 lässt sich die troposphärische Refraktion in eine hydrostatische (Index h) und eine feuchte (Index f) Komponente aufsplitten, wobei die hydrostatische Komponente mit einem Anteil von 90 % zur gesamten troposphärischen Laufzeitverzögerung beiträgt. Die vollständige troposphärische Laufzeitverzögerung $T(e)$ eines Satellitensignals, das die Empfangsantenne mit der Elevation e erreicht, ergibt sich aus der Addition der Laufzeitverzögerungen beider Anteile im Zenit $Z_{h,f}$, die mittels Projektionsfunktionen (*Mapping Function*, MF) $m_{h,f}(e)$ noch auf die jeweilige Elevation umgerechnet werden müssen:

$$T(e) = Z_h \cdot m_h(e) + Z_f \cdot m_f(e). \quad (3.3)$$

Zur Berechnung der Laufzeitverzögerung im Zenit werden Standardatmosphärenmodelle herangezogen, z. B. Saastamoinen (1973). Aufbauend auf dem Kettenbruch von Marini aus dem Jahr 1972 entwickelte Herring (1992) eine Projektionsfunktion

$$m_{h,f}(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}, \quad (3.4)$$

die die Grundlage der heutzutage genutzten Projektionsfunktionen, von denen drei nachfolgend vorgestellt werden, ist. Da es sich bei $a_{h,f}$, $b_{h,f}$ und $c_{h,f}$ für den hydrostatischen bzw. feuchten Anteil um unterschiedliche Koeffizienten handelt, gibt es für jede der beiden Komponenten eine eigene Projektionsfunktion. Wie aus Gleichung 3.4 ersichtlich, bleibt das Azimut, unter dem das Satellitensignal die Empfangsantenne erreicht, bei der Berechnung des geometrischen Faktors $m_{h,f}$ unberücksichtigt.

Lange Zeit wurde die *Niell Mapping Function* (NMF), die Niell (1996) anhand von Radiosondendaten der nördlichen Halbkugel bestimmt hat, verwendet. Die Parameter des hydrostatischen Anteils m_h beziehen sich auf die Stationsdaten (Breite und Höhe) und den Tag des Jahres, währenddessen die Parameter des feuchten Anteils m_f nur von der Breite der Station abhängig sind. Die NMF weist insbesondere für Stationen auf der südlichen Halbkugel aufgrund der dort fehlenden Radiosondendaten Unzulänglichkeiten auf (Böhm u. a. 2006a). Aus den Daten von numerischen Wettermodellen, wie denen des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), abgeleitet sind zwei neuere Projektionsfunktionen: die *Vienna Mapping Function 1* (VMF1) (Böhm u. a. 2006b) und die *Global Mapping Function* (GMF) (Böhm u. a. 2006a). Die Parameter beider Projektionsfunktionen wurden durch Strahlverfolgung (engl. *ray-tracing*) ermittelt. VMF1 und GMF sind miteinander konsistent, jedoch besitzt die VMF1 aufgrund der aktuellen Wetterdaten ein ausgeprägtes Rauschen (Heßelbarth 2011). Die zur Berechnung der VMF1 erforderlichen Parameter liegen für ausgewählte Stationen mit einer zeitlichen Auflösung von 6 h vor bzw. können aus einem globalen Gitter, das über eine räumliche Auflösung von $2,5^\circ \times 2,0^\circ$ (Länge x Breite) verfügt, durch Interpolation gewonnen werden. Zur Berechnung der GMF-Koeffizienten sind die Stationsdaten (Länge, Breite und Höhe) sowie der Tag des Jahres erforderlich.

Bei einer PPP-Auswertung ist es sinnvoll, zunächst den hydrostatischen Anteil im Zenit anhand eines Standardmodells zu ermitteln und unter Anwendung der hydrostatischen Projektionsfunktion umzurechnen, um damit die Code- und Phasenbeobachtungen vorab zu korrigieren. Die feuchte Komponente, d. h. der feuchte Anteil im Zenit, sowie hydrostatische Restfehler werden als Unbekannte in der Ausgleichung geschätzt (Heßelbarth 2009). Die Einführung von stückweise zu schätzenden Unbekannten erlaubt dabei eine bessere Berücksichtigung der Variabilität der feuchten Komponente.

Zudem sollten Gradienten - man differenziert zwischen Gradienten in Nord-Süd-Richtung und Gradienten in Ost-West-Richtung - als Unbekannte in den Ausgleichungsprozess eingeführt werden. Paarweise berücksichtigen sie, insbesondere im Zusammenhang mit Satellitensignalen aus niedrigen Elevationen, die ihrerseits zu einer besseren Dekorrelation von Troposphäre und Höhenkomponente beitragen, die azimutalen Variationen der troposphärischen Laufzeitverzögerung (Meindl u. a. 2004). Nach Böhm und Schuh (2007) gilt für den Gradient $G(a, e)$ eines Satellitensignals, das die Empfangs-

antenne unter dem Azimut a und mit der Elevation e erreicht:

$$G(a, e) = m_g(e) \cdot (G_{ns} \cdot \cos(a) + G_{ow} \cdot \sin(a)) \quad (3.5)$$

wobei

$$m_g(e) = m_f(e) \cdot \cot(e) \quad (3.6)$$

mit

- G_{ns} - Gradient in Nord-Süd-Richtung [m],
- G_{ow} - Gradient in Ost-West-Richtung [m].

3.2.4 Korrekturen an der Station

Uhr / Inter-System Bias (ISB)

Die Empfängeruhrabweichung, d. h. die Abweichung der Empfänger- von der GNSS-Systemzeit (vgl. Abschnitt 2.3.4), wird als Unbekannte im Ausgleichungsprozess mit geschätzt. Sie gehört zur Gruppe der zu eliminierenden Parameter.

Sobald wie im Fall einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung die Beobachtungen mehrerer GNSS gemeinsam prozessiert werden, wird zwischen zwei Varianten zur Schätzung (und epochenweisen Elimination) der Empfängeruhrabweichungen unterschieden. Einerseits besteht die Möglichkeit, pro GNSS eine Empfängeruhrabweichung δt^{System} zu schätzen, wobei die Schätzungen der einzelnen Empfängeruhrabweichungen voneinander unabhängig sind. Andererseits besteht die Option, lediglich eine Empfängeruhrabweichung für das sogenannte Master-GNSS (meistens GPS) zu schätzen. Für alle anderen beteiligten GNSS (z. B. GLONASS) werden dann nur noch Empfängeruhrabweichungsdifferenzen (*Inter-System Bias*, ISB) in Bezug auf die Empfängeruhrabweichung des Master-GNSS bestimmt. In diesem Zusammenhang wird meistens mit Bedingungen, die die Variabilität des ISB einschränken, gearbeitet.

Im Fall der vorliegenden Arbeit und der entwickelten kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung wurde der ersten Variante der Vorzug gegeben, da nur mit dieser Variante zwei voneinander unabhängige Empfängeruhrabweichungen geschätzt werden können.

Antennenphasenzentrum

Die Abweichung des mittleren elektrischen Phasenzentrums vom mechanischen Phasenzentrum, dem Antennenreferenzpunkt, wird durch absolute bzw. relative Phasenzentrumsoffsets (PZO) und -variationen (PZV) beschrieben (vgl. Abschnitt 2.3.4). PZO und PZVs stellen zusammen die Phasenzentrumskorrekturen dar. Zur Speicherung und Verarbeitung der baugruppen- oder antennen-spezifischen Phasenzentrumskorrekturen wird eine Antennenkorrektionsdatei (ANTEX-Format) genutzt.

Zur Ableitung von baugruppen- oder antennen-spezifischen Phasenzentrumskorrekturen wird auf verschiedene Methoden der Antennenkalibrierung zurückgegriffen. Grundsätzlich lassen sie sich einer der folgenden Kategorien zuordnen:

- absolute Feldkalibrierung (Roboterkalibrierung),

- relative Feldkalibrierung und
- Kammerkalibrierung.

Während bei der Kammerkalibrierung in einem mikrowellentoten Raum und mit einem künstlichen Satellitensignal gearbeitet wird, nutzt man bei Feldkalibrierungen, die zumeist in eigens dafür angelegten Testfeldern und in geringem Abstand zu einer Referenzantenne durchgeführt werden, die tatsächlichen Satellitensignale. Zur Auswertung stehen Beobachtungsdaten einer Basislinie zur Verfügung. Von besonderer Bedeutung ist bei der Feldkalibrierung der Mehrwegeeffekt, der sowohl auf Referenz- als auch auf die zu prüfende Antenne wirkt. Durch Drehung und Kippung des Prüflings sind die Korrekturen bei der absoluten Feldkalibrierung weitestgehend mehrwegfrei. Bei der relativen Feldkalibrierung, wo der Prüfling nur gedreht wird, gilt dies lediglich für die Lagekomponenten des PZO.

Je nach Anwendung erhält man relative oder absolute Korrekturen. Relative Korrekturen beziehen sich immer auf Referenzantennen, deren absolute Korrekturen bekannt sind. Vielfach wird die als fehlerfrei angenommene AOAD/M_T (Dorne Margoline T) verwendet. Absolute Korrekturen sind dagegen von einer Referenzantenne unabhängig. Absolutkalibrierte Antennen sind vor allem bei Anwendungen notwendig, bei denen von einer Gleichausrichtung der Antennen nicht mehr ausgegangen werden kann.

Zur Korrektur einer einzelnen Beobachtung sind zwei Rechenschritte notwendig (Rothacher und Schmid 2010). Ausgehend vom ARP wird mit dem PZO (Nord, Ost und Höhe) zunächst das mittlere elektrische Phasenzentrum berechnet. Anschließend wird der Richtungsabhängigkeit des mittleren elektrischen Phasenzentrums Rechnung getragen, indem noch die elevationsabhängigen bzw. azimut- und elevationsabhängigen PZVs angebracht werden. Es ist darauf zu achten, dass der PZO und die PZVs der Frequenz verwendet werden, auf die sich die Beobachtung bezieht.

Mehrwegeausbreitung

Die Überlagerung der direkten Satellitensignale mit in der Stationsumgebung reflektierten Signalen wird als Mehrwegeausbreitung bezeichnet (vgl. Abschnitt 2.3.3). Sie gehört zu den problematischsten Messabweichungen, weil sich der Mehrwegeeffekt in der für die Koordinatenberechnung wichtigen ionosphären-freien Linearkombination um den Faktor 3 verstärkt und es bisher keine Technik gibt, mit der eine vollkommene Beseitigung der Mehrwegeausbreitung erzielt werden konnte. Alle bisherigen Ansätze sind Techniken zur Verringerung von Mehrwegeausbreitung. Sie können u. a. hinsichtlich ihres Auftretens bezüglich der Signalverarbeitung eingeteilt werden (Wanninger 2000):

- vor der Signalverarbeitung durch die Auswahl der Messumgebung und des Antennendesigns,
- durch die Signalverarbeitung selbst und
- nach der Signalverarbeitung durch die Weiterverarbeitung der Messgrößen.

Die wohl effektivste Maßnahme zur Verringerung des Mehrwegeeffektes ergibt sich aus der Tatsache, welche Faktoren zur Mehrwegeausbreitung führen: eine geeignete Messumgebung. Es sollten sich möglichst keine Objekte oberhalb und nur wenige Reflektoren unterhalb des Antennenhorizontes befinden. Vor allem für die im Normalfall auf Dächern angebrachten Antennen von Referenzstationen muss dahingehend eine Balance gefunden werden. Aufbauend auf den PPP-Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination präsentieren Reußner und Wanninger (2013) eine Möglichkeit zur Abschätzung von Phasen-Mehrwegeausbreitung als Funktion von Azimut und Elevation des eingehenden Satellitensignals. Von den mehr als 500 untersuchten IGS- und EPN-Stationen unter-

liegt jede 6. Referenzstation einer deutlichen Beeinflussung durch Mehrwegeeffekte. Lediglich jede 6. Referenzstation weist keine oder nahezu keine Beeinträchtigung durch Mehrwegeausbreitung auf.

Signalbeugung

An Objekten über dem Antennenhorizont gebeugte Signale haben die Eigenschaft, dass sie im Vergleich zu den direkten Satellitensignalen eine stark verringerte Signalstärke ausweisen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Das niedrigere Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) kann genutzt werden, um gebeugte Signale zu erkennen. Im Normalfall werden solche Beobachtungen von der Auswertung ausgeschlossen.

Erdgezeiten, Auflasten und Polbewegung

Die Erde unterliegt in Folge von Erdgezeiten sowie ozeanischen und atmosphärischen Auflasten einer ständigen Verformung (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Auf eine Beschreibung der zum Teil komplexen Herleitung sowie der Modelle, aus denen die Korrekturen berechnet werden, wird an dieser Stelle verzichtet. Weiterführende Informationen finden sich u. a. in Kouba (2009a) und Petit und Luzum (2010). Die resultierenden Effekte der Erdgezeiten sowie der ozeanischen und atmosphärischen Auflasten wirken sich insbesondere auf die Höhenkomponente aus. Zu einer Beeinflussung der Lagekomponenten führt hingegen die Polbewegung. Im Rahmen einer PPP-Auswertung kann eine Nichtberücksichtigung der genannten Korrekturen je nach Messabweichung zu Koordinatenfehlern auf dem Niveau von Dezimetern führen (Heßelbarth 2009).

3.2.5 Instrumentelle Verzögerungen

Fractional-Cycle Biases (FCB)

Instrumentelle Verzögerungen sowohl im Satelliten als auch im Empfänger haben die unangenehme Eigenschaft, die Ganzzahligkeit von Mehrdeutigkeiten zu zerstören. Die Abweichung einer geschätzten Mehrdeutigkeit von der Ganzzahligkeit wird als *Fractional-Cycle Biases* (FCB) bezeichnet. Die ganzzahligen Anteile der Verzögerungen bleiben indes unbeachtet (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Trotz der Tatsache, dass jeder Satellitenbogen eine andere Mehrdeutigkeit besitzt, sollte die Annahme gelten, dass die FCBs während eines Satellitenbogens oder sogar über einen längeren Zeitraum bis hin zu Wochen oder Monaten konstant sein müssten. Bereits Gabor und Nerem (1999) konnten diese Annahme bestätigen, sodass es möglich ist bzw. sein sollte, auf der Basis von geschätzten Mehrdeutigkeiten FCBs als Korrektionswerte zu berechnen. Die Korrektion von geschätzten Mehrdeutigkeiten mit Hilfe von FCBs ist die Voraussetzung für die Festsetzung von Mehrdeutigkeiten.

Zur Ableitung von FCBs auf der Basis von geschätzten Mehrdeutigkeiten wurden in den letzten Jahren enorme Anstrengungen unternommen. Letztlich lassen sich die verschiedenen Ansätze in zwei Methoden zusammenfassen. Eine tiefer gehende Beschreibung sowohl der beiden Methoden als auch der verschiedenen Ansätze erfolgt im Kontext der Mehrdeutigkeitslösung in Abschnitt 3.4.

Inter-Frequency Biases (IFB)

Signale, die auf dem FDMA-Verfahren basieren, haben eng beieinanderliegende aber dennoch unterschiedliche Wellenlängen. Dies führt zu einer frequenzabhängigen Beeinflussung durch instrumentelle Verzögerungen als Folge von Verzögerungen, die sowohl aus der analogen Hardware als auch

aus der digitalen Signalverarbeitung resultieren (vgl. Gleichung 2.9). Nach dem CDMA-Verfahren ausgesendete Signale unterliegen ebenfalls solchen instrumentellen Einflüssen, jedoch wirken sie auf alle Signale identisch. Entsprechend ist eine differenzierte Handhabung der instrumentellen Signalverzögerungen h^{System} für GPS und GLONASS erforderlich (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Im Fall von GPS sind die instrumentellen Signalverzögerungen h^{System} für alle Satelliten identisch, sodass die instrumentellen GPS-Signalverzögerungen h^G mit der Empfängeruhrabweichung δt zu einer GPS-abhängigen Empfängeruhrabweichung δt^G zusammengefasst werden können:

$$\delta t^G = \delta t + h^G. \quad (3.7)$$

Bei GLONASS hingegen bleibt es bei der Trennung zwischen den instrumentellen Signalverzögerungen h_C^R und h_Φ^R sowie der GLONASS-abhängigen Empfängeruhrabweichung δt^R . Die instrumentellen Signalverzögerungen der Phasenbeobachtungen $h_\Phi^{R,k}$ eines GLONASS-Satelliten mit der Frequenznummer k resultieren im Wesentlichen aus Code-Phasen-Verzögerungen CPB, die mit k multipliziert werden (vgl. Gleichung 2.10). Der Einfluss von $h_\Phi^{R,k}$ auf eine Phasenbeobachtung kann auf einfache Art und Weise als lineare Funktion in Abhängigkeit von der Frequenznummer k und der Code-Phasen-Verzögerungen CPB bzw. IFB_Φ modelliert werden (Zinoviev u. a. 2009; Wanninger 2012a):

$$h_\Phi^{R,k} = k \cdot IFB_\Phi. \quad (3.8)$$

Eine vergleichbar einfache Handhabung der instrumentellen Verzögerungen der Codebeobachtungen $h_C^{R,k}$ ist nur eingeschränkt möglich. Wie Reußner und Wanninger (2011) anhand von mittleren Residuen der ionosphären-freien Code-Linearkombination zeigen, berücksichtigt eine lineare Modellierung des IFB_C in Abhängigkeit von der Frequenznummer k nur bedingt den Einfluss von instrumentellen Verzögerungen. Eine Modellierung mit Polynomen höheren Grades erscheint sinnvoll, jedoch nur schwer umsetzbar. Da mit einer linearen Funktion in Abhängigkeit von der Frequenznummer k nichtsdestotrotz die Anteile 1. Grades der instrumentellen Codeverzögerungen eliminiert werden können, wird an dieser Stelle eine derartige Approximation empfohlen:

$$h_C^R = k \cdot IFB_C. \quad (3.9)$$

Für die Schätzung des phasenbezogenen IFB_Φ empfiehlt sich eine vergleichbare Vorgehensweise wie bei der Korrektur der troposphärischen Laufzeitverzögerung (vgl. Abschnitt 3.2.3). Zunächst sind die GLONASS-Phasenbeobachtungen mit Hilfe von a priori-Korrekturen des IFB_Φ zu korrigieren. Die nun korrigierten Phasenbeobachtungen enthalten jetzt nur noch eine Restabweichung ifb_Φ . Durch diese Herangehensweise ist im Rahmen der Parameterschätzung nicht IFB_Φ selbst, sondern nur der Zuschlag ifb_Φ zu ermitteln, was sowohl die Parameterschätzung stabilisiert als auch die Zuverlässigkeit der Parameterschätzung erhöht. Die Berechnung von ifb_Φ ist jedoch nur im Zusammenhang mit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung möglich, da beide Arten von Unbekannten nicht unabhängig voneinander sind (siehe Abschnitt 3.3.5).

Aufbauend auf den Ergebnissen von Zinoviev (2005), Wanninger und Wallstab-Freitag (2007) und Zinoviev u. a. (2009) hat Wanninger (2012a) Phasenbeobachtungen von über 130 Stationen, die mit Empfängern verschiedener Hersteller ausgestattet waren, im Basislinien-Modus ausgewertet und

erstmalig a priori-Korrekturen des IFB_{Φ} für mehrere Empfängerhersteller (Ashtech, Javad, JPS, Leica Novatel, TPS, Trimble und Septentrio) bestimmt. Bei den geschätzten $IFB_{b,\Phi}$ handelt es sich um relative Angaben, die die Differenz der IFBs der beiden beteiligten Empfänger widerspiegeln. Absolute Angaben ergeben sich erst durch Festsetzung eines Absolutniveaus. Wanninger (2012a) realisiert das Absolutniveau durch die Bedingung, dass der mittlere IFB_{Φ} aller Empfänger vom Typ JPS Legacy Null ergibt. Die Festlegung auf diesen speziellen Empfängertyp ist historisch begründet, da die Hersteller der älteren Empfänger (JPS Legacy, weitere Empfänger von JPS und TPS sowie Ashtech Z-18) ihre Empfänger derartig kalibriert haben, dass die Doppel-Differenz-Verbesserungen von Null-Basislinien um Null schwanken (Zinoviev u. a. 2009; Wanninger 2012a).

Aus den IFB_{Φ} der originären Phasenbeobachtungen der beiden Frequenzbänder G1 und G2 (Abbildung 3.3) schlussfolgert Wanninger (2012a), dass

- ähnliche IFB_{Φ} in den beiden Frequenzbändern G1 und G2 existieren,
- die IFB_{Φ} eines Herstellers nur geringfügig variieren und
- die IFB_{Φ} der einzelnen Hersteller zum Teil deutlich voneinander abweichen.

Damit untermauern die praktischen Untersuchungen von Wanninger (2012a) die theoretische Herleitung von Sleewaegen u. a. (2012b) (vgl. Abschnitt 2.3.5).

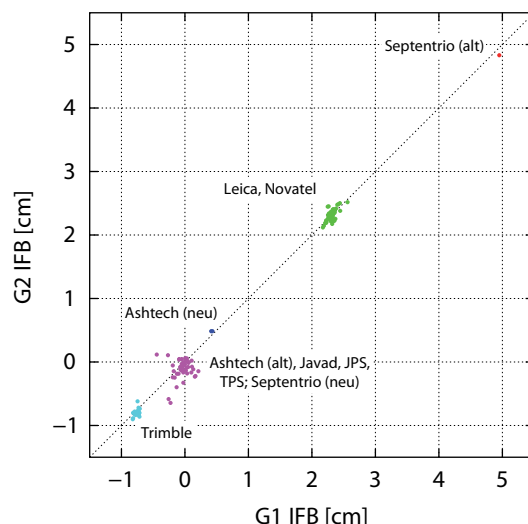


Abb. 3.3: IFB_{Φ} der Originalsignale G1 und G2 (nach Wanninger 2012a, modifiziert)

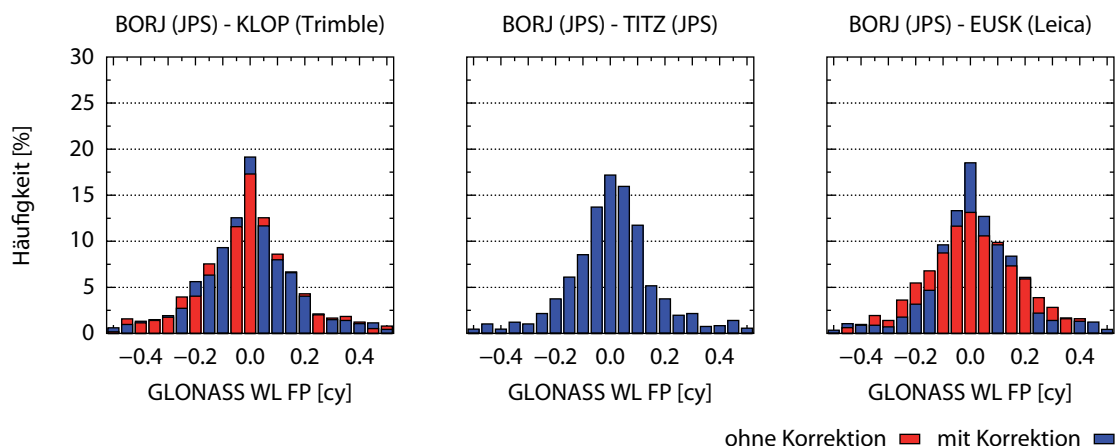
Die Ergebnisse der Untersuchung von Wanninger (2012a) sind in Tabelle 3.5 in Form von a priori-Korrekturen für fünf verschiedene Gruppen von Empfängerherstellern zusammengefasst. Aufgrund der o.g. Bedingung erfahren die Phasenbeobachtungen bestimmter Empfängerhersteller (u. a. Javad, JPS, TPS) keine Korrektur. Der maximale ΔIFB_{Φ} zwischen zwei Herstellern, die für eine Frequenznummerndifferenz $\Delta k_{min} = 1$ gilt, beträgt mehr als 5 cm (Trimble, Septentrio (alt)). Bei einer maximalen Frequenznummerndifferenz $\Delta k_{max} = 13$ kann der Einfluss des IFB_{Φ} größer als eine Wellenlänge sein und daher die Mehrdeutigkeitsfestsetzung negativ beeinflussen.

Deshalb ist die a priori-Korrektur der Phasenbeobachtungen bezüglich des IFB_{Φ} vor allem dann unumgänglich, wenn GLONASS-Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden sollen, obwohl die zur Korrektur verwendeten FCBs aus Phasendaten abgeleitet sind, die nicht von einem Empfänger des glei-

Tab. 3.5: A priori-Korrekturen des IFB_{Φ} der Originalsignale G1 und G2 (nach Wanninger 2012a, modifiziert)

Empfängerhersteller	A priori Korrektur [cm]
Trimble	-0,7
Ashtech (alt), Javad, JPS, TPS; Septentrio (neu)	0,0
Ashtech (neu)	0,4
Leica, Novatel	2,3
Septentrio (alt)	4,9

chen Herstellers aufgezeichnet wurden. Beispielhaft stellt Abbildung 3.4 die Abweichungen der geschätzten *Widelane*-Mehrdeutigkeiten von der Ganzzahligkeit in Form von *Fractional Parts* (FP) dar. Die WL-FPs resultieren aus der Korrektur der Phasenbeobachtungen der Station BORJ (Borkum, Deutschland) mittels den WL-FCBs von drei unterschiedlichen deutschen Stationen. Die Beobachtungen dieser drei Stationen wurden mit Empfängern drei verschiedener Hersteller aufgezeichnet, wobei es sich im Fall von BORJ und TITZ um den gleichen Empfängertyp handelt. Wie zu erwarten sind die Zuwächse an festsetzbaren Mehrdeutigkeiten umso deutlicher, je größer die Differenz der herstellerspezifischen a priori-Korrekturen ist.

Abb. 3.4: GLONASS-FPs der *Widelane*-Linearkombination ohne und mit Verwendung der a priori-Korrekturen

Für eine Korrektur des IFB_{Φ} mit Hilfe von a priori-Informationen sind zwei Voraussetzungen von Relevanz. Einerseits müssen die im RINEX-Header beinhalteten Angaben zu Empfänger (und Antenne) richtig sind, d. h. mit dem tatsächlichen Equipment übereinstimmen. Andererseits dürfen die Hersteller die ihnen bekannte Code-Phasen-Verzögerung als Ursache des IFB nicht ändern. Ist eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt, wird auf falsche oder ungültige a priori-Korrekturen zurückgegriffen, sodass die Festsetzung der GLONASS-Mehrdeutigkeiten fehlschlagen kann. Allerdings ist dieser Fall bereits schon Realität. Denn mit Ashtech und Septentrio gibt es aktuell zwei Hersteller, für deren Empfänger unterschiedliche Verzögerungen gelten (vgl. Abbildung 3.3 und Tabelle 3.5). Mit der Einführung der Firmware-Version 2.3 Anfang 2012 kompensiert Septentrio die

durch die digitale Signalverarbeitung (DSP) induzierten Code-Phasen-Verzögerung intern, sodass gilt: $IFB_{\Phi} = 0,0$ cm (Sleewaegen u. a. 2012a). Empfänger, die mit älteren Versionen arbeiten, besitzen weiterhin einen IFB_{Φ} von ca. 5 cm (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die Abhängigkeit von den o.g. Voraussetzungen bleibt unberührt für den Fall, dass die Festsetzung der GLONASS-Mehrdeutigkeiten auch dann erfolgreich ist, wenn auf a priori-Informationen verzichtet werden kann. Einen entsprechenden Ansatz, der ohne a priori-Informationen auskommt, stellen Banville u. a. (2013b) vor. Allerdings ist das der Ausgleichung zugrunde liegende Gleichungssystem singulär, sodass die Einführung einer zusätzlichen Bedingung unerlässlich ist. Jedoch darf diese die Ganzzahligkeit der GLONASS-Mehrdeutigkeiten nicht zerstören. Zur Auflösung der Singularität setzen Banville u. a. (2013b) die Mehrdeutigkeit eines zweiten Basissatelliten fest. Der Zwang der Ganzzahligkeit wird aber nur dann erfüllt, wenn die Differenz der Frequenznummern der beiden Basissatelliten $\Delta k^{1,2} = 1$ ist, d. h. die Basissatelliten müssen benachbarte Frequenznummern (z. B. $k^1 = 5$ und $k^2 = 6$) besitzen. Am Beispiel drei etwas mehr als 2 km langer Basislinien zeigen Banville u. a. (2013b), dass im Fall einer kombinierten GPS/GLONASS-RTK-Auswertung die Methode ohne Verwendung von a priori-Informationen nur zu geringfügig schlechteren Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquoten führt. Der Anteil an ungelösten Mehrdeutigkeiten erhöht sich im Vergleich zum herkömmlichen Ansatz um den Faktor 5 bis 6, wenn lediglich GLONASS-Beobachtungen zur Auswertung verwendet werden.

Differential Code Bias (DCB)

Verzögerungen bei der Signalgenerierung und -verarbeitung verfälschen die einzelnen Codebeobachtungen (C_1 , C_2 , P_1 und P_2 sowie P_2'), weshalb zwischen ihnen satellitenabhängige Differenzen (*Differential Code Biases*, DCB) existieren. Man unterscheidet zwischen P1P2-DCBs, P1C1-DCBs und P2C2-DCBs (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Bei einer Auswertung im PPP-Modus und gleichzeitiger Verwendung der präzisen IGS-Uhrkorrekturen sind insbesondere die P1C1-DCBs von Interesse. Die Berechnung der präzisen Uhrkorrekturen des IGS erfolgt seit dem 2. April 2000 durch Auswertung der ionosphären-freien Code-Linearkombination auf der Basis von P_1/P_2 -Beobachtungen (Ray 2000; Kouba 2009a). Folglich führt die Verwendung von C_1 -Codebeobachtungen und die damit verbundene Existenz von P1C1-DCBs bei der Verwendung von präzisen IGS-Uhrkorrekturen zu Widersprüchen (Schönemann 2011). Zur Wahrung der Konsistenz gibt es zwei Möglichkeiten. Ausgehend vom Umstand, der zur genannten Inkonsistenz führen kann, ist es am sinnvollsten, nur Codebeobachtungen von solchen Empfängern zu nutzen, die auf L1 ausschließlich oder zusätzlich zum C/A-Code den P-Code aufzeichnen, um P_1 statt C_1 verwenden zu können. Alternativ müssen die C_1 -Codebeobachtungen bzw. die aus den Codebeobachtungen resultierenden Linearkombinationen (ionosphären-freie Code-Linearkombination C_{IF} , Melbourne-Wübbena-Linearkombination Φ_{MW}) korrigiert werden.

Entsprechende Korrekturen, die die Unterschiede zwischen den Codebeobachtungen beseitigen, werden nachfolgend und in Abgrenzung zu den eigentlichen Verzögerungen als $DCB_{P_1P_2}$, $DCB_{P_1C_1}$ und $DCB_{P_2C_2}$ bezeichnet. In Abhängigkeit der gewählten Linearkombination sind diese zu skalieren. Die notwendigen Faktoren, die zur Korrektur des Unterschiedes zwischen C_1 und P_1 heranzuziehen sind, listet Tabelle 5.3 auf. Für weiterführende Informationen in Bezug auf $DCB_{P_1C_1}$ wird auf Abschnitt 5.3 verwiesen.

3.3 Ausgleichung

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (vgl. Abschnitt 2.5) sowie den Messabweichungen, die im Abschnitt 2.3 vorgestellt wurden, und den Möglichkeiten der Korrektur (vgl. Abschnitt 3.2) beschreibt dieser Abschnitt die Ausgleichung der PPP-Auswertung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam.

3.3.1 Beobachtungsgleichungen

Den Ausgangspunkt für die Betrachtung des funktionalen Modells (vgl. Gleichung 2.27) bilden die erweiterten Beobachtungsgleichungen der undifferenzierten Code- und Phasenmessung zwischen Satellit i und Antenne a (vgl. Gleichungen 2.3 und 2.5):

$$C_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + h_{a,C}^{i, System} - \delta t^i \right) + I_a^i + T_a^i + G_a^i + O_a^i + M_a^i + A_a^i + \epsilon_{a,C}^i \quad (3.10)$$

$$\Phi_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + h_{a,\Phi}^{i, System} - \delta t^i \right) - I_a^i + T_a^i + G_a^i + O_a^i + M_a^i + A_a^i + \lambda N_a^i + \epsilon_{a,\Phi}^i \quad (3.11)$$

mit

$$R_a^i = \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| = \sqrt{(X^i - X_a)^2 + (Y^i - Y_a)^2 + (Z^i - Z_a)^2}. \quad (3.12)$$

und

- C_a^i - Codemessung [m],
- Φ_a^i - Phasenmessung [m],
- R_a^i - berechnete geometrische Entfernung zwischen Satellit und Antenne [m],
- c_0 - Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s],
- δt_a - Empfängeruhrabweichung [s],
- h_a^i - instrumentelle Signalverzögerung [s],
- δt^i - Satellitenuhrabweichung [s],
- I_a^i - ionosphärische Laufzeitverzögerung [m],
- T_a^i - troposphärische Laufzeitverzögerung [m],
- G_a^i - horizontaler Gradient [m],
- O_a^i - Orbitabweichung [m],
- M_a^i - Abweichung durch Mehrwegeausbreitung [m],
- A_a^i - Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m],
- λ - Wellenlänge [m],
- N_a^i - Phasenmehrdeutigkeit [-],
- ϵ_a^i - zufällige Messabweichungen [m],
- \vec{X} - Vektoren globaler kartesischer Koordinaten [m].

Korrigierte Beobachtungsgleichungen

Die Beobachtungsgleichungen 3.10 und 3.11 sind nun anhand der Korrekturen aus Abschnitt 3.2 zu korrigieren. Sie vereinfachen sich, wenn die Gleichungen 3.7 bis 3.9 unberücksichtigt bleiben, zu

$$C_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + h_{a,C}^{i, System} \right) + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \epsilon_{a,C}^i \quad (3.13)$$

und

$$\Phi_a^i = R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + h_{a,\Phi}^{i, System} \right) + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \lambda N_a^i + \epsilon_{a,\Phi}^i \quad (3.14)$$

wobei

- $m(e_a^i)$ - elevationsabhängige Projektionsfunktion [-],
- Z_a^i - Zenitverzögerung [m] (feuchte Komponente sowie hydrostatische Restfehler).

Die Beobachtungsgleichungen 3.13 und 3.14 gelten für sämtliche Code- und Phasenbeobachtungen sowie für GPS und GLONASS, wobei die unterschiedliche Berücksichtigung der instrumentellen Signalverzögerungen zunächst unbeachtet blieb. Unter Beachtung der Gleichungen 3.7 bis 3.9 folgt schließlich

$$C_a^{G,i} = R_a^i + c_0 \delta t_a^G + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \epsilon_{a,C}^i \quad (3.15a)$$

$$C_a^{R,i} = R_a^i + c_0 (\delta t_a^R + k \cdot IFB_{a,C}) + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \epsilon_{a,C}^i \quad (3.15b)$$

und

$$\Phi_a^{G,i} = R_a^i + c_0 \delta t_a^G + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \lambda N_a^i + \epsilon_{a,\Phi}^i \quad (3.16a)$$

$$\Phi_a^{R,i} = R_a^i + c_0 (\delta t_a^R + k \cdot IFB_{a,\Phi}) + m(e_a^i) \cdot Z_a^i + G_a^i + \lambda N_a^i + \epsilon_{a,\Phi}^i. \quad (3.16b)$$

Die Unbekannten einer PPP-Auswertung

Die Beobachtungsgleichungen 3.15 und 3.16 enthalten die Unbekannten einer PPP-Auswertung. Sie lassen sich in zwei Gruppen aufteilen und umfassen zum einen

- die Stationskoordinate $\vec{X}_a = [X_a, Y_a, Z_a]$ (Anzahl $anz_{\vec{X}} = 3$),
- die instrumentelle Signalverzögerungen h_a^R bzw. IFB_a (Anzahl $anz_{IFB} = 1$),
- die Zenitverzögerung (feuchte Komponente inkl. hydrostatische Restfehler) Z (Anzahl anz_Z),
- die horizontalen Gradienten der troposphärische Laufzeitverzögerung G (Anzahl anz_G),
- im Fall von Phasenbeobachtungen die Mehrdeutigkeiten N (Anzahl anz_N)

und zum anderen

- die Empfängeruhrabweichungen δt_a^{System} , d. h. δt_a^G und δt_a^R (Anzahl $anz_{\delta t} = 2$).

Anmerkungen zu den Unbekannten einer PPP-Auswertung

Die Anzahl an Mehrdeutigkeiten anz_N ist abhängig von den Beobachtungsdaten. Je mehr Satelliten sichtbar sind, desto mehr Satellitenbögen und Mehrdeutigkeiten gibt es. Die Anzahl erhöht sich außerdem mit jedem Phasensprung (*Cycle-Slip*). Je mehr Mehrdeutigkeiten zu schätzen sind und umso weniger kontinuierliche Beobachtungen ein solcher (Teil)-Satellitenbogen beinhaltet, desto

instabiler wird das Gleichungssystem. Gleichzeitig ist der Nutzen von Mehrdeutigkeiten mit einer geringen Anzahl an Beobachtungen zum Ergebnis der Ausgleichung relativ klein.

Um der Variabilität des feuchten Anteils der Zenitverzögerung Rechnung zu tragen, wird im Ausgleichungsprozess nicht nur eine troposphärische Unbekannte geschätzt, sondern mit einer zeitlichen Auflösung von z. B. 2 h gearbeitet. Die geschätzten Parameter gelten somit nur für ein bestimmtes Intervall. Zur Vermeidung von Unstetigkeiten zwischen den Schätzwerten wird einerseits eine zusätzliche Unbekannte eingeführt. Andererseits trägt jede Beobachtung zur Bestimmung von zwei Troposphärenparametern bei, wobei der jeweilige Anteil durch Gewichte¹⁸ reguliert wird. Für einen 24 h-Datensatz ergeben sich bei einer zeitlichen Auflösung von 2 h 13 Unbekannte.

Bei den horizontalen Gradienten der troposphärischen Laufzeitverzögerung G unterscheidet man zwischen Gradienten in Nord-Süd- und in Ost-West-Richtung. Ähnlich der Zenitverzögerung Z werden die Gradienten in bestimmten Intervallen, z. B. 12 h, geschätzt. Für einen 24 h-Datensatz ergeben sich bei einer zeitlichen Auflösung von 12 h zwei Paare von Gradienten, d. h. vier Unbekannte.

Je nach Linearkombination (ionosphären-freie Linearkombination sowie *Widelane*- und Melbourne-Wübbena-Linearkombination) gibt es Abweichungen in den Beobachtungsgleichungen (und damit auch im funktionalen Modell). Dies betrifft hauptsächlich die Melbourne-Wübbena-Linearkombination. Sie besitzt keinerlei Informationen zu den Koordinaten der Empfängerantenne sowie den troposphärischen Parametern. Folglich sind die genannten Unbekannten auch nicht Teil des Parametervektors und die Koeffizienten der genannten Unbekannten sind 0.

In Summe sind für einen 24 h-GPS/GLONASS-Datensatz typischerweise zwischen 100 und 120 Unbekannten zu schätzen; bei Datensätzen mit vielen *Cycle-Slips* kann sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter leicht verdoppeln.

3.3.2 Funktionales Modell

Mit den nicht-linearen Beobachtungsgleichungen 3.15 und 3.16 wurde der sachlogische Zusammenhang zwischen den Messgrößen, d. h. den GPS- und GLONASS-Code- und Phasenbeobachtungen, und den zu bestimmenden Parametern hergestellt. Aufgrund der Nicht-Linearität können nicht sofort die Koeffizienten der Design-Matrix \mathbf{A} ermittelt werden, sondern erfolgt gemäß Gleichung 2.29 zunächst eine Linearisierung der Beobachtungsgleichungen hinsichtlich den zu schätzenden Parametern. Die Linearisierung erfordert zum Teil Näherungswerte für die Unbekannten, z. B. Näherungskordinaten $\vec{X}_a^0 = [X_a^0, Y_a^0, Z_a^0]$ (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Koeffizientenmatrizen \mathbf{A}_1 und \mathbf{A}_2

Gleichzeitig kommt es entsprechend der Aufzählung in Abschnitt 3.3.1 zur Trennung zwischen primären und zu eliminierenden Parametern (vgl. Abschnitt 2.5.4), sodass die partiellen Ableitungen nach den Empfängeruhrabweichungen δt_a^G und δt_a^R die Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_2 bilden, während alle

¹⁸Die zu verwendenden Faktoren (Gewichte) berechnen sich aus dem Zeitstempel t_i der Beobachtung l_i und dem Intervall der Zenitverzögerung int_Z . Die zu t_i gehörige Unbekannte Z_j ergibt sich nach $Z_j = \text{floor}(t_i/int_Z)$. Aus dem Vergleich von t_i mit den Zeitstempeln t_j und t_{j+1} der beiden Unbekannten Z_j und Z_{j+1} lassen sich die Gewichte $p_j = (t_{j+1} - t_i)/int_Z$ und $p_{j+1} = (t_j - t_i)/int_Z$ berechnen. Beispiel: Bei einem Intervall $int_Z = 6$ h hat eine Beobachtung l_i zum Zeitpunkt $t_i = 2$ h die Faktoren $p_j = 2/3$ und $p_{j+1} = 1/3$ (mit $j = 1$) und eine Beobachtung l_k zum Zeitpunkt $t_k = 12$ h die Faktoren $p_l = 1$ und $p_{l+1} = 0$ (mit $l = 3$).

anderen partiellen Ableitungen zur Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_1 zusammengefasst werden:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,\bar{X}} & \mathbf{A}_{1,IFB} & \mathbf{A}_{1,Z} & \mathbf{A}_{1,G} & \mathbf{A}_{1,N} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

und

$$\mathbf{A}_2^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Die Koeffizientenmatrizen \mathbf{A}_1 und \mathbf{A}_2 bestehen in ihrem grundsätzlichen Aufbau aus zwei Blöcken, nämlich einen Block für die Phasen- und einen Block für die Codebeobachtungen. Jeder Block beinhaltet n Zeilen (mit n gleich der Anzahl an Gesamtbeobachtungen eines Beobachtungstyps), umfasst e Epochen und beginnt mit den GPS-Beobachtungsgleichungen der ersten Epoche ($e = 1$; Indizes 1, 2, ect). Daran schließen sich die GLONASS-Beobachtungsgleichungen der ersten Epoche an ($e = 1$; Indizes $k, k+1$, etc.). Diese Vorgehensweise wird bis einschließlich der letzten GLONASS-Beobachtungsgleichung der letzten Epoche (Index k) fortgesetzt.

Beschreibung der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_1

Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_1 enthält die partiellen Ableitungen nach den primären Unbekannten (siehe Gleichung 3.19 in Abschnitt 3.3.4). Die Anzahl an Unbekannten u und damit die Anzahl an Spalten variiert in Abhängigkeit von der Auflösung der Zenitverzögerung sowie der horizontalen Gradienten und steht in Bezug zur Qualität der Beobachtungsdaten, aus der sich die Anzahl an Mehrdeutigkeiten anz_N ergibt. Für die nachfolgende Beschreibung der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_1 aus Gleichung 3.17 gibt es folgende Annahmen:

- Dauer des Datensatzes: 24 h,
- Epochenabstand: 30 s,
- Auflösung der Zenitverzögerung: 2 h (d. h. $anz_Z = 13$),
- Auflösung der horizontalen Gradienten: 12 h (d. h. $anz_G = 4$) und
- Anzahl an Mehrdeutigkeiten: $anz_N = 100$.

Zusammen mit den drei Unbekannten der Stationskoordinate und einem Schätzwert für die instrumentellen Verzögerungen sind insgesamt Unbekannte $u = 121$ zu schätzen. Jede Zeile der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_1 enthält die 121, zum Teil zeitvariablen partiellen Ableitungen einer Beobachtungsgleichung als Koeffizienten, d. h. im Fall von Codebeobachtungen die Ableitungen von Gleichung 3.15 und im Fall von Phasenbeobachtungen die Ableitungen von Gleichung 3.16.

Die Koeffizienten der Stationskoordinate, d. h. die Ableitungen von Gleichung 3.12 nach X_a , Y_a und Z_a , bilden jeweils die ersten drei Spalten. Sie sind in dem Sinne zeitvariabel, als dass sich die Koordinaten der Satelliten mit jeder Epoche ändern. Epochenunabhängig sind die Koeffizienten der instrumentellen Verzögerungen (Spalte 4). Während die Matrixelemente im Fall von GPS immer 0 sind, beinhalten sie im Fall von GLONASS die Frequenznummer k des jeweiligen Satelliten (vgl. Gleichung 3.8). Daran schließen sich die partiellen Ableitungen der Zenitverzögerung, die durch die elevationsabhängigen Projektionsfunktionen gegeben sind, an (Spalte 5 bis 17). Sie sind ebenfalls zeitvariabel, sodass die Eintragung entsprechend der zeitlichen Auflösung erfolgen muss. Die endgültigen Koeffizienten sind jedoch noch zu gewichten, um Unstetigkeiten zu vermeiden. Alle Beob-

achtungen der ersten Epoche haben die Gewichte $p_5 = 1$ und $p_6 = 0$, sodass der gesamte Wert der Projektionsfunktion als Koeffizient in Spalte 5 steht. Ähnlich verhält es sich bei allen anderen Beobachtungen, deren Zeitstempel ein Vielfaches der Auflösung der Zenitverzögerung ist. Beobachtungen, deren Zeitstempel nicht ein Vielfaches der Auflösung der Zenitverzögerung ist, haben Faktoren, die ungleich 0 und 1 sind (vgl. Beispiel in Abschnitt 3.3.1). Die Koeffizienten der Spalten 18 bis 21 sind die partiellen Ableitungen der horizontalen Gradienten, wobei es pro Beobachtungsgleichung zwei Koeffizienten gibt, nämlich einen Koeffizienten für die Nord-Süd-Richtung und einen Koeffizienten für die Ost-West-Richtung. Die Eintragung erfolgt im Vergleich zur Zenitverzögerung streng zeitvariabel. Abschließend ist im Fall von Phasenbeobachtungen der Koeffizient der Spalte auf 1 zu setzen, der zur Mehrdeutigkeit der jeweiligen Beobachtung gehört. Die Anordnung der Mehrdeutigkeiten richtet sich dabei nach ihrem zeitlichen Vorkommen (Spalte 22 bis 121).

Beschreibung der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_2

Wie aus Gleichung 3.18 ersichtlich, besteht die Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_2 aus zwei Spalten, d. h. je eine Spalte pro GNSS. Die Spalten enthalten die partiellen Ableitungen nach den Empfängeruhrabweichungen δt_a^{System} , wobei die erste Spalte in Relation zu GPS-Beobachtungsgleichungen, also δt_a^G , steht. Je nachdem, zu welchen GNSS eine Beobachtung gehört, enthält die jeweilige Zeilen-Spalten-Kombination eine 1 bzw. 0.

Vektor der verkürzten Beobachtungen \mathbf{l}

Zur Vervollständigung des funktionalen Modells ist abschließend der Vektor der verkürzten Beobachtungen \mathbf{l} zu erstellen (vgl. Gleichung 2.33), dessen Aufbau sich am Aufbau der Koeffizientenmatrizen \mathbf{A}_1 und \mathbf{A}_2 orientiert. Er enthält die gekürzten Phasen- Φ' und Codebeobachtungen C' als Differenz der korrigierten Beobachtungen (vgl. Gleichungen 3.15 und 3.16) und den Näherungswerten für die Beobachtungen¹⁹:

$$\mathbf{l}^T = \left[\begin{array}{ccccccccc} \Phi'(1,1) & \Phi'(1,2) & \dots & \Phi'(1,j) & \dots & \Phi'(e,k) & C'(1,1) & \dots & C'(e,k) \end{array} \right]. \quad (3.19)$$

3.3.3 Stochastisches Modell

Genauso wichtig wie das funktionale Modell ist das stochastische Modell, denn es beinhaltet die Genauigkeitsabschätzungen der Beobachtungsgrößen. Gleichzeitig beeinflusst es die Genauigkeitsmaße der Ausgleichung und der zu schätzenden Parameter.

Gewichtsmatrix \mathbf{P}

Grundlage des stochastischen Modells ist Gleichung 2.37

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

¹⁹Die Näherungswerte für die Beobachtungen ergeben sich durch Einsetzen der Näherungswerte der Unbekannten in die Beobachtungsgleichungen 3.15 und 3.16.

wobei die Varianzen σ_i^2 die Genauigkeiten der Beobachtungen wiedergeben. Auf Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen, die normalerweise als Elemente der Nebendiagonale abgebildet sind, wird verzichtet. Entsprechend den weiteren Ausführungen in Abschnitt 2.5.2 folgend kann Gleichung 3.20 in die Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 und die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} zerlegt werden, woraus sich durch Inversion die Gewichtsmatrix \mathbf{P} ergibt (vgl. Gleichung 2.40). Für das Beispiel aus Abschnitt 3.3.2 lautet die Gewichtsmatrix \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{\Phi}^{1,1} & & & & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & p_{\Phi}^{e,k} & & \\ & & & p_C^{1,1} & \\ & & & & \ddots \\ 0 & & & & & p_C^{e,k} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Gewichte

Mit Einführung der oft benutzten Annahme, dass $\sigma_0^2 = 1 \text{ m}^2$, wird klar, dass die Gewichte

$$p^{ii} = 1/\sigma_i^2 \quad (3.22)$$

lediglich von der Standardabweichung σ_i abhängig sind. Allerdings gibt es drei Faktoren, die eine vereinfachte Handhabung der Standardabweichungen σ_i erschweren und letztlich unmöglich machen:

- Im Fall einer kombinierten Auswertung von GPS- und GLONASS-Code- und Phasenbeobachtungen werden Messgrößen von vier Beobachtungsgruppen j mit zum Teil unterschiedlichen Genauigkeitsniveaus verarbeitet, infolgedessen sich auch die Standardabweichungen $\sigma_{i,j}$ unterscheiden.
- Die Beobachtungen einer Beobachtungsgruppe haben unterschiedliche Genauigkeiten, die aus der elevationsabhängigen Beeinflussung der Satellitensignale herrühren. Insbesondere Signale von niedrig stehenden Satelliten sind negativ beeinflusst. Als Hauptursache hierfür gelten troposphärische Restabweichungen und der Mehrwegeeffekt.
- Die der Berechnung der Standardabweichungen zugrunde liegenden Verbesserungen beziehen sich auf eine bestimmte Linearkombination.

Aus den genannten Gründen wird in GNSS-Auswertungen mit einer elevationsabhängigen Gewichtung gearbeitet, die auf den Standardabweichungen der resultierenden Verbesserungen beruht. Unter Umständen gilt pro Beobachtungsgruppe und Linearkombination eine spezielle Gewichtungsfunktion.

Ableitung von Gewichtungsfunktionen

Zur Ableitung der Gewichtungsfunktionen wurden GPS- und GLONASS-Code- und Phasenbeobachtungen von mehreren Referenzstationen sowie mehreren Tagen prozessiert und GPS- und GLONASS-Code- und Phasenresiduen der drei wichtigsten Linearkombinationen (ionosphären-freie Linearkombination sowie *Widelane*- und Melbourne-Wübbena-Linearkombination) berechnet. Bei den verwendeten Codebeobachtungen handelt es sich um P₁/P₂-Beobachtungen und die Phasen-

beobachtungen der *Widelane*-Linearkombination sind bezüglich dem ionosphärischen Einfluss 1. Ordnung korrigiert. Die Elevationsmaske beträgt 10° .

Aus den Verbesserungen eines Elevationsblocks von 1° lassen sich empirische Standardabweichungen in Form von RMS-Werten ermitteln (vgl. Gleichung 2.73), die die Ausgangsdaten einer Regressionsanalyse bilden. Das Ergebnis der insgesamt acht Regressionsanalysen ist je eine Funktion, die die a priori-Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Elevation beschreibt. Sie sind zusammen mit den ursprünglichen Verbesserungen sowie getrennt nach GPS (rot) und GLONASS (blau) in den Abbildungen²⁰ 3.5 bis 3.8 dargestellt.

Abbildung 3.5 stellt die Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination Φ_{IF} dar. Der oben genannte negative Einfluss von Messabweichungen auf Signale von tief stehenden Satelliten ist deutlich zu erkennen. Während Beobachtungen mit Elevationen über 45° Residuen kleiner 2 cm aufweisen, sind Beobachtungen von niedrig stehenden Satelliten wesentlich stärker beeinflusst. Bei Elevationen um 10° ist mit Messabweichungen um einen Dezimeter zu rechnen. Die resultierenden Standardabweichungen sind durch die eingezeichneten Regressionsgeraden gekennzeichnet und veranschaulichen ebenfalls die deutliche Elevationsabhängigkeit. Sie zeigen zudem, dass die Beobachtungen von GPS und GLONASS in ähnlicher Weise durch Messabweichungen beeinträchtigt sind und folglich mit einheitlichen a priori-Standardabweichungen gearbeitet werden kann:

$$s_{\Phi_{IF},GNSS}(e) = \left(\frac{0,9}{\sin(e)} + 0,2 \right) \cdot 0,005. \quad (3.23)$$

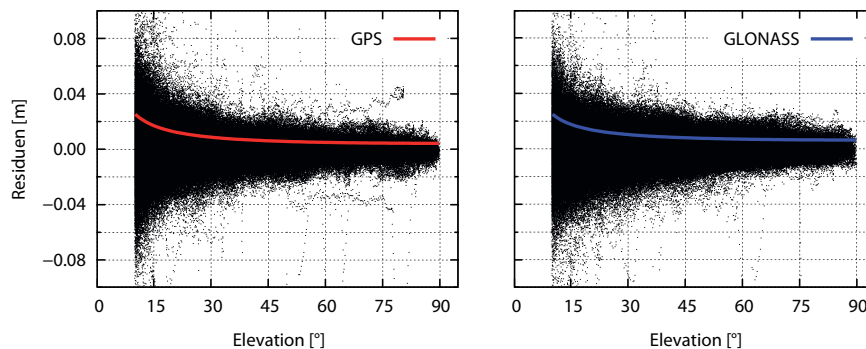


Abb. 3.5: Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination

Im Vergleich zu den Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination Φ_{IF} mit maximalen Werten von 10 cm sind die Coderesiduen der ionosphären-freien Linearkombination C_{IF} deutlich größer und erreichen maximale Werte von 10 m. Dieser Unterschied von zwei Größenordnungen gilt über den gesamten Elevationsbereich (Abbildung 3.6). Eine deutliche Elevationsabhängigkeit ist für beide GNSS erkennbar, allerdings auf unterschiedlichen Niveaus. Vor allem Beobachtungen mit Elevationen größer 30° sind bei GLONASS anfälliger gegenüber Messabweichungen. Die enormen Differenzen zwischen den Residuen von GPS und GLONASS können mit dem stärkeren Rauschen der GLONASS-Codebeobachtungen begründet werden. Im Mittel sind die GPS-Residuen um den Faktor 2 kleiner als die GLONASS-Residuen. Letztlich sind für GPS und GLONASS getrennte

²⁰Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen der Residuen weicht der Wertebereich der y-Achse in den vier Abbildungen voneinander ab. Der Wertebereich der x-Achse bleibt von Änderungen unberührt.

a priori-Standardabweichungen zu verwenden:

$$s_{C_{IF},GPS}(e) = \left(\frac{1,0}{\sin(e)} - 0,1 \right) \cdot 0,4 \quad (3.24)$$

und

$$s_{C_{IF},GLONASS}(e) = \left(\frac{0,5}{\sin(e)} + 1,4 \right) \cdot 0,9. \quad (3.25)$$

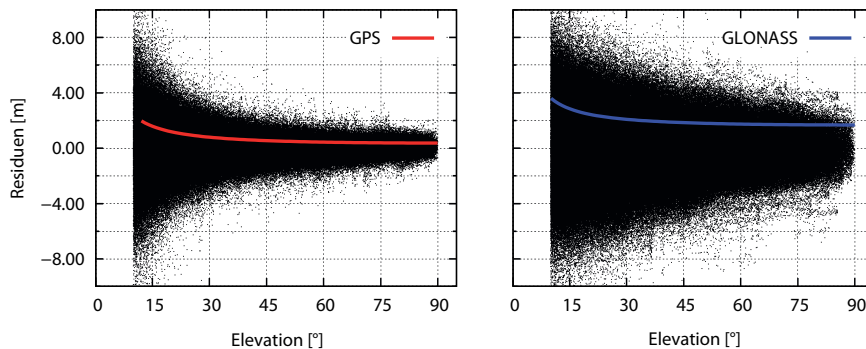


Abb. 3.6: Coderesiduen der ionosphären-freien Code-Linearkombination

Abbildung 3.7 stellt die Phasenresiduen der um den ionosphärischen Effekt 1. Ordnung korrigierten *Widelane*-Linearkombination Φ_{WL} dar. Im Vergleich mit den Phasenresiduen der ionosphären-freien Linearkombination Φ_{IF} sind sie um eine Größenordnung höher. Im Maximum erreichen sie knapp über einen Meter und ab Elevationen größer 45° sind sie kleiner 40 cm. Zwischen den Residuen von GPS und GLONASS sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen, weshalb mit gleichen a priori-Standardabweichungen gearbeitet werden kann:

$$s_{\Phi_{WL},GNSS}(e) = \left(\frac{1,9}{\sin(e)} + 0,3 \right) \cdot 0,04 \quad (3.26)$$

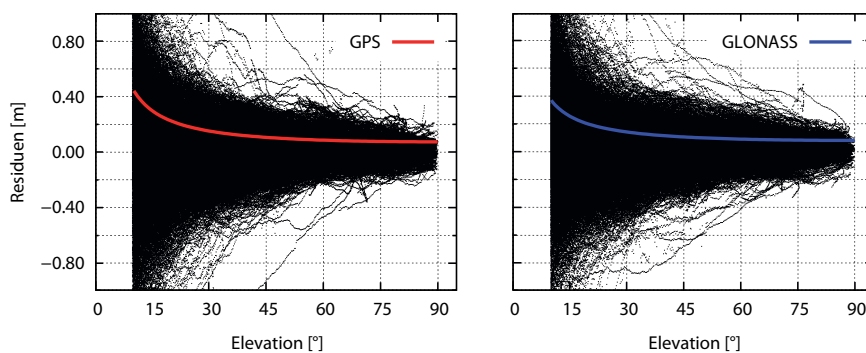


Abb. 3.7: Phasenresiduen der *Widelane*-Linearkombination

Die sowohl aus Phasen- als auch Codebeobachtungen gebildete Melbourne-Wübbena-Linearkombination Φ_{MW} ist zwar nahezu unabhängig von Messabweichungen, jedoch dominiert das im Vergleich zu Phasenbeobachtungen wesentlich höhere Rauschen der Codebeobachtungen die systematischen Messabweichungen (Abbildung 3.8). In Elevationsbereichen größer 30° sind die Messabweichungen

auf dem Niveau von wenigen Dezimetern, wobei sich vor allem in diesem Bereich Unterschiede zwischen den Residuen von GPS und GLONASS erkennen lassen. Aufgrund der schon erwähnten höheren Empfindlichkeit der GLONASS-Codebeobachtungen gegenüber Messabweichungen ist das Rauschen der GLONASS- gegenüber den GPS-Residuen geringfügig größer. Die Beobachtungen von niedrig stehenden Satelliten sind durch Messabweichungen auf dem Niveau von wenigen Metern beeinflusst, wobei keine Unterschiede zwischen GPS und GLONASS zu erkennen sind. Trotz der geringfügigen Differenzen in den Residuen von hochstehenden Satelliten kann mit einheitlichen a priori-Standardabweichungen gearbeitet werden:

$$s_{\Phi_{MW},GNSS}(e) = \left(\frac{0,9}{\sin(e)} + 0,2 \right) \cdot 0,1. \quad (3.27)$$

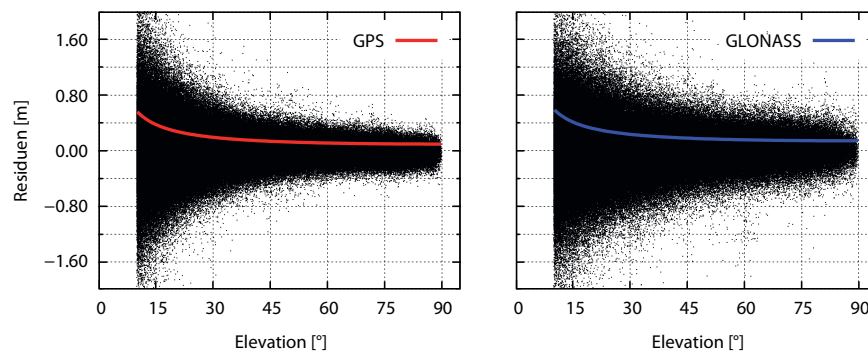


Abb. 3.8: Phasenresiduen der Melbourne-Wübbena-Linearkombination

Fazit

Als Ergebnis der Untersuchung zur elevationsabhängigen Gewichtung bleibt festzuhalten,

- dass Beobachtungen mit großen Elevationen im Vergleich zu Beobachtungen von niedrig stehenden Satelliten weniger stark von Messabweichungen beeinflusst sind, d. h. kleine Verbesserungen aufweisen und daraus resultierend mit einem größeren Gewicht behaftet werden;
- dass GPS- und GLONASS-Phasenbeobachtungen einem nahezu identischen Einfluss durch Messabweichungen unterliegen und folglich pro Linearkombination nur eine Gewichtungsfunktion notwendig ist;
- dass, bezogen auf die ionosphären-freie Code-Linearkombination, GLONASS-Codebeobachtungen um den Faktor 2 verrauschter sind als GPS-Codebeobachtungen und daher GLONASS-Codebeobachtungen gegenüber GPS-Codebeobachtungen um den Faktor 2 abgewichtet werden sollten und
- dass, bezogen auf die ionosphären-freie Linearkombination, Codebeobachtungen um den Faktor 100 verrauschter sind als Phasenbeobachtungen und folglich Code- gegenüber Phasenbeobachtungen um den Faktor 100 abgewichtet werden sollten.

Die aus den Gleichungen 3.23 bis 3.27 resultierenden a priori-Standardabweichungen sind zunächst in Varianzen umzurechnen und diese wiederum werden anschließend genutzt, um die Gewichte der einzelnen Beobachtungen festzulegen (vgl. Gleichung 3.22).

Wie aus den Abbildungen 3.5 bis 3.8 ersichtlich, weichen die empirisch ermittelten Standardabweichungen im Allgemeinen von der tatsächlichen Qualität der Beobachtungsdaten, z. B. als Folge

von erhöhter Mehrwegeausbreitung, ab. In solchen Fällen empfiehlt sich eine Anpassung der a priori-Standardabweichungen und damit der Gewichte durch die Hilfsmittel, die die Varianzkomponentenschätzung zur Verfügung stellt (vgl. Abschnitt 2.5.6).

3.3.4 Sequentielle Ausgleichung

Die Matrizen in den Gleichungen 3.17, 3.18 und 3.19 sowie 3.21 besitzen jeweils $2 * n$ Zeilen (mit n gleich der Anzahl an Gesamtbeobachtungen eines Beobachtungstyps, z. B. $2 * n = 80\,000$), die gemeinsam ausgewertet werden müssen und eine Ausgleichung verlangsamen. Aus diesem Grund wird auf die Vorteile der sequentiellen Ausgleichung (vgl. Abschnitt 2.5.5) zurückgegriffen, die es erlaubt, mit einer wesentlich geringeren Anzahl an Zeilen $2 * j$ (mit j gleich der Anzahl an maximalen Satelliten in einer Epoche, z. B. $2 * j = 50$) zu arbeiten.

Die software-technische Umsetzung erfolgt auf die Art und Weise, dass vor jeder neuen Epoche sämtliche Elemente der Matrizen \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 und \mathbf{P} sowie des Vektors \mathbf{l} auf 0 zusetzen sind. Anschließend werden sie entsprechend den Ausführungen in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 befüllt. Nach jeder Epoche werden die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} und das Absolutglied des Normalgleichungssystems \mathbf{n} aufaddiert (vgl. Gleichungen 2.63 und 2.64). Erst wenn alle n Beobachtungen verarbeitet sind, wird der gekürzte Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$ berechnet (vgl. Gleichung 2.65):

$$\hat{\mathbf{x}}^T = \left[\begin{array}{cccccccccccc} dX & dY & dZ & dIFB & Z^1 & \dots & Z^{anz_Z} & G^1 & \dots & G^{anz_G} & N^1 & \dots & N^{anz_N} \end{array} \right]. \quad (3.28)$$

Die ausgeglichenen Unbekannten $\hat{\mathbf{X}}$ ergeben sich abschließend aus den Näherungswerten der Unbekannten \mathbf{X}^0 und den Zuschlägen der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ nach Gleichung 2.35.

3.3.5 Singularitäten

Die zu schätzenden Unbekannten aus Gleichung 3.28 sind zum Teil nicht unabhängig voneinander, vielmehr bestehen zwischen ihnen Beziehungen. Der Tatsache, dass diese Singularitäten eine Invertierung der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} verhindern, ist es geschuldet, dass bestimmte Bedingungen eingeführt werden müssen. Bei einer kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertung unterscheidet man zwischen zwei Arten von Singularitäten. Jede der beiden Arten erfordert eine andere Vorgehensweise, um die entsprechenden Singularitäten zu beheben.

Singularitäten zwischen den Empfängeruhrabweichungen δt_a^{System} und den Mehrdeutigkeiten N

Die Anzahl an Singularitäten zwischen den Empfängeruhrabweichungen δt_a^{System} und den Mehrdeutigkeiten N definiert sich durch die Anzahl an zusammenhängenden Blöcken von Beobachtungen eines GNSS. Im besten Fall gibt es pro GNSS einen Block und somit eine Singularität. Sind jedoch *Cycle-Slips* über alle Satelliten eines GNSS vorhanden, gibt es eine zweite Singularität, usw.

Um ein reguläres Gleichungssystem zu erhalten, ist pro Singularität eine Mehrdeutigkeit des jeweiligen GNSS auf einen beliebigen Wert (z. B. $N_k = 0$) festzusetzen. Die betreffenden Mehrdeutigkeiten verschwinden dann von der Liste der Unbekannten und sind nicht mehr Teil des Unbekanntenvektors $\hat{\mathbf{x}}$. Um mögliche Diskrepanzen - vor allem im Fall von GLONASS - zu vermeiden, sollte es sich

bei den gewählten Mehrdeutigkeiten um Mehrdeutigkeiten eines Satelliten handeln. Diese Satelliten werden als Referenz- oder Basissatelliten bezeichnet.

Singularität zwischen den Mehrdeutigkeiten N und dem *Inter-Frequency Bias* IFB_{Φ}

Die Behebung der Singularität zwischen den Mehrdeutigkeiten N und dem *Inter-Frequency Bias* IFB_{Φ} setzt voraus, dass für alle Mehrdeutigkeiten ein Schätzwert bestimmt wurde. Bedingung dieser Ausgleichung ist jedoch, dass die Koeffizienten des IFB_{Φ} in der Design-Matrix \mathbf{A}_1 auch im Fall von GLONASS Null sind, d. h. zunächst wird kein Schätzwert für IFB_{Φ} bestimmt.

Anschließend ist eine zusätzliche GLONASS-Mehrdeutigkeit festzusetzen. Bei der Wahl dieser Mehrdeutigkeit sind zwei Dinge zu beachten: einerseits sollte sie so nah wie möglich an der Ganzzahligkeit liegen und andererseits sollte die Frequenznummer des entsprechenden Satelliten in Nachbarschaft der Frequenznummer des Basissatelliten liegen. Erst wenn diese zusätzliche GLONASS-Mehrdeutigkeit festgesetzt und dadurch ebenfalls nicht mehr Teil der Liste an Unbekannten ist, kann innerhalb einer zweiten Ausgleichung für den Zuschlag ifb_{Φ} ein Schätzwert bestimmt werden. Die einzige Veränderung im Vergleich zur ersten Parameterschätzung betrifft die Koeffizienten in der Design-Matrix \mathbf{A}_1 , die nun entsprechend Abschnitt 3.3.2 nur bei GPS-Beobachtungen Null und bei GLONASS-Beobachtungen durch die Frequenznummer k des jeweiligen Satelliten gegeben sind.

Die beschriebene Vorgehensweise zur Lösung der Singularität zwischen den Mehrdeutigkeiten N und dem *Inter-Frequency Biases* IFB_{Φ} unterscheidet sich nicht von der Herangehensweise, wie sie u. a. Wanninger (2012a) im Fall von RTK anwendet.

3.4 Mehrdeutigkeitslösung

Phasenbeobachtungen haben im Vergleich zu Codebeobachtungen den Nachteil, dass sie mehrdeutig sind, gleichzeitig aber den Vorteil, dass ihr Messrauschen auf dem Niveau von Milli- bis Zentimetern zwei Größenordnungen kleiner ist als das Messrauschen der Codebeobachtungen. Die letztere Eigenschaft ist dafür verantwortlich, dass PPP-Auswertungen vorrangig auf Phasenbeobachtungen beruhen. Die Erfahrungen bei der differentiellen GNSS-Auswertung (RTK bzw. Netz-RTK) zeigen allerdings, dass eine zentimetergenaue Positionsbestimmung bei einer Beobachtungsdauer von deutlich weniger als einer Stunde nur mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten erreichbar ist.

Kontinuierliche Code- und Phasenbeobachtungen von zum Teil mehreren Stunden vorausgesetzt, ist mit PPP eine Positionsbestimmung auf dem Niveau von Zentimetern und besser trotz der Tatsache möglich, dass die Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen nur als reelle Werte geschätzt sind (*float-Lösung*) (Cai und Gao 2007; Hebelbarth 2009; Li u. a. 2009). Ist eine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf ihre ganzzahligen Werte möglich (*fixed-Lösung*), hat dies einerseits Auswirkungen auf das Ergebnis der Koordinatenschätzung, wobei sich insbesondere die Genauigkeit der Ostkomponente verbessert, und andererseits verkürzt sich die Konvergenzzeit. Die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten erfordert jedoch bestimmte Informationen zu den Mehrdeutigkeiten, die im Abschnitt 3.2.5 unter dem Namen *Fractional-Cycle Biases* (FCB) eingeführt wurden. Frequenzabhängige Effekte sind zudem im Fall von GLONASS zu berücksichtigen.

3.4.1 Linearkombinationen

Mit Hilfe von präzisen Orbit- und Uhrkorrekturen sind die beiden Messabweichungen mit dem größten Anteil am „Fehlerhaushalt“ einer PPP-Auswertung weitestgehend eliminiert. Die troposphärische Refraktion wird zum einen modelliert und zum anderen als Unbekannte im Ausgleichungsprozess mit geschätzt. Lediglich für die ionosphärische Refraktion gibt es bisher keine Alternative zur ionosphären-freien Linearkombination, die den Einfluss der Ionosphäre fast vollständig beseitigt. Von daher basiert die präzise Positionsbestimmungen mit PPP auf der ionosphären-freien Phasen- (und Code)-Linearkombination. Dieser Sachverhalt gilt sowohl für Koordinatenlösungen mit ungelösten als auch mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten.

Im Vergleich mit den Wellenlängen der Originalsignale ist die ionosphären-freie Linearkombination durch eine Wellenlänge gekennzeichnet (vgl. Tabelle 2.2), die für die Festsetzung von Mehrdeutigkeiten eher ungeeignet ist. Um dennoch die ionosphären-freie Linearkombination mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten zur Berechnung der Koordinaten verwenden und gleichzeitig den Nachteil der kurzen (GLONASS) bis sehr kurzen (GPS) Wellenlänge umgehen zu können, wird die Idee der effektiven Wellenlänge ausgenutzt. Ihr liegt die Tatsache zugrunde, dass die Festsetzung von Mehrdeutigkeiten einer Linearkombination einen Zwang auf die Mehrdeutigkeiten aller anderen Linearkombinationen ausübt (vgl. Abschnitt 2.4).

Diesem Umstand ist es geschuldet, dass PPP-Auswertungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten auf einem zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren beruhen, wobei im ersten Schritt die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten festzusetzen sind. Hierfür wird normalerweise die Melbourne-Wübbena-Linearkombination als spezielle Form der *Widelane*-Linearkombination verwendet. Mit ihr lassen sich die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten trotz des Einflusses von Code-Mehrwege und Code-Rauschen verhältnismäßig leicht festsetzen. Es ist natürlich auch möglich, die eigentliche *Widelane*-Linearkombination zur Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten heranzuziehen. Obwohl dem Einfluss der ionosphärischen Refraktion durch die Korrektur mittels GIM-Modellen entgegengewirkt wird, erschweren verbleibende ionosphärische Restabweichungen die Mehrdeutigkeitsfestsetzung.

Der aus der Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten resultierende Zwang, dass die Mehrdeutigkeiten der Originalsignale identische Werte aufweisen müssen, hat zur Folge, dass die ionosphären-freie Linearkombination nicht mehr mit ihrer ursprünglichen Wellenlänge gebildet werden muss, sondern die *Narrowlane*-Wellenlänge zur Berechnung der ionosphären-freien Linearkombination verwendet werden kann (vgl. Tabelle 2.3). Da gleichzeitig die ionosphärische Refraktion fast vollständig beseitigt wird, ist die ionosphären-freie Linearkombination mit λ_{NL} als effektiver Wellenlänge wesentlich besser zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung geeignet. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Mehrdeutigkeiten dann natürlich um *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten handelt.

3.4.2 Methoden zur Beseitigung der *Fractional-Cycle Bias* (FCB)

Sowohl im Satelliten als auch im Empfänger auftretende instrumentelle Verzögerungen bewirken eine Veränderung der Mehrdeutigkeit. Der Gesamtbeitrag der Verzögerungen kann mehrere Wellenlängen betragen. Im Ergebnis zerstören die Verzögerungen die Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeiten (vgl. Gleichung 2.8). Die Abweichungen der geschätzten Mehrdeutigkeiten von ihrer Ganzzahligkeit werden als *Fractional Part* (FP) bezeichnet. Um Mehrdeutigkeiten festsetzen zu können, müssen die

FPs durch Anbringen von *Fractional-Cycle Biases* (FCB) beseitigt werden (vgl. Abschnitt 3.2.5). Zur Ableitung derartiger Korrekturen, die für alle Satelliten und Linearkombinationen notwendig sind, wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Ansätze entwickelt. Die verschiedenen Strategien (Tabelle 3.9), auf die im Folgenden näher eingegangen wird, lassen sich entweder der *Fractional-Cycle Bias* (FCB)- oder der *Integer Recovery Clock* (IRC)-Methode zuordnen (Geng u. a. 2010a).

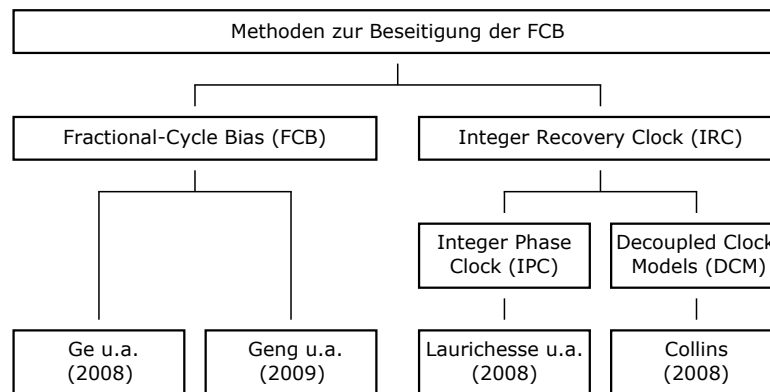


Abb. 3.9: Methoden zur Beseitigung der *Fractional-Cycle Bias* (FCB)

Fractional-Cycle Bias (FCB)-Methode

Erste Untersuchungen bezüglich FCB und ihrer Beseitigung wurden von Gabor und Nerem (1999) durchgeführt. Ihr Hauptaugenmerk lag auf der Berechnung der FCBs und der Analyse der zeitlichen Variabilität der berechneten FCB. Die Basis ihrer Berechnungen bilden einfache Differenzen zwischen den Beobachtungen zweier Satelliten, wodurch die instrumentellen Verzögerungen des Empfängers b (vgl. Gleichung 2.8) eliminiert werden. Sowohl die MW-FCBs als auch die IF-FCBs ergeben sich aus dem Mittel der FPs aller geschätzten Mehrdeutigkeiten (getrennt nach Satellitenpaar). Die abgeleiteten MW-FCBs weisen zum einen eine tägliche Stabilität auf, d. h. unterschiedliche Einfach-Differenz-Mehrdeutigkeiten besitzen ähnliche FCBs, und unterliegen zum anderen einem Trend, der im Mittel $0,5 \text{ cy/a}$ nicht übersteigt. Wie die MW-FCBs zeigen auch die abgeleiteten IF-FCBs eine tägliche Übereinstimmung. Allerdings sind die Variationen von Tag zu Tag eher zufällig.

Die Überlegungen von Ge u. a. (2008) gehen zurück auf die Erfahrungen bei der relativen Positionsbestimmung. Insbesondere bei kurzen Basislinienlängen ist eine nahezu vollständige Festsetzung aller Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten möglich. Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten sind jedoch nur nahe der Ganzzahligkeit, wenn die beiden dazugehörigen Einfach-Differenz-Mehrdeutigkeiten bzw. deren FPs sehr gut zueinander passen. Daraus schlussfolgern sie, dass bei PPP trotz Phasenverzögerungen (*Uncalibrated Phase Delay*, UPD) eine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination möglich sein sollte, insofern FCBs der Melbourne-Wübbena- und der ionosphären-freien Linearkombination berechnet und als Korrekturen angebracht werden können (Abbildung 3.10). Zur Validierung dieser Annahme berechneten Ge u. a. (2008) FCBs der beiden genannten Linearkombinationen anhand der Beobachtungsdaten von über 180 IGS-Stationen von 14 aufeinanderfolgenden Tagen im Jahr 2006. Die MW-FCBs eines einzelnen Tages als auch die MW-FCBs über den gesamten Zeitraum weisen eine Genauigkeit von $0,05 \text{ cy}$ auf. Schwankungen von bis zu $0,4 \text{ cy}$ sind dagegen bei den IF-FCBs zu beobachten, die im Allgemeinen eine wesentlich schlechtere zeitliche Stabilität besitzen. Werden MW-FCBs täglich und IF-FCBs alle 15 min aufaddiert, liegt die Festsetzungsquote bei über 90 % (MW, Kriterium: $0,25 \text{ cy}$) bzw. bei über

80 % (IF, Kriterium: 0,1 cy). Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung wirkt sich insbesondere auf die Ostkomponente, die eine Genauigkeitssteigerung von 30 % erfährt, aus.

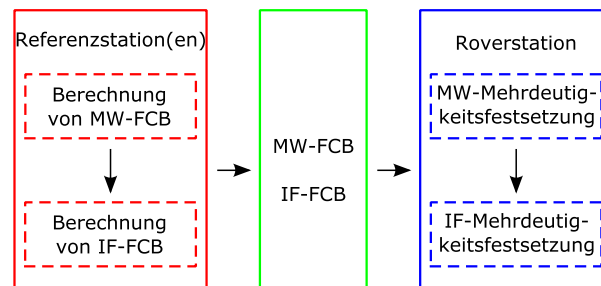
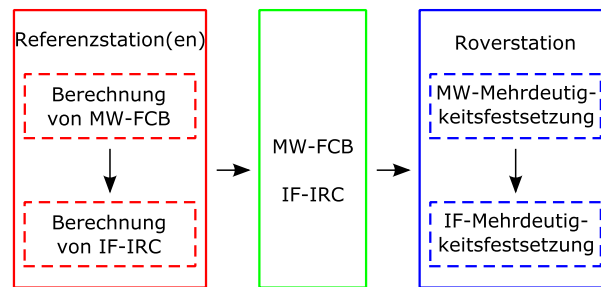


Abb. 3.10: *Fractional-Cycle Bias* (FCB)-Methode

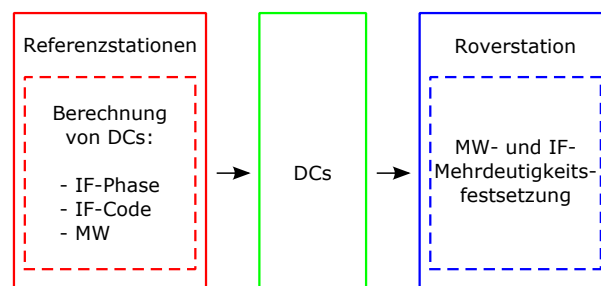
Ein entscheidender Nachteil des Ansatzes von Ge u. a. (2008) ist der hohe Aufwand, der für die Berechnung der IF-FCBs mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min notwendig ist. Im Vergleich zu Ge u. a. (2008) beschränken sich Geng u. a. (2009) auf einem IF-FCB pro Satellitenbogen und damit auf zwei IF-FCBs pro 24 h. Ansonsten sind beide Ansätze identisch. Mittels Beobachtungsdaten von sieben aufeinanderfolgenden Tagen im Jahr 2007 berechneten sie MW- und IF-FCBs, die später als Korrektur für stündliche Beobachtungsdaten dienten. Die IF-FCBs eines Satellitenbogens aller Stationen variieren auf dem Niveau von 0,2 cy. Gleichzeitig gibt es signifikante Unterschiede zwischen den gemittelten IF-FCBs der einzelnen Satellitenbögen eines Satelliten. Im Endergebnis haben knapp 91 % aller definierten und mehr als 97 % aller unabhängigen IF-Mehrdeutigkeiten eine Abweichung von der Ganzzahligkeit kleiner 0,15 cy. Gleichzeitig bewirkt die Mehrdeutigkeitsfestsetzung eine Genauigkeitssteigerung von knapp 87 % in der Ostkomponente und von über 68 % in der 3D-Position.

Integer Recovery Clock (IRC)-Methode

Das Modell von Laurichesse u. a. (2008) zeigt im Vergleich mit den Ansätzen von Ge u. a. (2008) und Geng u. a. (2009) sowohl Gemeinsamkeiten als auch eindeutige Differenzen. Einer der Hauptunterschiede besteht in der Verwendung von undifferenzierten Beobachtungen, weshalb die Verzögerungen im Empfänger nicht eliminiert werden und daher in den Berechnungen zu berücksichtigen sind. Auf die Berechnung der FCBs auf der Basis von Beobachtungsdaten eines Netzes von Stationen hat dies insofern eine Auswirkung, als dass die Empfängerverzögerung b einer Station auf einen beliebigen Wert, z. B. $b = 0$, festgelegt werden muss. Erst dann ist es möglich, sowohl die Verzögerungen b aller weiteren Stationen, als auch die FCBs zu ermitteln. Im Falle der MW-FCBs entspricht dies letztlich der Berechnung von Ge u. a. (2008) und Geng u. a. (2009). In Bezug auf die IF-FCBs gehen Laurichesse u. a. (2008) aber einen anderen Weg. Der zweite Hauptunterschied ist dadurch gekennzeichnet, dass es keine direkte Berechnung der IF-FCBs gibt. Stattdessen erfolgt eine indirekte Berechnung. Hierbei werden die Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination als festgesetzt angenommen, sodass die geschätzten Uhrparameter auch die Informationen zu den IF-FCBs enthalten, d. h. Uhrparameter und IF-FCBs verschmelzen zu einer gemeinsamen Korrektur, der *Integer Phase Clock* (IPC) (Abbildung 3.11).

Abb. 3.11: *Integer Phase Clock (IPC)-Methode*

Sowohl die Ansätze der FCB-Methode als auch die Strategie von Laurichesse u. a. (2008) beschäftigen sich lediglich mit den Phasenverzögerungen (der Satelliten und der Empfänger) sowie deren Kalibrierung. Die Auswirkungen der Codeverzögerungen auf die Schätzung und Festsetzung der Phasemehrdeutigkeiten bleiben indes unbeachtet. Ausgehend vom traditionellen PPP-Modell, das aus den Beobachtungsgleichungen der ionosphären-freien Code- und Phasen-Linearkombination besteht, zeigt Collins (2008), dass die geschätzten Mehrdeutigkeiten nicht nur durch Phasenverzögerungen, sondern auch durch Codeverzögerungen, beeinflusst sind. Von daher sind neben Phasen- auch Codeverzögerungen zu berücksichtigen. Zur Trennung (Entkopplung) des Einflusses von Satelliten- und Empfänger-Code- und Phasenverzögerungen erweitert Collins (2008) das traditionelle Modell durch Hinzunahme der Melbourne-Wübbena-Linearkombination. Im Gegensatz zu den präzisen Uhrkorrekturen des IGS, die nur eine gemeinsame Uhrkorrektur für Code- und Phasenbeobachtungen zur Verfügung stellen, beinhalten die Uhrkorrekturen des *Decoupled Clock Models (DCM)* je eine Uhrkorrektur für Code- und Phasenbeobachtungen sowie eine dritte Uhrkorrektur für die Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Abbildung 3.12). Die Berechnung der „entkoppelten“ Uhren ist nur innerhalb eines Netzes von Stationen möglich. Auf diese Art und Weise geschätzte Uhrkorrekturen weisen eine im Vergleich zu den Uhrkorrekturen des Standardmodells um den Faktor 2 bessere Wiederholgenauigkeit auf. Die Verwendung von DCM-Uhrkorrekturen führt bei 24 h-Datensätzen sowohl bei geschätzten als auch bei festgesetzten Mehrdeutigkeiten zu einer Genauigkeitssteigerung der Ostkomponente. Die Genauigkeiten der Nordkomponente und der Höhe bleiben indes gleich (Collins u. a. 2008).

Abb. 3.12: *Decoupled Clock Model (DCM)-Methode*

Vergleich

Im Unterschied zu den Ansätzen der FCB-Methode, die auf Einfach-Differenz-Beobachtungen basieren, verzichten die Ansätze der IRC-Methode auf jegliche Bildung von Differenzen und arbeiten stattdessen mit undifferenzierten Beobachtungen. Daraus ergibt sich bei der IRC-Methode eine andere

Behandlung der Empfängerverzögerungen. Je nach Methode bzw. Ansatz unterscheiden sich zudem die resultierenden Korrekturen: zum einen aus den geschätzten Mehrdeutigkeiten abgeleitete FCBs und zum anderen uhr-ähnliche Parameter.

Um die Äquivalenz von FCB- und IRC-Methode zu überprüfen,prozessierten Geng u. a. (2010a) die Beobachtungsdaten eines Jahres von über 350 Stationen mit Hilfe der beiden Denkweisen, d. h. pro Datensatz gab es eine FCB- und eine IRC-Koordinatenlösung. Aus mehr als 100 000 Koordinatenpaaren berechneten sie Koordinatenabweichungen für alle drei Koordinatenkomponenten. Die systematischen Abweichungen zwischen den Koordinaten der beiden Methoden sind mit maximal 0,2 mm (Ost) vernachlässigbar klein. Die resultierenden Standardabweichungen sind nicht größer als 2 mm (Höhe). Aus den Ergebnissen schlussfolgern Geng u. a. (2010a) die theoretische Äquivalenz von FCB- und IRC-Methode.

Eine ausschließlich theoretische Betrachtungsweise der drei Ansätze FCB, IPC und DCM verfolgen Shi und Gao (2014). Aufbauend auf einer einheitlichen Notation der zugrunde liegenden Beobachtungsgleichungen analysieren sie die jeweilige Implementierung auf Seiten eines Netzwerk-Betreibers und auf Nutzer-Seite. Unter Annahme, dass die Mehrdeutigkeiten korrekt festgesetzt wurden, kommen Shi und Gao (2014) zum Ergebnisse, dass die drei Ansätze trotz unterschiedlicher Parametrisierung zu gleichwertigen Koordinatenlösungen führen.

3.4.3 Methoden der Mehrdeutigkeitslösung

Grundsätzlich wird zwischen geschätzten und festgesetzten Mehrdeutigkeiten klassifiziert. Je nach Art der Positionsbestimmung, d. h. RTK, Netz-RTK oder PPP, kann der Abstand der geschätzten Mehrdeutigkeiten von der Ganzzahligkeit als Folge von nicht-modellierten und zufälligen Abweichungen variieren. Je geringer dieser Abstand und je kleiner die Standardabweichung der Mehrdeutigkeit ist, desto sicherer ist es, dass die nächstliegende ganzzahlige Mehrdeutigkeit die richtige Mehrdeutigkeit ist, und desto sicherer kann die geschätzte Mehrdeutigkeit festgesetzt werden (Dong und Bock 1989). Aufgrund der Korrelationen zwischen den Mehrdeutigkeiten muss die nächste Ganzzahl aber nicht unbedingt die richtige Mehrdeutigkeit sein.

Jede festgesetzte Mehrdeutigkeit verbessert das funktionale Modell, da sie zur Dekorrelation zwischen den Mehrdeutigkeiten selbst, als auch zur Dekorrelation zwischen Mehrdeutigkeiten und den weiteren Unbekannten, insbesondere der Stationskoordinate, beiträgt. Erst festgesetzte Mehrdeutigkeiten erlauben eine schnelle Konvergenz der Koordinatenschätzung und führen insbesondere zu einer Genauigkeitssteigerung der Ostkomponente (Blewitt 1989).

Eine Mehrdeutigkeit wird als „festgesetzt“ bezeichnet, wenn die Mehrdeutigkeiten zweier Linearkombinationen festgesetzt sind. Bezogen auf den in Abschnitt 3.4.1 erläuterten Umweg mit der Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination (bzw. *Widelane*-Linearkombination) heißt das, dass sowohl die *Widelane*- als auch die ionosphären-freie Mehrdeutigkeit festgesetzt sein müssen, bevor die Mehrdeutigkeit als „festgesetzt“ bezeichnet werden kann. Eine Phasenbeobachtung, deren Mehrdeutigkeit festgesetzt ist, entspricht einer mehrdeutigkeitslosen Phasen-, d. h. Codebeobachtung mit Rauschen auf Millimeter-Niveau. Mit jeder festgesetzten Mehrdeutigkeit reduziert sich die Anzahl an zu schätzenden Parametern um eins. Im besten Fall können alle Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden. Ab einer Quote von 80 % kann man von einer *fixed*-Lösung sprechen, andernfalls handelt es sich um eine *float*-Lösung.

Allgemein

Wie erwähnt, ist eine Positionsbestimmung mit cm-Genauigkeit nur möglich, wenn Beobachtungen von ausreichender Dauer vorliegen oder die reell-wertigen Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen durch Festsetzung auf ganzzahlige Werte aus der Auswertung eliminiert werden können. Letzteres ist mit den herkömmlichen Mitteln der Ausgleichsrechnung nicht durchführbar, sondern erfordert eine Auswertung, die in drei aufeinander aufbauenden Schritten erfolgt und in deren Mittelpunkt die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten, d. h. die Mehrdeutigkeitslösung (*Ambiguity Resolution*, AR) steht (Abbildung 3.13).

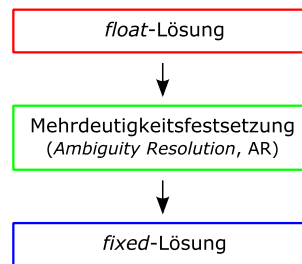


Abb. 3.13: Ablauf der Mehrdeutigkeitslösung

Ausgangspunkt aller Strategien ist eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, deren Grundlage die Beobachtungsgleichungen 3.15 und 3.16 sind, die zusätzlich mittels FCBs bzw. IRCs korrigiert wurden. Das Ergebnis dieser Ausgleichung ist die bestmögliche Schätzung aller Unbekannten und zwar in Form von reell-wertigen Parametern. Zu den Unbekannten gehören auch die Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen (Anzahl n), deren besondere Eigenschaft, die Ganzzahligkeit, zunächst außer Acht gelassen wird. Aufgrund der Berücksichtigung von FCBs bzw. IRCs sowie im Fall von GLONASS-Phasenbeobachtungen durch die a priori-Korrektur des IFB und vor allem bei einer ausreichenden Anzahl an Beobachtungen sollten die Mehrdeutigkeiten dennoch nahe der Ganzzahligkeit sein. Wegen der reell-wertigen Schätzung der Mehrdeutigkeiten wird das Ergebnis einer derartigen Ausgleichung auch als *float-Lösung* bezeichnet.

Die im ersten Schritt geschätzten Mehrdeutigkeiten (sowie die dazugehörigen Varianzen und Kovarianzen) sind Grundlage der anschließenden Mehrdeutigkeitslösung. Hierbei differenziert man zwischen verschiedenen Strategien, die sich zum einen im Berechnungsaufwand und zum anderen hinsichtlich der Berücksichtigung der Korrelationen der Mehrdeutigkeiten unterscheiden: *Integer Rounding* (IR), *Integer Bootstrapping* (IB) und *Integer Least-Squares* (ILS). Auf die einzelnen Strategien wird im Anschluss an diese überblicksmäßige Einführung näher eingegangen. Neben der eigentlichen und im Vordergrund stehenden Bestimmung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten ist die Überprüfung der Mehrdeutigkeitsfestsetzung anhand statistischer Tests die zweite wichtige Säule innerhalb dieses zweiten Schrittes. Eine Validierung der Mehrdeutigkeitslösung wird hauptsächlich bei den Methoden angewendet, die zur Gruppe der ILS-Algorithmen gehören.

Abschließend wird erneut eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Im Gegensatz zur Parameterschätzung im ersten Schritt sind jedoch nur noch die Mehrdeutigkeiten Teil der Unbekannten, die im zweiten Schritt nicht festgesetzt werden konnten. Im besten Fall also keine Mehrdeutigkeit. Alle ganzzahligen Mehrdeutigkeiten werden entweder mit Zwang, d. h. mit hohem Gewicht, eingeführt oder es werden die zu einer Mehrdeutigkeit gehörenden Beobachtungen um den entsprechenden Wert der Mehrdeutigkeit korrigiert. Aufgrund der normalerweise großen

Anzahl an festgesetzten Mehrdeutigkeiten wird das Ergebnis einer derartigen Ausgleichung auch als *fixed*-Lösung bezeichnet.

Integer Rounding (IR)

Integer Rounding (IR) stellt die einfachste Variante dar, Mehrdeutigkeiten festzusetzen (Abbildung 3.14). Die Bestimmung der festgesetzten Mehrdeutigkeiten erfolgt durch Runden der geschätzten Mehrdeutigkeiten \check{N} auf die nächste Ganzzahl \hat{N} (Teunissen 1999):

$$\check{N}_{IR} = \begin{pmatrix} \check{N}_{1,IR} \\ \check{N}_{2,IR} \\ \vdots \\ \check{N}_{n,IR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\hat{N}_1] \\ [\hat{N}_2] \\ \vdots \\ [\hat{N}_n] \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

wobei $[\hat{N}_i]$ das Runden der i-ten Mehrdeutigkeit auf die nächste Ganzzahl kennzeichnet.

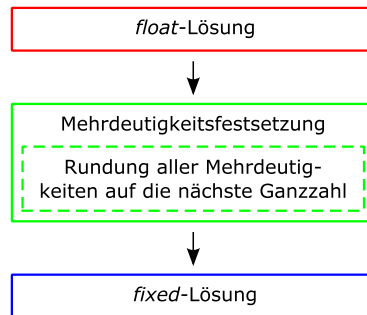


Abb. 3.14: Mehrdeutigkeitslösung nach *Integer Rounding* (IR)

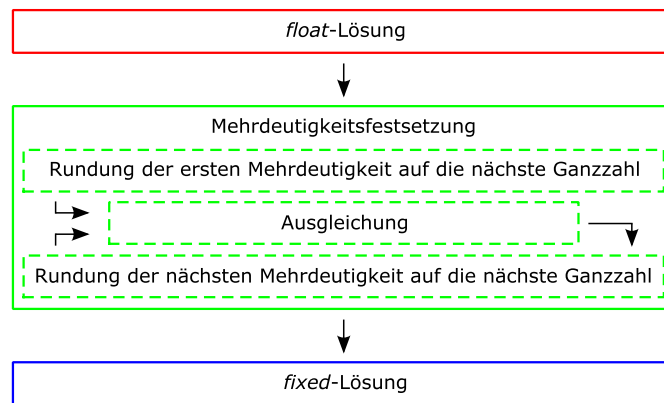
Es ist ersichtlich,

- dass die Reihenfolge, in der die Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden, keine Rolle spielt;
- dass die Mehrdeutigkeiten nicht hinsichtlich ihres Abstandes zur Ganzzahligkeit geprüft werden; und
- dass die aus der Kovarianzmatrix der Unbekannten Σ_{xx} (vgl. Gleichung 2.51) bekannten Korrelationen zwischen den Mehrdeutigkeiten unberücksichtigt bleiben.

Integer Bootstrapping (IB)

Die Verallgemeinerung des IR stellt das *Integer Bootstrapping* (IB) dar. Im Vergleich zu IR werden nicht alle Mehrdeutigkeiten gleichzeitig auf ihren nächsten ganzzahligen Wert gerundet, sondern nacheinander, weshalb man auch von *Sequential Integer Rounding* (SIR) spricht. Gleichzeitig finden bei dieser sequentiellen Vorgehensweise auch die Korrelationen der Mehrdeutigkeiten Berücksichtigung, wobei die Varianzen und Kovarianzen der Mehrdeutigkeiten als Teil der Kovarianzmatrix der Unbekannten Σ_{xx} (vgl. Gleichung 2.51) zur Verfügung stehen (Abbildung 3.15).

Die sequentielle Variante des IR startet mit der Festsetzung der ersten Mehrdeutigkeit durch Rundung von \check{N}_1 auf die nächste Ganzzahl $\check{N}_{1,IB}$. Alle weiteren Mehrdeutigkeiten sind nun entsprechend ihrer Korrelation mit der ersten Mehrdeutigkeit zu korrigieren, z. B. wird \check{N}_2 zu $\check{N}_{2|1}$. Mit $\hat{N}_{i|I}$ wird

Abb. 3.15: Mehrdeutigkeitslösung nach *Integer Bootstrapping* (IB)

die i -te Mehrdeutigkeit bezeichnet, die sich aus der Festsetzung von $I = 1, \dots, (i-1)$ sequentiell gerundeten Mehrdeutigkeiten ergibt. Anschließend ist die zweite Mehrdeutigkeit $\hat{N}_{2|1}$ auf die nächste Ganzzahl \check{N}_2 zu runden und alle verbleibenden Mehrdeutigkeiten werden entsprechend ihrer Korrelation mit der zweiten Mehrdeutigkeit korrigiert. Der Wechsel aus Korrektur und Rundung wiederholt sich solange, bis alle n Mehrdeutigkeiten durchlaufen wurden. Der sich daraus ergebende Algorithmus lässt sich wie folgt beschreiben (Teunissen 1999):

$$\check{\mathbf{N}}_{IB} = \begin{pmatrix} \check{N}_{1,IB} \\ \check{N}_{2,IB} \\ \vdots \\ \check{N}_{n,IB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\hat{N}_1] \\ [\hat{N}_{2|1}] \\ \vdots \\ [\hat{N}_{n|n-1}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\hat{N}_1] \\ [\hat{N}_2 - \sigma_{21}\sigma_1^{-2}(\hat{N}_1 - \check{N}_{1,IB})] \\ \vdots \\ [\hat{N}_n - \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{n,i|I}\sigma_{i|I}^{-2}(\hat{N}_{i|I} - \check{N}_{i,IB})] \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Insbesondere der ersten festzusetzenden Mehrdeutigkeit \hat{N}_1 kommt eine besondere Rolle zu. Sie sollte daher sorgfältig ausgewählt sein. Gleiches gilt im Grunde auch für alle weiteren Mehrdeutigkeiten, da sich jede Festsetzung auf alle Mehrdeutigkeiten auswirkt. Die Reihenfolge, in der die Mehrdeutigkeiten behandelt werden, ist daher nicht frei wählbar. Vielmehr orientiert sie sich an den Abständen der Mehrdeutigkeiten zur Ganzzahligkeit, dem sogenannten *Fractional Part* (FP). Es wird immer die Mehrdeutigkeit ausgewählt, deren FP am kleinsten ist.

Anmerkung: Für den Fall, dass die Mehrdeutigkeiten nicht miteinander korreliert sind, d. h. $\sigma_{i,j} = 0$ (mit $i \neq j$), und kein Test der FPs hinsichtlich eines Schwellwertes erfolgt, führen *Integer Rounding* und *Integer Bootstrapping* zu einem identischen Ergebnis: $\check{\mathbf{N}}_{IB} = \check{\mathbf{N}}_{IR}$.

Integer Least-Squares

Wie der Name *Integer Least-Squares* (ILS) schon vermuten lässt, basiert die Bestimmung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten auf einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Das Ziel von ILS ist die Minimierung der Residuen zwischen reellwertigen und ganzzahligen Mehrdeutig-

keiten (Teunissen 1993, 1995):

$$\left(\hat{\mathbf{N}} - \check{\mathbf{N}}_{ILS}\right)^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} \left(\hat{\mathbf{N}} - \check{\mathbf{N}}_{ILS}\right) \rightarrow \min. \quad (3.31)$$

Wie aus Gleichung 3.31 ersichtlich, können die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten $\check{\mathbf{N}}_{ILS}$ nicht auf so einfache Art und Weise berechnet werden, wie dies beim *Integer Rounding* (vgl. Gleichung 3.29) und *Integer Bootstrapping* (vgl. Gleichung 3.30) der Fall ist. Stattdessen verlangt die Lösung von Gleichung 3.31 effektive Suchverfahren. In den 1990er Jahren wurde eine Vielzahl derartiger Algorithmen entwickelt. Eine Übersicht sowie einen Einblick in die verschiedenen Strategien geben u. a. Kim und Langley (2000) und Hofmann-Wellenhof u. a. (2008).

Die meisten der in Kim und Langley (2000) und Hofmann-Wellenhof u. a. (2008) genannten Techniken verfolgen ein Suchverfahren, welches auf drei Schritten beruht (Abbildung 3.16). Zu Beginn werden Kombinationen von potentiellen ganzzahligen Mehrdeutigkeiten in Form von Lösungsvektoren berechnet, indem für jede geschätzte Mehrdeutigkeit ein Suchraum erzeugt wird. Der Suchraum einer Mehrdeutigkeit definiert sich durch die geschätzte Mehrdeutigkeit sowie deren Genauigkeit, die ebenfalls Teil der *float*-Lösung ist, und enthält die möglichen ganzzahligen Mehrdeutigkeiten. Da unter den ermittelten Lösungsvektoren der Lösungsvektor sein muss, der Gleichung 3.31 erfüllt, wäre es sinnvoll, pro Mehrdeutigkeit einen möglichst großen Suchraum zu erzeugen. Damit erhöht sich aber die Anzahl an Kombinationen, was wiederum zu einer Steigerung der benötigten Rechenzeit führt.

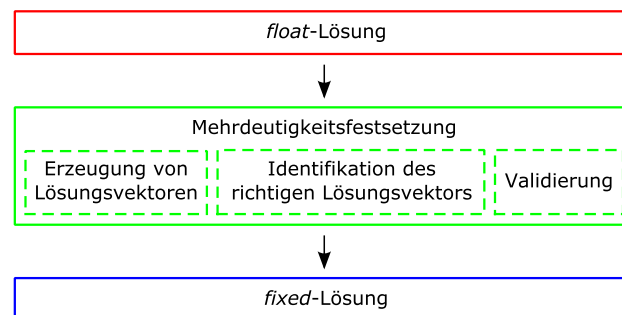


Abb. 3.16: Mehrdeutigkeitslösung nach *Integer Least-Squares* (ILS)

Die im ersten Schritt erzeugten Lösungsvektoren, d. h. die Kombinationen von potentiellen ganzzahligen Mehrdeutigkeiten, werden im zweiten Schritt herangezogen, um den korrekten Lösungsvektor zu identifizieren. Der korrekte Lösungsvektor zeichnet sich durch Erfüllung von Gleichung 3.31 aus und enthält die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten, die am wahrscheinlichsten sind.

Ob der korrekte Lösungsvektor zugleich auch der beste Lösungsvektor ist, wird im dritten Schritt überprüft. Zur Validierung der Mehrdeutigkeitsfestsetzung gibt es zwei Ansätze, die entweder gemeinsam oder jeder für sich angewendet werden. Zumeist erfolgt die Plausibilitätsprüfung der Mehrdeutigkeitslösung anhand des Vergleiches der Verbesserungsquadratsummen der zweitbesten und besten Lösung. Ist das Verhältnis beider Verbesserungsquadratsummen größer als ein bestimmter Schwellwert (z. B. 3), gilt der beste zugleich als wahrer Lösungsvektor. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei der Mehrdeutigkeitslösung um eine korrekte Mehrdeutigkeitsfestsetzung handelt, ist die zweite wichtige Kenngröße. Die Erfolgsquote (engl. *success rate*) kann Werte zwischen 0 und 1

bzw. 0 und 100 % annehmen. Sie ist von drei Faktoren abhängig: dem funktionalen Modell (Beobachtungsgleichung), dem stochastischen Modell (Genauigkeit der Beobachtungen) und dem gewählten Ansatz zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung (Joosten und Tiberius 2000).

Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment (LAMBDA)

Eine der entscheidenden Hürden der ILS-Methoden stellt die Korrelation der Mehrdeutigkeiten untereinander dar. Die aus der *float*-Lösung herrührenden Kovarianzen der Mehrdeutigkeiten führen, wie beim *Integer Bootstrapping* ersichtlich, durch die Festsetzung einer einzelnen Mehrdeutigkeit zu einer komplexen Beeinflussung aller geschätzten Mehrdeutigkeiten.

Genau an dieser Stelle setzt die von Teunissen (1993) eingeführte *Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment* (LAMBDA)-Methode an. Durch Transformation werden die miteinander korrelierten Mehrdeutigkeiten in Mehrdeutigkeiten umgerechnet, die nunmehr unkorreliert sind. Bezogen auf den Suchraum, der durch zwei geschätzte Mehrdeutigkeiten gegeben ist, entspricht dies einer Änderung von einer gestreckten Ellipse hin zu einer kreisähnlichen Fläche. Auf diese Weise ermöglicht LAMBDA eine Einschränkung des Suchraums, was zum einen zu einer höheren Effizienz des ILS-Ansatzes führt und zum anderen die Erfolgsquote der Mehrdeutigkeitsfestsetzung erhöht (Teunissen und Kleusberg 1998).

3.5 Kombinierte GPS- und GLONASS-PPP-Auswertung

Im Abschnitt 3.4.2 wurden verschiedene Ansätze zur Beseitigung der FCBs vorgestellt, sodass es mit den Methoden zur Mehrdeutigkeitslösung aus Abschnitt 3.4.3 möglich sein sollte, die Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination festzusetzen. Mit Ausnahme des DCM von Collins (2008), welches die Beobachtungen der Melbourne-Wübbena-Linearkombination gleichzeitig mit den Beobachtungen der ionosphären-freien Code- und Phasen-Linearkombination verarbeitet, ist bei allen anderen Ansätzen zuvor der Umweg über die Mehrdeutigkeitsfestsetzung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination notwendig. Während die Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung von der Art des GNSS unabhängig sind, stellt genau dieser Sachverhalt den entscheidenden Nachteil aller in Abschnitt 3.4.2 genannten Ansätze dar: sie behandeln lediglich GPS, aber nicht GLONASS.

Wie zum einen aus dem Vergleich zwischen GPS und GLONASS im Abschnitt 2.1.3 und zum anderen aus den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels hervorgeht, birgt die Hinzunahme von GLONASS-Beobachtungen zu einer PPP-Auswertung einerseits einen zusätzlichen Aufwand (z. B. Erweiterung des funktionalen Modells, andere und zum Teil schlechtere Genauigkeiten der Beobachtungen, weitere notwendige Korrekturen) in sich. Andererseits stellen die Beobachtungen eines zweiten GNSS einen enormen Mehrwert dar, indem sie z. B. zur Stabilisierung des funktionalen Modells beitragen. Dies gilt insbesondere in solchen Situationen, in denen nur wenige GPS-Satelliten sichtbar sind. Der Profit erhöht sich durch die mittlerweile voll ausgebaute Satellitenkonstellation von GLONASS nochmals. Diesem Umstand geschuldet stellen die Verarbeitung und Festsetzung von GLONASS-Beobachtungen sowie die damit einhergehenden Problematiken (z. B. IFB und FCB) den Schwerpunkt der im Rahmen der Arbeit entwickelten kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung im PPP-Modus dar.

Innerhalb einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung können GLONASS-Beobachtungen auf die gleiche Art und Weise wie GPS-Beobachtungen prozessiert werden, solange die Mehrdeutig-

keiten Teil der Parameterschätzung sind und die Koordinatenlösung auf der ungelösten ionosphärenfreien Linearkombination beruht. Eine kombinierte GPS/GLONASS-Koordinatenlösung mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten verlangt in Bezug auf das zweistufige Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren eine differenzierte Herangehensweise. Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die dafür verantwortlichen Hintergründe beleuchtet.

Der zweite Teil dieses Abschnitts beschreibt die beiden wesentlichen Softwaremodule, die in der Arbeit zur kombinierten PPP-Auswertung von GPS/GLONASS-Beobachtungen genutzt wurden. Zum einen handelt es sich dabei um das Modul WaPPP, das einerseits der Vorverarbeitung der RINEX-Datei dient und das andererseits eine eigenständige sowie auf geschätzten Mehrdeutigkeiten basierende PPP-Auswertung erlaubt. Zum anderen wird das Modul IntAR verwendet. Aufbauend auf einer von WaPPP erzeugten Binärdatei können mit IntAR PPP-Auswertungen sowohl mit ungelösten als auch mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten durchgeführt werden. Die Ergebnisse der *float*-Lösung sind Basis für die Ableitung der notwendigen FCBs.

3.5.1 Konzept

Durch die Einführung von Orbit- und Satellitenuhrkorrekturen wird den beiden Messabweichungen mit dem größten Einfluss entgegengewirkt, sodass unter den verbleibenden Messabweichungen die ionosphärische Refraktion die Messabweichung mit dem größten Einfluss darstellt. Eine PPP-Koordinatenlösung sowohl mit ungelösten als auch mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten beruht daher ausnahmslos auf der Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Die Prozessierung einer *float*-Lösung erfolgt für GPS und GLONASS auf die gleiche Art und Weise. Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht jedoch, dass die Berechnung einer *fixed*-Lösung aufgrund des gemeinsamen Einflusses von Code- und Phasenverzögerungen in Bezug auf die beiden GNSS eine differenzierte Herangehensweise erfordert. Dementsprechend kann für GLONASS-Beobachtungen nicht die gleiche Mehrdeutigkeitsfestsetzungsstrategie wie für GPS genutzt werden.

Für die Ableitung von FPs der Melbourne-Wübbena- und *Widelane*-Linearkombination wurden die Beobachtungsdaten von vier EPN-Stationen der GPS-Woche 1688 verwendet (Tabelle 3.6). Die FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination basieren auf den Beobachtungen der polnischen Station REDZ. Die zur Korrektur verwendeten FCBs sind aus den Beobachtungen der ca. 850 km weiter südlich sich befindlichen slowakischen Station MOP2 abgeleitet. Um den Einfluss der ionosphärischen Refraktion auf die Bestimmung der FPs der *Widelane*-Linearkombination auszuschließen, wurden mit den beiden Stationen HERS und HERT in Hailsham zwei in Sichtweite zueinander liegende Stationen gewählt. Die beiden Antennen sind lediglich 150 m auseinander. In diesem Fall stammen die FCBs von einem Septentrio-Empfänger (HERS) und die zu korrigierenden Beobachtungen von einem Leica-Empfänger (HERT). Die in Abbildung 3.17 dargestellten FPs gründen jeweils auf Beobachtungen von zwei Stunden, d. h. insgesamt gibt es 84 voneinander unabhängige Berechnungen.

Die beiden oberen Zeilen in Abbildung 3.17 zeigen die GPS- und GLONASS-FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination. Es ist ersichtlich, dass fast alle GPS-FPs kleiner als 0,2 cy sind (Zeile 1) und folglich die überwiegende Mehrheit der Mehrdeutigkeiten erfolgreich festgesetzt werden kann. Obwohl die Generierung als auch die eigentliche PPP-Auswertung auf Beobachtungen von Empfängern (und Antennen) des gleichen Typs basiert, variieren die GLONASS-FPs im Vergleich

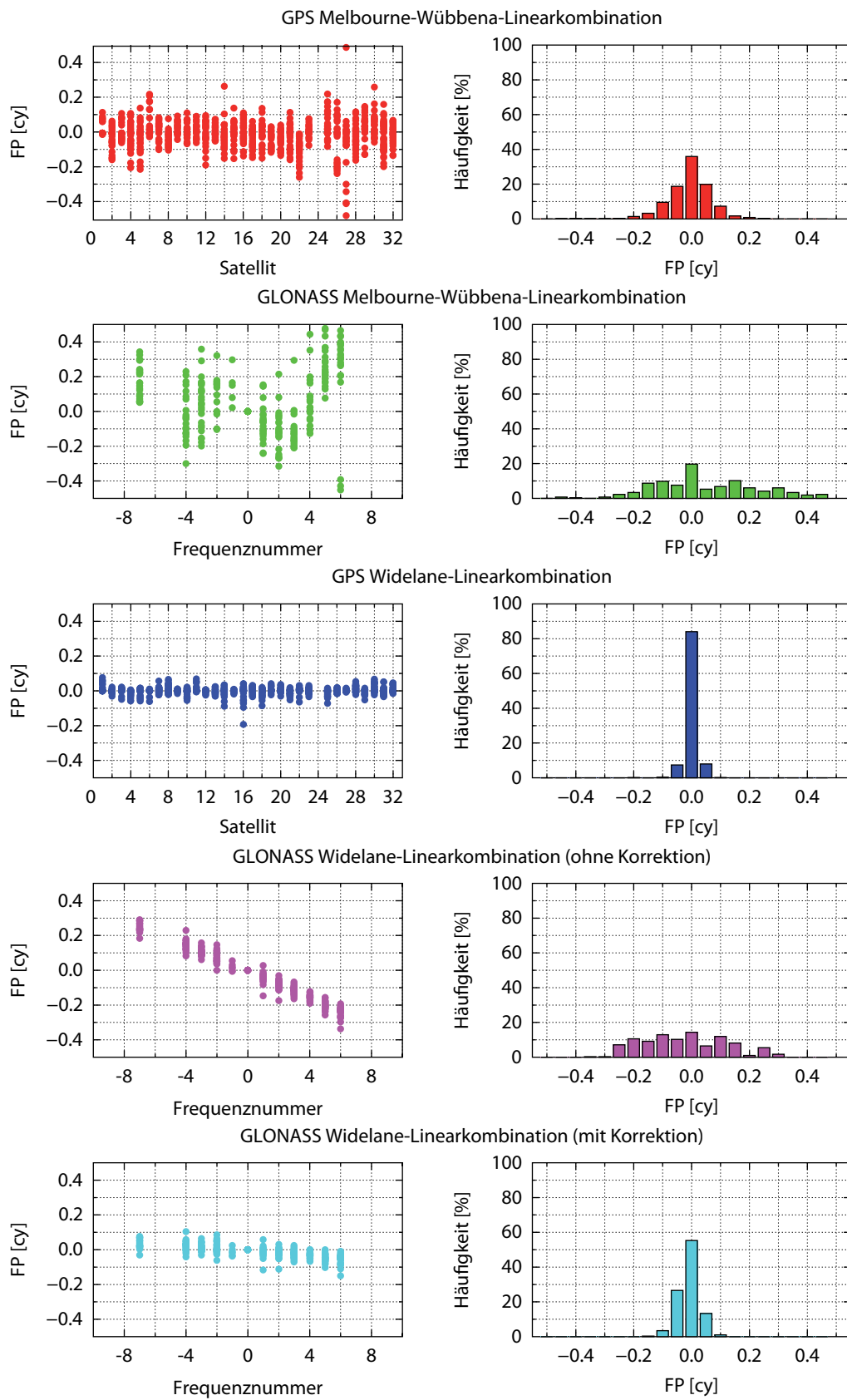


Abb. 3.17: FP der Melbourne-Wübbena- und *Widelane*-Linearkombination

Tab. 3.6: Stationen

Station	Stationsname	Land	Empfänger	Information
MOP2	Modra-Piesok	Slowakei	Trimble NetR5	MW-FCB berechnet
REDZ	Redzikowo	Polen	Trimble NetR5	MW-FCB angebracht
HERS	Herstmonceux	Großbritannien	Septentrio PolaRx3eTR	WL-FCB berechnet
HERT	Herstmonceux	Großbritannien	Leica GRX1200 GG PRO	WL-FCB angebracht

deutlich stärker (Zeile 2). Lediglich 73% aller Mehrdeutigkeiten haben einen Abstand zur Ganzzahligkeit kleiner 0,2 cy. Unter Umständen lässt sich ein frequenzabhängiger Effekt vermuten, wenn gleich der Einfluss nicht-linearer Natur ist und somit eine einfache Modellierung nur bedingt Erfolg verspricht.

Die drei unteren Zeilen in Abbildung 3.17 stellen die GPS- und GLONASS-FPs der *Widelane*-Linearkombination dar. Die FPs beider GNSS variieren aufgrund der kurzen räumlichen Distanz von unter 150 m nur geringfügig (GPS: Zeile 3; GLONASS: Zeile 4). Allerdings weisen die GLONASS-FPs einen deutlich erkennbaren frequenzabhängigen Einfluss, der jedoch linearer Natur ist, auf. Werden sowohl bei der Ableitung der FCBs als auch bei der eigentlichen PPP-Auswertung die Beobachtungen mit den jeweiligen herstellereigenen a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 korrigiert, kann ein Großteil des frequenzabhängigen Einflusses von den GLONASS-Phasenbeobachtungen entfernt werden (Zeile 5). Nahezu alle Mehrdeutigkeiten haben einen Abstand zur Ganzzahligkeit kleiner 0,15 cy und sind somit festsetzbar. Selbiges gilt auch für die GPS-Mehrdeutigkeiten.

Wie die Ergebnisse in Abschnitt 5.4 zeigen, können die aus dem Beispiel gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf die Melbourne-Wübbena-Linear kombination als allgemein gültig angesehen werden. Daraus resultiert ein für GPS und GLONASS unterschiedliches zweistufiges Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren (Abbildung 3.18). Während die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten im Fall von GPS auf der Basis der Melbourne-Wübbena-Linear kombination berechnet und festgesetzt werden (MW-Ansatz, Abbildung 3.18a), wird im Fall von GLONASS die ursprüngliche *Widelane*-Linear kombination verwendet (WL-Ansatz, Abbildung 3.18b). Deren Bildung erfordert jedoch zusätzliche Informationen zur Korrektur der ionosphärischen Refraktion, z. B. GIM-Modelle des IGS (vgl. Abschnitt 3.2.3). Da im Normalfall mit deutlich größeren verbleibenden ionosphärischen Restabweichungen als im obigen Beispiel zu rechnen ist, besitzen die GLONASS-FPs der *Widelane*-Linear kombination eine größere Variabilität. Aufgrund dessen sind im Vergleich zu GPS und der Melbourne-Wübbena-Linear kombination niedrigere GLONASS-Festsetzungsquoten zu erwarten.

Insofern die zur Festsetzung der *Widelane*-Linear kombination notwendigen FCBs zur Verfügung stehen, können die GPS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten natürlich auch nach dem WL-Ansatz festgesetzt werden. Die Variabilität der GPS-FP der *Widelane*-Linear kombination ist dann ebenso von der Größenordnung der verbleibenden ionosphärischen Restabweichungen abhängig und erschwert wie im Fall von GLONASS gegebenenfalls die Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Unter normalen Umständen können mit dem WL-Ansatz aber weniger GPS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden als mit dem MW-Ansatz (siehe Tabelle 6.4).

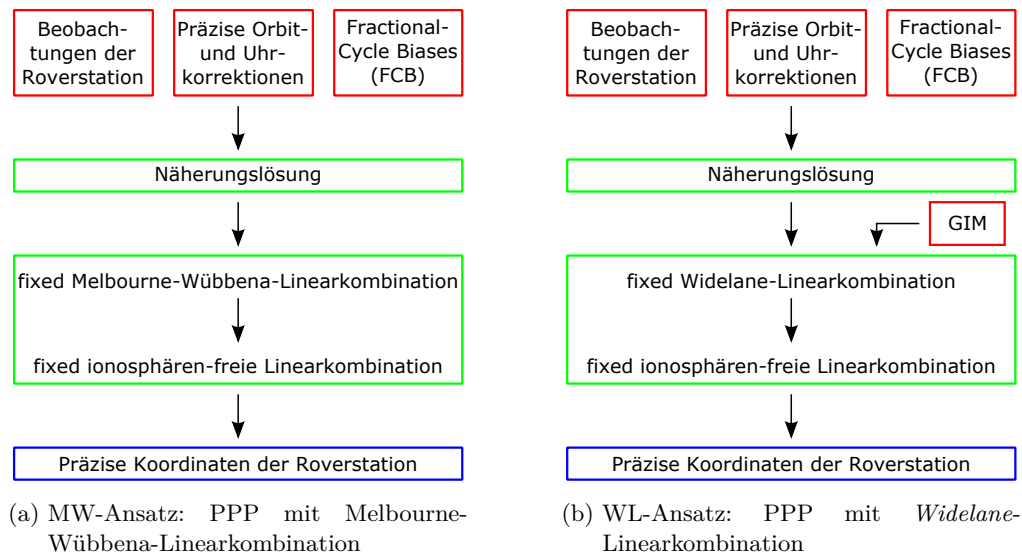


Abb. 3.18: Ansätze für PPP mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung

Eine Festsetzung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten aufbauend auf dem MW-Ansatz scheint möglich, allerdings verkompliziert der gemeinsame Einfluss von GLONASS-Code- und Phasenverzögerungen die Festsetzung erheblich (siehe Abschnitt 5.4).

3.5.2 WaPPP

WaPPP ist ein Programm zur Auswertung von vorzugsweise Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen im statischen PPP-Modus. Es ermöglicht aber auch die Verarbeitung von Einfrequenz-Beobachtungen bzw. eine kinematische Berechnung. Es handelt sich dabei um Beobachtungen einer einzelnen Station.

WaPPP erlaubt sowohl die Auswertung von GPS- als auch von GPS/GLONASS-Beobachtungen. Diese müssen jeweils im RINEX-Format zur Verfügung stehen und werden zu Beginn der Prozessierung in ein internes Binärformat umgewandelt und in selbigem abgespeichert. Zum Umfang an notwendigen Dateien gehören in erster Linie präzise Orbit- (SP3) und Uhrkorrekturen (RINEX-CLK) sowie Antennenkorrekturen (ANTEX). Eine Verarbeitung von eventuell vorhandenen GLONASS-Beobachtungen erfolgt nur, wenn zusätzlich GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden²¹ (RINEX) zur Verfügung stehen. Fehlen für einzelne GNSS oder Satelliten Teile der genannten Korrekturen bzw. Informationen, werden diese von der Verarbeitung ausgeschlossen. Das Referenzsystem der resultierenden Koordinaten ist durch das Referenzsystem der Orbitinformationen gegeben, d. h. im Fall von präzisen IGS-Ephemeriden IGSxx (z. B. IGS05 bzw. IGS08).

WaPPP arbeitet befeilszeilenorientiert, sodass es möglich ist, per Batch-Programmierung Stapelläufe zu generieren. Gleichzeitig kann die Auswertung über eine breite Palette an Optionen, z. B. Elevationsmaske, Änderung der Anfangs- bzw. Endzeit oder Ausschluss bestimmter Elemente der Para-

²¹Für die Berechnung der satellitenspezifischen GLONASS-Frequenzen sind die Frequenznummern nach Gleichung 2.2 unabdingbar. Derzeit stellen die GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden die verlässlichste Quelle zur Extrahierung der Frequenznummern dar. Alternativ sollten für den Fall, dass die Beobachtungsdaten in der RINEX Version 3.02 vorliegen, die Frequenznummern auch aus einem verpflichtenden *Record* generiert werden können. Eine Möglichkeit, die Frequenznummern direkt aus dem Beobachtungsdaten abzuleiten, stellen Cai und Gao (2013a) vor (siehe Abschnitt 4.1).

meterschätzung, gesteuert werden. Der Fortlauf der Prozessierung wird innerhalb einer Log-Datei dokumentiert. Zusätzlich zu den wesentlichen Zwischenergebnissen enthält sie auch eine Zusammenfassung der Endergebnisse, d. h. die Koordinaten sowie verschiedene Genauigkeitsangaben.

Die von WaPPP erzeugte Binärdatei beinhaltet in erster Linie die gekürzten und korrigierten Code- und Phasenbeobachtungen. Zudem sind in ihr die Positionen der Satelliten in Form von Azimut und Elevation sowie weitere Angaben, z. B. Stationskoordinate, Informationen zu den Mehrdeutigkeiten und die Mappingfunktion des feuchten Anteils der troposphärischen Refraktion, abgespeichert. Aufbauend auf diesen Daten erfolgt die Berechnung mit IntAR.

3.5.3 IntAR

Grundlage der Prozessierung mit IntAR ist die von WaPPP erzeugte Binärdatei, welche zu Beginn der Verarbeitung eingelesen wird. Die wichtigsten Informationen sind hierbei die gekürzten und korrigierten Code- und Phasenbeobachtungen, die sich auf die Originalsignale beziehen und daher die Bildung von Linearkombinationen erlauben.

IntAR arbeitet wie WaPPP befehlszeilenorientiert. Die Prozessierung lässt sich ebenfalls über eine Vielzahl an Optionen anpassen bzw. steuern, z. B. Ausschluss von Satelliten oder Änderung des Schwellwertes, anhand dessen die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten erfolgt. Die Ergebnisse der Parameterschätzung (Koordinaten, Residuen, FCBs) können wahlweise in verschiedene ASCII- oder Binar-Dateien ausgegeben werden.

Der Schwerpunkt von IntAR liegt auf einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung inklusive einer Parameterschätzung mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten (*fixed*-Lösung). Es ist jedoch genauso eine reine GPS-PPP-Auswertung oder eine Parameterschätzung ohne Festsetzung der Mehrdeutigkeiten (*float*-Lösung) möglich. Letztere ist für die Berechnung der FCBs erforderlich. Ausgangspunkt beider Parameterschätzungen, die auf einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate beruhen, sind die Beobachtungsgleichungen 3.15 und 3.16. Je nach Art der Prozessierung ist eine Korrektur mittels FCBs erforderlich. Das Ergebnis der Prozessierung ist die bestmögliche Schätzung aller Unbekannten, wobei die Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit der Parameterschätzung Teil der Unbekannten sind oder nicht sind.

Der allgemeine Ablauf einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Prozessierung mit Festsetzung der Mehrdeutigkeiten orientiert sich an den Ansätzen von Ge u. a. (2008) bzw. Geng u. a. (2009) (vgl. FCB-Methode in Abschnitt 3.4.2) und gliedert sich in vier Abschnitte (vgl. Abbildung 3.18). Im Mittelpunkt steht dabei das zweistufige Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren. Aufbauend auf den durch die WaPPP-Binärdatei zur Verfügung gestellten Daten wird zunächst eine Näherungslösung berechnet. Teil dieser *float*-Lösung sind auch die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten, die normalerweise auf der Melbourne-Wübbena-Linear kombination im Fall von GPS und auf der eigentlichen *Widelane*-Linear kombination im Fall von GLONASS basieren. Anschließend erfolgt die Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten. Beobachtungen, deren *Widelane*-Mehrdeutigkeit nicht festgesetzt werden konnte, sind von der weiteren Berechnung ausgeschlossen, sodass die im dritten Schritt berechneten *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linear kombination nur auf Beobachtungen mit fixierten *Widelane*-Mehrdeutigkeiten gründen. Anschließend erfolgt die Festsetzung der *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten. Die endgültige Koordinatenlösung ergibt im vierten und letzten Schritt, wobei

sowohl Beobachtungen mit festgesetzten *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten als auch Beobachtungen mit nicht festgesetzten *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten verwendet werden.

Die zur Beseitigung der FPs notwendigen Informationen, d. h. die FCBs, werden aus den geschätzten Mehrdeutigkeiten abgeleitet. Zur Speicherung der FCBs wurde ein geeignetes Binärformat entwickelt, welches zusätzlich zu den FCBs die wichtigsten Informationen (GNSS, PRN, Zeitraum der Gültigkeit, etc.) zu jedem einzelnen FCB enthält. Zu jedem Satelliten stehen mindestens zwei FCBs zur Verfügung; zum einen der zur ionosphären-freien Linearkombination gehörige und auf der *Narrowlane*-Wellenlänge basierende FCB und zum anderen ein FCB, mit dem der FP der *Widelane*-Mehrdeutigkeit korrigiert wird. Im Normalfall sind dies der FCB der Melbourne-Wübbena-Linearkombination im Fall von GPS und der FCB der *Widelane*-Linearkombination im Fall von GLONASS.

Sowohl zur Festsetzung der *Widelane*- als auch zur Festsetzung der *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten wird das *Integer Bootstrapping* angewendet. Die Reihenfolge der Mehrdeutigkeiten ist durch die Größe der FPs gegeben, d. h. Mehrdeutigkeiten mit kleinen Abständen zur nächsten Ganzzahl werden zu Beginn und Mehrdeutigkeiten mit größeren Abständen zur nächsten Ganzzahl später getestet. Die Reihenfolge ist unabhängig vom GNSS, sodass im Fall einer kombinierten Auswertung GPS- und GLONASS-Mehrdeutigkeiten auch abwechselnd geprüft werden. Besteht eine Mehrdeutigkeit (bzw. deren FP) den Vergleich mit dem vorgegebenen Schwellwert, wird sie durch ein hohes Gewicht festgehalten und der gekürzte Parametervektor neu berechnet. Wurde keine weitere Mehrdeutigkeit festgesetzt, wird eine komplette Ausgleichung über alle Epochen durchgeführt, wobei die zu einer festgesetzten Mehrdeutigkeit gehörenden Beobachtungen um den entsprechenden Wert der Mehrdeutigkeit zu korrigieren sind. Unter Umständen gibt es jetzt weitere Mehrdeutigkeiten, die festgesetzt werden können. Andernfalls ist die Festsetzung für die entsprechende Linearkombination beendet.

4 Voruntersuchungen

Aus den beiden vorangegangenen Kapiteln ist einerseits bekannt, dass instrumentelle Verzögerungen ursächlich für die Zerstörung der Ganzzahligkeit der Phasenmehrdeutigkeiten sind. Den Hauptanteil an den Abweichungen der geschätzten Mehrdeutigkeiten von der Ganzzahligkeit besitzen dabei die *Fractional-Cycle Biases* (FCB). Im Fall von GLONASS sind die Abweichungen zudem durch die Frequenzabhängigkeit der instrumentellen Verzögerungen (*Inter-Frequency Biases*, IFB) geprägt. Dies gilt sowohl für die Phasen- als auch für die Codebeobachtungen. Andererseits wurde herausgearbeitet, dass sowohl Korrekturen der FCB als auch a priori-Informationen zu den IFB_{Φ} als unverzichtbare Voraussetzungen für die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten innerhalb einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung gelten. Umso wichtiger ist die Beantwortung der Frage nach der zeitlichen und räumlichen Stabilität dieser Kenngrößen. Dies setzt im Fall von GLONASS jedoch die Kenntnis der Frequenznummern voraus. Normalerweise werden die GLONASS-Frequenznummern aus der GLONASS-Navigationsdatei extrahiert.

Im Abschnitt 4.1 wird eine Methode vorgestellt, anhand der die Frequenznummern unmittelbar aus den im RINEX-Format vorliegenden Code- und Phasenbeobachtungen berechnet werden können. Aufbauend auf den in Abschnitt 4.2 erläuterten Beobachtungsdaten beschäftigen sich die Abschnitte 4.3 und 4.4 mit der zeitlichen und räumlichen Stabilität der instrumentellen Verzögerungen der Phasen- und Codebeobachtungen sowie deren Frequenzabhängigkeit im Fall von GLONASS.

4.1 GLONASS-Frequenznummern

Zur Auswertung von GLONASS-Beobachtungen ist nach den Gleichungen 2.2 sowie 3.15 und 3.16 die Kenntnis über die GLONASS-Frequenznummern von elementarer Bedeutung. Die Unkenntnis führt automatisch zum Ausschluss von GLONASS-Beobachtungen.

GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden sind einerseits die zuverlässigste und waren andererseits für lange Zeit die einzige Quelle, aus der die Frequenznummern extrahiert werden konnten. Daher mussten für eine GPS/GLONASS-PPP-Auswertung, trotz Verwendung präziser Orbit- und Uhrkorrekturen, GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden zur Verfügung stehen. Andernfalls war eine Prozessierung der GLONASS-Beobachtungen nicht möglich. Zum Ausschluss von GLONASS-Beobachtungen einzelner Satelliten kann es aber auch kommen, wenn sich die Frequenznummer innerhalb eines Tages ändert. Normalerweise wechselt die Frequenznummer eines Satelliten nur, wenn der Satellit seinen Slot ändert oder durch einen anderen Satelliten ersetzt wird. Nichtsdestotrotz sind die in den GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden enthaltenen Frequenznummern teilweise nicht konsistent. Vielmehr gibt es Änderungen innerhalb eines Tages oder es weisen identische Epochen mehrere Einträge auf (Abbildung 4.1).

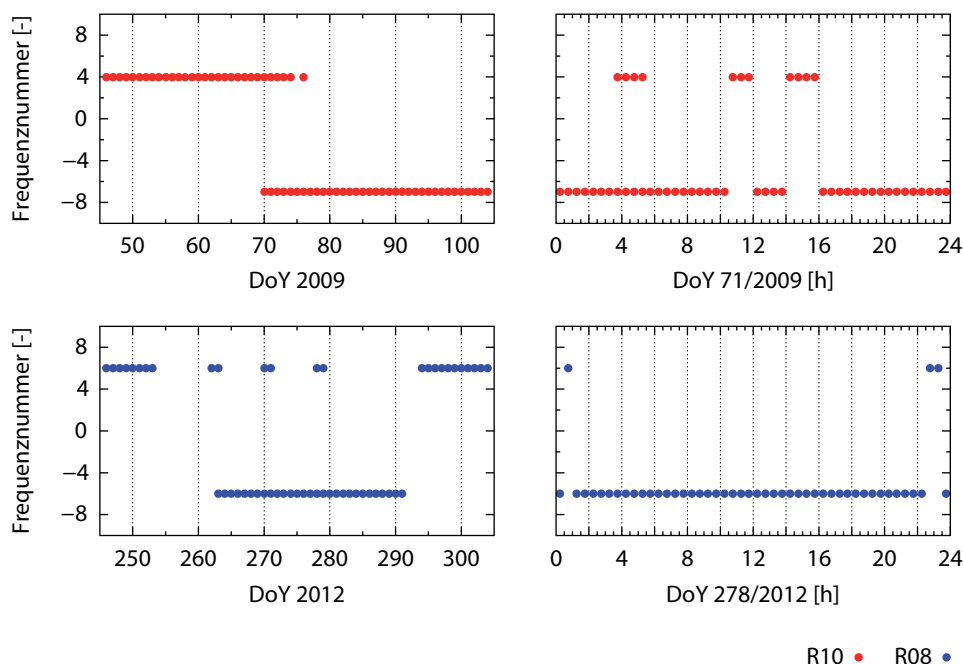


Abb. 4.1: GLONASS-Frequenznummern (aus *Broadcast*-Ephemeriden entnommen)

Mit der Einführung der RINEX-Version 3 wurde jedoch die Voraussetzung geschaffen, die Frequenznummern direkt aus der Beobachtungsdatei zu extrahieren. War in der RINEX-Version 3.01 (Gurtner und Estey 2009) der 'GLONASS SLOT / FRQ #'-Record im *Header* der Beobachtungsdatei noch optional, ist er in der seit April 2013 gültigen Version 3.02 (Gurtner und Estey 2013) verpflichtend²². Die Bereitstellung von GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden und der damit verbundene zusätzliche Mehraufwand sollten somit bei Verwendung von Beobachtungsdaten, deren RINEX-Version 3.02 oder höher ist, entfallen.

Um zu überprüfen, ob die verfügbaren Beobachtungsdaten den genannten RINEX-Konventionen entsprechen, wurden *Multi-GNSS Experiment* (MGEX²³)-Beobachtungsdaten vom 1. Juli 2013 (DOY 182/2013) hinsichtlich dem 'GLONASS SLOT / FRQ #'-Record analysiert. Von den am DOY 182/2013 verfügbaren 74 MGEX-Stationen zeichnen 31 Stationen ihre Beobachtungsdaten in der RINEX-Version 3.01 auf (Typ A) und generieren 32 Stationen Beobachtungsdaten in der RINEX-Version 3.02 (Typ B). Die Untersuchung zeigt, dass keine Station vom Typ B den verpflichtenden *Record* enthält. Lediglich die *Header* von fünf Typ A-Stationen besitzen den in diesem Fall optionalen *Record*. Eine zweite, anhand der Beobachtungsdaten vom 1. März 2014 (DOY 60/2014) durchgeführte Analyse von 84 MGEX-Stationen belegt eine nur geringfügige Zunahme von Typ B-Stationen, deren Beobachtungsdaten den Konventionen der RINEX-Version 3.02 entsprechen. Lediglich die Beobachtungsdaten von 11 der 70 Typ B-Stationen erfüllen die entsprechenden Vorgaben der RINEX-Version 3.02.

²²Hinweis: In der Formatbeschreibung beider Versionen, d. h. RINEX 3.01 und RINEX 3.02, findet sich unter Punkt „9.5 Header Records for GLONASS Slot and Frequency Numbers“ der Eintrag, dass der *Record* 'GLONASS SLOT / FRQ #' optional ist. In Tabelle A2 „GNSS Observation Data File - Header Section Description“ der Formatbeschreibung zu RINEX 3.02 ist der *Record* jedoch als verpflichtend markiert. Optionale Einträge werden mit einem * gekennzeichnet. Entsprechend weist MacLeod (2012) auf den verpflichtenden Eintrag der GLONASS-Frequenznummern ab RINEX-Version 3.02 hin.

²³Vor dem Hintergrund der zunehmenden Anzahl an funktionsfähigen GNSS sowie der Einführung neuer Signale hat der IGS das *Multi-GNSS Experiment* (MGEX) (Montenbruck u. a. 2014) eingerichtet. Es dient der Sammlung entsprechender Beobachtungsdaten als auch der Einwicklung neuer Standards (z. B. Dateiformate).

Hierbei handelt es sich ausnahmslos um Stationen mit Septentrio-Empfängern. Folglich werden unter Umständen auch für Beobachtungsdaten der RINEX-Version 3.xx weiterhin Quellen zur Extraktion der Frequenznummern benötigt.

Entsprechend ihrer Definition stehen die im RINEX-Format abgespeicherten Code- und Phasenbeobachtungen in unterschiedlichen Einheiten (Code: Meter; Phase: Zyklen) zur Verfügung. Aufgrund dieses durch die RINEX-Konventionen festgelegten Sachverhaltes besteht die Möglichkeit, die GLONASS-Frequenznummern unmittelbar durch Vergleich der GLONASS-Code- und Phasenbeobachtungen abzuleiten. Hierfür werden aus den Beobachtungsdaten zweier aufeinanderfolgender Epochen Code- und Phasendifferenzen gebildet. In den resultierenden Differenzen verbleiben durch diese zeitliche Differenzbildung nur Restabweichungen, die mit Ausnahme des ionosphärischen Resteinflusses nahezu identisch sein sollten. Die ionosphärischen Restabweichungen sind vom Betrag her gleich, wirken aber mit unterschiedlichen Vorzeichen. Für den abschließenden Vergleich ist eine der beiden Differenzen in die Einheit der anderen Differenz umzurechnen, wobei die GLONASS-Frequenznummer zur Berechnung der Frequenz entsprechend Gleichung 2.2 notwendig ist. Sinngemäß kann im umgekehrten Fall aus dem Vergleich auf die GLONASS-Frequenznummer geschlossen werden (Cai und Gao 2013a):

$$k_i^j = \frac{c_0 \cdot \left(\frac{\Delta\phi_i^j}{\Delta C_i^j} \right) - f_{R,i,0}}{\Delta f_{R,i}} \quad (4.1)$$

mit

- k - Frequenznummer [-],
- j - Satellit,
- i - Frequenzband (i=1,2),
- c_0 - Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s],
- $\Delta\phi$ - Phasendifferenz [cy],
- ΔC - Codedifferenz [m],
- $f_{R,i,0}$ - GLONAS-Grundfrequenz (Frequenzband i) [MHz],
- $\Delta f_{R,i}$ - GLONAS-Frequenzintervall (Frequenzband i) [MHz].

Die Verlässlichkeit, mit der GLONASS-Frequenznummern aufbauend auf Gleichung 4.1 ermittelt werden können, hängt von mehreren Faktoren ab. In erster Linie sind dies die Resteinflüsse der ionosphärischen Laufzeitverzögerung sowie das Code-Rauschen und die Code-Mehrwegeausbreitung. Zur Erhöhung der Genauigkeit empfehlen Cai und Gao (2013a) die sich aus der Berechnung mit den Daten beider Frequenzen und mehrerer aufeinanderfolgender Epochen ergebenden Frequenznummern zu einer mittleren Frequenznummer \bar{k} zusammen zu fassen. Üblicherweise ergibt sich bei einem Intervall von 30s und Beobachtungsdaten von 10 bis 30 Epochen eine mittlere Frequenznummer \bar{k} , die als reell-wertiger Schätzwert nahe der tatsächlichen ganzzahligen Frequenznummer liegt (Cai und Gao 2013a).

Zwar betrachten Cai und Gao (2013a) in ihrer Analyse die anzunehmenden Genauigkeiten der nach Gleichung 4.1 geschätzten Frequenznummern, doch machen sie keine Angaben zum tatsächlichen Genauigkeitsniveau ihrer Ergebnisse. Zudem unterliegen die von ihnen verwendeten Beobachtungsdaten nur bedingt dem maximalen ionosphärischen Einfluss. Vor diesem Hintergrund wurde die Ableitung der GLONASS-Frequenznummern nach Gleichung 4.1 auf der Basis von simultan

gemessenen Code- und Phasenbeobachtungen algorithmisch umgesetzt. Die epochenweise Berechnung erfolgt mit allen zur Verfügung stehenden Code- und Phasenbeobachtungen, d. h. im besten Fall ergibt sich pro Frequenz nicht nur ein Ergebnis ($k_{1,P}^j, k_{2,P}^j$), sondern erhält man pro Frequenz mehrere Lösungen ($k_{1,C}^j, k_{1,P}^j$). Zur Steigerung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit werden die Einzelergebnisse einer Epoche einerseits zu einer mittleren Epochenlösung \bar{k}^j zusammengefasst und andererseits Näherungswerte für Beobachtungsblöcke mit einer frei wählbaren Anzahl an Epochen (z. B. 15 min) bestimmt. Aus einem 24 h-Datensatz mit einem Beobachtungsintervall von 30 s resultieren pro Satellit und Code-Typ mehr als 1 000 Einzelergebnisse und ca. 30 Näherungswerte für den Fall, dass die Berechnung auf 30 Epochen umfassenden Beobachtungsblöcken gründet.

Die beschriebene Methode zur Berechnung von GLONASS-Frequenznummern beruht auf der Bildung von epochenweisen Code- und Phasendifferenzen, die zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Je näher ein Satellit seinem Kulminationspunkt oder je kleiner das Beobachtungsintervall ist, desto größer ist der Einfluss des Code-Rauschens auf die Codedifferenz und desto ungenauer ist letztlich der Quotient. Da der Quotient jedoch maßgeblich dafür verantwortlich ist, wie verlässlich die berechnete Frequenznummer ist, ist eine Beschränkung der Codedifferenz (z. B. $\Delta C > 5$ km) und/oder des Beobachtungsintervalls (z. B. 30 s) unumgänglich.

Für die Berechnung von GLONASS-Frequenznummern aus Code- und Phasenbeobachtungen wurden die Beobachtungsdaten von je vier deutschen und brasilianischen Stationen verwendet (Tabelle 4.1). Die Beobachtungsdaten stammen jeweils vom 1. November der Jahre 2008 bis 2014 und unterliegen infolge der zunehmenden Sonnenaktivität (vgl. Abbildung 2.7) einem stärker werdenden ionosphärischen Einfluss. Aufgrund ihrer Lage am magnetischen Äquator ist die Wirkung der ionosphärischen Refraktion auf die brasilianischen Stationen größer als auf die deutschen Stationen. Das Beobachtungsintervall beträgt 30 s.

Tab. 4.1: Stationen

Land	Station	Stationsname	Empfänger
Deutschland	BADH	Bad Homburg	Leica GRX1200 GG PRO
	MOX2	Moxa	Leica GRX1200 GG PRO
	TITZ	Titz	JPS Legacy
	WARN	Warnemünde	JPS Legacy
Brasilien	POVE	Porto Velho	Trimble NetR5
	RECF	Recife	Trimble NetR5, Trimble NetR8
	SALU	Sao Luis	Trimble NetR5, Trimble NetR8
	UFPR	Curitiba	Trimble NetR5

Zunächst sollen die epochenweise ermittelten Frequenznummern betrachtet werden. Die reellwertigen Frequenznummern wurden den aus den GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden entnommenen ganzzahligen Frequenznummern gegenübergestellt und aus den Abweichungen nach Gleichung 2.73 Standardabweichungen berechnet (Abbildung 4.2). Es zeigt sich, dass die geographische Lage der Beobachtungsstation als auch der zeitliche Bezug der Beobachtungsdaten für die Ableitung von Frequenznummern aus den originären Beobachtungsdaten keine Rolle spielen. Verbleibende iono-

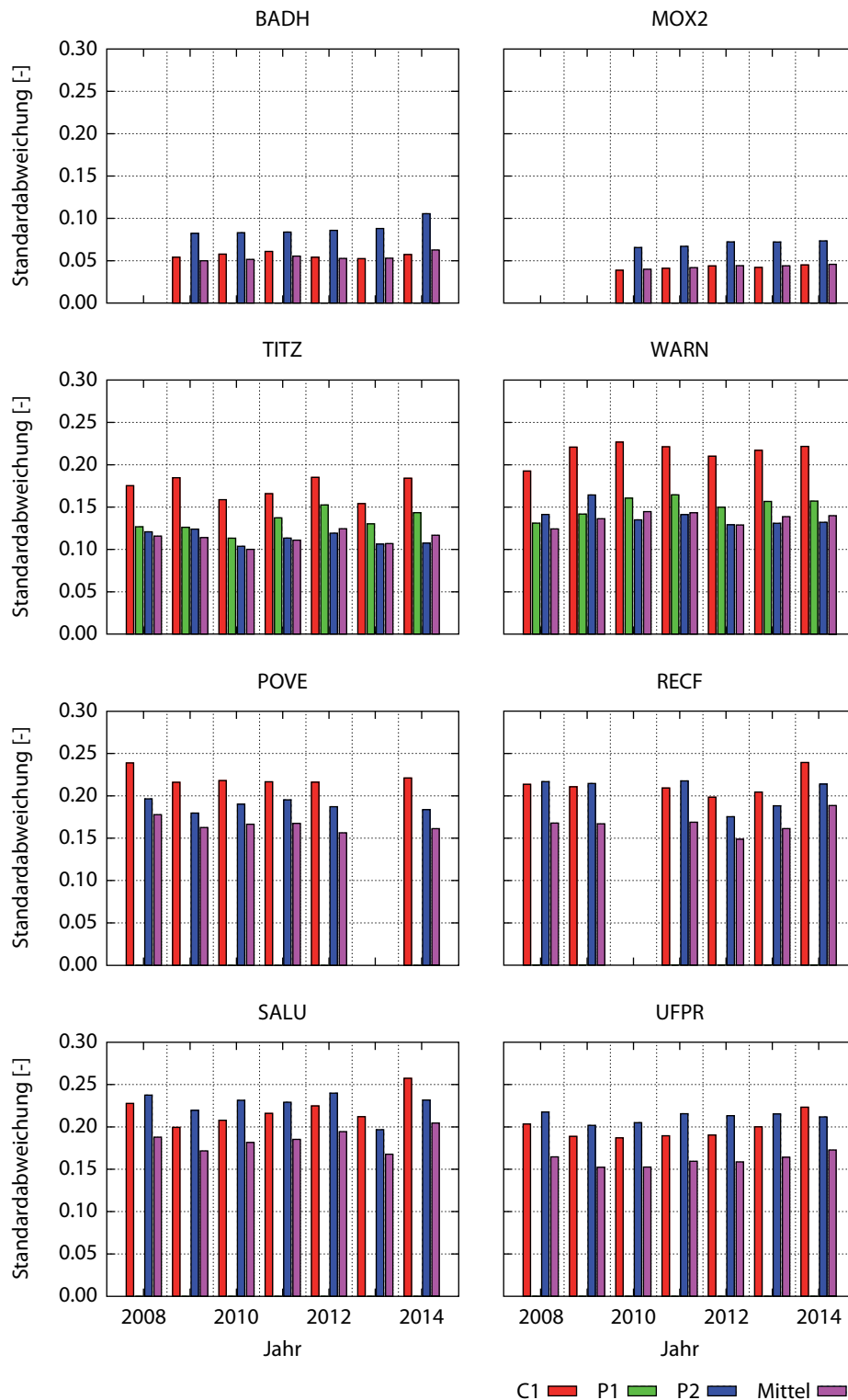


Abb. 4.2: Standardabweichungen von epochenweise berechneten Frequenznummern

sphärische Resteinflüsse haben nur einen untergeordneten Einfluss auf die Berechnung. Einen signifikanten Anteil hat dagegen das Equipment, mit denen die Daten aufgezeichnet wurden. Die im Vergleich zu den sechs anderen Stationen wesentlich genauere Bestimmung der Frequenznummern im Fall der beiden Leica-Stationen BADH und MOX2 ist vermutlich auf Verfahren zur Minimierung des Code-Mehrweges und Code-Rauschens zurückzuführen. Bei weitem nicht so deutlich, aber dennoch abhängig vom Empfänger ist die Tatsache, mit welchen Codebeobachtungen die Berechnung erfolgt. Im Sinne der Zuverlässigkeit wird empfohlen, die codespezifischen Ergebnisse $k_{1,C}^j$, $k_{1,P}^j$ und $k_{2,P}^j$ zu einer mittleren Frequenznummer \bar{k}^j zusammenzufassen. Die abgeleiteten Frequenznummern sind mit einer mittleren Standardabweichung von zum Teil deutlich unter 0,2 normalerweise schon genau genug, um auf die tatsächliche Frequenznummer zu schließen.

Es empfiehlt sich trotzdem, die epochenweise ermittelten Frequenznummern \bar{k}^j zu einem einzigen Wert zusammen zu fassen. Derartige mittlere Frequenznummern \bar{k}^j wurden für sechs Blöcke unterschiedlicher Dauer gebildet (5, 10, 15, 20, 25 und 30 Epochen). Aus dem Vergleich mit den aus den GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden entnommenen Frequenznummern ergaben sich wiederum Standardabweichungen. Da der zeitliche Bezug der Beobachtungsdaten keine Rolle spielt, erfolgt diesbezüglich keine weitere Differenzierung. Abbildung 4.3 veranschaulicht den deutlichen Genauigkeitsgewinn, der durch die Mittelbildung erreicht wird. Allein durch die Zusammenfassung der Ergebnisse aus fünf Epochen steigert sich die Genauigkeit der berechneten Frequenznummern um den Faktor 3. Um den Faktor 5 verbessert sich die Genauigkeit, wenn die Frequenznummern auf der Basis von 15 min-Blöcken berechnet werden. Frequenznummern, die aus Beobachtungsdaten von 30 Epochen abgeleitet sind, besitzen eine mittlere Standardabweichung von zum Teil deutlich unter 0,02 und sind demzufolge genau genug, um auf die tatsächliche Frequenznummer zu schließen.

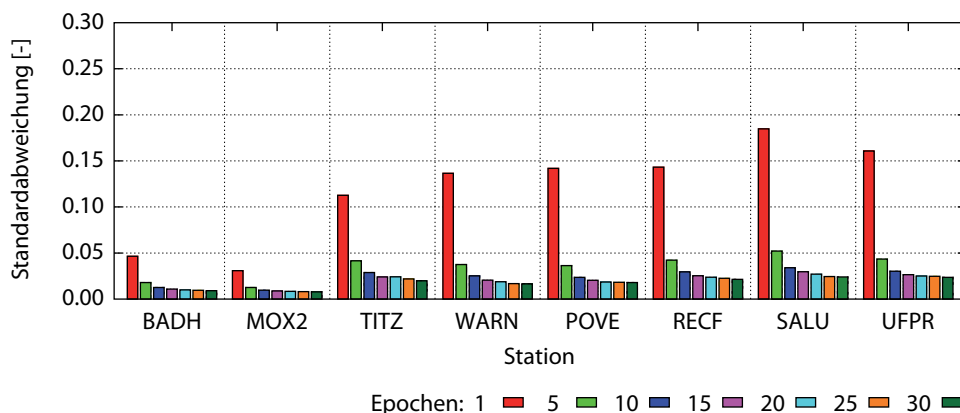


Abb. 4.3: Standardabweichungen von gemittelten Frequenznummern

Abschließend wird untersucht, inwiefern der vorgestellte Algorithmus geeignet ist, Fehleinträge in den GLONASS-*Broadcast*-Ephemeriden zu entdecken, sodass Beobachtungsdaten von der Prozessierung nicht ausgeschlossen werden müssen. Hierfür wurden die Beobachtungsdaten von mehr als 140 EUREF *Permanent Network* (EPN)- und IGS-Stationen vom DOY 71/2009 im Hinblick auf den GLONASS-Satelliten R10 prozessiert. R10 weist an diesem Tag vier Epochen (3:45 Uhr bis 5:15 Uhr) mit doppelten Einträgen (Frequenznummer 4 und -7) und sieben weitere Epochen (10:45 Uhr bis 11:15 Uhr und 14:15 Uhr bis 15:45 Uhr) mit der Frequenznummer 4 auf, währenddessen für alle anderen Epochen die Frequenznummer -7 ausgewiesen wird (vgl. Abbildung 4.1). Die auf Basis von 10 min-Blöcken berechneten mittleren Frequenznummern von sechs ausgewählten Stationen (MAS1,

RECF; ADIS, REUN; KHAJ und NOVM) sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Stationen in der gleichen Reihe (z. B. MAS1 und RECF in der oberen Reihe) decken mit ihren Beobachtungsdaten einen der drei genannten Problembereiche ab. Es ist ersichtlich, dass zur Identifizierung des GLONASS-Satelliten R10 den gesamten Tag über die Frequenznummer -7 genutzt wurde.

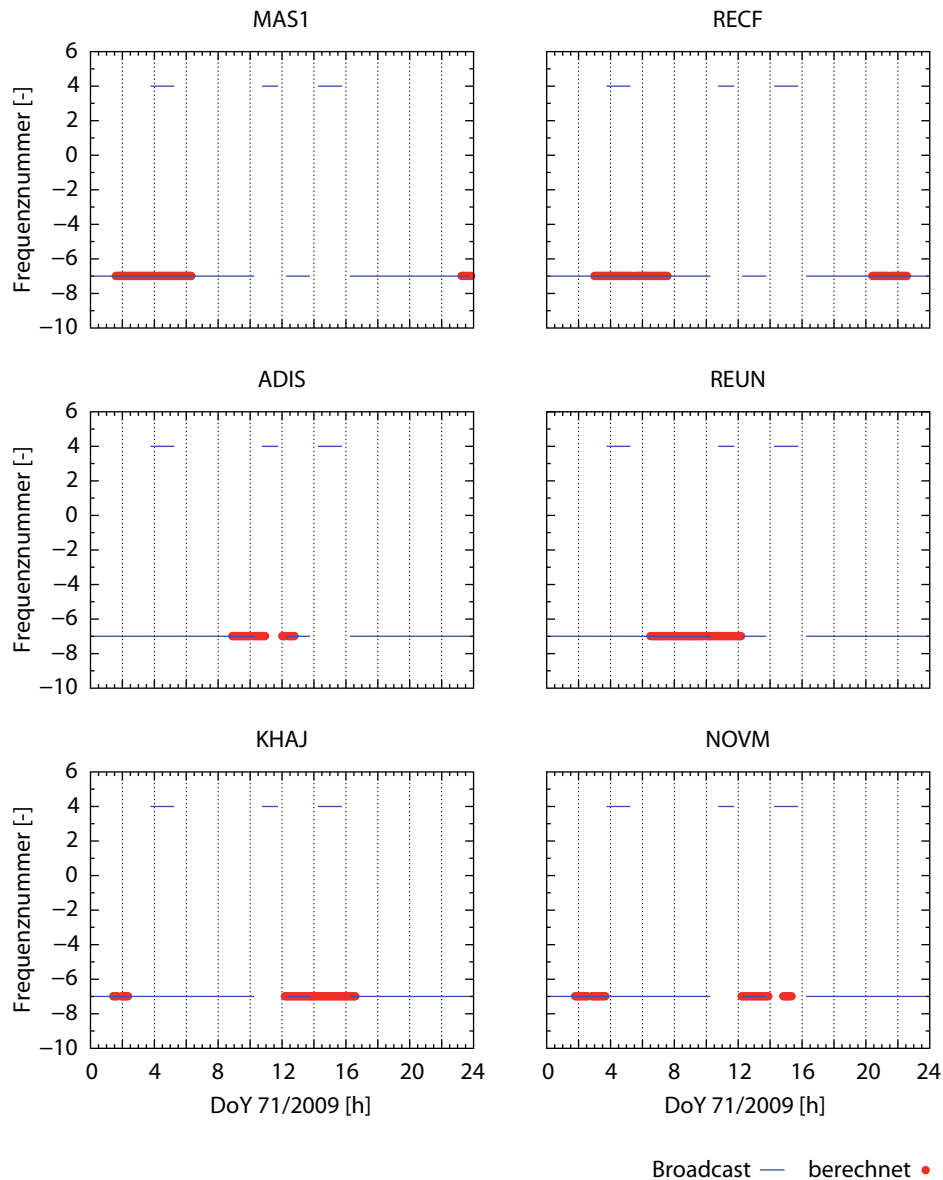


Abb. 4.4: Detektion von fehlerhaften GLONASS-Frequenznummern in den *Broadcast*-Ephemeriden

Unter den mehr als 140 untersuchten EPN- und IGS-Stationen sind 10 Stationen (BARH, BUDP, DARW, DAV1, MALL, MAW1, MOBJ, NTUS, TERU und VALA), die für den GLONASS-Satelliten R10 am DOY 71/2009 im Gegensatz zur Mehrheit der Stationen die 'falsche' Frequenznummer 4 ausgeben. Mit Ausnahme von MOBJ (TPS Legacy) sind die anderen Stationen mit einem Empfänger vom Typ LEICA GRX1200 GG PRO ausgestattet. Alle Stationen haben nur einige wenige Epochen des GLONASS-Satelliten R10 aufgezeichnet. Es ist davon auszugehen, dass Probleme beim Beobachten des Satelliten ursächlich für die inkorrekte Frequenznummer sind.

4.2 Daten

Die nachfolgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Langzeitstabilität der instrumentellen Verzögerungen der Phasen- und Codebeobachtungen sowie deren Frequenzabhängigkeit im Fall von GLONASS. Für die entsprechenden Untersuchungen wurden zwei verschiedene Datensätze verwendet.

4.2.1 Datensatz 1

Die Untersuchungen hinsichtlich den FCBs unterteilen sich in zwei Kernpunkte: einerseits soll die Langzeitstabilität analysiert werden und andererseits wird der Frage nachgegangen, inwieweit die geographische Lage einer Station in diesem Zusammenhang eine Rolle spielt. Letzteres wird nachfolgend als 'räumliche' Stabilität bezeichnet und setzt voraus, dass Beobachtungsdaten von global verteilten Stationen prozessiert werden. Dementsprechend wurden 14 IGS-Stationen, die eine globale Abdeckung gewährleisten, ausgewählt (Tabelle 4.2). Der Beobachtungszeitraum umfasst das gesamte Jahr 2012. Innerhalb dieses Abschnitts kam es auf keiner Station zu Änderungen der eigentlichen Empfänger/Antennen-Kombination. Lediglich Firmware-Updates wurden auf einigen Stationen durchgeführt.

Tab. 4.2: Stationen von Datensatz 1

Station	Stationsname	Land	Empfänger
BJFS	Fangshan	China	Trimble NetR8
HERS	Herstmonceaux	Großbritannien	Septentrio PolaRx3eTR
HLFX	Halifax	Kanada	AOA Benchmark ACT
KOKV	Kokee Park	USA	JPS E_GGDT
NKLG	N'Koltang	Gabun	Trimble NetR9
NOVM	Novosibirsk	Russland	JPS Legacy
POVE	Porto Velho	Brasilien	Trimble NetR5
REUN	La Reunion	Frankreich	Trimble NetR9
STR2	Stromlo	Australien	Trimble NetR8
SUTV	Sutherland	Südafrika	JPS E_GGDT
TASH	Tashkent	Usbekistan	Javad TRE_G3TH Delta
THTI	Tahiti	Französisch-Polynesien	Trimble NetR8
WARN	Warnemünde	Deutschland	JPS Legacy
ZIM2	Zimmerwald	Schweiz	Trimble NetR5

4.2.2 Datensatz 2

Um die Wirkung der nicht-modellierten Messabweichungen (insbesondere Iono- und Troposphäre) auf die Bestimmung der FCBs bzw. des IFB so gering wie möglich zu halten, stellen Beobachtungs-

daten von räumlich dicht beieinanderliegenden Stationen das ideale Datenmaterial dar. Allerdings beschränkt ein derartiges Vorgehen die Auswertung auf die Beobachtungsdaten einiger weniger Stationspaare (z. B. Wettzell), sodass ein Netz von Stationen gesucht wurde, welches zwei Anforderungen erfüllen sollte. Zum einen müssen Beobachtungsdaten über einen längeren Zeitraum verfügbar und zum anderen sollten die Abstände zwischen den Stationen so klein wie möglich (z. B. maximal wenige 100 km) sein.

Ein derartiges Netz von Stationen stellt das Integrierte Geodätische Referenznetz Deutschlands (GREF) dar. Das GREF-Netz umfasst insgesamt 29 Stationen und erfuhr zu Beginn des Jahrtausends eine Erneuerung, deren Ziel die Umstellung auf GPS/GLONASS-fähige Empfänger war. Diese Modernisierung hat allerdings zur Folge, dass der Großteil der GREF-Stationen mit JPS-Empfängern ausgerüstet ist und nur einige wenige Stationen mit Leica-Empfängern arbeiten. Keine GREF-Station ist mit einem Trimble-Empfänger ausgestattet. Zum Umfang der insgesamt 31 Stationen (Abbildung 4.5) gehören deshalb auch die beiden EPN-Stationen HOBU (Hohenbünstorf) und KLOP (Kloppenheim), auf denen Empfänger von Leica bzw. Trimble zum Einsatz kamen.

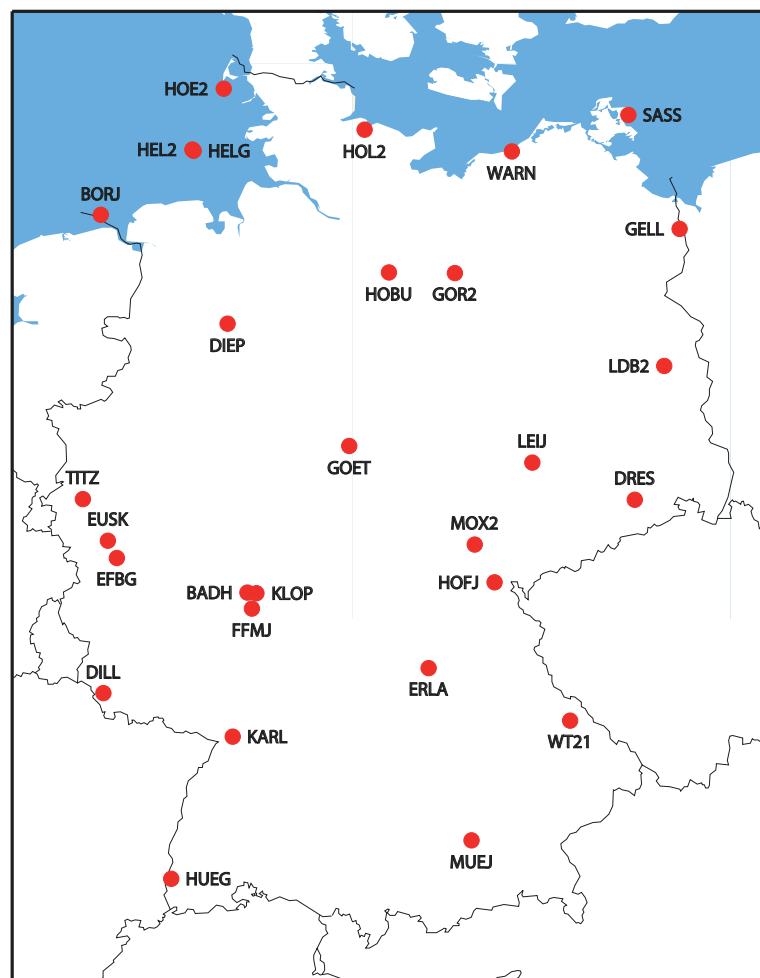


Abb. 4.5: Stationen von Datensatz 2

Um aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der Langzeitstabilität zu erhalten, ist die Verarbeitung von Beobachtungsdaten eines entsprechend langen Zeitraums notwendig. Der gewählte Abschnitt

umfasst mit den GPS-Wochen 1568 (24.1.2010, DOY 24/2010) bis 1689 (26.5.2012, DOY 147/2012) mehr als zwei Jahre. Allerdings wurden pro GPS-Woche jeweils nur die Beobachtungsdaten von geraden GPS-Wochentagen (Sonntag, Dienstag, Donnerstag, Samstag) prozessiert. Beobachtungsdaten von zwei Stationen (AUGB und PTBB) waren über den gesamten Zeitraum nicht verfügbar. Insgesamt gibt es 406 mögliche Kombinationen von Stationen.

Innerhalb des Untersuchungszeitraums von mehr als zwei Jahren erfolgte auf nahezu allen Stationen eine Erneuerung der Empfänger- und/oder Antennenkombination (Tabelle 4.3). Auf zwei Stationen (EFBG und WT21) gab es einen kompletten Wechsel von Empfänger sowie Antenne und auf zwei weiteren Stationen (HEL2 und HOBU) wurde der Empfänger ersetzt. Vielfach wurde aber lediglich die Antenne gewechselt. Die Mehrheit der alten Antennen gehören zum Typ TPSCR3_GGD und TRM29659.00. Die neuen Antennen sind größtenteils Antennen vom Typ LEIAR25.R3 und LEIAR25.R4, die Signale aller vier GNSS verarbeiten.

4.3 Phase

4.3.1 *Fractional-Cycle Biases* (FCB)

Sowohl der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansatz, der sich an Ge u. a. (2008) und Geng u. a. (2009) orientiert, als auch die von Laurichesse u. a. (2008) verfolgte Herangehensweise (vgl. Abschnitt 3.4.2) beruht auf der Tatsache, dass die im ersten Teil des zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahrens notwendigen FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination eine gewisse zeitliche Stabilität aufweisen. Allerdings werden zur Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination Codebeobachtungen mit einem Rauschen auf Meter-Niveau herangezogen, sodass unter Umständen von einer eingeschränkten Beständigkeit der MW-FCBs ausgegangen werden muss.

Aufbauend auf den Beobachtungsdaten von über 180 IGS-Stationen von 14 aufeinanderfolgenden Tagen im Jahr 2006 weisen Ge u. a. (2008) einerseits eine Genauigkeit der MW-FCBs von 0,05 cy nach. Andererseits berichten Gabor und Nerem (1999), die MW-FCBs von mehr als 300 Tagen des Jahres 1997 untersucht haben, von einem jährlichen Trend. Der Trend übersteigt zwar für die Mehrheit der betrachteten Einfach-Differenz-Kombinationen 0,5 cy/a nicht, kann in einigen Fällen jedoch größer als eine Wellenlänge sein.

Vor diesem Hintergrund wurden die in Abschnitt 4.2.1 genannten Datensätze verwendet, um sowohl die zeitliche als auch die räumliche Stabilität der MW-FCBs zu untersuchen. Aufgrund der Tatsache, dass GLONASS-Mehrdeutigkeiten durch GLONASS-spezifische Verzögerungen (vgl. Abschnitte 5.4.3 bis 5.4.5) in negativer Art und Weise beeinflusst sind, beschränkt sich die Untersuchung auf die Auswertung von GPS-Beobachtungen. Die Beobachtungsdaten von Stationen, die auf der ersten Frequenz lediglich C_1 zur Verfügung stellen, wurden mittels DCB_{P1C1} des CODE AC korrigiert. Die 24-stündigen Beobachtungsdaten wurden in Blöcke von 1, 2, 4, 6, 8, 12 sowie 24 Stunden unterteilt und jeweils die FCBs der satellitenspezifischen Mehrdeutigkeiten mit den meisten Beobachtungen extrahiert. Da sämtliche FCBs in Bezug auf den Referenz-Satellit G07 gebildet wurden, konnten insbesondere von den kurzen Beobachtungszeiten nicht alle FCBs in den anschließenden Untersuchungen verwendet werden.

Tab. 4.3: Stationen von Datensatz 2

Station	Empfänger	Antenne
BADH	Leica GRX1200 GG PRO	TRM41249.00
BORJ	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 244/10: LEIAR25.R3
DIEP	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
DILL	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 87/12: LEIAR25.R4
DRES	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 266/10: LEIAR25.R3
EFBG	Leica GRX1200 GG PRO, ab 123/11: JPS E_GGD, ab 143/11: TPS E_GGD	TRM29659.00, ab 123/11: TPSCR3_GGD
ERLA	JPS Legacy	TRM29659.00, ab 230/10: LEIAR25.R3
EUSK	Leica GRX1200 GG PRO	LEIAT504GG
FFMJ	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 39/11: LEIAR25.R4
GELL	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
GOET	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 61/11: LEIAR25.R3
GOR2	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
HELG	JPS Legacy	LEIAT504GG
HEL2	TPS NET-G3, ab 166/10: Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25.R3
HOBU	Leica GRX1200 GG PRO, ab 131/10: Leica GRX1200+GNSS	LEIAT504GG, ab 326/10: LEIAR25.R4
HOE2	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 293/10: LEIAR25.R3
HOFJ	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 45/11: LEIAR25.R4
HOL2	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
HUEG	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
KARL	JPS Legacy	TRM29659.00, ab 60/12: LEIAR25.R4
KLOP	Trimble NetR5	TRM55971.00
LDB2	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 271/11: LEIAR25.R4
LEIJ	JPS Legacy	TRM29659.00, ab 181/10: LEIAR25.R3
MOX2	Leica GRX1200 GG PRO	TPSCR3_GGD
MUEJ	JPS Legacy	LEIAT504GG
SASS	JPS Legacy	TPSCR3_GGD
TITZ	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 68/11: LEIAR25.R4
WARN	JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 258/10: LEIAR25.R3
WT21	TPS NET-G3, ab 303/10: JPS Legacy	TPSCR3_GGD, ab 300/10: LEIAR25.R3

Beispielhaft zeigt Abbildung 4.6 die sich aus 24-stündigen Beobachtungsdaten ergebenden FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination von sechs GPS-Satelliten. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass sich sämtliche FCBs auf den Referenz-Satelliten G07 beziehen. Entsprechend bedeuten kleine Variationen, dass die Melbourne-Wübbena-Linearkombinationen der beiden beteiligten Satelliten bis auf einen systematischen Effekt, den MW-FCB, sehr gut zueinander passen. Im umgekehrten Fall (z. B. G03 und G32) gilt, dass die FCBs durchaus deutlichen Schwankungen unterliegen können, wobei nur schwer feststellbar ist, welcher der beiden beteiligten Satelliten letztlich für die Variationen verantwortlich ist. Die täglichen satellitenspezifischen FCBs aller Stationen weisen eine Übereinstimmung von 0,08 cy auf. Für 78 % der mehr als 11 200 resultierenden mittleren FCBs ergibt sich eine Standardabweichung (der Einzelmessung) von unter 0,1 cy. Beide Kenngrößen verdeutlichen die erwartete gute räumliche Stabilität der MW-FCBs. Die Bestimmung von MW-FCBs ist damit unabhängig von der geographischen Lage der Station und scheint ebenfalls unabhängig von der eingesetzten Empfänger/Antennen-Kombination zu sein. Allerdings können Schwankungen auftreten, die im Mittel zwar 0,2 cy nicht übersteigen, im Extremfall aber deutlich größer als eine halbe Wellenlänge sind.

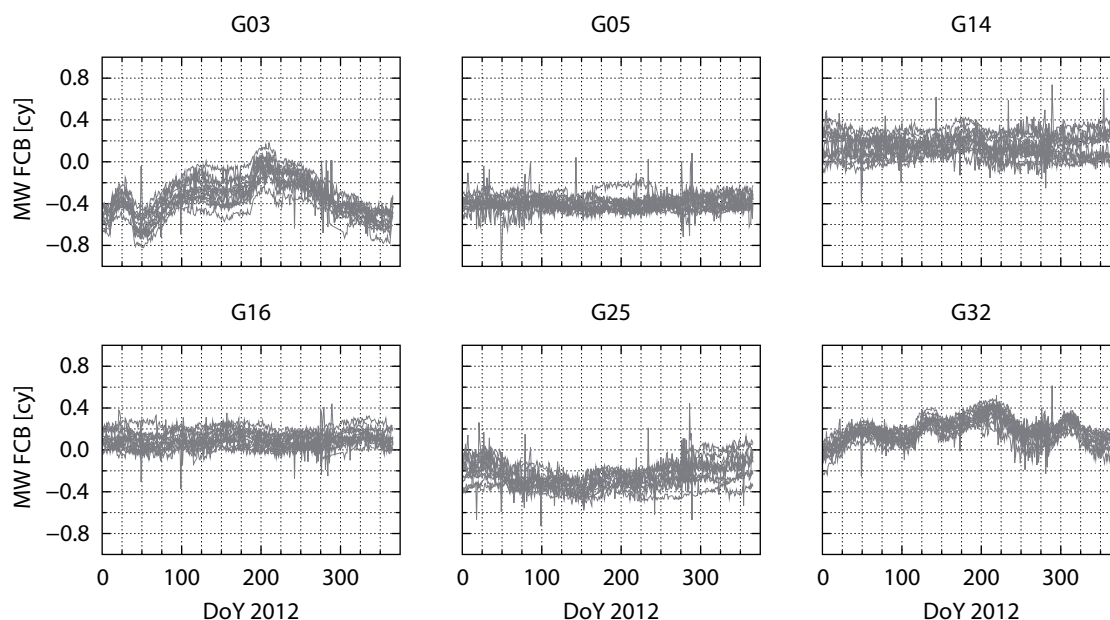


Abb. 4.6: GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Referenz-Satellit: G07)

Diese langperiodischen Schwankungen werden zudem von kurzperiodischen Variationen überlagert. Je weniger Beobachtungen zur Schätzung einer Mehrdeutigkeit und damit zur Ableitung des FCB zur Verfügung stehen, desto unsicherer ist die Schätzung der Mehrdeutigkeit und desto größer ist die Variabilität des abgeleiteten FCBs. Folglich ist zu vermuten, dass aus einstündigen Beobachtungsdaten abgeleitete FCBs deutlich größere kurzperiodische Variationen aufweisen als FCBs, die z. B. anhand von sechs- oder 24-stündigen Beobachtungsdaten bestimmt wurden. Die Verteilung der Differenzen von aufeinanderfolgenden FCBs in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Sie bestätigt die Annahme, dass die Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden FCBs umso größer sind, je kürzer die Beobachtungszeiten sind. Differenzen von unter 0,05 cy ergeben sich für 42 % (1 h), 56 % (6 h) bzw. 88 % (24 h) und von unter 0,1 cy für 70 % (1 h), 78 % (6 h) bzw. 96 % (24 h) aller aufeinanderfolgender FCBs.

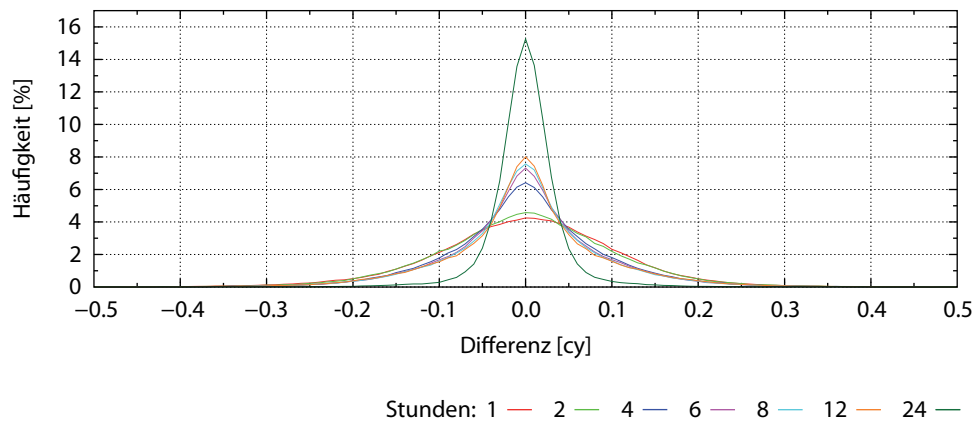


Abb. 4.7: Häufigkeitsverteilung der Differenzen aufeinanderfolgender GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linear kombination

Die Amplitude, insbesondere der kurzperiodischen Variationen aber auch der langperiodischen Schwankungen, ist entscheidend für die zeitliche Stabilität der FCBs. Je größer die Variabilität der FCBs innerhalb eines betrachteten Zeitraums ist, desto instabiler ist der entsprechende Mittelwert für diesen Abschnitt. Daher ist zu erwarten, dass aus einstündigen Beobachtungsdaten abgeleitete mittlere FCBs deutlich ungenauer sind als mittlere FCBs, die aus sechs- oder 24-stündigen Beobachtungsdaten bestimmt wurden. In Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer wurden die jeweiligen stationspezifischen FCBs einer statistischen Auswertung unterzogen, indem fortlaufend für Zeitspannen von zwei Tagen, vier Tagen, usw. bis 28 Tagen ein mittlerer FCB inkl. Standardabweichung (der Einzelmessung) ermittelt wurden. Die einzelnen Standardabweichungen sind abschließend zu einer mittleren Standardabweichung zusammengefasst worden und in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Wiederholgenauigkeit liegt zum Teil deutlich unter 0,1 cy, wengleich ersichtlich ist, dass die Beobachtungsdauer der entscheidende Parameter in Bezug auf die Stabilität der FCBs ist. Für die aus 24-stündigen Beobachtungsdaten abgeleiteten FCBs ergibt sich eine Reproduzierbarkeit, die um den Faktor 2 bis 3 besser ist als die Wiederholgenauigkeit der FCBs, die anhand einstündiger Beobachtungsdaten bestimmt wurden. Die geringfügige Verschlechterung der Wiederholgenauigkeiten bei gleichzeitiger Zunahme der in der Mittelbildung berücksichtigten FCBs ist den Schwankungen

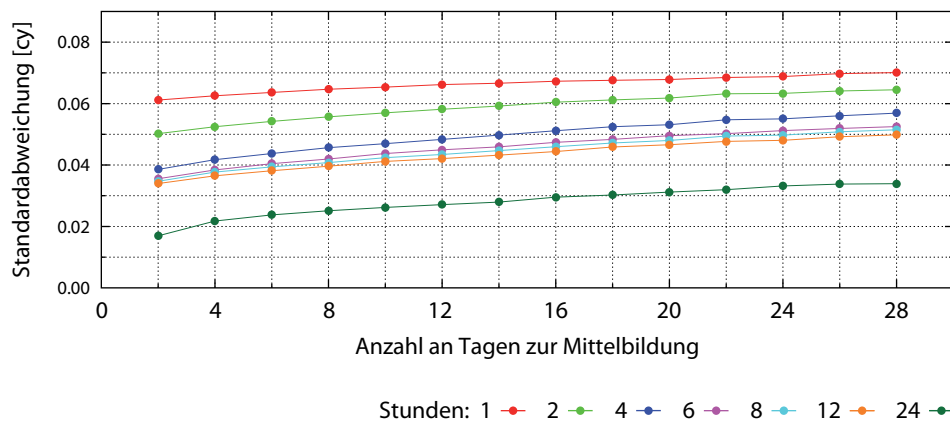


Abb. 4.8: Wiederholgenauigkeit von GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linear kombination

geschuldet, die bereits im Zusammenhang mit Abbildung 4.6 erläutert wurden. Nichtsdestotrotz empfiehlt sich eine Mittelbildung anhand der Daten mehrerer Tage.

Ohne die entsprechenden FCBs wirklich miteinander in Relation gesetzt zu haben, kommen die bisherigen Analysen in diesem Abschnitt zum Fazit, dass es zwischen den FCBs aus ein- und 24-stündigen Beobachtungsdaten deutliche Unterschiede gibt. Unter normalen Umständen sollen jedoch die aus 24-stündigen Beobachtungsdaten abgeleiteten FCBs bzw. Mittelwerte eines bestimmten Zeitabschnitts zur Festsetzung von Mehrdeutigkeiten genutzt werden, die auf der Basis von deutlich weniger Beobachtungen (z. B. eine Stunde) geschätzt wurden. Vor diesem Hintergrund wurden die FCBs aus einstündigen Beobachtungsdaten den mittleren, aus 24-stündigen Beobachtungsdaten abgeleiteten FCBs der zuvor genannten Zeitspannen gegenübergestellt. Die Verteilung der Abweichungen in Bezug auf die mittleren FCBs der verschiedenen Zeitspannen (zwei Tage, vier Tage, usw. bis 28 Tage) ist nahezu identisch. Beispielhaft sind in Abbildung 4.9 die Abweichungen in Bezug auf die mittleren FCBs für eine Zeitspanne von 14 Tagen dargestellt. Im Mittel weichen die aus einstündigen Beobachtungsdaten abgeleiteten FCBs um 0,09 cy vom jeweiligen Mittelwert ab und 77% der Differenzen sind betragsmäßig kleiner als 0,1 cy. Beide Kenngrößen verdeutlichen, dass FCBs aus 24-stündigen Beobachtungsdaten bzw. aus ihnen berechnete Mittelwerte eines bestimmten Zeitabschnitts zur Festsetzung von Mehrdeutigkeiten genutzt werden können, die anhand von deutlich weniger Beobachtungen geschätzt wurden und daher eine im Vergleich deutlich größere Variabilität aufweisen.

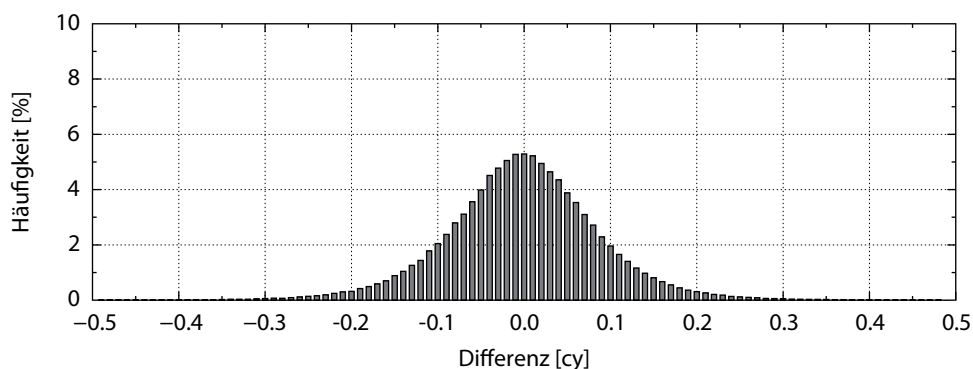


Abb. 4.9: Häufigkeitsverteilung der Differenzen von einstündigen GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination und dem 14-tägigen Mittel von 24-stündigen GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination

4.3.2 *Inter-Frequency Biases* (IFB)

Werden die Beobachtungsdaten eines Empfängers mit den Beobachtungsdaten oder aus ihnen abgeleiteten Produkten (z. B. FCBs) eines zweiten Empfängers korrigiert, verschmelzen nicht nur die FCBs, sondern auch die IFBs miteinander. Sind beide Empfänger vom gleichen Hersteller oder sogar vom selben Typ, sollte sich der IFB aufheben bzw. drastisch reduziert haben. Handelt es sich dagegen um Empfänger von zwei unterschiedlichen Herstellern, werden die Mehrdeutigkeiten durch einen kombinierten IFB beeinflusst, der ebenso linear abhängig von der Frequenznummer ist. Die bestehende Singularität zwischen den GLONASS-Mehrdeutigkeiten und dem IFB wird durch das Festsetzen einer zusätzlichen GLONASS-Mehrdeutigkeit beseitigt. Die Bestimmung des IFB ist

jedoch nur im Zusammenhang mit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung und dem durch jede festgesetzte Mehrdeutigkeit ausgeübten Zwang sinnvoll, d. h. je größer die Festsetzungsquote der Mehrdeutigkeiten, desto genauer kann der IFB bestimmt werden.

Verifizierung

Zur Verifizierung der PPP-Ergebnisse dienen die sich aus der Berechnung im Basislinien-Modus ergebenden RTK-Ergebnisse. Anstelle von abgeleiteten FCBs werden im Basislinien-Modus die ursprünglichen Phasenbeobachtungen als Phasenkorrekturen verwendet. Die Berechnung des Basislinienvektors und aller weiteren Unbekannten (inkl. IFB) erfolgt normalerweise durch Auswertung der simultan gemessenen Phasenbeobachtungen zweier Empfänger auf der Basis von Doppel-Differenzen. Mit Blick auf die unterschiedlichen GLONASS-Frequenzen empfiehlt Wanninger (2012a) die Auswertung von GLONASS-Phasenbeobachtungen auf Basis von Einfach-Differenzen. Die Prozessierung simultan gemessener GPS/GLONASS-Phasenbeobachtungen zweier Empfänger durch Auswertung von Einfach-Differenzen führt einerseits zu einer deutlichen Verringerung des Fehlerhaushaltes (Satellitenuhrabweichung sowie instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten werden eliminiert und Satellitenbahnabweichung sowie iono- und troposphärische Effekte reduziert), doch andererseits verbleiben (entfernungsabhängige) Resteinflüsse. Deshalb sind zusätzlich Satelliten- und Empfängerantennenkorrekturen sowie präzise Orbit- und Ionosphärenprodukte eingeführt wurden.

Sowohl die RTK- als auch die PPP-Auswertung gründen auf den Orbit- und Uhrkorrekturen des IGS AC ESA/ESOC. Die Ionosphärenkorrekturen sind diejenigen des IGS. Um den negativen Einfluss tiefstehender Satelliten zu vermeiden, beschränkt sich die Auswertung auf Beobachtungen von Satelliten mit einer Elevation größer 10° . Die a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 wurden genutzt, um den Großteil des frequenzabhängigen Einflusses vorab von den GLONASS-Phasenbeobachtungen zu entfernen.

Zur Verifizierung wurden die im Abschnitt 4.2.2 genannten Datensätze verwendet. Dabei wurden jedoch lediglich die Beobachtungsdaten der Sonntage prozessiert, da es sich um einen Vergleich von zwei unterschiedlichen Verfahren zur Berechnung des IFB handelt und die Langzeitstabilität hierbei eine untergeordnete Rolle spielt. Insgesamt ergeben sich maximal 244 Tageslösungen pro Stationspaar und Berechnungsverfahren. Um die Weiterverarbeitung von schlecht bestimmten IFBs auszuschließen, wurden Tageslösungen mit einer GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote unter 80 % eliminiert. Die Analyse basiert letztlich auf mehr als 54 000 Paaren von Tageslösungen. Es werden nur die IFBs der ionosphären-freien Linearkombination ($IFB_{\Phi,IF}$) betrachtet.

Abbildung 4.10 stellt als Beispiel die $\Delta IFB_{\Phi,IF}$ von drei ausgewählten Stationspaaren graphisch dar. Die Kombinationen werden jeweils durch die Station DIEP (Diepholz, JPS Legacy) sowie die Stationen EUSK (Euskirchen, Leica GRX1200 GG PRO), HELG (Helgoland, JPS Legacy) und KLOP (Kloppenheim, Trimble NetR5) gebildet. Auf allen vier Stationen haben über den gesamten Zeitraum keine Änderungen hinsichtlich des Instrumentariums stattgefunden. Während die linke Spalte von Abbildung 4.10 die Ergebnisse beider Verfahren in Abhängigkeit von der Zeit zeigt, vergleicht die rechte Spalte die IFBs beider Verfahren direkt miteinander. Jede der drei Kombinationen weist an einigen wenigen Tagen größere Abweichungen zwischen korrespondierenden IFBs auf. Die Mehrheit der Ausreißer ist durch einen im Vergleich zum RTK-IFB betragsmäßig größeren PPP-IFB gekennzeichnet. Dennoch bestehen zwischen den $\Delta IFB_{\Phi,IF}$ beider Verfahren keine großen Unterschiede. Dies bestätigen auch die empirischen Standardabweichungen in Form von RMS-Werten, die mit einem Niveau von Submillimetern vernachlässigbar gering sind.

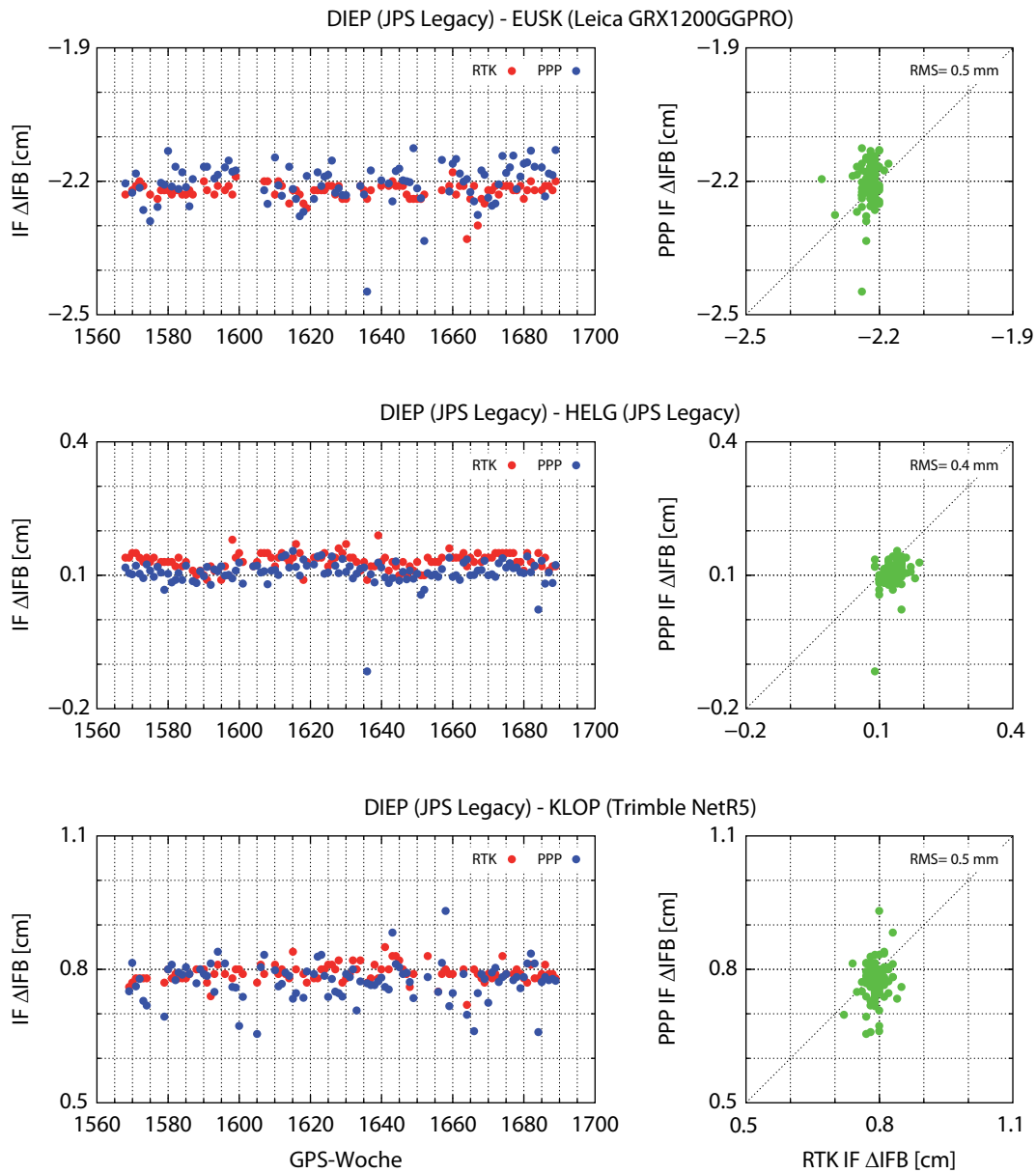


Abb. 4.10: Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen am Beispiel der Station DIEP

Bei den in Abbildung 4.10 dargestellten IFBs handelt es sich um relative IFBs ($\Delta IFB_{\Phi,IF}$), die für ein bestimmtes Stationspaar gelten. Zur Berechnung von mittleren Abweichungen und empirischen Standardabweichungen aus den Abweichungen korrespondierender IFBs für alle Stationen sind jedoch absolute IFBs ($IFB_{\Phi,IF}$) notwendig. Das Absolutniveau wurde entsprechend Wanninger (2012a) durch die IFBs aller Empfänger von Typ JPS Legacy festgesetzt. Aus den beiden neuen Datensätzen von IFBs ergeben sich absolute Differenzen (Abbildung 4.11). Sie beinhalten keine systematischen Abweichungen und bestätigen damit die gute Übereinstimmung der geschätzten IFBs, wenngleich es Unterschiede im Rauschen gibt, die sich in den empirischen Standardabweichungen widerspiegeln.

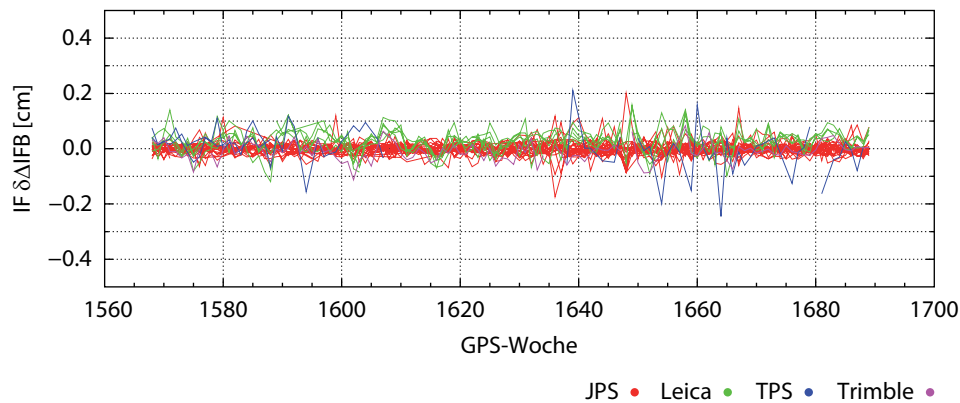


Abb. 4.11: Abweichungen zwischen den absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen

Die empirischen Standardabweichungen sind in Form von RMS-Werten und in Abhängigkeit des Empfängerherstellers in Abbildung 4.12 dargestellt. Es zeigt sich, dass Stationen mit JPS-Empfängern die kleinsten Variationen aufweisen und folglich die von beiden Berechnungsverfahren geschätzten IFBs am besten miteinander übereinstimmen. Die Standardabweichungen aller anderen Stationen sind im Vergleich größer, aber immer noch auf dem Niveau von Submillimetern. Es ist jedoch zu beachten, dass einerseits mehrheitlich Daten von Stationen mit JPS-Empfängern in die Untersuchung eingegangen sind und andererseits JPS-Empfänger das Absolutniveau vorgeben.

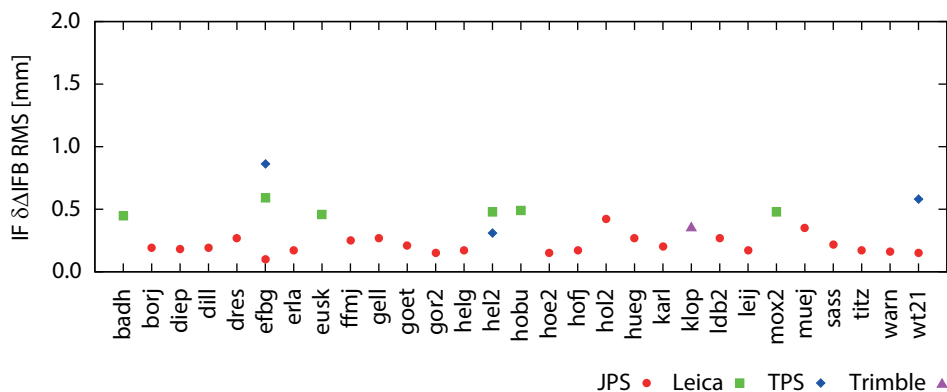


Abb. 4.12: Standardabweichungen der Abweichungen zwischen den absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination von RTK- und PPP-Auswertungen

Langzeitstabilität

Die Gegenüberstellung der aus RTK- und PPP-Auswertungen resultierenden $IFB_{\Phi,IF}$ hat zum Ergebnis, dass sich unabhängig von der Auswertetechnik nahezu identische IFBs ergeben. Die Langzeitstabilität der geschätzten IFBs blieb bei dieser Analyse weitestgehend unbeachtet. Allerdings stellt sie einen wesentlichen Aspekt bei der Modellierung des IFB dar und ist zugleich Voraussetzung für die Anwendung von a priori-Korrekturen.

Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität der IFBs gründen auf den im Abschnitt 4.2.2 genannten Beobachtungsdaten. Innerhalb PPP-Auswertungen wurden die Orbit- und Uhrkorrekturen des IGS AC ESA/ESOC und die Ionosphärenkorrekturen des IGS verwendet. Die Elevationsmaske beträgt 10° . Wiederum wurden die a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 genutzt, um den Großteil des frequenzabhängigen Einflusses vorab von den GLONASS-Phasenbeobachtungen zu entfernen. Insgesamt ergeben sich maximal 976 Tageslösungen pro Stationspaar. Um die Weiterverarbeitung von schlecht bestimmten IFBs auszuschließen, wurden Tageslösungen mit einer GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote unter 80 % eliminiert. Es werden nur die IFBs der ionosphären-freien Linearkombination betrachtet. Beispielhaft zeigt Abbildung 4.13 die $\Delta IFB_{\Phi,IF}$ der gleichen drei Stationspaare wie in Abbildung 4.10. Mit Ausnahme einiger weniger Ausreißer sind die drei Zeitreihen sehr stabil. Dies belegen auch die empirischen Standardabweichungen, die wenige Zehntel Millimeter betragen.

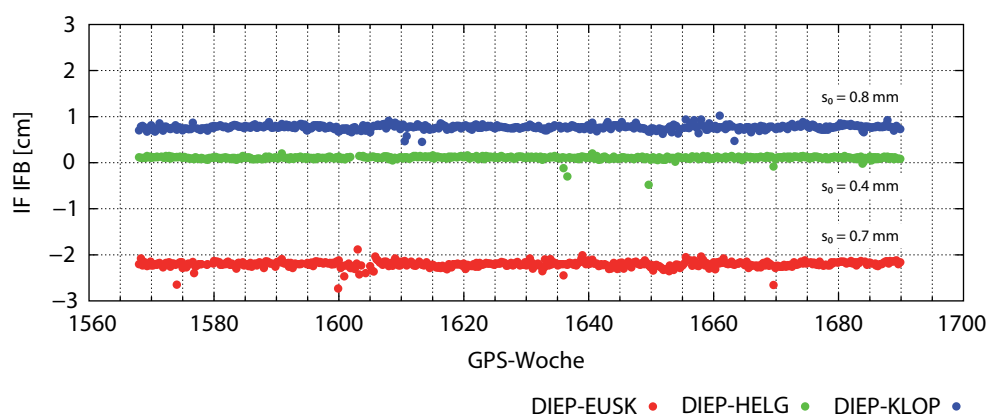


Abb. 4.13: Langzeitstabilität der absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination am Beispiel der Station DIEP

Anschließend erfolgte entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 'Verifizierung' die Umrechnung der auf ein Stationspaar bezogenen relativen IFBs in stationspezifische und absolute IFBs. Für Zeiträume ohne Änderungen des Empfängerherstellers wurden anschließend stationsabhängige Standardabweichungen berechnet, wobei sich für die Stationen EFBG, HEL2 und WZ21 entsprechend Tabelle 4.3 mehrere IFBs ergeben. Wie nicht anders zu vermuten, variieren die IFB-Zeitserien nur sehr geringfügig. Für 82 % der bestimmten $IFB_{\Phi,IF}$ gilt eine Wiederholgenauigkeit von besser als einem Millimeter. Mit 4 mm besitzt der erste Block der Station WT21 die schlechteste Standardabweichung. Während dieser Periode war WT21 mit einem Empfänger vom Typ TPS NET-G3 und einer Antenne vom Typ TPSCR3_GGD ausgestattet. Dieselbe Empfänger/Antennen-Kombination war ebenso auf den Stationen EFBG und HEL2 installiert. Für die entsprechenden Abschnitte dieser Stationen wurde eine Wiederholgenauigkeit des IFB von 2 mm ermittelt.

Im Allgemeinen sollten sich die absoluten Werte nur ändern, nachdem ein Wechsel des Empfängers stattgefunden hat und sich zugleich die IFBs der beiden Hersteller voneinander unterscheiden. Durch Wechsel der Empfangsantenne kann es unter Umständen zu Änderungen im Submillimeter-Bereich kommen. Insofern die Empfängerhersteller auf ihre internen Code-Phasen-Verzögerungen innerhalb einer Baureihe oder innerhalb aller Baureihen achten, sollten Variationen des IFB in Folge von Modifikationen der Firmware bzw. bei Wechsel des Empfängertyps normalerweise nicht existieren. Um diese Annahmen zu überprüfen, wurden die IFB-Zeitreihen erneut statistisch ausgewertet und mittlere IFBs sowie Standardabweichungen für nunmehr 69 Blöcke bestimmt. Im Gegensatz zu den Blöcken der ersten Auswertung sind diese Blöcke ohne jegliche Änderung in der Empfänger- und Antennentechnik. Damit ergibt sich für 90% der bestimmten IFBs eine Wiederholgenauigkeit von besser als einem Millimeter.

Drei der vier genannten Quellen, die ursächlich für Änderungen des IFB sein können, traten im Untersuchungszeitraum auf der Station HOBU auf. Wie aus Tabelle 4.4 hervorgeht, liegen für dieses Beispiel die Änderungen des IFB auf dem Niveau der Standardabweichungen. Zudem ist zu erwähnen, dass der mittlere IFB von HOBU mit dem IFB von Leica (2,3 cm) sehr gut übereinstimmt.

Tab. 4.4: Absolute $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination der Station HOBU

Empfänger	Antenne	IFB [cm]	Standardabweichung [cm]
Leica GRX1200 GG PRO 6.00/3.017	LEIAT504GG	2,2	0,06
Leica GRX1200+GNSS 7.80/4.004	LEIAT504GG	2,3	0,07
Leica GRX1200+GNSS 7.80/4.004	LEIAR25.R4	2,5	0,05
Leica GRX1200+GNSS 8.20/4.007	LEIAR25.R4	2,4	0,13
Leica GRX1200+GNSS 8.50/6.110	LEIAR25.R4	2,4	0,08

Die Bandbreite der durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel hervorgerufenen Änderungen der IFBs veranschaulicht Tabelle 4.5. Die mittleren Änderungen des IFB sowie die Minima und Maxima bestätigen die zuvor diskutierten Aussagen und unterstreichen, dass Firmware-Updates oder Antennenwechsel mehrheitlich nur minimale Änderungen des IFBs nach sich ziehen. Mit Ausnahme des Firmware-Updates auf der Station HEL2 liegen die Änderungen auf dem Niveau der Wiederholgenauigkeiten. Ein Firmware-Update auf der Station HEL2 führt zu einer Änderung des IFB von mehreren Millimetern. Allerdings enthält die LOG-Datei der Station keinen Eintrag, der mit dem genannten Datum in Verbindung steht.

Tab. 4.5: Änderungen der absoluten $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel

Art des Wechsels	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Mittel [mm]
Firmware-Update (mit HEL2)	-4,1	1,0	-0,3
Firmware-Update (ohne HEL2)	-0,8	1,0	-0,1
Antennenwechsel	0,0	1,2	0,4

Problem: Helgoland 2 (HEL2)

Wie erwähnt, führt ein auf der Station Helgoland 2 (HEL2) am DOY 193/2011 durchgeführtes Firmware-Update zu einer deutlichen Änderung des $IFB_{\Phi,IF}$. Um den IFB der Station näher zu untersuchen, wurden die Beobachtungsdaten der Jahre 2011 und 2012 von HEL2 prozessiert. Die zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung notwendigen FCBs stammen von der zweiten Station auf Helgoland (Helgoland, HELG). Beide Stationen sind 1,7 km voneinander entfernt, sodass von identischen atmosphärischen Einflüssen ausgegangen werden kann. Während HEL2 mit einem Empfänger vom Typ Leica GRX1200+GNSS arbeitet, ist HELG mit einem Empfänger vom Typ JPS Legacy ausgestattet. Neben dem bereits bekannten Firmware-Update fand im Untersuchungszeitraum auf HEL2 ein weiteres Update statt. Die LOG-Datei von HELG verzeichnet keine Änderung am Instrumentarium.

Die täglichen $\Delta IFB_{\Phi,IF}$ der Jahre 2011 und 2012 veranschaulicht Abbildung 4.14. Die verschiedenen Abschnitte repräsentieren Zeiträume, in denen auf dem Leica-Empfänger von HEL2 unterschiedliche Firmware-Versionen installiert waren. Die Sprünge in den Zeitreihen korrespondieren mit den Daten der Firmware-Updates, die beide nicht in der LOG-Datei aufgelistet sind. Während die IFBs des ersten sowie dritten Abschnitts auf einem ähnlichen Niveau liegen und die Mittel von jeweils 2,6 cm mit dem aus Tabelle 3.5 entnommenen $\Delta IFB_{\Phi,IF} = 2,3$ cm gut zusammenpassen, sind die IFBs des zweiten Abschnitts mit 1,5 cm deutlich zu klein. Obwohl in einem Vorverarbeitungsschritt neue a priori-Korrekturen für diesen mittleren Abschnitt bestimmt worden sind und beide Stationen sehr nah beieinanderliegen, liegt die Festsetzungsquote sowohl im zweiten als auch im dritten Block an einem von vier Tagen unter 80%. Im ersten Abschnitt werden auf diese Weise nur 10% aller täglichen IFBs eliminiert. Es ist anzunehmen, dass die aktualisierte Firmware ursächlich für den geänderten IFB ist, jedoch kann ein Neustart des Empfängers im Zusammenhang mit dem Update als möglicher Auslöser nicht ausgeschlossen werden.

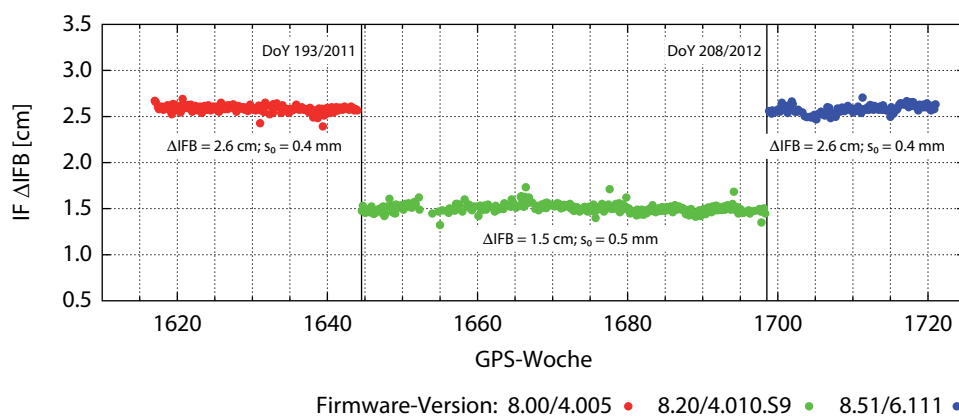


Abb. 4.14: Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination der Station HEL2 in Abhängigkeit der installierten Firmware-Version

Problem: Septentrio

Änderungen der IFB_{Φ} aufgrund von Modifikationen der Firmware im Hinblick auf die durch die digitale Signalverarbeitung (DSP) induzierten Code-Phasen-Verzögerung können, wie u. a. auch am Beispiel HEL2 zu erkennen, zu erheblichen Problemen bei der Mehrdeutigkeitslösung führen. Dies ist vor allem dann als kritisch zu beurteilen, wenn sich der IFB_{Φ} durch die bewusste „Manipulation“ der Firmware um mehrere Zentimeter ändert. Septentrio hat mit der Einführung der Firmware-

Version 2.3 Anfang 2012 dazu beigetragen, dass es Septentrio-Empfänger mit sehr unterschiedlichen IFBs gibt: ca. 4,9 cm für Empfänger mit der Firmware-Version 2.2 (und älter) sowie ca. 0,0 cm für Empfänger mit der Firmware-Version 2.3 (und höher) (Sleewaegen u. a. 2012a). Aktuell gibt es unter den IGS- und EPN-Referenzstationen mehrere Stationen, die mit Empfängern von Septentrio ausgerüstet sind, auf denen eine der beiden Versionen installiert ist.

Um den Wechsel des IFB_{Φ} zu analysieren, wurden die Beobachtungsdaten von fünf EPN-Stationen, die mit Septentrio-Empfängern ausgestattet sind, im PPP-Modus inkl. Festsetzung der Mehrdeutigkeiten ausgewertet. Die dafür notwendigen FCBs sind aus den Beobachtungsdaten von EPN-Stationen, die sich in der Nähe der Septentrio-Stationen befinden, abgeleitet (Tabelle 4.6). Die Beobachtungsdaten stammen aus dem Zeitraum DOY 1/2012 bis 167/2013. Es wurden jeweils immer nur die Daten der Sonntage ausgewertet. Bedauerlicherweise hat keine der fünf Stationen Daten sowohl mit der alten als auch der neuen Firmware-Version aufgezeichnet. Einzig die britische Station HERS in Herstmonceux war mit älterem Equipment ausgestattet (Septentrio PolaRx3TR Firmware-Version 2.1). Die vier anderen Stationen wurden im Laufe der Zeit auf Septentrio PolaRx4 bzw. Septentrio PolaRx4TR und unterschiedliche Ausführungen der Firmware-Version 2.3 umgestellt.

Die interne Korrektur der Code-Phasen-Verzögerungen durch Septentrio erschwert die Auswertung von GLONASS-Phasenbeobachtungen, da die bisherigen a priori-Korrekturen ihre Gültigkeit verloren haben. Zudem ist ein einfacher Zugriff auf die Korrekturwerte anhand des Empfänger-Herstellers ohne weiteres nicht mehr möglich. Vielmehr werden zusätzliche Informationen, wie z. B. die Firmware-Version, notwendig. Für diesen Versuch wurden daher in einem Vorverarbeitungsschritt neue a priori-Korrekturen bestimmt.

Die Ergebnisse in Tabelle 4.6 zeigen in erster Linie die von Sleewaegen u. a. (2012a) angekündigte Änderung des IFB_{Φ} von Septentrio-Empfängern von ca. 4,9 cm auf ca. 0,0 cm. Insbesondere beim Stationspaar BRUX/HERS, die beide mit Septentrio-Empfängern arbeiten, auf denen aber einerseits die alte und andererseits die neue Firmware installiert ist, ist der Wechsel des IFB deutlich zu erkennen. Normalerweise hat der $\Delta IFB_{\Phi,IF}$ zwischen Empfängern desselben Herstellers einen Wert nahe Null. Zugleich ist aber auch die gute Übereinstimmung der relativen IFBs für gleiche Paare von Empfängern (CEBR/SONS, MAS1/IZAN und VILL/SONS) ersichtlich.

Tab. 4.6: Absolute $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination verschiedener Stationen mit Septentrio-Empfängern

Station 1 (Beobachtungen)		Station 2 (FCBs)		IF IFB [cm]	
Name	Empfänger	Name	Empfänger	Soll	Ist
BRUX	Septentrio PolaRx4TR 2.3.x	ELJS	TPS Odyssey E	0,0	0,0
BRUX	Septentrio PolaRx4TR 2.3.x	LIL2	Trimble NetR8	0,7	0,6
BRUX	Septentrio PolaRx4TR 2.3.x	HERS	Septentrio PolaRx3TR 2.1	-4,9	-5,1
CEBR	Septentrio PolaRx4TR 2.3.x	SONS	Leica GRX1200 GG PRO	-2,3	-2,3
HERS	Septentrio PolaRx3TR 2.1	HERT	Leica GRX1200 GG PRO	2,6	2,9
MAS1	Septentrio PolaRx3 2.3.x	IZAN	Leica GRX1200 GG PRO	-2,3	-2,2
VILL	Septentrio PolaRx4TR 2.3.x	SONS	Leica GRX1200 GG PRO	-2,3	-2,2

4.4 Code

Obwohl Codebeobachtungen ein Messrauschen besitzen, das zwei Größenordnungen über dem der Phasenbeobachtungen liegt und sie daher um den Faktor 100 abgewichtet werden, sind sie für eine PPP-Auswertung dennoch nicht unwichtig. Speziell bei kurzen Beobachtungszeiten tragen Codebeobachtungen zur Unterstützung der im Normalfall auf Phasenbeobachtungen beruhenden Koordinatenberechnung bei. Unter Umständen basiert die PPP-Auswertung aber auch nur auf Codebeobachtungen. Eine weitaus größere Bedeutung haben sie bei der Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten, wofür normalerweise die Melbourne-Wübbena-Linear kombination genutzt wird.

In allen drei Fällen werden durch instrumentelle Codeverzögerungen negativ beeinflusste Codebeobachtungen verwendet. Im Fall von GPS wirken die instrumentellen Codeverzögerungen auf die Signale aller Satelliten identisch, sodass die PPP-Residuen der ionosphären-freien Linearkombination um Null schwanken. Von Null abweichende PPP-Residuen besitzen GLONASS-Satelliten, was sich in einem höheren Rauschen widerspiegelt (vgl. Abbildung 3.5 und Gleichung 3.25). Die Codeabweichungen können mehrere Meter erreichen und sind nur zum Teil frequenzabhängig (Yamada u. a. 2010; Al-Shaery u. a. 2012; Reußner und Wanninger 2012; Banville u. a. 2013b; Chuang u. a. 2013; Aggrey und Bisnath 2014).

Die Berechnung der Codeabweichungen (*Code Delay*, CD) der ionosphären-freien Linearkombination erfolgt nicht unmittelbar während der Auswertung der Beobachtungsdaten im PPP-Modus, sondern basiert auf der Analyse von Coderesiduen, die sich aus der Auswertung der Beobachtungsdaten im PPP-Modus ergeben. Der Hauptgrund für diese Herangehensweise ist die Tatsache, dass im ersten Fall zu viele Bedingungen zu berücksichtigen wären. Deren Anzahl ist davon abhängig, ob CDs pro GLONASS-Satellit oder pro Frequenznummer bestimmt werden sollen. Letzteres setzt die Annahme voraus, dass die CDs von GLONASS-Satelliten mit der gleichen Frequenznummer (nahezu) identisch sind. Zugleich erhöht sich die Anzahl an zu schätzenden Unbekannten.

Zur Separierung der satellitenspezifischen Codeabweichungen aus den Coderesiduen ist die Einführung von Bedingungen zwar ebenfalls unvermeidlich. Allerdings handelt es sich nur um zwei Zwänge, die zudem wesentlich leichter zu handhaben sind. Die Notwendigkeit des ersten Zwangs ergibt sich aus der Tatsache, dass die Coderesiduen sowohl die Codeabweichungen als auch den Empfängeruhrfehler enthalten und beide nicht unabhängig voneinander sind. Um diese Singularität zu lösen, wird die Bedingung eingeführt, dass die Summe aller CDs einer Station eines Tages Null sein muss:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i^j = 0. \quad (4.2)$$

Zudem sind die Coderesiduen und damit auch die Codeabweichungen im starken Maße von den verwendeten Uhrkorrekturen abhängig. Die Uhrkorrekturen enthaltenen satellitenindividuelle AC-spezifische Anteile, die auf alle Stationen identisch wirken. Zur Abspaltung des gemeinsamen Anteils an den Codeabweichungen wird eine zweite Bedingung eingeführt. Nach dieser muss die Summe aller CDs eines Satelliten aller Stationen eines Tages Null sein, sodass die Codeabweichungen aller einbezogenen Stationen letztlich mittelwertfrei sind:

$$\hat{b}_k^j = b_k^j - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_k^j. \quad (4.3)$$

Das Hauptaugenmerk dieses Abschnitts liegt, analog zu Abschnitt 4.3, auf der Untersuchung der Langzeitstabilität der durch die Codeverzögerungen verursachten Codeabweichungen. Hierzu wurden die im Abschnitt 4.2.2 genannten Datensätze verwendet. Da die Untersuchungen auf den Residuen der ionosphären-freien Code-Linearkombination beruhen und zu deren Berechnung präzise Uhrkorrekturen eingesetzt wurden, müssen die Beobachtungsdaten die in Abschnitt 3.2.5 aufgeführte Konsistenz erfüllen. Demnach sind die Beobachtungsdaten von Stationen, die auf der ersten Frequenz lediglich C_1 -Codebeobachtungen zur Verfügung stellen, mittels DCB_{P1C1} zu korrigieren (u. a. BADH und EUSK). Andernfalls werden fehlerhafte CDs für diese Stationen und folglich fehlerhafte CDs für alle Stationen bestimmt. Insgesamt ergeben sich pro Station maximal 488 Tageslösungen, die auf einer kombinierten GPS- und GLONASS-Code- und Phasen-PPP-Auswertung beruhen.

Im ersten Teil dieses Abschnitts wird zunächst auf die Codeabweichungen der Satelliten eingegangen. Der zweite Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich mit den IFBs der ionosphären-freien Code-Linearkombination ($IFB_{C,IF}$).

4.4.1 Satellit

Die zeitliche Stabilität der Codeabweichungen der einzelnen GLONASS-Satelliten sowie die zeitliche Stabilität der Differenzen der Codeabweichungen von GLONASS-Satelliten mit der gleichen Frequenznummer sind Voraussetzungen für die zeitliche Stabilität des $IFB_{C,IF}$. Je geringer die Codeabweichungen der Satelliten über einen längeren Zeitraum variieren, desto genauer kann der $IFB_{C,IF}$ für selbigen bestimmt werden. Beide Aspekte sind Gegenstand dieses Abschnitts.

Hierfür wurden zunächst die täglichen Codeabweichungen stationsweise zusammengefasst und für jeden Satelliten stationsabhängige Standardabweichungen berechnet. Jedoch können Änderungen sowohl in der GLONASS-Konstellation als auch in der Empfänger/Antennen-Kombination zu Sprüngen in den Codeabweichungen führen und die Wiederholgenauigkeiten verfälschen. Daher wurden Standardabweichungen nur für Zeiträume ohne Änderung ermittelt. Abbildung 4.15 veranschaulicht die Wiederholgenauigkeiten in Abhängigkeit von der GLONASS-PRN-Nummer sowie als Histogramm. Es zeigt sich, dass keine Unterschiede zwischen den Wiederholgenauigkeiten der einzelnen Satelliten bestehen. Selbiges gilt mit Ausnahme der Station GELL (Gellin) auch für die untersuchten Stationen. Obwohl die Station GELL zu einer Gruppe von Stationen (u. a. DIEP, GOR2 und HOL2)

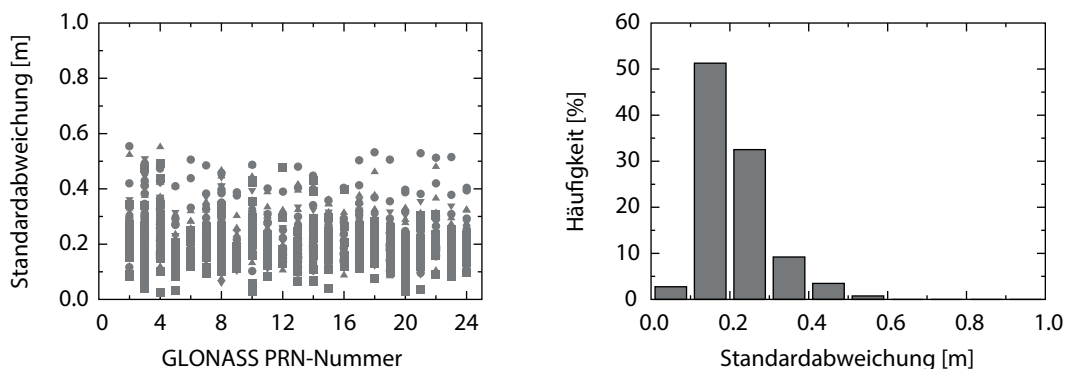


Abb. 4.15: Wiederholgenauigkeiten der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination

gehört, die über den gesamten Zeitraum mit der identischen Empfänger/Firmware/Antennen-Kombination gearbeitet haben (JPS Legacy 2.6.1; TPSCR3_GGD), weisen die Codeabweichungen von GELL im Vergleich zu den Codeabweichungen aller anderen Stationen eine schlechte Wiederholgenauigkeit auf. 85 % bzw. 95 % aller Codeabweichungen besitzen eine zeitliche Stabilität besser 30 cm bzw. 40 cm, was die gute Übereinstimmung der Ergebnisse nochmals unterstreicht.

Nahezu identische Ergebnisse konnten auch von Chuang u. a. (2013) ermittelt werden. Anhand der Beobachtungsdaten von 133 IGS-Stationen aus dem Zeitraum DOY 1/2012 bis 136/2012 zeigen sie, dass 81 % bzw. 95 % der von ihnen ausgewählten Stationen eine Wiederholgenauigkeit besser 25 cm bzw. 35 cm besitzen. Acht Stationen weisen eine Standardabweichung größer 40 cm auf.

Wie erwähnt, setzt die Modellierung des $IFB_{C,IF}$ neben der zeitlichen Stabilität der Codeabweichungen der einzelnen GLONASS-Satelliten ebenfalls voraus, dass die Codeabweichungen von GLONASS-Satelliten mit der gleichen Frequenznummer nur geringfügige Unterschiede aufweisen. Für diese zweite Untersuchung wurden die täglichen Codeabweichungen ebenfalls stationsweise zusammengefasst und Differenzen zwischen den Codeabweichungen von GLONASS-Satelliten mit der gleichen Frequenznummer gebildet. Wiederum wurden nur solche Blöcke analysiert, die sowohl in der GLONASS-Konstellation als auch in der Empfänger/Antennen-Kombination frei von Änderungen sind. Abbildung 4.16 veranschaulicht die mittleren absoluten Differenzen in Abhängigkeit von der GLONASS-PRN-Nummer sowie als Histogramm.

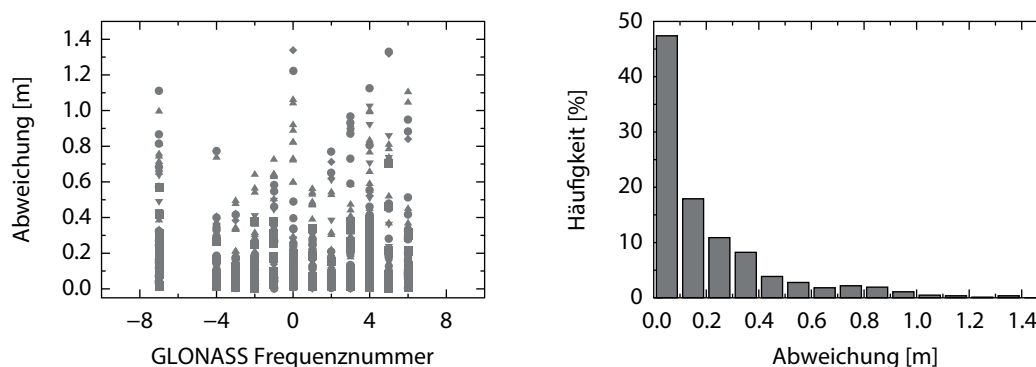


Abb. 4.16: Differenz der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination von GLONASS-Satelliten mit derselben Frequenznummer

Vergleichbar den Wiederholgenauigkeiten der Satelliten, die mit Ausnahme der Station GELL auf einem ähnlich hohen Niveau liegen, resultiert aus den Differenzen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung der Codeabweichungen von Satelliten mit der gleichen Frequenznummer. 75 % bzw. 88 % aller Differenzen sind kleiner 30 cm bzw. 50 cm. Ausnahmen gibt es aber auch hier, wobei diese nicht direkt mit einer bestimmten Frequenznummer und folglich nicht mit bestimmten Satelliten in Verbindung gebracht werden können. Größere Variationen, die zudem unabhängig von einem bestimmten Zeitraum sind, zeigen HEL2 und KLOP. Größere Abweichungen, die zeitlich jedoch begrenzt sind, wurden zum einen für den bereits erwähnten ersten Block von WT21 und zum anderen für drei Zeiträume von HOBU ermittelt. Einzelne Stationen (u. a. BADH, ERLA und insbesondere EUSK) besitzen lediglich für die Frequenznummer -7, die sich die Satelliten R10 (GLONASS-Nummer 717) und R14 (722) teilen, größere Differenzen zwischen den Codeabweichungen der Satelliten. Alles in allem sind jedoch auch die Differenzen stabil. 64 % bzw. 86 % aller Differenzen besitzen eine zeitliche Stabilität besser 30 cm bzw. 50 cm.

4.4.2 Inter-Frequency Biases (IFB)

Die im Abschnitt 4.4.1 vorgenommenen Untersuchungen haben zum Ergebnis, dass sowohl die Codeabweichungen der Satelliten als auch die Differenzen zwischen den Codeabweichungen von GLONASS-Satelliten mit der gleichen Frequenznummer eine hohe zeitliche Stabilität besitzen. Somit sind die Voraussetzungen gegeben, die u. a. von Al-Shaery u. a. (2012) auf Basis von DD-Code-residuen nachgewiesene Linearität der Codeabweichungen von der Frequenznummer zu analysieren.

Hierfür wurden die bereits im Abschnitt 4.4.1 verwendeten täglichen Codeabweichungen einer linearen Regression unterzogen, wobei nur der Polynomkoeffizient 1. Grades, der $IFB_{C,IF}$, von Interesse ist. Allerdings liegt das Hauptaugenmerk nicht auf dem $IFB_{C,IF}$ selbst, vielmehr steht die Wiederholgenauigkeit der $IFB_{C,IF}$ über einen längeren Zeitraum im Vordergrund. Daher sind die Beobachtungsdaten von lediglich 29 Stationen, die zudem nur mit einigen wenigen unterschiedlichen Empfänger-/Antennenkombinationen gemessen haben, ausreichend²⁴.

Abbildung 4.17 stellt als Beispiel die $IFB_{C,IF}$ von vier ausgewählten Stationen graphisch dar. Zunächst ist zu erkennen, dass der $IFB_{C,IF}$ im Vergleich zum $IFB_{\Phi,IF}$ wesentlich größere Werte

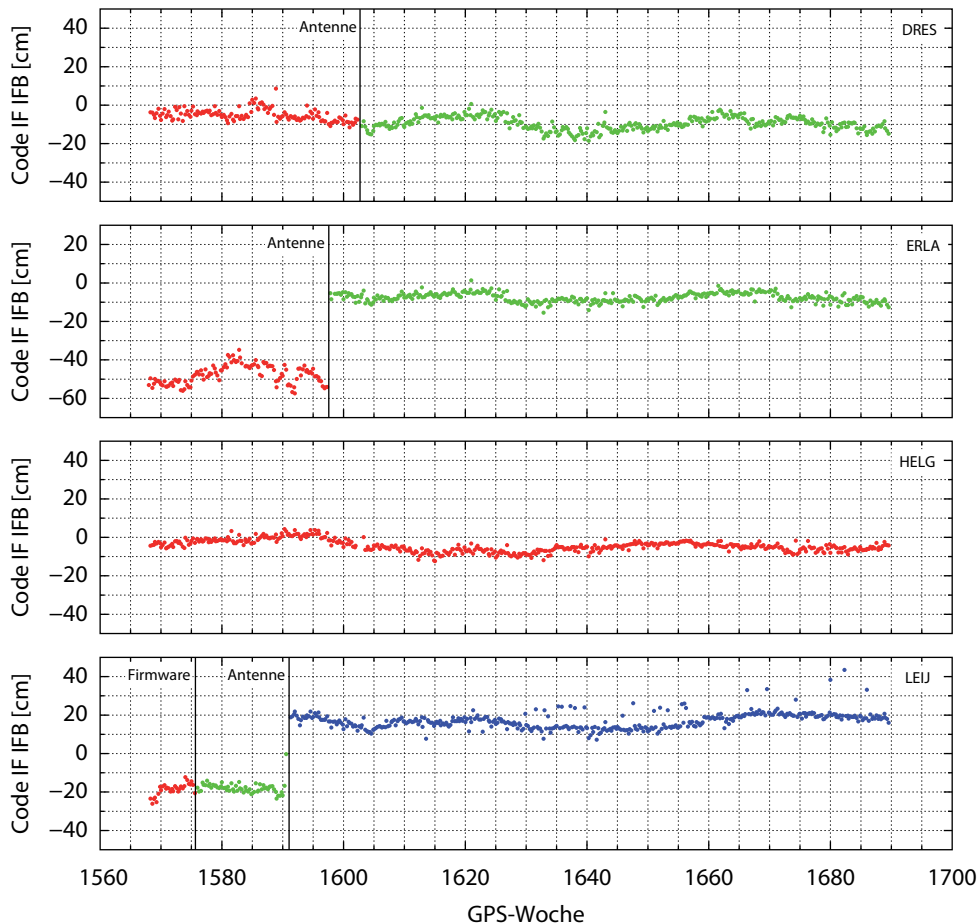


Abb. 4.17: $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination

²⁴Eine wesentlich größere Stichprobe war die Grundlage für die Berechnung im Abschnitt 5.2, wo die Beobachtungsdaten von knapp 170 Stationen im Hinblick auf den $IFB_{C,IF}$ untersucht werden.

annehmen kann. Die $IFB_{C,IF}$ der acht Blöcke schwanken zwischen -48 cm und 17 cm. Gleichwohl sind auch die Wiederholgenauigkeiten im Vergleich zu den Wiederholgenauigkeiten der $IFB_{\Phi,IF}$ um eine Größenordnung höher. Mit Ausnahme einiger weniger Ausreißer, speziell im dritten Block der Station LEIJ, sind die Zeitreihen sehr stabil. Die Standardabweichungen bewegen sich im Bereich von ca. 3 cm. Aufgrund eines Wechsels der Antenne vom Typ TRM29659.00 zum Typ LEIAR25.R3 auf der Station ERLA (JPS Legacy 2.6.1) ändert sich nicht nur der $IFB_{C,IF}$ von -48 cm auf -8 cm, sondern verbessert sich auch die Wiederholgenauigkeit von $4,9$ cm auf $2,3$ cm.

Mit Standardabweichungen im Bereich von 2 cm bis 5 cm repräsentieren die vier Stationen die mehrheitlich erreichbare Wiederholgenauigkeit (Abbildung 4.18). Für knapp 75% der bestimmten $IFB_{C,IF}$ gilt eine Reproduzierbarkeit von besser als 5 cm. Fünf der 69 Blöcke (7%) haben eine Wiederholgenauigkeit schlechter als 7 cm. Dies betrifft im Wesentlichen die bereits erwähnten Zeiträume der Stationen HEL2, KLOP und WT21.

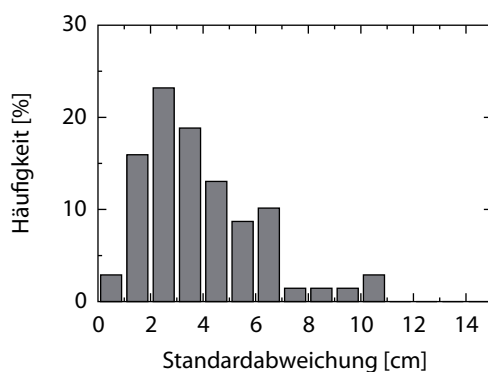


Abb. 4.18: Wiederholgenauigkeiten der $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination

Die Bandbreite der durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel hervorgerufenen Änderungen der IFBs veranschaulicht Tabelle 4.7. Sowohl die mittleren Änderungen des IFB als auch die Minima und Maxima sind im Vergleich zu Tabelle 4.5 um eine Größenordnung höher. Die Änderungen können mehrere Dezimeter betragen. Im Mittel liegen sie auf dem Niveau der Wiederholgenauigkeit.

Tab. 4.7: Änderungen der $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination durch Firmware-Updates oder Antennenwechsel

Art des Wechsels	Minimum [cm]	Maximum [cm]	Mittel [cm]
Firmware-Update	$-12,9$	$19,4$	$-1,9$
Antennenwechsel	$-30,8$	$40,1$	$5,6$

Obwohl aus den vorherigen Untersuchungen bekannt ist, dass einerseits sowohl die Codeabweichungen als auch die Differenzen zwischen den Codeabweichungen von Satelliten mit der gleichen Frequenznummer und andererseits die $IFB_{C,IF}$ zeitlich stabil sind, kann daraus nicht unmittelbar abgeleitet werden, dass eine Approximation der instrumentellen Codeverzögerungen in Abhängigkeit von der Frequenznummer und damit die Schätzung des $IFB_{C,IF}$ in Gleichung 3.15 überhaupt sinnvoll ist. Unter Umständen ist eine Angleichung durch ein Polynom höheren Grades (z. B. Grad 2) besser geeignet. Diese bereits im Abschnitt 3.2.5 angerissene Fragestellung soll zum Abschluss dieses Abschnitts diskutiert werden.

Zur Klärung des genannten Sachverhaltes wurden zwei Regressionsanalysen durchgeführt: zum einen die Angleichung einer linearen Funktion (Polynom Grad 1, Gerade) und zum anderen die Einpassung einer quadratischen Funktion (Polynom Grad 2, Parabel). Das Hauptaugenmerk der Ausgleichung liegt allerdings nicht auf den Unbekannten, den Polynomkoeffizienten, sondern auf den resultierenden Verbesserungen. Die Auswertung der Restabweichung mit Blick auf die Berechnung von RMS-Werten, d. h. Standardabweichungen nach Gleichung 2.73, erfolgte zum einen satellitenindividuell und zum anderen, wie zuvor auch, nur für Blöcke ohne Änderung in der Empfänger- und Antennentechnik. Schlussendlich ergeben sich für jede der beiden Varianten mehr als 1 700 RMS-Werte, die in Abhängigkeit von der Frequenznummer sowie als Histogramm in Abbildung 4.19 einander gegenüber gestellt sind.

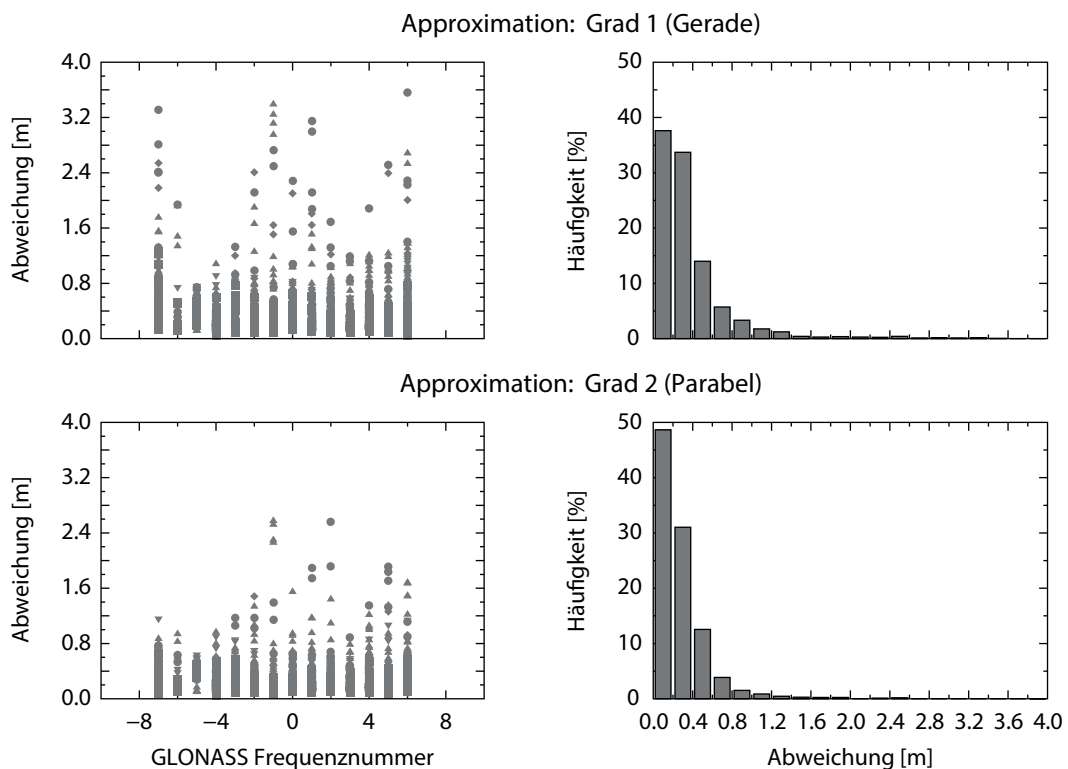


Abb. 4.19: GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. bzw. 2. Grades

Es ist deutlich erkennbar, dass die verbleibenden Codeabweichungen eine wesentlich geringere Streuung besitzen, wenn die Frequenzabhängigkeit der instrumentellen Codeverzögerungen durch die Anpassung einer quadratischen Funktion statt durch die Schätzung einer linearen Funktion eliminiert wird. Die geringere Streuung geht einher mit einer Verbesserung der RMS-Werte. Im Mittel haben die Satelliten, die die Frequenznummern -7 und 6 zur Kennzeichnung nutzen, nach Abzug des Geradenanstieges die größten Restabweichungen. Der umgekehrte Fall gilt vor allem für die Satelliten mit den Frequenznummern -6 und -5. Speziell die Satelliten mit Frequenznummern am Rand (-7, 5 und 6) als auch in der Mitte (-1, 0 und 1) profitieren von einer Modellierung eines Polynoms 2. Grades. Es gibt aber auch einzelne Blöcke von einigen wenigen Satelliten, deren RMS-Werte sich verschlechtern, d. h. die sich aus der Ausgleichung ergebenden Verbesserungen sind nach der Einpassung einer Parabel größer (z. B. Frequenznummer 5). Die Quote der Codeabweichungen, die kleiner

als 0,2m sind, erhöht sich nach der Ausgleichung eines Polynoms 2. Grades um 10 %. Gleichzeitig verringert sich in erster Linie die Anzahl an Werten mit Restabweichungen größer 2 m, d. h. die Einpassung einer Parabel wirkt sich insbesondere auf die Codeabweichungen positiv aus, die trotz Geradenausgleichung große Restabweichungen besitzen. Im Mittel sind 85 % (Ausgleichung: lineare Funktion) bzw. 92 % (Ausgleichung: quadratische Funktion) der verbleibenden Codeabweichungen kleiner als 0,6m. Durch die Approximation eines Polynoms 2. Grades halbiert sich die Anzahl der Codeabweichungen, die größer als 1 m sind. Im Extremfall können die verbleibenden Codeabweichungen Werte von über 3 m annehmen. Nichtsdestotrotz gibt es aber auch Codeabweichungen, die um Null schwanken.

Mit den genannten Kennzahlen liegen die verbleibenden Codeabweichungen beider Regressionsanalysen jedoch über dem Niveau der Codeabweichungen, die sich für GPS-Satelliten ergeben (Abbildung 4.20²⁵). Die Berechnung der GPS-RMS-Werte erfolgte nach den gleichen Gesichtspunkten wie sie auch für GLONASS gelten, d. h. es wurden Standardabweichungen nur für solche Zeiträume ermittelt, in denen es keine Änderungen in der GPS-Konstellation als auch in der Empfänger/Antennen-Kombination gab. Im Gegensatz zu GLONASS bilden jedoch die Codeabweichungen, die sich nach Gleichung 4.3 ergeben, die Grundlage für die statistische Auswertung. Zwar besteht das GPS-Weltraumsegment im Vergleich zur GLONASS-Konstellation aus mehr Satelliten, doch gab es im Untersuchungszeitraum insgesamt nur drei Erneuerungen in der GPS-Konstellation, sodass lediglich etwas mehr als 2000 RMS-Werte in die Abbildung 4.20 eingegangen sind. Über die Hälfte von ihnen besitzt eine Standardabweichung von unter 1 cm. Im Mittel sind 91 % bzw. 98 % der GPS-Codeabweichungen kleiner als 0,3m bzw. 0,6 m. Die Quote der Codeabweichungen, die nach der Ausgleichung einer Gerade größer als 0,6 m sind, ist für GPS 10-mal kleiner als für GLONASS. Es lässt sich festhalten, dass GLONASS-Codeabweichungen trotz Eliminierung der instrumentellen Codeverzögerungen durch die Einpassung einer Gerade bzw. eines Polynoms 2. Grades mit dem Faktor 2 über dem Niveau der GPS-Codeabweichungen liegen.

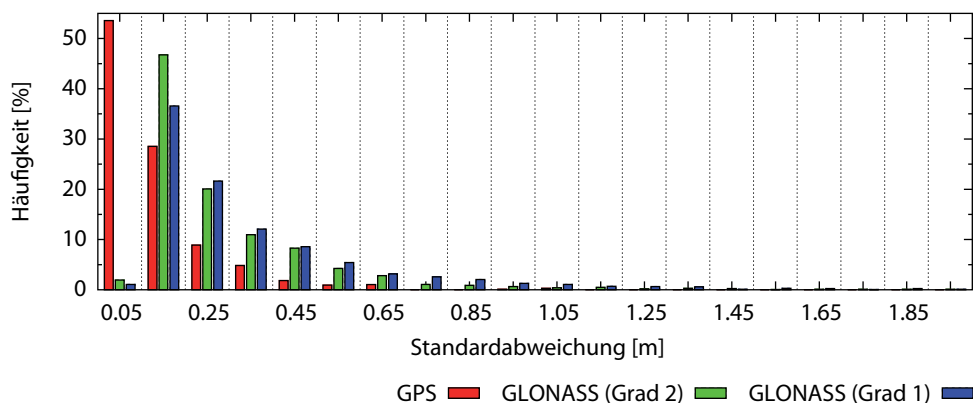


Abb. 4.20: Häufigkeitsverteilung der Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination

Obwohl gezeigt werden konnte, dass eine Approximation mit einem Polynom 2. Grades im Allgemeinen zu kleineren Restabweichungen führt als die Angleichung einer linearen Funktion, wird an dieser Stelle die Schätzung des $IFB_{C,IF}$ favorisiert. Selbiges wird u. a. auch von Banville u. a.

²⁵Hinweis: Im Vergleich zu Abbildung 4.19 stellt die x-Achse von Abbildung 4.20 zum einen kleineren Wertebereich dar und zum anderen ist deren Auflösung verdoppelt worden, sodass beide Darstellungen nur indirekt miteinander vergleichbar sind.

(2013b) empfohlen. Als Hauptgrund gilt die Anzahl an Bedingungen, die einzuführen sind, um die Polynomkoeffizienten während der PPP-Auswertung zu schätzen, wobei die Anzahl an Bedingungen dem Grad des Polynoms entspricht. Wird nur der $IFB_{C,IF}$ geschätzt, ist lediglich eine Bedingung notwendig.

5 Untersuchungen zu Codeverzögerungen

Die Phasenbeobachtungen stellen die primären Messgrößen bei einer GNSS-Positionsbestimmung im PPP-Modus dar (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dennoch können die ungenaueren Codebeobachtungen zur Unterstützung der Positionslösung beitragen, indem sie insbesondere bei kurzen Beobachtungszeiten als zweite Messgröße zur Stabilisierung des Gleichungssystems beitragen. Von größerer Bedeutung sind Codebeobachtungen im Zusammenhang mit der Bildung der Melbourne-Wübbena-Linear-kombination, deren Mehrdeutigkeiten im ersten Schritt der Mehrdeutigkeitslösung festgesetzt werden. Beides setzt voraus, dass die Codebeobachtungen mit den Vorgaben des IGS übereinstimmen. Andernfalls führt die Verwendung der Codebeobachtungen zu Messabweichungen.

Daher liegt das Hauptaugenmerk dieses Kapitels auf den Codebeobachtungen. In diesem Zusammenhang wurden zahlreiche Untersuchungen im Hinblick auf unterschiedliche Signalverzögerungen der Codebeobachtungen durchgeführt, die nachfolgend näher betrachtet werden sollen. Die Analysen basieren auf den Beobachtungsdaten der mehr als 160 EUREF *Permanent Network* (EPN)-Stationen, auf die in Abschnitt 5.1 kurz eingegangen wird. Aufbauend auf den Ergebnissen im Abschnitt 4.4 beschäftigt sich Abschnitt 5.2 mit den GLONASS-Codeabweichungen und deren Frequenzabhängigkeit. Abschnitt 5.3 befasst sich mit der Ableitung von stations- bzw. empfängerspezifischen DCB_{P1C1}^{TUD} und deren Gegenüberstellung zu den von CODE bereitgestellten DCB_{P1C1}^{CODE} sowie der Analyse der GLONASS- DCB_{P1C1}^{TUD} im Hinblick auf einen möglichen frequenzabhängigen Einfluss $IFB_{DCB,P1C1}$. Den Abschluss dieses Kapitels bildet Abschnitt 5.4, der sich mit der Melbourne-Wübbena-Linear-kombination und den Chancen einer Mehrdeutigkeitslösung auseinandersetzt.

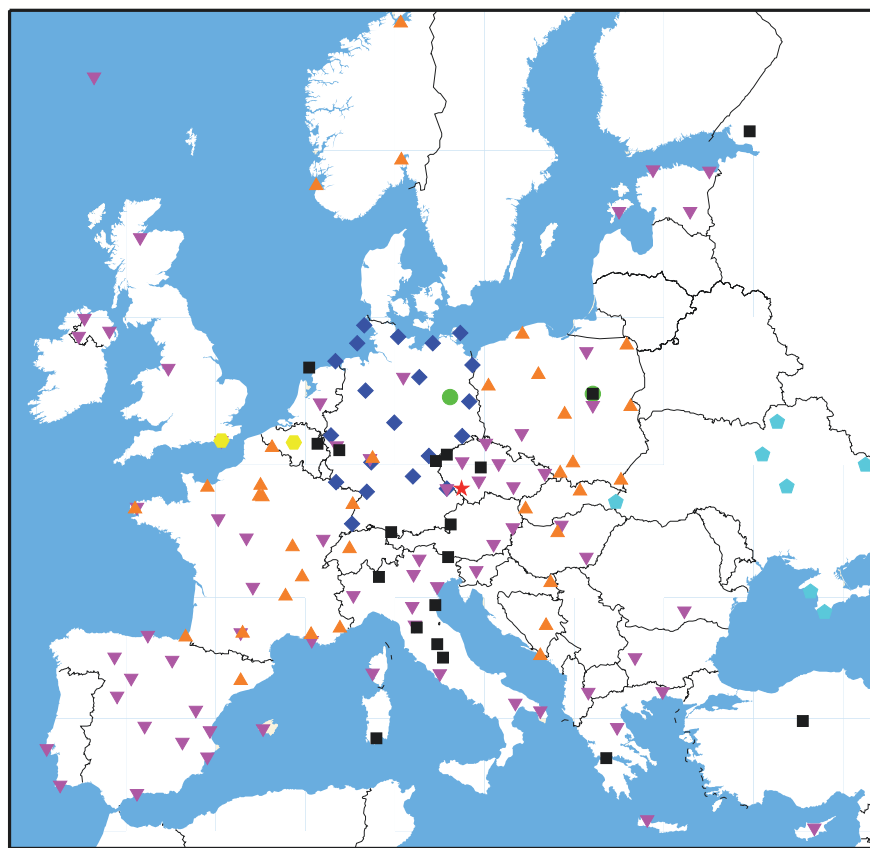
5.1 Daten

Die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Untersuchungen verlangen sowohl GPS- als auch GLONASS-Beobachtungsdaten, die von Stationen mit möglichst vielen unterschiedlichen Empfänger- und Antennenkombinationen aufgezeichnet wurden. Zugleich sollten die Codebeobachtungen auf der ersten Frequenz in beiden Varianten, d. h. als C_1 und als P_1 , vorliegen und die Abstände zwischen den Stationen nicht allzu groß sein.

Solch ein Netz an Stationen ist durch das EUREF *Permanent Network* (EPN) gegeben. Die überwiegende Anzahl an EPN-Stationen arbeitet mit einem Empfänger von Leica, Trimble oder TPS. Auf der Minderheit der Stationen sind Empfänger von Ashtech, Javad, JPS, Novatel und Septentrio verbaut. Zusätzlich wurden die Beobachtungsdaten der GREF-Stationen mit einbezogen, wodurch sich insbesondere die Anzahl an Stationen, die mit einem JPS-Empfänger ausgestattet sind, erhöht hat. Während Tabelle 5.1 einen Überblick über die Anzahl an Stationen und deren Zugehörigkeit zu einem der acht Empfängerhersteller bzw. zu einem der 20 Empfängertypen gibt, veranschaulicht Abbildung 5.1 die geographische Verteilung der insgesamt 169 Stationen. Die Beobachtungsdaten umfassen zwei aufeinanderfolgende Wochen im Jahr 2012 (GPS-Woche 1688 und 1689). Es wurden

Tab. 5.1: Stationen

Hersteller	Typ	Anzahl	Hersteller	Typ	Anzahl
Ashtech	Z-18	1	Septentrio (Fs.)	PolaRx4TR	1
Javad	TRE_G3T Delta	2	TPS	E_GGD	8
	TRE_G3TH Delta	2	Eurocard		1
JPS	Legacy	21	GB-1000		3
Leica	GR10	5	NET-G3		5
	GR25	2	NET-G3A		1
	GRX1200+GNSS	23	Odyssey E		4
	GRX1200 GG PRO	45	Trimble	NetR5	25
Novatel	OEMV-3	7		NetR8	7
Septentrio	PolaRx3eTR	1		NetR9	5



Ashtech ★ Javad ● JPS ◆ Leica ▼ Novatel ◆ Septentrio ● TPS ■ Trimble ▲

Abb. 5.1: Stationen

die Orbit- und Uhrkorrekturen des IGS AC ESA/ESOC und die IGS-Ionosphärenkorrekturen verwendet. Die Elevationsmaske beträgt 10° .

5.2 Codeabweichungen (*Code Delay*, CD)

Während im Abschnitt 4.4 das Hauptaugenmerk auf die Langzeitstabilität der Codeabweichungen und des $IFB_{C,IF}$ gerichtet war, steht in diesem Abschnitt die Konsistenz der Codeabweichungen und der $IFB_{C,IF}$ im Vordergrund.

Grundlage der Untersuchung sind die Coderesiduen der ionosphären-freien Linearkombination, die aus einer kombinierten GPS- und GLONASS-Code- und Phasen-PPP-Auswertung resultieren. Beobachtungsdaten von Stationen, die auf der ersten Frequenz nur C_1 -Codebeobachtungen zur Verfügung stellen, wurden mittels $DCB_{P_1C_1}$ korrigiert. Dies betrifft alle Stationen mit Ausnahme der Stationen, die mit Empfängern von JPS bzw. TPS arbeiten.

Die sich aus den Coderesiduen anhand der Gleichungen 4.2 und 4.3 ergebenden täglichen Codeabweichungen wurden zunächst stationsweise zusammengefasst, um anschließend pro Frequenznummer eine mittlere Codeabweichung zu bestimmen. Abbildung 5.2 veranschaulicht die mittleren GLONASS-Codeabweichungen der insgesamt 169 Stationen, wobei zur besseren Abgrenzung und Interpretation der Ergebnisse je eine Unterabbildung pro Hersteller, nachfolgend als Gruppe bezeichnet, existiert.

Es ist ersichtlich, dass sich zum einen die Codeabweichungen der acht Gruppen zum Teil deutlich voneinander abgrenzen und es zum anderen Gemeinsamkeiten zwischen den Gruppen in Bezug auf das Verhalten der Codeabweichungen gibt. Für nahezu alle Stationen gilt, dass die Codeabweichungen der Satelliten mit der Frequenznummer -7 (R10 und R14) trotz eines in den meisten Fällen deutlich erkennbaren Trends auf einem ähnlichen Niveau wie die Codeabweichungen der Satelliten mit der Frequenznummer -4 (R2 und R6) liegen. Dieser Sachverhalt gilt im Zusammenhang mit den Frequenznummern 5 (R3 und R7) und 6 (R4 und R8) ebenso für alle fünf Novatel- und andeutungsweise auch für die Mehrheit der Leica-Stationen. Die meisten Trimble-Stationen besitzen eine Ausprägung der Codeabweichungen der Satelliten mit der Frequenznummer 5. Es lässt sich aber nicht ganz eindeutig klären, ob die Codeabweichungen der Satelliten mit der Frequenznummer 5 oder mit der Frequenznummer 6 als Ausreißer zu identifizieren sind.

Die Codeabweichungen einiger Stationen weisen im Gegensatz zur Gesamtheit oder im Vergleich zu den Codeabweichungen von Stationen der gleichen Gruppe große Unterschiede auf. Insbesondere die russische TPS-Station MDVJ in Mendeleevo fällt mit Codeabweichungen von betragsmäßig mehr als 10 m aus dem sonst üblichen Wertebereich, der sich zwischen -3 m und 3 m bewegt. Gleichwohl haben die 22 Stationen, die mit einem TPS-Empfänger ausgestattet sind, die größte Bandbreite an Codeabweichungen, aus der sowohl positive als auch negative Trends resultieren. Der umgekehrte Fall, d. h. die kleinste Bandbreite, gilt für Leica und Trimble. Die Codeabweichungen der drei Leica-Stationen BADH (Bad Homburg, Deutschland), DRAG (Metzoki Dragot, Israel) und MATE (Matera, Italien) besitzen einen negativen Trend, während die Codeabweichungen aller anderen Stationen der Gruppe einen positiven Trend aufweisen. In Bezug auf die einzige mit einem Ashtech-Empfänger arbeitende Station VACO (Vacov, Tschechien) ist ersichtlich, dass der

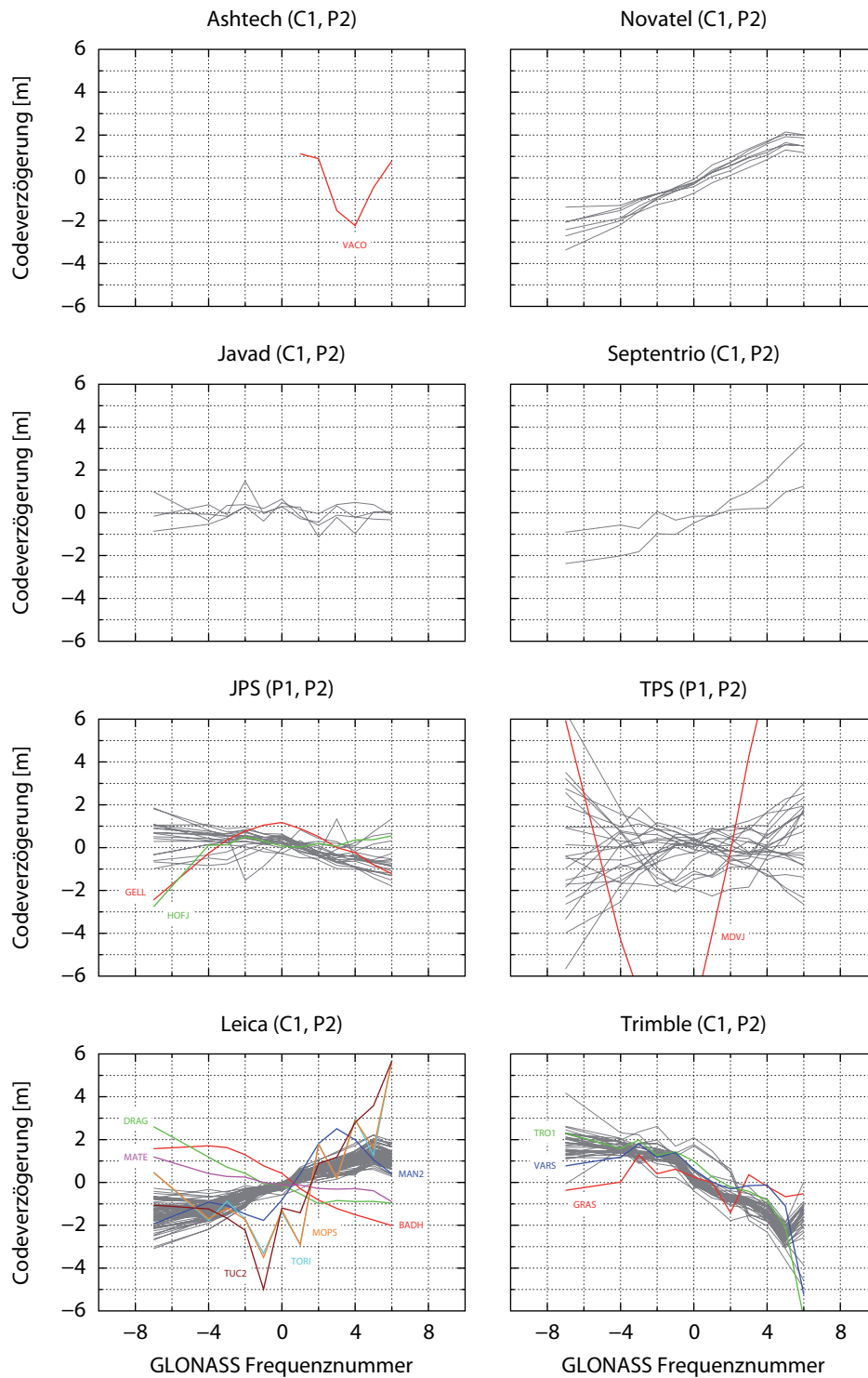


Abb. 5.2: Stationsspezifische GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linear-kombination von acht Empfängerherstellern

Empfänger vom Typ Ashtech Z18 lediglich Daten von GLONASS-Satelliten mit Frequenznummern im ursprünglichen Wertebereich aufzeichnen kann.

Zu vergleichbaren Ergebnissen gelangen auch Banville u. a. (2013a) auf der Basis der Beobachtungen von 145 EPN-Stationen sowie einigen wenigen NRCAN-Stationen, wobei sie für ihre Untersuchungen lediglich die Daten eines Tages (1. März 2013) verwendet haben. Es ist zu beachten, dass die von Banville u. a. (2013a) genutzte Bezeichnung 'Inter-frequency Code Bias' dem in dieser Arbeit verwendeten Begriff 'Codeverzögerung' entspricht und nicht mit dem in dieser Arbeit verwendeten Ausdruck $IFB_{C,IF}$ zu verwechseln ist.

Neben den eigentlichen Codeabweichungen spielt vor allem deren Modellierung eine entscheidende Rolle. Im einfachsten Fall können die Codeabweichungen als Gerade approximiert werden. Hierzu wurden die täglichen Codeabweichungen stationsweise einer linearen Regression unterzogen und aus den einzelnen Polynomkoeffizienten 1. Grades ein mittlerer $IFB_{C,IF}$ pro Station berechnet. Die in Abbildung 5.3 dargestellten $IFB_{C,IF}$ bestätigen die obigen Ausführungen. Speziell die große Streuung der $IFB_{C,IF}$ von Stationen mit TPS-Empfängern ist auffällig. Die größte Homogenität innerhalb eines Empfängertyps ist für die Stationen erkennbar, auf denen ein Empfänger vom Typ Leica GRX1200 GG PRO verbaut ist. Hierzu gehören auch die drei erwähnten Stationen BADH, DRAG und MATE, die jedoch mit ihren negativen $IFB_{C,IF}$ deutlich hervortreten. Die TPS-Station MDVJ hat mit knapp 2 m den größten $IFB_{C,IF}$, wobei eine Gerade den Verlauf der Codeabweichungen nur unzureichend repräsentiert.

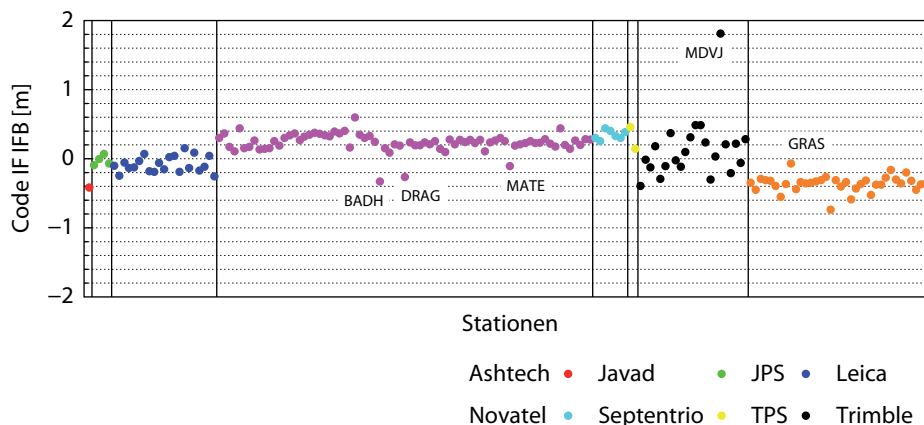


Abb. 5.3: $IFB_{C,IF}$ der ionosphären-freien Code-Linearkombination

Sowohl die Untersuchungen in Abschnitt 4.4.2 als auch speziell das Beispiel MDVJ verdeutlichen, dass die aus einer Regressionsanalyse resultierenden Restabweichungen einzelner Stationen deutlich geringer sein sollten und können, wenn die Codeabweichungen mit einem Polynom 2. Grades statt durch eine Gerade modelliert werden. Aus den Restabweichungen beider Regressionen wurden RMS-Werte berechnet und zu einander ins Verhältnis gesetzt (Abbildung 5.4). Das quadratische Mittel, das aus den Restabweichungen nach Angleichung einer Gerade folgt, stellt bei der Berechnung der Quotienten den Zähler dar.

Für 75 % der Stationen verringern sich die Restabweichungen durch die Ausgleichung einer Parabel im Vergleich zu den Restabweichungen nach Abzug des Geradenanstieges nur geringfügig. Eine signifikante Verbesserung der Standardabweichung (Faktor 2 und größer) ergibt sich für 14 der

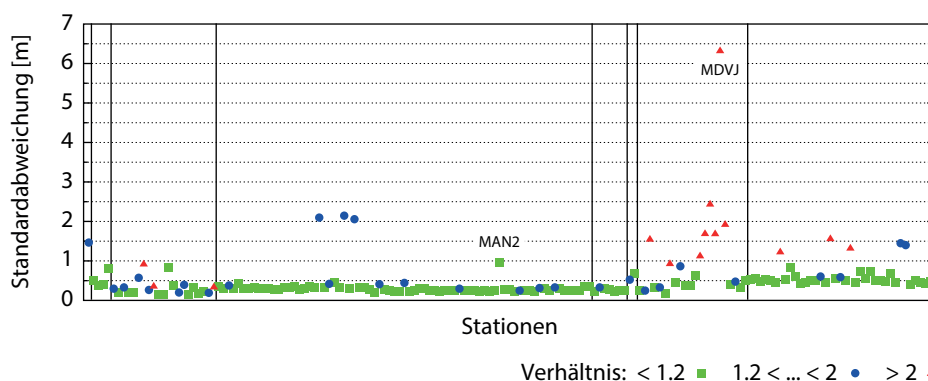


Abb. 5.4: Standardabweichungen der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. Grades und Verhältnis der Standardabweichungen der GLONASS-Codeabweichungen der ionosphären-freien Code-Linearkombination nach Anpassung eines Polynoms 1. bzw. 2. Grades

169 Stationen. Die verbleibenden Restabweichungen von 82 % (Ausgleichung: lineare Funktion) bzw. 90 % (Ausgleichung: quadratische Funktion) aller Stationen sind kleiner als 0,6 m und bestätigen damit die Untersuchungen aus Abschnitt 4.4.2.

Vor allem die Codeabweichungen von Stationen mit TPS-Empfängern können mit einem Polynom 2. Grades genauer modelliert werden. Für ein Drittel der untersuchten TPS-Stationen gilt, dass die Restabweichungen maximal nur noch halb so groß sind, wenn die Codeabweichungen durch eine Parabel statt durch eine Gerade approximiert werden. Insbesondere die bereits erwähnte Station MDVJ profitiert von einer derartigen Modellierung. Allerdings liegt der RMS-Wert trotzdem bei über 1,7 m und ist damit 3-mal größer als das quadratische Mittel aller TPS-Stationen.

Allerdings gibt es ein paar Stationen, deren Standardabweichungen zum Teil deutlich über dem Mittel von 0,52 m (ohne Ausreißer: 0,36 m) liegen und deren Restabweichungen sich trotz Anpassung eines Polynoms 2. Grades gar nicht oder nur in geringem Umfang verbessern. Die Codeabweichungen der entsprechenden Stationen weisen im Normalfall Unstetigkeiten auf. Dies betrifft im Wesentlichen acht Stationen: die einzige Ashtech-Station VACO (Vacov, Tschechien), die vier Leica-Stationen MOPS (Modena, Italien), TORI (Torino, Italien), TUC2 (Chania, Griechenland) und MAN2 (Le Mans, Frankreich), die TPS-Station MDVJ (Mendeleevo, Russland) sowie die beiden norwegischen Trimble-Stationen TRO1 (Tromsø) und VARS (Vardø).

Innerhalb der acht Stationen stellt die französische Station MAN2 (Leica GRX1200 GG PRO) einen Sonderfall dar. Mit einem Quotient $q_{MAN2} = 1,0001$ gehört sie der Gruppe von Stationen an, deren Restabweichungen sich nach der Modellierung einer Parabel nicht von den Restabweichungen unterscheiden, die nach Abzug einer Geraden verbleiben. Im Vergleich zu den meisten Stationen dieser Gruppe resultiert aus den Restabweichungen mit 0,96 m eine deutlich zu hohe Standardabweichung. Im Gegensatz zu den Codeabweichungen von z. B. MOPS, TORI und TUC2 weisen die Codeabweichungen von MAN2 jedoch keine Unstetigkeiten auf (vgl. Abbildung 5.2). Folglich sollte im Fall von MAN2 eine Modellierung mit einem Polynom höheren Grades möglich sein. Die RMS-Werte verschiedener Polynomausgleichungen belegen diese Vermutung. Das quadratische Mittel der Restabweichungen von MAN2 ist ab Angleichung eines Polynoms 5. Grades kleiner als 50 cm und liegt damit auf dem mittleren Niveau. Die aus den Restabweichungen resultierenden RMS-Werte

für MOPS, TORI und TUC2 verbessern sich ebenfalls, doch selbst nach der Ausgleichung eines Polynoms 9. Grades ergeben sich quadratische Mittel auf dem Niveau von größer einem Meter.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die GLONASS-Codeabweichungen der Mehrheit der untersuchten Stationen als lineare Funktion der Frequenznummer modelliert werden können. Die Codeabweichungen der restlichen Stationen können durch ein Polynom höheren Grades approximiert werden, insofern die Codeabweichungen als Funktion der Frequenznummer keine Unstetigkeiten aufweisen bzw. sich nicht völlig unregelmäßig verhalten.

5.3 Differential Code Biases (DCB)

5.3.1 Allgemein

Seit dem 2. April 2000 berechnet der IGS und dessen ACs die präzisen Uhrkorrekturen auf der Basis der ionosphären-freien Code-Linearkombination von P_1/P_2 -Beobachtungen (Ray 2000; Kouba 2009a). Dies kann zu Inkonsistenzen führen, wenn GNSS-Empfänger nicht alle Typen von Codebeobachtungen (C_1 , C_2 , P_1 und P_2 sowie P'_2) bereitstellen. Vielmehr beinhalten die RINEX-Dateien nur eine bestimmte Auswahl. Es lassen sich unter Vernachlässigung von C_2 folgende Gruppen von Empfängern bilden (Ray 1999, 2002; Schaer 2012b): P_1/P_2 -Empfänger (P_1 und P_2 bzw. C_1 , P_1 und P_2), C_1/P_2 -Empfänger (C_1 und P_2) und C_1/P_2' -Empfänger (C_1 und P'_2).

Das *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) am Astronomischen Institut der Universität Bern stellt auf seiner Internetseite eine Übersicht zur Verfügung, welche alle gängigen GNSS-Empfänger einer der drei Empfängerklassen zuordnet (CODE 2015). Aufbauend auf dieser Übersicht klassifiziert Tabelle 5.2 die aktuell auf IGS- und EPN-Referenzstationen am häufigsten eingesetzten GNSS-Empfänger.

Um nicht in Widerspruch mit den IGS-Konventionen zu stehen, ist eine Anpassung der Beobachtungen von C_1/P_2 - und C_1/P_2' -Empfängern mittels der entsprechenden DCBs erforderlich. Ein Übergang auf P_1/P_2 -Beobachtungen ist ebenso Voraussetzung für die konsistente Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination, die im ersten Schritt der PPP-Mehrdeutigkeitslösung genutzt wird, um die Mehrdeutigkeiten der *Widelane*-Linearkombination festzusetzen. Beruhen die dafür notwendigen FCB nicht auf identischen Beobachtungen, führt dies zu einer Inkompatibilität der Ergebnisse. Es besteht aber ebenso die Möglichkeit, nur Codebeobachtungen von solchen Empfängern zu nutzen, die auf L1 ausschließlich oder zusätzlich zum C/A-Code den P-Code aufzeichnen, um P_1 - statt C_1 -Codebeobachtungen verwenden zu können. Eine derartige Beschränkung auf Codebeobachtungen von P_1/P_2 -Empfängern ist gleichbedeutend mit dem Ausschluss aller Beobachtungen von C_1/P_2 - und C_1/P_2' -Empfängern (z. B. Leica und Trimble).

Zur Korrektur der C_1 -Codebeobachtungen bzw. der resultierenden Linearkombinationen mittels $DCB_{P_1C_1}$ sind einerseits eine Umrechnung der in Nanosekunden gegebenen $DCB_{P_1C_1}$ in Meter und andererseits Faktoren notwendig, die zu einer Skalierung der DCBs führen. Tabelle 5.3 listet für die drei wichtigsten Code-Linearkombinationen die P_1C_1 -Korrekturen in Abhängigkeit der drei Empfängerklassen auf. Wie zu erwarten, sind im Fall von P_1/P_2 -Empfängern bei keiner der drei Linearkombinationen P_1C_1 -Korrekturen zu berücksichtigen, da die gleichen Codebeobachtungen wie bei der Bestimmung der präzisen Uhrkorrekturen verwendet werden.

Tab. 5.2: Einteilung von GNSS-Empfängern (nach CODE 2015)

Hersteller	P1/P2-Empfänger	C1/P2-Empfänger	C1/P2'-Empfänger
AOA	Benchmark ACT, SNR-12 ACT		
Ashtech	UZ-12, Z-X, Z-XII3, Z-XII3T, Z-18		
Javad	TRE_G3T Delta, TRE_G3TH Delta		
JPS	E_GGD, E_GGDT, Legacy		
Leica		CRS1000, GR10, GR25, GRX1200+GNSS, GRX1200 GG PRO, GRX1200 PRO, RS500, SR530	
Novatel		OEMV-3	
Rogue			SNR-12, SNR-800, SNR-8000
Septentrio	PolaRx2, PolaRx2e, PolaRx3eTR, PolaRx4 , PolaRx4TR		
TPS	E_GGD, Eurocard, GB-1000, Legacy, NET-G3, NET-G3A, Odyssey E		
Trimble		4700, 5700, NetR5, NetR8, NetR9, NetRS	4000SSE, 4000SSI

Tab. 5.3: P1C1-Korrekturen (nach Schaer 2012b)

Linearkombination	P1/P2-Empfänger	C1/P2-Empfänger	C1/P2'-Empfänger
C_1	0	DCB_{P1C1}	DCB_{P1C1}
C_{IF}	0	$(f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)) \cdot DCB_{P1C1}$	DCB_{P1C1}
Φ_{MW}	0	$-(f_1 / (f_1 + f_2)) \cdot DCB_{P1C1}$	$-DCB_{P1C1}$

Selbiges trifft jedoch nicht zu, wenn Codebeobachtungen genutzt werden sollen, die von C1/P2- bzw. C1/P2'-Empfängern aufgezeichnet wurden. Mit Ausnahme der Originalbeobachtung C_1 unterscheiden sich zudem die Faktoren, mit denen die ursprünglichen DCB_{P1C1} zu skalieren sind. Für die Berechnung einer verbesserten Codebeobachtung $C_{1,korr}$ eines C1/P2-Empfängers gilt (in [m]):

$$C_{1,korr} = C_1 + DCB_{P1C1} \cdot c_0 \cdot 10^{-9} = \tilde{P}_1. \quad (5.1)$$

Implementiert wurde Gleichung 5.1 u. a. in das Programm *CC2NONCC*, welches auf RINEX-Ebene die Codebeobachtungen von C1/P2- bzw. C1/P2'-Empfängern der gültigen IGS-Konvention anpasst und zum jetzigen Zeitpunkt in der Version 6.5 zur freien Verfügung steht (Romero 2012). Der Name des Programms leitet sich aus der Tatsache ab, dass C1/P2- bzw. C1/P2'-Empfänger zur Klasse der *Cross-Correlation* (CC)-Empfänger gehören, während P1/P2-Empfänger die Klasse der *Non-Cross-Correlation* (NONCC)-Empfänger bilden. *CC2NONCC* arbeitet befehlszeilenorientiert und benötigt zwei Dateien: zum einen die RINEX-Beobachtungsdatei, die die zu korrigierenden Codebeobachtungen enthält, und zum anderen eine zweite Datei, in der die DCB_{P1C1} als P1C1-Korrekturen abgespeichert sind.

5.3.2 DCB_{P1C1}^{CODE} des *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE)

Zum Zeitpunkt der Untersuchung gab es lediglich zwei IGS-Analysezentren, die DCB-Korrekturen berechnen: das *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) (Schaer 2012a) und *Natural Resources Canada* (NRCan) (Ghoddousi-Fard 2012). Jedoch stellt nur CODE DCB-Korrekturen offiziell zur Verfügung (Schaer 2001). Hierbei handelt es sich um satellitenindividuelle Werte, die in monatlichen Abständen aufbereitet sind. Die zu Beginn eines Monats archivierten und für den Vormonat geltenden Korrekturen stellen Monatsmittel dar, die auf täglichen Lösungen basieren, deren Wiederholgenauigkeit im Fall von DCB_{P1C1}^{CODE} mit 15 mm angegeben wird (CODE 2012). Aktuell stellt CODE zwei verschiedene DCB_{P1C1}^{CODE} -Produkte zur Verfügung. Diese unterscheiden sich zum einen in ihrer Bestimmung, d. h. in der Art und Weise, wie sie berechnet werden, und enthalten zum anderen Korrekturen für unterschiedliche GNSS-Konstellationen.

Einerseits handelt es sich um DCB_{P1C1}^{CODE1} -Korrekturen, die auf der ionosphären-freien Linearkombination basieren und ein Nebenprodukt der präzisen Uhrschätzung sind. Derartige DCB_{P1C1}^{CODE1} -Korrekturen gibt es seit GPS-Woche 1057 (9. April 2000) und ausschließlich für GPS-Satelliten. Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass er Beobachtungsdaten aus einem gemischten Netz (C1/P2-, C1/P2'- und P1/P2-Empfänger) voraussetzt. Gleichzeitig schließt die Notwendigkeit von Beobachtungsdaten von allen drei Empfängergruppen aber auch den Vorteil ein, dass die DCB_{P1C1}^{CODE1} genau

aus den Daten abgeleitet werden, für die sie bestimmt sind, nämlich als Korrekturen für Beobachtungen von C1/P2- bzw. C1/P2'-Empfängern (CODE 2012).

Andererseits berechnet CODE auch DCB_{P1C1} -Korrekturen aus den originären Beobachtungsdaten. Im Gegensatz zum ersten Ansatz sind hierfür aber Beobachtungen von P1/P2-Empfängern ausreichend bzw. funktioniert dieser zweite Ansatz auch nur mit Beobachtungen von P1/P2-Empfängern (vgl. Abschnitt 5.3.3). Die DCB_{P1C1}^{CODE2} -Korrekturen resultieren aus der Gegenüberstellung von simultanen C₁- und P₁-Codebeobachtungen. Im Vergleich zu den nur für GPS gültigen DCB_{P1C1}^{CODE1} -Korrekturen des ersten Ansatzes stehen sie sowohl für GPS- als auch für GLONASS-Satelliten zur Verfügung.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.5 die von CODE für Mai 2012 anhand des zweiten Ansatzes berechneten DCB_{P1C1}^{CODE2} . Zu diesem Zeitpunkt waren insgesamt 32 GPS- und 23 GLONASS-Satelliten aktiv. Es ist ersichtlich, dass die DCB_{P1C1}^{CODE2} aller Satelliten zwischen -60 cm und 60 cm schwanken. Dies entspricht, da $1 \text{ ns} \approx 30 \text{ cm}$, einer maximalen Differenz zwischen korrespondierenden C₁- und P₁-Codebeobachtungen von ca. 2 ns. Damit wird deutlich, dass eine Nichtberücksichtigung von DCB_{P1C1} zu einer fehlerbehafteten Schätzung und Festsetzung sowohl der Melbourne-Wübbena als auch der ionosphären-freien Mehrdeutigkeiten führen kann. Das ist insbesondere als kritisch zu bewerten, wenn es sich dabei um die DCB_{P1C1} -Korrektur des Basissatelliten handelt.

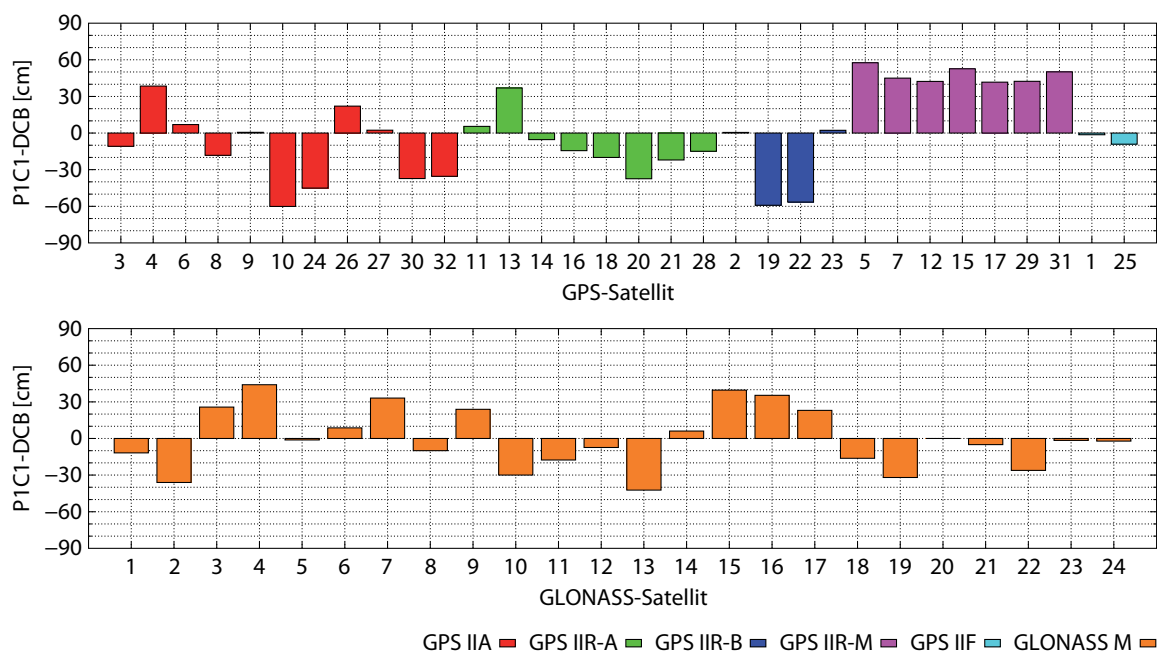


Abb. 5.5: DCB_{P1C1}^{CODE2} des Center for Orbit Determination in Europe (CODE) für Mai 2012

Die Gegenüberstellung der aus beiden Ansätzen resultierenden DCB_{P1C1}^{CODE} der 32 im Mai 2012 verfügbaren GPS-Satelliten weist im Mittel keine signifikanten Differenzen auf. Für vier bzw. 12 Satelliten ergeben sich Unterschiede, die größer als ± 10 cm bzw. ± 5 cm sind. G23, ein Satellit vom Typ Block IIR-B, besitzt mit $\Delta DCB_{P1C1}^{CODE} = 19$ cm die größte Differenz.

Zum Abschluss dieses Abschnitts soll die Langzeitstabilität der DCB_{P1C1}^{CODE2} diskutiert werden. Hierfür wurden die monatlichen von CODE bereitgestellten DCB_{P1C1}^{CODE2} des Zeitraums Januar 2010 bis einschließlich Oktober 2013 statistisch untersucht. Die in Abbildung 5.6 dargestellten Mittel-

werte und Standardabweichungen der einzelnen GPS- und GLONASS-Satelliten beruhen folglich auf maximal 46 Monatswerten pro Satellit. In Folge der Übernahme von PRN-Codes durch andere Satelliten ergeben sich für die einzelnen Satelliten, z. B. GPS-Satellit G27 und GLONASS-Satellit R03, unterschiedlich viele statistische Angaben (GPS: 37; GLONASS: 35). Die für die verschiedenen Zeiträume eines Satelliten bestimmten mittleren DCB_{P1C1}^{CODE2} unterscheiden sich zum Teil sehr deutlich voneinander. Die größten Sprünge in ihrer Konstellation wurden für den GPS-Satellit G30 und den GLONASS-Satellit R07 mit $\Delta DCB_{P1C1}^{G30} \approx 0,8\text{ m}$ bzw. $\Delta DCB_{P1C1}^{R07} \approx 0,9\text{ m}$ ermittelt.

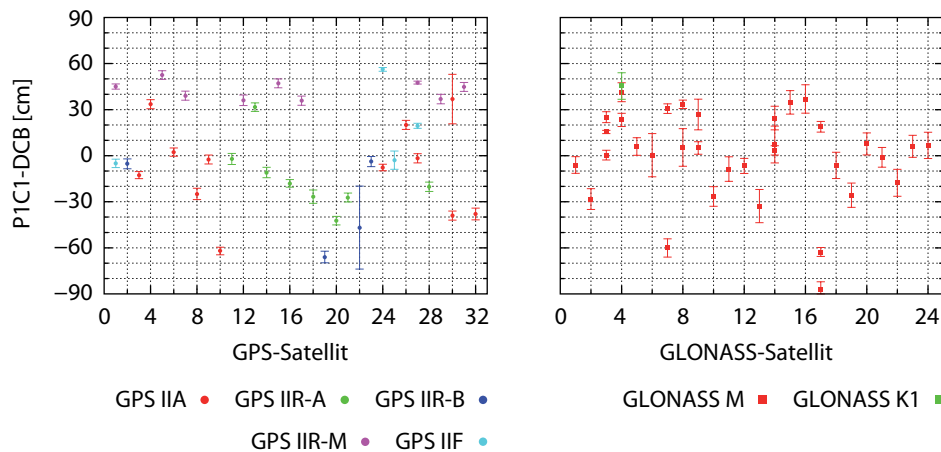


Abb. 5.6: Mittlere DCB_{P1C1}^{CODE2} des *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) (Januar 2010 bis Oktober 2013). Die Standardabweichungen sind um den Faktor 3 überhöht dargestellt.

Im Fall von GPS ist auffällig, dass insbesondere die DCB_{P1C1}^{CODE2} von Satelliten vom Typ Block IIR-M auf annähernd identischem Niveau liegen (vgl. Abbildung 5.5). Eine derartige Übereinstimmung ist bei den DCB_{P1C1}^{CODE2} der anderen GPS-Blöcke und bei GLONASS nicht zu erkennen. Die Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1}^{CODE2} sind dagegen unabhängig vom verwendeten Satellitentyp, wenngleich die Standardabweichungen der DCB_{P1C1}^{CODE2} von GLONASS-Satelliten im Mittel um den Faktor 2 schlechter sind als die der GPS-Satelliten ($s_G = 3,3\text{ cm}$, $s_R = 6,7\text{ cm}$).

Von den insgesamt 72 DCB_{P1C1}^{CODE2} -Zeitreihen besitzt diejenige des GPS Block IIR-B-Satelliten G22 (*Space Vehicle Number* (SVN) 47) mit $s_{G22} = 27\text{ cm}$ die mit Abstand größte Unsicherheit. Deren Ursprung ist eine signifikante Änderung des DCB_{P1C1}^{CODE2} um mehr als 2 ns von 3,7 cm auf $-60,1\text{ cm}$ als Folge einer Anomalie des Satellitensignals am 30. Oktober 2010 und der anschließenden Wiederinbetriebnahme des Satelliten nach erfolgter Instandsetzung (Hauschild 2010, 2012). Wird der Störung und dem daraus resultierenden Sprung der DCB_{P1C1}^{CODE2} durch Aufspaltung in zwei Teilstücke Rechnung getragen, ergeben sich für G22 Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1} auf dem Niveau der übrigen GPS-Satelliten.

Die gute Langzeitstabilität der GPS- bzw. GLONASS- DCB_{P1C1}^{CODE2} von deutlich unter bzw. knapp über 5 cm über einen Zeitraum von zum Teil mehreren Jahren sprechen für eine Archivierung der DCB_{P1C1}^{CODE2} in monatlichen oder sogar größeren Abständen. Jedoch können Satellitenwechsel oder Störungen des Satellitensignals wie im Fall des GPS Block IIR-B-Satelliten G22 zu einer deutlichen Änderung der betreffenden DCB_{P1C1}^{CODE2} führen, die bei der monatlichen Archivierung allerdings keine Berücksichtigung finden und lediglich anhand von merklich schlechteren Standardabweichungen identifizierbar sind. In derartigen Fällen sollte auf die Verwendung der Codebeobachtungen,

insbesondere im Zusammenhang mit der Festsetzung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination, verzichtet werden.

5.3.3 Stationsspezifische $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$

Unter Umständen kann es sinnvoll sein, an Stelle von einheitlichen Korrekturen (z. B. $DCB_{P_1C_1}^{CODE}$) mit stations- oder empfängerspezifischen Korrekturen, nachfolgend als $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ bezeichnet, zu arbeiten.

Die Berechnung von stationsspezifischen $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$, deren Gegenüberstellung zu den vom *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) bereitgestellten $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ (vgl. Abschnitt 5.3.2) sowie die Analyse der GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ im Hinblick auf einen möglichen frequenzabhängigen Einfluss sind die Schwerpunkte dieses Abschnitts.

Inwiefern sich die drei Arten von $DCB_{P_1C_1}$ ($DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$, um den frequenzabhängigen Einfluss korrigierte $DCB_{P_1C_1}^{TUD2}$ und $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$) auf die Mehrdeutigkeitsfestsetzung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination auswirken, ist Gegenstand des nachfolgenden Abschnitts 5.4.

Berechnung

Die einfachste Möglichkeit zur Berechnung von $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ bietet der Vergleich von C_1 - und P_1 -Codebeobachtungen von P1/P2-Empfängern. Zur Ableitung von satellitenspezifischen $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ aus dem Vergleich der originären Beobachtungsdaten von P1/P2-Empfängern reichen im Normalfall die Beobachtungsdaten einer einzelnen Epoche aus. Um jedoch den Einfluss von zufälligen Abweichungen zu minimieren, werden die C_1 - und P_1 -Codebeobachtungen mehrerer Epochen voneinander subtrahiert und die resultierenden Differenzen, z. B. eines gesamten Satellitenbogens, abschließend gemittelt. Die mittlere Differenz stellt den satellitenspezifischen $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ dar:

$$DCB_{P_1C_1}^{TUD1,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{1,i}^j - C_{1,i}^j \right). \quad (5.2)$$

Da die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ auch auf einen möglichen frequenzabhängigen Einfluss hin untersucht werden sollen, wurde das auf Gleichung 5.2 basierende Ausgleichungsmodell dahingehend erweitert, dass innerhalb der Ausgleichung zusätzlich zu den GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD2}$ auch die instrumentellen Verzögerungen in Form eines frequenzabhängigen Terms IFB_{DCB,P_1C_1} geschätzt werden:

$$DCB_{P_1C_1}^{TUD2,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{1,i}^j - C_{1,i}^j + k^j \cdot IFB_{DCB,P_1C_1} \right). \quad (5.3)$$

Die anhand der Gleichungen 5.2 bzw. 5.3 bestimmten satellitenspezifischen GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ sind jedoch durch einen empfängerspezifischen Anteil verfälscht, sodass die $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ mehrerer Stationen nur bedingt miteinander in Verbindung gebracht werden können. Um sie dennoch miteinander vergleichen zu können, wird die Bedingung eingeführt, dass die Summe aller $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ einer Station eines Tages Null sein muss (Mittelwertzentrierung):

$$\frac{1}{m} \sum_{l=1}^m DCB_{P_1C_1}^{TUD,l} = 0. \quad (5.4)$$

Verifizierung

Um die aus Gleichung 5.4 resultierenden $DCB_{P_1C_1}^{TUD}$ zu verifizieren, wurde nach einer alternativen Methode gesucht. Die zur Berechnung notwendigen Eingangsdaten sollten, wenn möglich, ebenfalls nur die originären Beobachtungsdaten sein und mit den Eingangsdaten von Gleichung 5.2 bzw. Gleichung 5.3 übereinstimmen.

Der gewählte Ansatz verwendet zusätzlich zu den C_1 - und P_1 -Codebeobachtungen auch die P_2 -Codebeobachtungen sowie die L_1 - und L_2 -Phasenbeobachtungen. Mit den genannten Beobachtungsdaten von P_1/P_2 -Empfängern werden zwei Melbourne-Wübbena-Linear kombinationen gebildet, die sich nur in der verwendeten Codebeobachtung der ersten Frequenz unterscheiden, d. h. die Generierung erfolgt mit identischen Phasen- und P_2 -Codebeobachtungen. Anschließend werden die beiden Melbourne-Wübbena-Linear kombinationen voneinander subtrahiert. Durch Umformung und als Folge der gegenseitigen Eliminierung von identischen Beobachtungsgrößen ergibt sich

$$\Phi_{MW,C_1P_2} - \Phi_{MW,P_1P_2} = [\lambda_{WL} \Phi_{WL,L_1L_2} - C_{NL,C_1P_2}] - [\lambda_{WL} \Phi_{WL,L_1L_2} - C_{NL,P_1P_2}] \quad (5.5a)$$

$$= [(\lambda_{WL} (\Phi_1 - \Phi_2)) - (\alpha_{NL} C_1 + \beta_{NL} P_2)] - [(\lambda_{WL} (\Phi_1 - \Phi_2)) - (\alpha_{NL} P_1 + \beta_{NL} P_2)] \quad (5.5b)$$

$$= \alpha_{NL} P_1 - \alpha_{NL} C_1 \quad (5.5c)$$

$$= \frac{f_1}{f_1 + f_2} DCB_{P_1C_1}, \quad (5.5d)$$

woraus folgt, dass

$$DCB_{P_1C_1} = P_1 - C_1 = \frac{f_1 + f_2}{f_1} (\Phi_{MW,C_1P_2} - \Phi_{MW,P_1P_2}). \quad (5.6)$$

Nach Gleichung 5.6 können $DCB_{P_1C_1}$ einerseits aus dem direkten Vergleich von C_1 - und P_1 -Codebeobachtungen bestimmt oder andererseits aus dem Vergleich zweier Melbourne-Wübbena-Linear kombinationen Φ_{MW,C_1P_2} und Φ_{MW,P_1P_2} , deren einziger Unterschied die verwendete Codebeobachtung der ersten Frequenz ist, abgeleitet werden. Beide Ansätze führen zum gleichen Ergebnis. Im Umkehrschluss folgt aus Gleichung 5.6 die Bestätigung des zu verwendenden Korrektionswertes (vgl. Tabelle 5.3) für den Fall, dass die Melbourne-Wübbena-Linear kombination mit den Beobachtungen eines C_1/P_2 -Empfängers gebildet werden soll:

$$\Phi_{MW,P_1P_2} = \Phi_{MW,C_1P_2} - \frac{f_1}{f_1 + f_2} DCB_{P_1C_1}. \quad (5.7)$$

Daten

Anhand von Tabelle 5.2 ist ersichtlich, dass die RINEX-Dateien einiger der in Abschnitt 5.1 genannten Stationen keine P_1 -Codebeobachtungen enthalten und somit für die nachfolgenden, auf den Gleichungen 5.2 bzw. 5.3 aufbauenden Untersuchungen nur unvollständige Beobachtungsdaten bereitstellen. Hierzu gehören Stationen, auf denen Empfänger von Leica, Novatel und Septentrio verbaut sind. Im Fall von GPS gilt dies mehrheitlich auch für Stationen, die mit Trimble-Empfängern arbei-

ten²⁶. Außerdem können die Beobachtungen des einzigen Ashtech-Empfängers nicht genutzt werden, da er als P1/P2-Empfänger zwar C₁- und P₁-Codebeobachtungen aufzeichnet, doch hat es den Anschein, als wenn die C₁- von den P₁-Codebeobachtungen abgeleitet sind, da beide die identischen Werte aufweisen. Den genannten Umständen geschuldet standen letztlich Beobachtungsdaten von nur 80 Stationen zur Verfügung (Tabelle 5.4). Der gewählte Zeitraum umfasst zwei aufeinanderfolgende Wochen im Jahr 2012 (GPS-Woche 1688 und 1689).

Tab. 5.4: Stationen

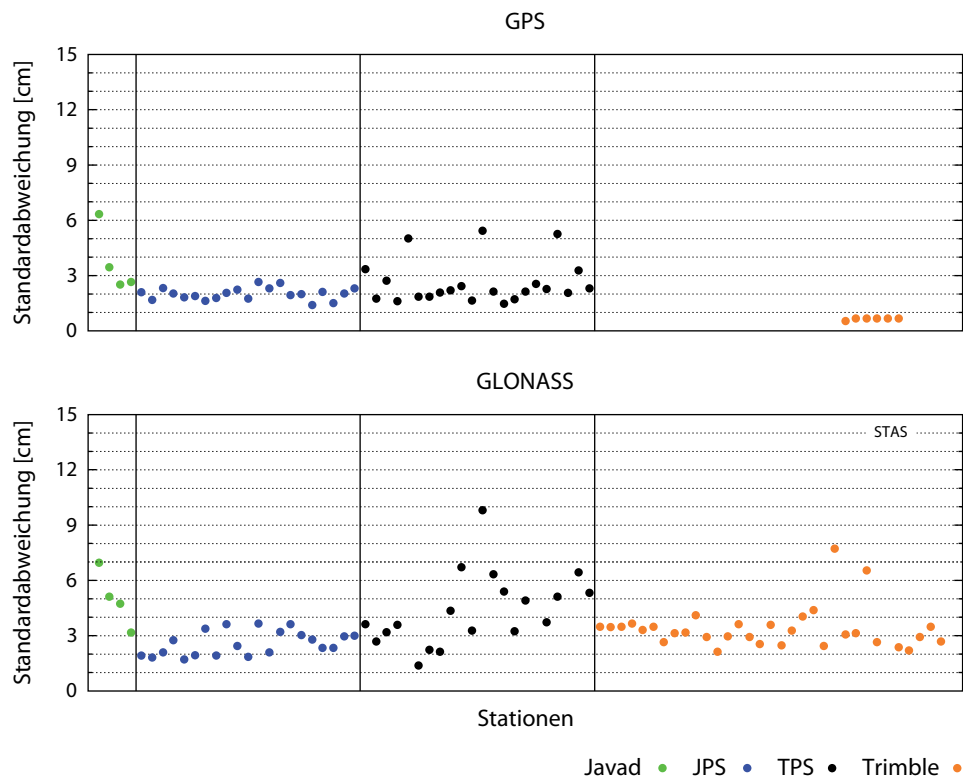
Hersteller	Typ	Anzahl Stationen	
		GPS	GLONASS
Javad	TRE_G3T Delta	2	2
	TRE_G3TH Delta	2	2
JPS	Legacy	21	21
TPS	E_GGD	8	8
	EUROCARD	1	1
	GB-1000	3	3
	NET-G3	5	5
	NET-G3A	1	1
Trimble	Odyssey E	4	4
	NetR5	0	23
	NetR8	6	8
	NetR9	0	2

Auswertung

Die anhand von Gleichung 5.2 berechneten GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD_1}$ aller Stationen sollen mit Blick auf den Empfängerhersteller näher untersucht werden. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, wurden die 14 täglichen GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD_1}$ aller Stationen einer statistischen Auswertung unterzogen. Neben den mittleren GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD_1}$ sind auch die resultierenden Standardabweichungen (vgl. Gleichung 2.74) von Interesse, da sie Rückschlüsse über die Tag-zu-Tag-Variationen der satellitenspezifischen $DCB_{P_1C_1}^{TUD_1}$ geben.

Die Analyse der Standardabweichungen aller Satelliten aller Stationen ergab, dass es größtenteils keine signifikanten Unterschiede in den satellitenspezifischen Wiederholgenauigkeiten bezogen auf eine Station gibt. Die mittleren Wiederholgenauigkeiten aller Stationen wiederum zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Empfängertypen eines Herstellers gibt (Abbildung 5.7).

²⁶Die Beobachtungsdaten von 33 mit Trimble-Empfängern ausgestatteten Stationen konnten teilweise verwendet werden, obwohl die eingesetzten NetR5-, NetR8- und NetR9-Empfänger nach Tabelle 5.2 zur Gruppe der C1/P2-Empfänger gehören und normalerweise keine P₁-Codebeobachtungen aufzeichnen. Im Rahmen dieser Untersuchung gilt dies nicht für sechs mit NetR8-Empfängern ausgestattete Stationen im Fall von GPS und für 33 der 37 mit Empfängern von Trimble arbeitenden Stationen im Fall von GLONASS.

Abb. 5.7: Stationsspezifische Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1}^{TUD1}

Aufgrund dessen ist es möglich, die Standardabweichungen aller Satelliten aller Stationen zu einer mittleren Standardabweichung pro Empfängerhersteller und GNSS zusammenzufassen (Tabelle 5.5). Bezogen auf das jeweilige GNSS kann auch von gleichartigen Wiederholgenauigkeiten gesprochen werden. Die Standardabweichungen der GLONASS- DCB_{P1C1}^{TUD1} sind im direkten Vergleich der beiden GNSS um den Faktor 2 schlechter. Die GPS- DCB_{P1C1}^{TUD1} , die anhand der Beobachtungen von Trimble-Empfängern berechnet wurden, weisen die höchste Tag-zu-Tag-Konsistenz innerhalb des untersuchten Zeitraums von 14 Tagen auf. Dies ist insofern interessant, da Trimble-Empfänger zur Gruppe der C1/P2-Empfänger gehören und folglich die Generierung der P_1 -Codebeobachtungen nur eine untergeordnete Rolle spielen könnte. Mit Blick auf das Messrauschen von Codebeobachtungen auf dem Niveau von mehreren Dezimetern bedeuten Standardabweichungen auf Zentimeter-Niveau ein vielversprechendes Ergebnis. Jedoch erreicht die Reproduzierbarkeit eines einzelnen GPS- DCB_{P1C1}^{TUD1} nicht das Niveau, das CODE als Wiederholgenauigkeit für seine DCB_{P1C1}^{CODE} angibt. Es ist allerdings

Tab. 5.5: Herstellerspezifische Wiederholgenauigkeiten der DCB_{P1C1}^{TUD1}

GNSS	Mittlere Standardabweichung [cm]			
	Javad	JPS	TPS	Trimble
GPS	3,6	2,1	2,7	0,7
GLONASS	5,2	2,9	4,9	3,6

zu vermuten, dass die von CODE auf ihrer Internetseite dokumentierten 15 mm die Genauigkeit der $DCB_{P_1C_1}^{CODE1}$ widerspiegeln, die das AC anhand des ersten Ansatzes berechnet.

Zum Zweck der Veranschaulichung sind in Abbildung 5.8 die mittleren GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ aller Stationen getrennt nach den vier Empfängerherstellern dargestellt. Aufgrund der notwendigen Änderung der Skalierung der y-Achse lässt sich Abbildung 5.8 nur bedingt mit den Abbildungen 5.5 und 5.6 vergleichen. Nichtsdestotrotz ist ersichtlich, dass die GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ im Vergleich zu den GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ sowohl innerhalb der vier Empfängergruppen als auch über alle vier Empfängergruppen eine deutlich höhere Konsistenz aufweisen. Die GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von Trimble-Stationen passen interessanterweise am besten zueinander. Das ist gleichbedeutend mit der besten Kongruenz innerhalb von $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$, die von Stationen stammen, die mit Empfängern des gleichen Herstellers arbeiten. Gegenteiliges trifft für die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von TPS-Stationen zu, die sich zum Teil sehr deutlich voneinander unterscheiden.

Die mittleren GPS- und GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ aller Stationen wurden anschließend den von CODE für Mai 2012 berechneten $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ (vgl. Abbildung 5.5) gegenübergestellt. Die sich aus den Differenzen nach Gleichung 2.73 ergebenden RMS-Werte sind in Abhängigkeit des GNSS, d. h. GPS oder GLONASS, sowie getrennt nach den vier Empfängerherstellern in Abbildung 5.9 dargestellt. Aufgrund der zum Teil großen Streuung der GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von Stationen mit TPS-Empfängern ist bei deren Bewertung zu beachten, dass die y-Achsen sowohl in ihrem Wertebereich als auch in ihrer Skalierung deutlich voneinander abweichen.

Es ist ersichtlich, dass die GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ wesentlich besser mit den $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ übereinstimmen als dies für die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ der Fall ist. Die GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$, die mittels Beobachtungen von JPS-Empfängern erzeugt wurden, weisen die größte Homogenität mit den $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ auf. Die nahezu identischen RMS-Werte der sechs Trimble-Stationen belegen nochmals die gute innere Genauigkeit der aus Trimble-Codebeobachtungen abgeleiteten GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$. Deutlich größere Variationen sind hingegen bei den GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von TPS-Stationen zu erkennen. Dieser Sachverhalt gilt im Allgemeinen für die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ aller Stationen und im Speziellen wiederum für die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$, die anhand der Beobachtungen von TPS-Empfängern bestimmt wurden. Um den Faktor 4 bis 5 größere Standardabweichungen sind ein deutliches Indiz, dass die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von TPS-Stationen zum Teil deutliche Unterschiede in Bezug auf die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ besitzen. Lediglich die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ von neun der 22 TPS-Stationen sind mit mittleren Abweichungen von bis zu 40 cm im Genauigkeitsbereich der anderen GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$. Die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ der anderen 13 TPS-Stationen ausgenommen, weichen die GLONASS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ im Mittel um 15,3 cm von den $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ ab. Sie weisen damit eine um den Faktor 3 schlechtere Genauigkeit als die GPS- $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ (5,7 cm) auf.

Schlechte RMS-Werte weisen zwar einerseits auf große Differenzen zwischen den $DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$ und den $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ hin. Andererseits zeigen sie aber auch eindrucksvoll, dass die Korrektur mittels $DCB_{P_1C_1}$ unter Umständen nur bedingt helfen kann, den Widerspruch zwischen den Code-Linear-kombinationen aus C_1/P_2 - und C_1/P_2' - sowie P_1/P_2 -Beobachtungen zu lösen. Der Fragestellung, inwieweit die verwendeten C_1 - bzw. P_1 -Codebeobachtungen zur Diskrepanz mit den $DCB_{P_1C_1}^{CODE2}$ beitragen, wurde im Rahmen der Arbeit nicht nachgegangen. In Bezug auf die im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Stationen mit TPS-Empfängern lässt sich jedoch festhalten, dass dieses Problem normalerweise nicht auftreten sollte, da es sich dabei um P1/P2-Empfänger handelt.

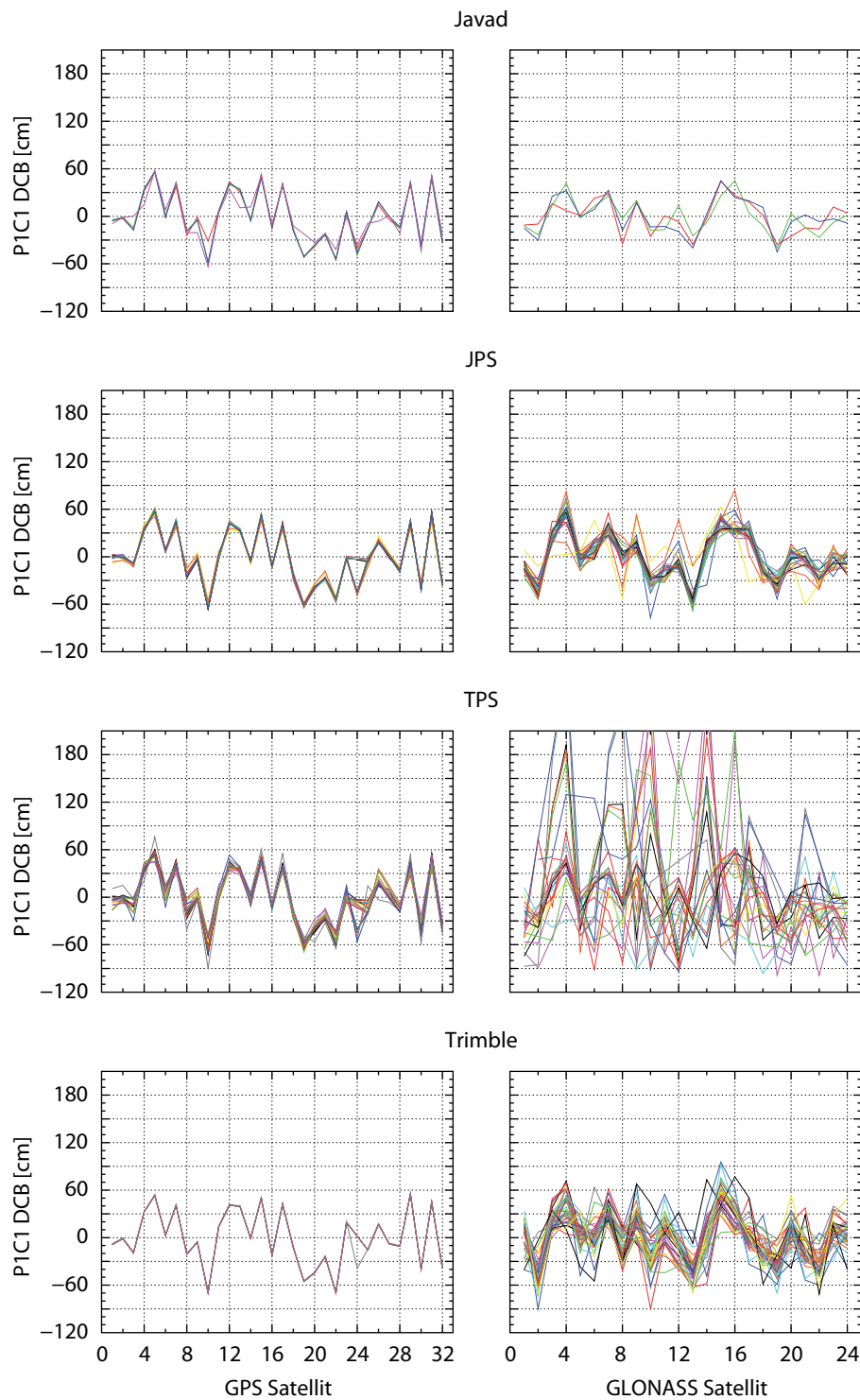


Abb. 5.8: DCB_{P1C1}^{TUD1} von vier Empfängerherstellern in Abhängigkeit von der Satellitennummer

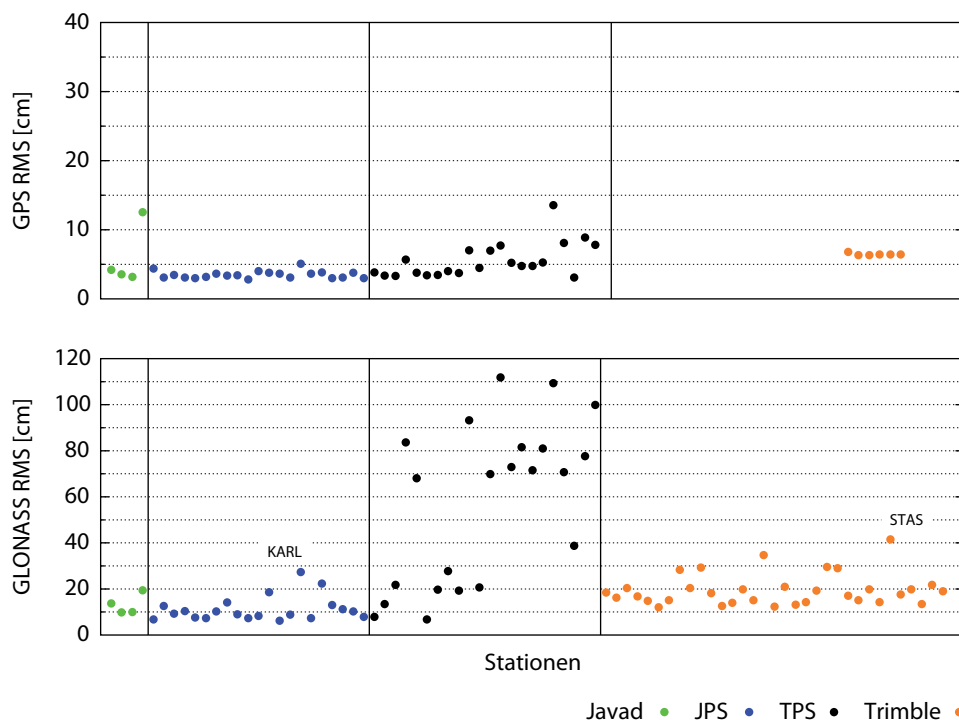


Abb. 5.9: RMS der Differenzen zwischen DCB_{P1C1}^{CODE2} und DCB_{P1C1}^{TUD1}

Lediglich $GPS-DCB_{P1C1}$ wurden von Leandro u. a. (2007) berechnet. Dafür nutzen sie C_1/P_2 -Codebeobachtungen, die nach dem PPP-Prinzip prozessiert wurden. Die notwendigen Orbit- und Uhrkorrekturen stammen vom IGS, sodass es sich bei Uhrkorrekturen um Korrekturen handelt, die auf der Basis der ionosphären-freien Linearkombination von P_1/P_2 -Beobachtungen bestimmt wurden. Wird innerhalb einer PPP-Prozessierung nun die ionosphären-freie Code-Linearkombination mit C_1/P_2 - statt mit P_1/P_2 -Beobachtungen gebildet und werden gleichzeitig präzise IGS-Uhrkorrekturen verwendet, kommt es einerseits zur Verfälschung der PPP-Lösung durch die Nichtberücksichtigung der DCB_{P1C1} und können andererseits die DCB_{P1C1} selbst bestimmt werden. Die mittlere Abweichung zwischen den von Leandro u. a. (2007) anhand der Beobachtungsdaten der ersten 10 Tage des Jahres 2007 von neun, mit Trimble-Empfängern ausgestatteten Stationen des *L2C Test Network* ermittelten und den von CODE generierten $GPS-DCB_{P1C1}^{CODE}$ beträgt 3,6 cm. Leandro u. a. (2007) erreichen mit ihren $GPS-DCB_{P1C1}$ eine geringfügig bessere Übereinkunft mit den $GPS-DCB_{P1C1}^{CODE}$.

Abschließend soll untersucht werden, inwieweit $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ einem frequenzabhängigen Einfluss unterliegen und ob die resultierenden $IFB_{DCB,P1C1}$ eine Empfängerabhängigkeit aufweisen. Die Untersuchungen im Abschnitt 5.2 bezüglich den Codeabweichungen und deren Modellierung mittels Polynomen niederen Grades geben Anlass zu der Vermutung, dass auch die $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ einem frequenzabhängigen Einfluss unterliegen, der zudem hersteller- oder empfängerabhängig ist. Die Vermutung erhärtet sich, wenn die in Abbildung 5.8 dargestellten $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ nicht in Abhängigkeit der Satellitennummer, sondern in Abhängigkeit der GLONASS-Frequenznummer betrachtet werden (Abbildung 5.10). Mutmaßlich beinhalten sie einen positiven frequenzabhängigen Einfluss, der von Hersteller zu Hersteller variiert.

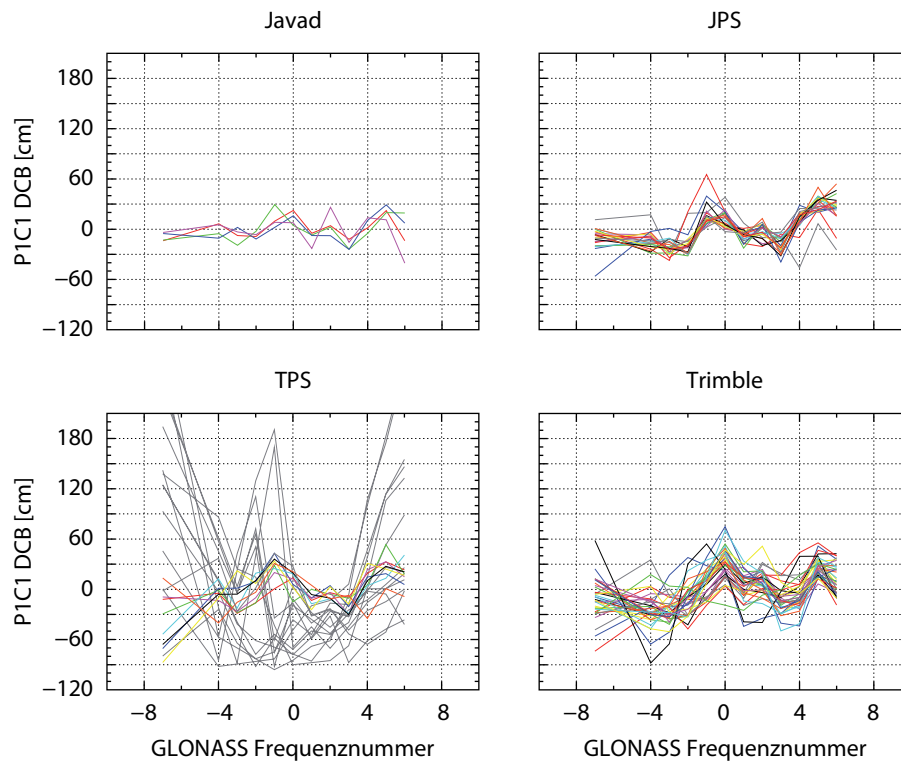


Abb. 5.10: $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ von vier Empfängerherstellern in Abhängigkeit von der Frequenznummer

Vor diesem Hintergrund wurden alle zuvor verwendeten Beobachtungsdaten erneut prozessiert. Im Rahmen dieser zweiten Prozessierung ist zusätzlich zu den GPS- und $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD2}$ auch ein frequenzabhängiger Term $IFB_{DCB,P1C1}$ geschätzt wurden (vgl. Gleichung 5.3). Während die $GPS-DCB_{P1C1}^{TUD}$ im Vergleich zur ersten Prozessierung unverändert bleiben, resultieren aus dem zusätzlichen GLONASS-spezifischen Parameter neue $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD2}$.

Das Hauptaugenmerk liegt jedoch diesmal nicht auf den GPS- und $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD2}$, sondern auf der Analyse der $IFB_{DCB,P1C1}$. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, wurden die 14 täglichen $IFB_{DCB,P1C1}$ aller Stationen einer statistischen Auswertung unterzogen. Neben den mittleren $IFB_{DCB,P1C1}$ sind wiederum auch die resultierenden Standardabweichungen (vgl. Gleichung 2.74) von Interesse, da sie Rückschlüsse über die Tag-zu-Tag-Variationen der $IFB_{DCB,P1C1}$ geben. Die Wiederholgenauigkeit der täglichen $IFB_{DCB,P1C1}$ liegt in den meisten Fällen auf dem Niveau von wenigen Millimetern. 20% bzw. 80% der täglichen $IFB_{DCB,P1C1}$ weisen Tag-zu-Tag-Variationen kleiner 2 mm bzw. 5 mm auf. Ausnahme sind auch hier größtenteils die $IFB_{DCB,P1C1}$ von Stationen mit TPS-Empfängern, wobei dies mehrheitlich die TPS-Stationen betrifft, deren $GLONASS-DCB_{P1C1}$ ebenfalls eine schlechte Wiederholgenauigkeit aufweisen (vgl. Abbildung 5.7).

Abbildung 5.11 stellt die mittleren $IFB_{DCB,P1C1}$ aller Stationen getrennt nach den vier Empfängerherstellern dar. Es ist ersichtlich, dass die $GLONASS-DCB_{P1C1}$ größtenteils einer positiven Frequenzabhängigkeit unterliegen und insbesondere die mittleren $IFB_{DCB,P1C1}$ von JPS-Stationen auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die $IFB_{DCB,P1C1}$ von KARL (Karlsruhe, Deutschland) und MAS1 (Maspalomas, Spanien) ausgenommen, ergibt sich für die verbleibenden 19 JPS-Stationen

ein herstellerspezifischer $IFB_{DCB,P1C1} = 3,4$ cm, um den die Einzelwerte mit 5 mm streuen. Die deutsche JPS-Station KARL ist eine der 11 Stationen, für die ein negativer $IFB_{DCB,P1C1}$ bestimmt wurde. Zudem gehören zu dieser Gruppe, die 14 % aller Stationen umfasst, auch neun TPS-Stationen, deren $IFB_{DCB,P1C1}$ zumeist aber nicht als repräsentativ anzusehen sind. Hierfür sprechen zum einen Wiederholgenauigkeiten im Bereich zwischen 5 mm und 10 mm und zum anderen die Tatsache, dass eine Modellierung des frequenzabhängigen Einflusses mittels einer Geraden nur bedingt den tatsächlichen Effekt widerspiegelt. Vielmehr ist die Approximation mit einem Polynom höheren Grades erforderlich (vgl. Abbildung 5.10).

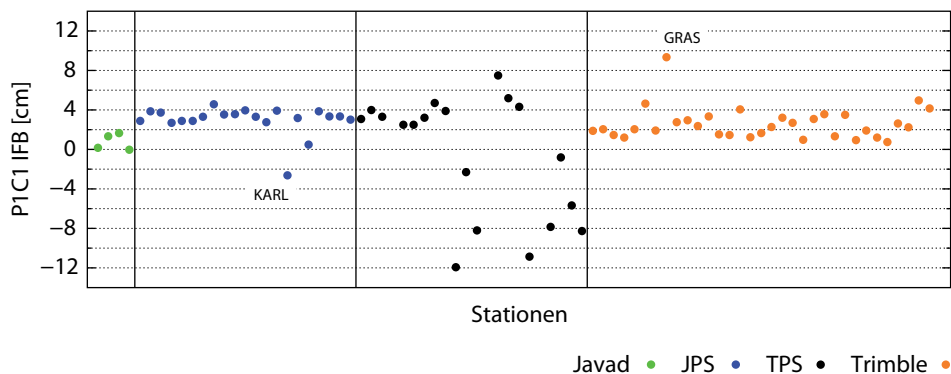


Abb. 5.11: Stationsspezifische $IFB_{DCB,P1C1}$ der $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$

Zusammenfassend stellt Tabelle 5.6 die herstellerspezifischen $IFB_{DCB,P1C1}$ sowie die Streuung der in die Mittelbildung eingegangenen mittleren $IFB_{DCB,P1C1}$ für die beiden Fälle gegenüber, dass einerseits alle $IFB_{DCB,P1C1}$ verwendet und andererseits nur die $IFB_{DCB,P1C1}$ berücksichtigt wurden, die nicht als Ausreißer identifiziert wurden. Als Ergebnis der Untersuchungen bezüglich eines frequenzabhängigen Einflusses auf die $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ lässt sich festhalten, dass die $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$ einem linear zu modellierenden frequenzabhängigen Effekt unterliegen, der sich im Bereich zwischen 2 cm bis 3 cm bewegt. Allerdings gibt es Stationen bzw. Empfänger, bei denen eine derartige einfache Approximation nicht ausreicht.

Tab. 5.6: Herstellerspezifische $IFB_{DCB,P1C1}$ der $GLONASS-DCB_{P1C1}^{TUD1}$. In Klammern angegeben sind die Kennzahlen ohne identifizierte Ausreißer.

Hersteller	Anzahl	IFB [cm]	Standardabweichung [cm]
Javad	4 (3)	0,8 (0,5)	0,8 (0,6)
JPS	21 (19)	3,0 (3,4)	1,5 (0,5)
TPS	22 (14)	0,6 (2,5)	9,8 (2,6)
Trimble	33 (28)	2,6 (2,1)	1,6 (0,8)

5.4 Melbourne-Wübbena-Linearkombination

Aus den Untersuchungen in den beiden vorangegangenen Abschnitten ist bekannt, dass sowohl die ionosphären-freie Code-Linearkombination (vgl. Abschnitt 5.2) als auch die Differenzen zwischen

C_1 - und P_1 -Beobachtungen (vgl. Abschnitt 5.3) in Bezug auf GLONASS einen frequenzabhängigen Einfluss unterliegen. In den meisten Fällen kann der durch FDMA hervorgerufene Effekt linear modelliert werden, wobei die Linearität in Abhängigkeit vom Empfängerhersteller unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Allerdings gibt es auch Ausnahmen, die eine Approximation mit einem Polynom höheren Grades erfordern - und auch erlauben, insofern die Daten keine Unstetigkeiten oder Unregelmäßigkeiten aufweisen. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass die Melbourne-Wübbena-Linear kombination sowohl durch instrumentelle Verzögerungen der Phase als auch durch instrumentelle Verzögerungen des Codes negativ beeinflusst wird und infolgedessen es zu Problemen bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung kommen kann. Die Untersuchung der Melbourne-Wübbena-Linear kombination im Hinblick auf den (linearen) Einfluss der instrumentellen Verzögerungen bildet den Schwerpunkt dieses Abschnitts.

5.4.1 Berechnung

Im Rahmen der Untersuchungen in diesem Abschnitt wird in Bezug auf die Bildung der Melbourne-Wübbena-Linear kombination ebenfalls zwischen zwei Möglichkeiten unterschieden. Es ist zu differenzieren, ob neben den P_2 -Codebeobachtungen C_1 - oder P_1 -Codebeobachtungen zur Bildung der Code-Narrowlane-Linear kombination verwendet werden. Folglich ist zu beachten, auf welcher der beiden Varianten die notwendigen FCBs basieren und welche der beiden Melbourne-Wübbena-Linear kombinationen mit diesen FCBs korrigiert werden soll. Unter Umständen ist die Korrektur mittels $DCB_{P_1C_1}$ erforderlich.

Im Zuge der Untersuchungen wird aufbauend auf vier unterschiedlichen Ansätzen zwischen acht Arten von Lösungen unterschieden (Tabelle 5.7). Einerseits sind nur solche Beobachtungen und FCBs miteinander kombiniert worden, deren Melbourne-Wübbena-Linear kombination mit dem selben Code-Typ auf der ersten Frequenz gebildet wurden (Lösungstypen A und B). Andererseits sind auch Kombinationen gebildet worden, bei denen die Beobachtungen und FCBs auf einer der beiden Varianten gründen (Lösungstypen C, D und E sowie Lösungstypen F, G und H). Bei den Lösungstypen C bis H sind außerdem $DCB_{P_1C_1}$ zu berücksichtigen. Im Fall der Lösungstypen F, G und H erfolgt die Berücksichtigung bei der Ableitung der FCBs.

Tab. 5.7: Lösungstypen

Lösungstyp	Beobachtungen	FCB	$DCB_{P_1C_1}$
A	C1P2	C1P2	—
B	P1P2	P1P2	—
C	C1P2	P1P2	$DCB_{P_1C_1}^{CODEE2}$
D	C1P2	P1P2	$DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$
E	C1P2	P1P2	$DCB_{P_1C_1}^{TUD2}$
F	P1P2	C1P2	$DCB_{P_1C_1}^{CODEE2}$
G	P1P2	C1P2	$DCB_{P_1C_1}^{TUD1}$
H	P1P2	C1P2	$DCB_{P_1C_1}^{TUD2}$

Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen sind die Beobachtungsdaten von 169 EPN- und GREF-Stationen, die einen Zeitraum von zwei aufeinanderfolgenden Wochen im Jahr 2012 umfassen (vgl. Abschnitt 5.1). Für jeden der acht Lösungstypen wurden die entsprechenden Beobachtungen aller Stationen prozessiert. Aufgrund der bereits in Abschnitt 5.3.3 erwähnten Problematik hinsichtlich der Anzahl an Stationen mit P_1 -Codebeobachtungen unterscheiden sich die einzelnen Lösungstypen in der Anzahl an resultierenden Tageslösungen sehr stark. Die meisten Tageslösungen gab es für den Lösungstyp A. Umgekehrt verhält es sich im Fall der Lösungstypen B, G und H, da für diese Lösungstypen lediglich die Beobachtungen von 53 Stationen zur Verfügung stehen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um solche Stationen, die eine Berechnung der Melbourne-Wübbena-Linear kombination aufbauend auf P_1 - und P_2 -Codebeobachtungen sowohl für GPS als auch für GLONASS erlauben. Gleiches gilt für die notwendigen $DCB_{P_1C_1}$, die ebenfalls für beide GNSS zur Verfügung stehen müssen.

Die Auswahl der Stationen, anhand deren Beobachtungsdaten die notwendigen FCBs für eine bestimmte (Haupt-)Station generiert wurden, orientiert sich einerseits am Abstand der beiden beteiligten Stationen und andererseits am Empfängerhersteller der FCB-Stationen. Ausgehend von den in Tabelle 5.1 genannten acht Empfängerherstellern wurden im Umkreis jeder Station pro Hersteller die drei Stationen ermittelt, die in ihrer Gruppe den kürzesten Abstand zur (Haupt-)Station aufweisen. Folglich kann es sein, dass manche „Basislinien“ ausschließlich in einer der beiden möglichen Varianten bestimmt werden. Zudem standen lediglich die Beobachtungsdaten von zwei Stationen mit Septentrio-Empfängern zur Verfügung.

5.4.2 Fractional-Cycle Biases (FCB)

Die Ableitung des IFB der Melbourne-Wübbena-Linear kombination $IFB_{\Phi, MW}$ erfolgt vor dem gleichen thematischen Hintergrund wie im Fall des IFB der ionosphären-freien Linear kombination (vgl. Abschnitt 4.3.2): durch die Korrektur der Beobachtungsdaten einer ersten Station mit den FCBs einer zweiten Station verschmelzen nicht nur die FCBs, sondern auch die IFBs miteinander. Gleichwohl gilt, dass die Bestimmung des IFB nur im Zusammenhang mit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung und dem durch jede festgesetzte Mehrdeutigkeit ausgeübten Zwang sinnvoll ist. Der IFB sollte umso besser bestimmt sein, je mehr Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden konnten.

Dies setzt voraus, dass die nach der Korrektur der Beobachtungsdaten mittels FCBs geschätzten Mehrdeutigkeiten nur geringfügig Differenzen zur Ganzzahligkeit aufweisen. Der FP einer korrigierten Mehrdeutigkeit ist umso kleiner, je besser der FP der unkorrigierten Mehrdeutigkeit und der zur Korrektur verwendete FCB zusammenpassen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst FCBs vom Lösungstyp A aller 169 Stationen für jeden Tag des Untersuchungszeitraums berechnet und diese anschließend sowohl zu stations- als auch zu herstellerspezifischen FCBs zusammengefasst. Aufgrund der Tatsache, dass GLONASS-Mehrdeutigkeiten durch GLONASS-spezifische Verzögerungen (vgl. Abschnitte 5.4.3 bis 5.4.5) in negativer Art und Weise beeinflusst sind, beschränkt sich die Untersuchung auf die Auswertung von GPS-Beobachtungen. Die Wiederholgenauigkeit der mehr als 66 000 täglichen FCBs beträgt im Mittel 0,07 cy und bestätigt damit die Ergebnisse von Ge u. a. (2008). Für 74 % von ihnen ergibt sich eine Reproduzierbarkeit von unter 0,1 cy.

Die Berechnung der herstellerspezifischen FCBs erfolgte auf der Grundlage von knapp 5 000 stations-spezifischen FCBs. Die satellitenspezifischen FCBs in Bezug auf den Referenz-Satellit G14 von sieben

Empfängerherstellern sowie deren Standardabweichungen sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Für die Mehrheit der GPS-Satelliten resultieren aus der Berechnung konsistente herstellerspezifische FCBs. Gleichwohl ist ersichtlich, dass insbesondere die Leica-spezifischen FCBs nur bedingt mit den FCBs der anderen Hersteller übereinstimmen und zudem deutlich ungenauer sind. Die Genauigkeit der mittleren satellitenspezifischen FCBs erhöht sich im Mittel um den Faktor 1,5 und im Extremfall um den Faktor 4, wenn die Leica-spezifischen FCBs bei der Mittelbildung unberücksichtigt bleiben. Die Übereinstimmung der herstellerspezifischen FCBs über alle Satelliten beträgt 0,12 cy (mit Leica) bzw. 0,07 cy (ohne Leica)²⁷.

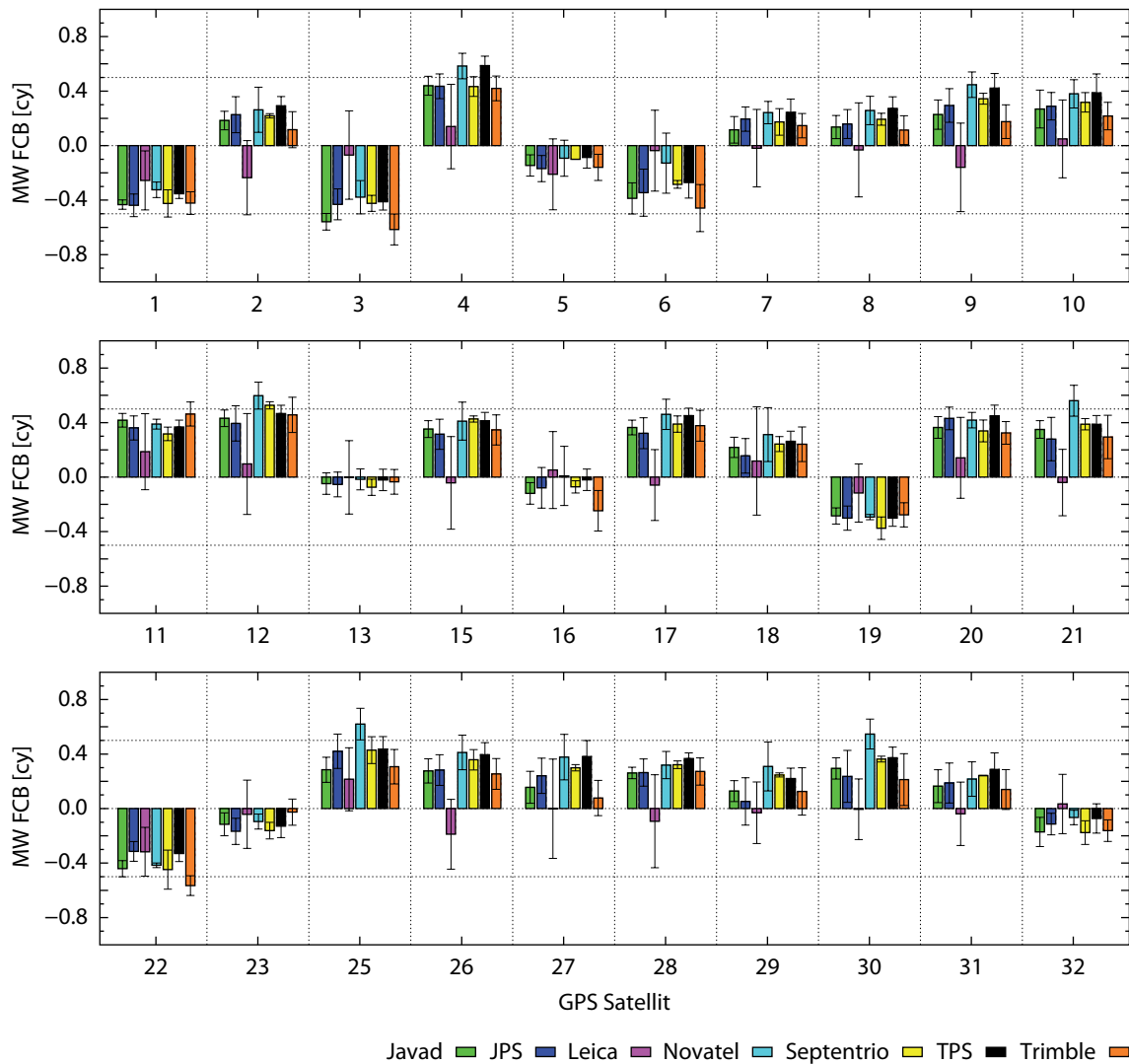


Abb. 5.12: Herstellerspezifische GPS-FCB der Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Referenz-Satellit: G14)

Ursächlich für die Diskrepanz der Leica-spezifischen FCBs im Vergleich mit den anderen herstellerspezifischen FCBs ist vordergründig die enorme Streuung der stationsspezifischen FCBs der 75 Leica-Stationen. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.13 die stationsspezifischen FCBs der GPS-Satelliten

²⁷Für die Mehrheit der GPS-Satelliten ergeben sich ebenfalls konsistente herstellerspezifische FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination vom Lösungstyp B. Deren Übereinstimmung über alle Satelliten beträgt 0,05 cy.

G11 und G17 in Bezug auf den Referenz-Satellit G14 von allen untersuchten Stationen. Insbesondere die FCBs von Stationen mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200 GG PRO weisen zum Teil deutliche Differenzen zum jeweiligen satellitenspezifischen Mittelwert auf. In Abhängigkeit des Satelliten lassen sich zwei unterschiedliche Niveaus ausmachen (u. a. G01 und G11). Unter Umständen stimmen beide jedoch nicht mit dem jeweiligen satellitenspezifischen Mittelwert überein (u. a. G05 und G09). Mit ARG1 (Argir, Färöer-Inseln) und BADH (Bad Homburg, Deutschland) zeigen lediglich zwei von 45 Stationen mit einem Empfänger vom Typ Leica GRX1200 GG PRO keine derartige Auffälligkeiten. In Abhängigkeit des Satelliten weisen auch die FCBs der 23 Stationen mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200+GNSS eine große Streuung auf. Lediglich OROS (Oroshaza, Ungarn), TORI (Torino, Italien) und VALA (Valladolid, Spanien) besitzen FCBs mit Abweichungen zum satellitenspezifischen Mittelwert auf dem Niveau der Stationen mit anderen Empfängern.

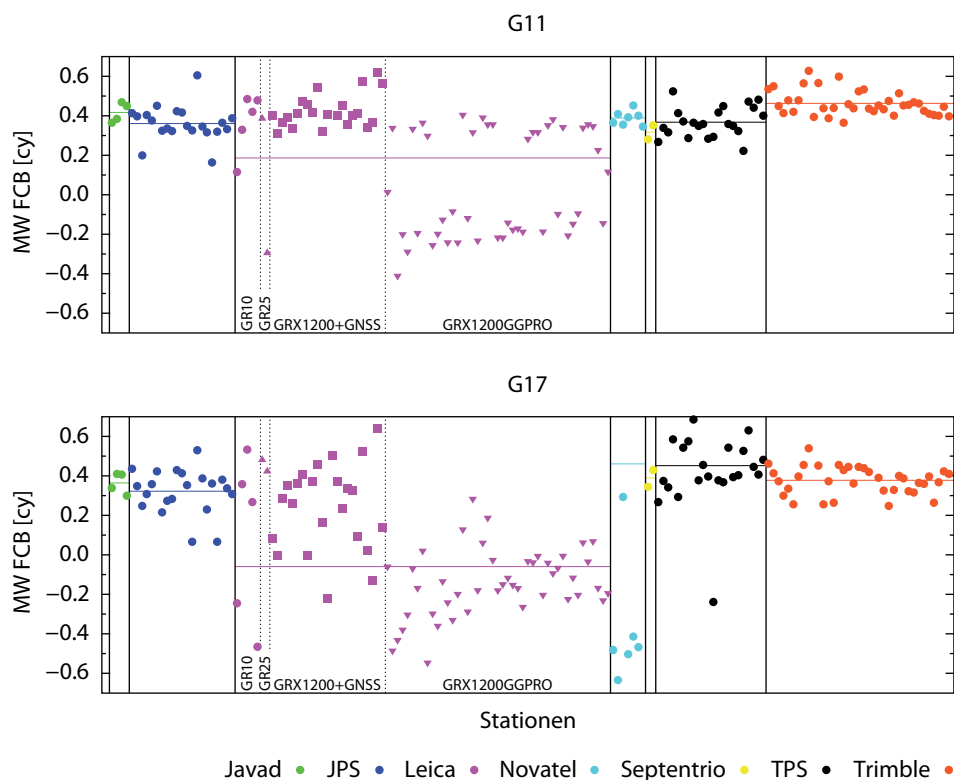


Abb. 5.13: Herstellerspezifische FCB der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der GPS-Satelliten G11 und G17 (Referenz-Satellit: G14)

Die Analyse der Firmware-Versionen sowie des Antennentyps in Bezug auf die Stationen mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200+GNSS brachten keine weiteren Erkenntnisse, die die Unstimmigkeiten in den FCBs erklären könnten. Sowohl die auf den drei genannten Stationen installierten Firmware-Versionen (8.51/6.110, 8.10/4.010, und 8.20/4.007) als auch der Antennentyp LEIAR25.R3 sind Merkmale der anderen 20 Stationen mit dem gleichen Empfängertyp. Dieselbe Analyse in Bezug auf die Stationen mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200 GG PRO zeigt, dass ARG1 die einzige Station ist, auf der noch die ältere Firmware-Version 6.00 installiert ist. Gleichzeitig ist BADH (Firmware-Version 8.10/3.01) die einzige Station mit einem Leica-Empfänger und einer Trimble-Antenne (TRM41249.00). Inwiefern die genannten Eigenschaften des auf ARG1 und BADH eingesetzten Equipments für die bessere Übereinstimmung der stationsspezifischen FCBs mit

den mittleren FCBs ursächlich sind, lässt sich schwer beurteilen. Ebenso wurde die ionosphärenfreie Code-Linearkombination im Hinblick auf GPS-Codeverzögerungen untersucht. Zwar gibt es einerseits Unterschiede zwischen den Codeabweichungen von Stationen mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200+GNSS und Leica GRX1200 GG PRO, doch andererseits ergeben sich vergleichbare Ergebnisse innerhalb der Stationen mit einem der beiden Empfänger.

Eine fundierte Aussage darüber, ob die GLONASS-FCBs gleichermaßen Unterschiede in Bezug auf die herstellereispezifischen FCBs aufweisen, lässt sich an dieser Stelle nicht treffen. Die Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten (vgl. Tabelle 5.9) lassen aber die Vermutung aufkommen, dass es innerhalb der einzelnen Empfänger-Gruppen deutliche Schwankungen gibt.

5.4.3 A priori-Korrekturen

Aufgrund des Einflusses sowohl durch instrumentelle Verzögerungen der Phase als auch durch instrumentelle Verzögerungen des Code können die a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 nicht verwendet werden. Daher war ein Vorverarbeitungsschritt notwendig, in welchem für jedes Stationspaar und für jeden der acht Lösungstypen neue und lediglich für die Melbourne-Wübbena-Linearkombination geltende a priori-Korrekturen bestimmt wurden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten, die beide auf einer iterativen Vorgehensweise basieren.

Die einfachere der beiden Varianten ergibt sich aus der Tatsache, dass sich die bestmögliche a priori-Korrektur dadurch auszeichnet, dass mit ihr die meisten Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden können. Entsprechend kann zur Bestimmung der a priori-Korrekturen der normale PPP-Algorithmus zur Anwendung kommen. Von Vorteil ist zudem, dass sich auf diese Art und Weise ohne zusätzliche Berechnungen die endgültigen $IFB_{\Phi, MW}$ ergeben. Allerdings ist dieser Ansatz aufgrund der enormen Rechenzeit sehr zeitintensiv.

Die zweite Variante zur Ableitung von a priori-Korrekturen basiert auf den Kenntnissen der vorangegangenen Abschnitte. Demnach sind die Mehrdeutigkeiten, die sich ergeben, wenn die Beobachtungen einer Station mit den FCBs einer zweiten Station korrigiert werden, durch die instrumentellen Verzögerungen beider Stationen verfälscht. Folglich sind auch die FPs der Mehrdeutigkeiten verfälscht und können daher ebenso für die Bestimmung der a priori-Korrekturen verwendet werden. Hierzu wurden die FPs einer Regressionsanalyse unterzogen. Der Anstieg der ausgleichenden Gerade mit der kleinsten Standardabweichung spiegelt den frequenzabhängigen Effekt am besten wider. Dabei ist zu beachten, dass es bei den aktuell verwendeten Frequenznummern bei frequenzabhängigen Einflüssen größer $\pm 6,6$ cm zu Überläufen kommt. Im Vergleich zur ersten Variante ist die zweite Möglichkeit weit weniger rechenintensiv, sodass ihr der Vorzug gegeben wurde.

Um mit den berechneten a priori-Korrekturen den Großteil des frequenzabhängigen Einflusses vorab beseitigen zu können, sodass im Rahmen der PPP-Ausgleichung nur noch ein kleiner Restfehler zu schätzen ist, müssen sie den frequenzabhängigen Effekt bestmöglich widerspiegeln. Inwieweit dies zu trifft, veranschaulicht zunächst Abbildung 5.14. Dargestellt sind die FPs eines einzelnen Tages vom Lösungstyp A von neun Stationspaaren sowie die nach Variante 2 bestimmten a priori-Korrekturen. Es zeigt sich, dass bei entsprechend guten Daten mit dem vorgestellten Algorithmus repräsentative a priori-Korrekturen zu erwarten sind. Dies belegen auch die angegebenen Standardabweichungen der Regressionsanalyse, die 0,2 cy nicht übersteigen. Im Fall von weniger guten Daten können die Standardabweichungen um den Faktor 2 größer sein.

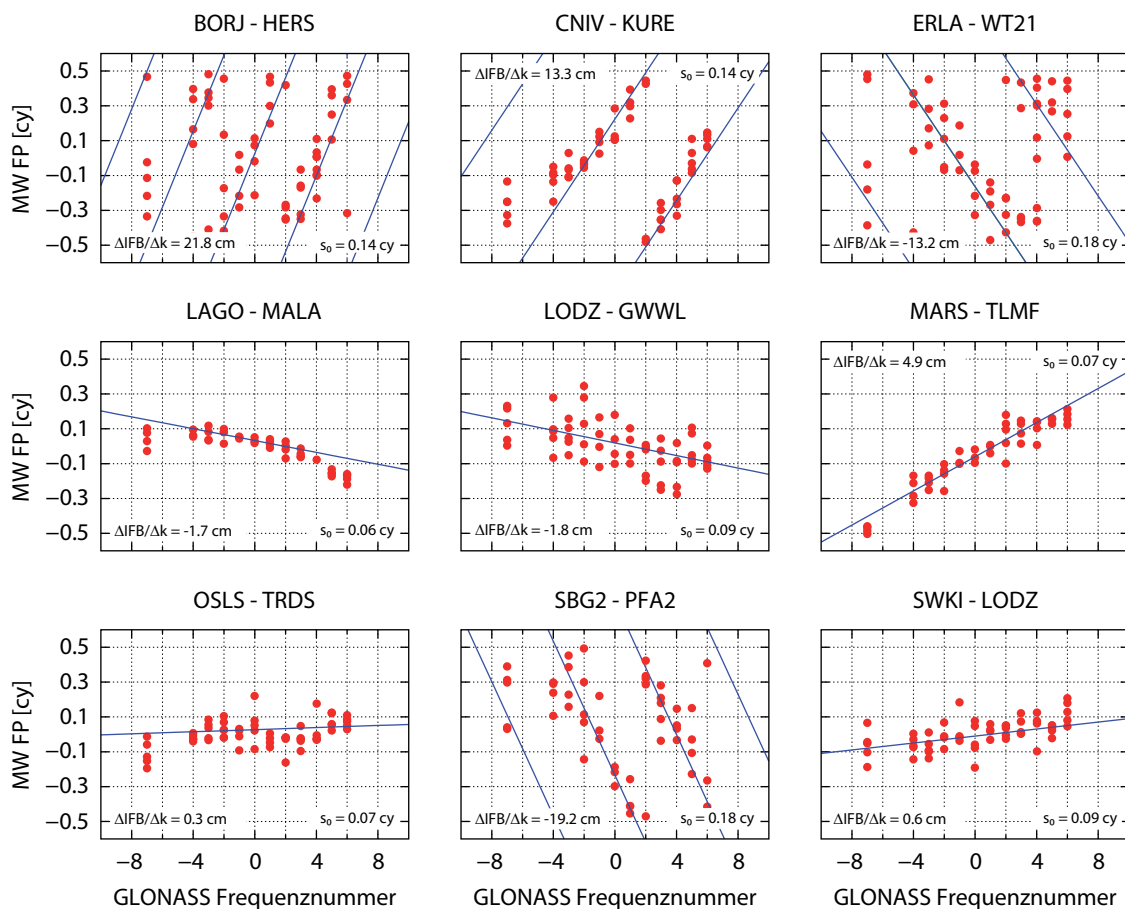


Abb. 5.14: Ableitung von a priori-Korrekturen der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A

Wird dem frequenzabhängigen Effekt mittels a priori-Korrekturen entgegengewirkt und der Großteil des frequenzabhängigen Einflusses vorab beseitigt, sollten sich GLONASS-Mehrdeutigkeiten ergeben, die einerseits nur noch einen kleinen frequenzabhängigen Resteinfluss aufweisen und deren FPs andererseits mit den FPs von GPS-Mehrdeutigkeiten vergleichbar sind. Letztere besitzen in der Regel einen entsprechend kleinen Abstand zur Ganzzahligkeit, der es erlaubt, nahezu alle Mehrdeutigkeiten festzusetzen. Um dies zu prüfen, wurden von allen Stationen basierend auf allen zur Verfügung stehenden Beobachtungen und FCBs des Lösungstyps A zum einen GPS-FPs und zum anderen GLONASS-FPs sowohl ohne als auch mit a priori-Korrektur berechnet.

Für die neun genannten Stationen sind die Ergebnisse in Abbildung 5.15 in Form von Histogrammen dargestellt. Die Stationspaare CNIV-KURE und SBG2-PFA2 ausgenommen, weisen die GLONASS-FPs im Vergleich zu den GPS-FPs größere Variationen auf. Dennoch resultieren aus der Verwendung der a priori-Korrekturen im Fall dieser Stationen zum Großteil GLONASS-Mehrdeutigkeiten, die eine erfolgreiche Festsetzung erlauben. Legt man einerseits ein Kriterium von 0,2cy als maximal möglichen Abstand einer Mehrdeutigkeit zur Ganzzahligkeit zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten zu Grunde und fordert andererseits eine Festsetzungsquote von mindestens 80 %, so gilt dies nicht für CNIV-KURE (GPS), ERLA-WT21 (GLONASS) und SBG2-PFA2 (beide GNSS).

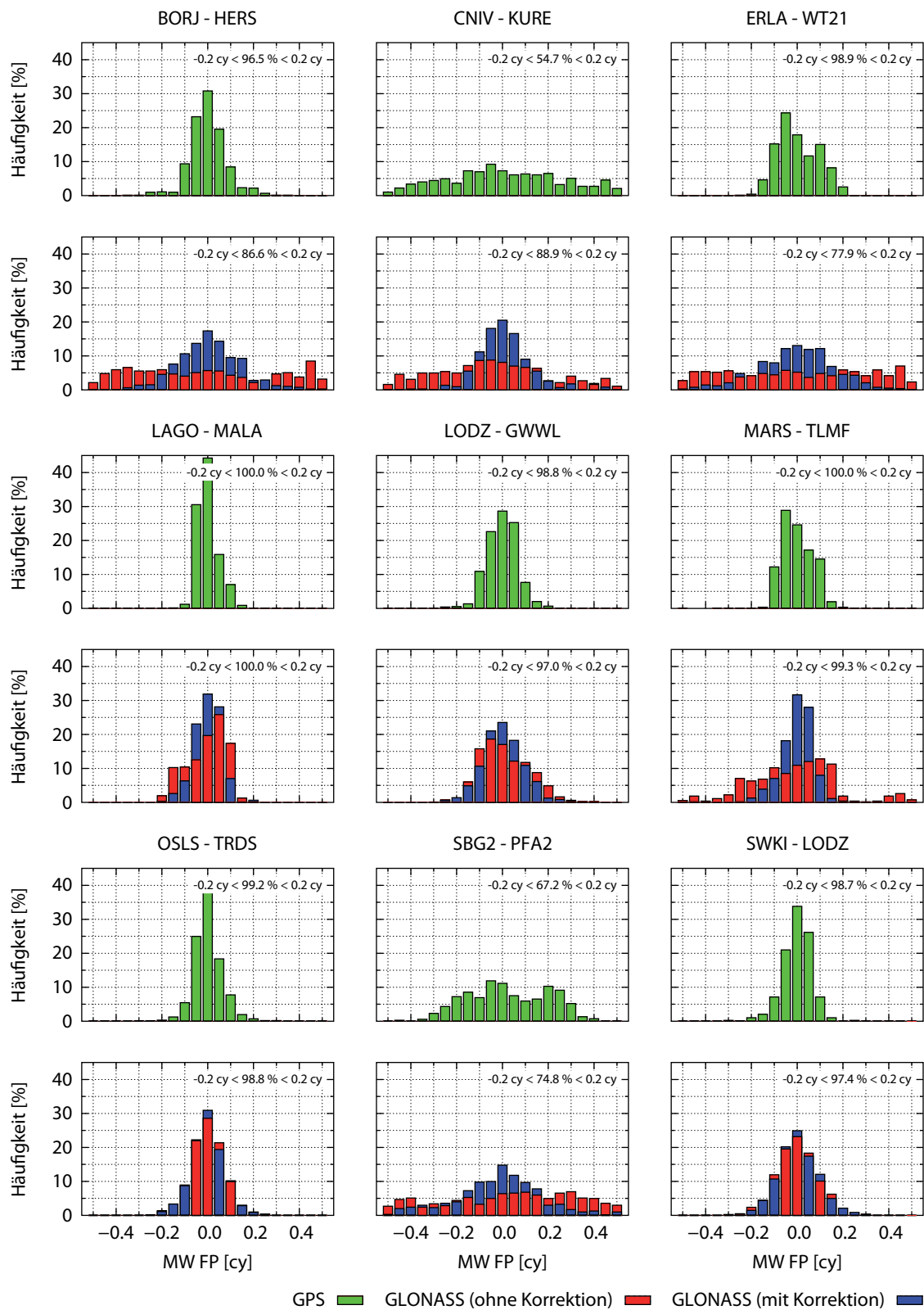


Abb. 5.15: Häufigkeitsverteilung von FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A

Die Diskrepanz zwischen den GPS- und den korrigierten GLONASS-FPs wird umso größer, je größer die Variationen der unkorrigierten GLONASS-FPs und je geringer die Chancen zur Ableitung von repräsentativen a priori-Korrekturen sind. Wie die Standardabweichungen von jeweils ungefähr 44 000 GPS- und korrigierten GLONASS-Datensätzen belegen, ist eine Unstimmigkeit hinsichtlich der Güte der GPS- und GLONASS-FPs jedoch deutlich gegeben. Die Standardabweichungen wurden entsprechend ihrer Größe in verschiedene Klassen eingeteilt. Zur besseren Einordnung der Angaben in Tabelle 5.8 sei erwähnt, dass sich eine Standardabweichung im Bereich zwischen 0,1 cy und 0,15 cy ergibt, wenn die überwiegende Mehrheit der Mehrdeutigkeiten eines Datensatzes einen Abstand von kleiner als 0,2 cy zur Ganzzahligkeit aufweist. Es ist ersichtlich, dass dies nur für 10 % der untersuchten GLONASS-Datensätze zutrifft. Die Verteilung der GLONASS-Standardabweichungen verhält sich genau umgekehrt zur Verteilung der Standardabweichungen von GPS. Variationen kleiner als 0,25 cy wurden für 71 % aller GPS-FPs und lediglich für 27 % aller GLONASS-FPs berechnet. Sechs von 10 GLONASS-Mehrdeutigkeiten sind zwischen 0,25 cy und 0,3 cy von der Ganzzahligkeit entfernt.

Tab. 5.8: Standardabweichungen der FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination des Lösungstyps A

GNSS	< 0,05 cy	< 0,1 cy	< 0,15 cy	< 0,2 cy	< 0,25 cy	< 0,3 cy	> 0,3 cy
GPS	1,7 %	15,5 %	24,2 %	15,0 %	14,7 %	22,8 %	6,2 %
GLONASS	0,3 %	4,1 %	5,9 %	4,4 %	12,5 %	59,4 %	13,5 %

Die Analyse der a priori-Korrekturen lässt bereits die Vermutung aufkommen, dass im Fall der Melbourne-Wübbena-Linearkombination keine homogene, d. h. herstellerspezifische IFB zu erwarten sind. Aus diesem Grund kann für die $IFB_{\Phi, MW}$ auch kein Absolutniveau festlegen werden. Daher handelt es sich bei den im Folgenden diskutierenden $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ um relative Angaben, die sich auf ein bestimmtes Stationspaar oder einen speziellen Empfängertyp beziehen. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wird daher bei allen in Abschnitt 5.4 behandelten $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ auf einen ausdrücklichen Hinweis in dieser Hinsicht verzichtet.

Der $IFB_{\Phi, MW}$ sollte sich in erster Linie dann aufheben bzw. drastisch reduziert haben, wenn sowohl Beobachtungsdaten als auch FCBs von Empfängern des gleichen Herstellers stammen. Folglich sind die Erfolgchancen zur Ableitung von IFBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination insbesondere bei solchen Stationspaaren ersichtlich, die beide mit dem selben Empfängertyp (und dem selben Antennentyp) ausgestattet sind.

5.4.4 Lösungstyp A und B

Die beiden Lösungstypen A und B sind dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die FCBs als auch die Melbourne-Wübbena-Linearkombination entweder auf C_1/P_2 - oder P_1/P_2 -Codebeobachtungen basieren. Die Korrektur der C_1 -Codebeobachtungen mittels $DCB_{P_1C_1}$ ist beim Lösungstyp A, obwohl von den IGS-Konventionen abweichende Codebeobachtungen zur Berechnung genutzt werden, nicht erforderlich.

Die Festsetzungsquote der GLONASS-Mehrdeutigkeiten spielt bei der Schätzung des $IFB_{\Phi, MW}$ eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund wurden die mehr als 46300 Tageslösungen von Lösungstyp A und die mehr als 7200 Tageslösungen von Lösungstyp B hinsichtlich der Anzahl an festgesetzten GLONASS-Mehrdeutigkeiten der Melbourne-Wübbena-Linearkombination analysiert. Es zeigt sich ein vom Lösungstyp nicht gänzlich unabhängiges Verhalten (Abbildung 5.16). Die größten Unterschiede sind für Festsetzungsquoten zwischen 40 % und 70 % zu erkennen, wenn bis zu andert-halb mal mehr Tageslösungen vom Lösungstyp B als Tageslösungen vom Lösungstyp A festgesetzt wurden. Lediglich eine von 10 Lösungstyp A- bzw. Lösungstyp B-Tageslösungen erreicht den für *fixed*-Lösungen relevanten Schwellwert von 80 %.

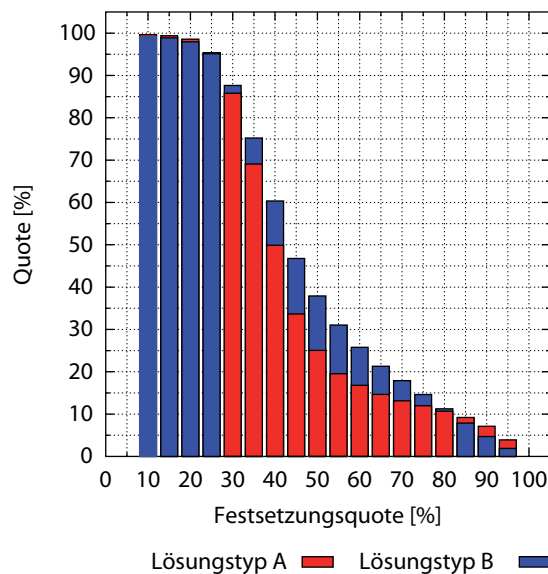


Abb. 5.16: Festsetzungsquoten der GLONASS-Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten der Lösungstypen A und B

Die Interpretation von Abbildung 5.16 wird u. a. durch die deutlichen Unterschiede in der Anzahl an eingehenden Tageslösungen erschwert. Nur jede 7. Tageslösung vom Lösungstyp A steht auch als Tageslösung vom Lösungstyp B zur Verfügung. Für einen direkteren Vergleich der beiden Lösungstypen in Bezug auf die Festsetzungsquote der Melbourne-Wübbena-Linearkombination wurden im Rahmen einer zweiten Analyse nur die Tageslösungen verwendet, die in beiden Lösungstypen vorkommen. Die Auswertung beschränkt sich somit im Wesentlichen auf die Tageslösungen von Stationspaaren, die mit Empfängern von JPS und TPS arbeiten. Die Unterschiede zwischen den beiden Lösungstypen sind nun deutlich ausgeprägter (Abbildung 5.17). Dies betrifft insbesondere den Bereich der für *fixed*-Lösungen relevanten Festsetzungsquoten. Im Vergleich zum Lösungstyp B erreichen dreimal weniger Tageslösungen vom Lösungstyp A eine Festsetzungsquote von 80 % und darüber. Es empfiehlt sich, die Melbourne-Wübbena-Linearkombination mit den P_1 -Codebeobachtungen zu generieren, insofern der präzise Code auf der ersten Frequenz zur Verfügung steht.

Letztlich wurden, um die Weiterverarbeitung von schlecht bestimmten IFBs auszuschließen, Tageslösungen mit einer GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote unter 80 % eliminiert. Die weiteren Analysen basieren folglich auf ca. 3000 bzw. 700 Tageslösungen vom Lösungstyp A bzw. Lösungstyp B. Unter ihnen sind insbesondere jene Tageslösungen von Interesse, die von Stationspaaren

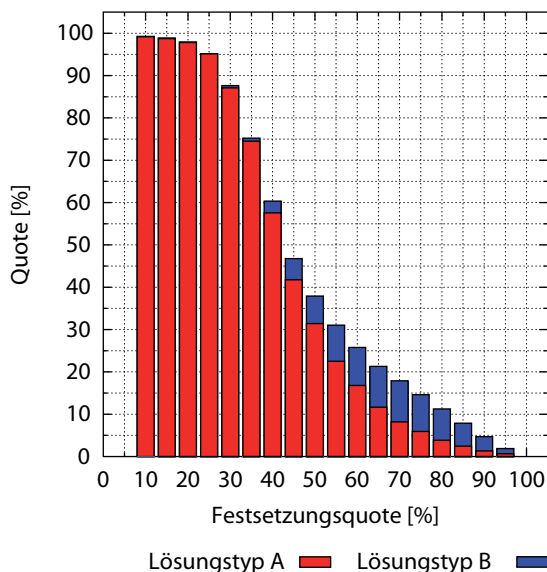


Abb. 5.17: Festsetzungsquoten der GLONASS-Melbourne-Wübbena-Mehrdeutigkeiten der Lösungstypen A und B mit identischen Tageslösungen

stammen, welche mit dem selben Empfängertyp ausgestattet sind, und unter Umständen sowohl für Lösungstyp A als auch für Lösungstyp B zur Verfügung stehen.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.18 die IFBs von sechs ausgewählten Stationspaaren, die entweder die erste oder aber beide Forderungen erfüllen. Alle sechs Stationspaare gehören zum Umfang der neun Stationspaare, die in Abschnitt 5.4.3 näher betrachtet wurden. Die IFBs beider Lösungstypen sind für die Stationspaare ERLA-WT21 und OSLS-TRDS dargestellt. Die IFBs der beiden Stationspaare, die mit Trimble NetR5-Empfängern arbeiten, ergaben sich jeweils unter Beteiligung der polnischen Station LODZ. Weil jedes Stationspaare mit dem selben Empfängertyp ausgestattet ist, ist davon auszugehen, dass die IFBs normalerweise gleich Null sein müssten. Dieser Sachverhalt wird allerdings von keiner der acht Zeitreihen bestätigt.

Stattdessen wurden für die gewählten Stationspaare $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ von zum Teil mehreren Zentimeter berechnet. Im Fall der beiden deutschen Stationen ERLA und WT21 resultiert aus den nahezu identischen IFBs beider Lösungstypen ($\Delta IFB_{\Phi, MW, C1P2} = -10,3$ cm, $\Delta IFB_{\Phi, MW, P1P2} = -10,4$ cm) ein maximaler Einfluss von annähernd zwei *Widelane*-Wellenlängen, wenn die größtmögliche Frequenznummerndifferenz $\Delta k_{max} = 13$ zu Grunde gelegt wird. Differenzen auf dem Niveau von einigen Millimetern weisen die Zeitreihen der beiden Stationspaare mit Trimble NetR5-Empfängern auf. Selbiges gilt auch für die Zeitreihen des Trimble NetR8-Stationspaares OSLS-TRDS, obwohl es sich bei den Zeitreihen um die IFBs beider Lösungstypen handelt. Die unterschiedliche Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination führt im Fall von OSLS-TRDS zu einem größeren Widerspruch zwischen den $IFB_{\Phi, MW, C1P2}$ und $IFB_{\Phi, MW, P1P2}$ als bei ERLA-WT21. Eine mittlere quadratische Abweichung von knapp 3 cm resultiert aus der Diskrepanz der beiden Zeitreihen, deren Stationspaare mit Empfängern vom Typ Leica GRX1200 GG PRO gearbeitet haben.

Abbildung 5.18 verdeutlicht einerseits sowohl die zu erwartenden Übereinstimmungen als auch Unstimmigkeiten in Bezug auf die IFBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination sowie die Größenordnung der IFBs. Andererseits demonstriert sie aber auch, dass die IFBs über den untersuchten Zeit-

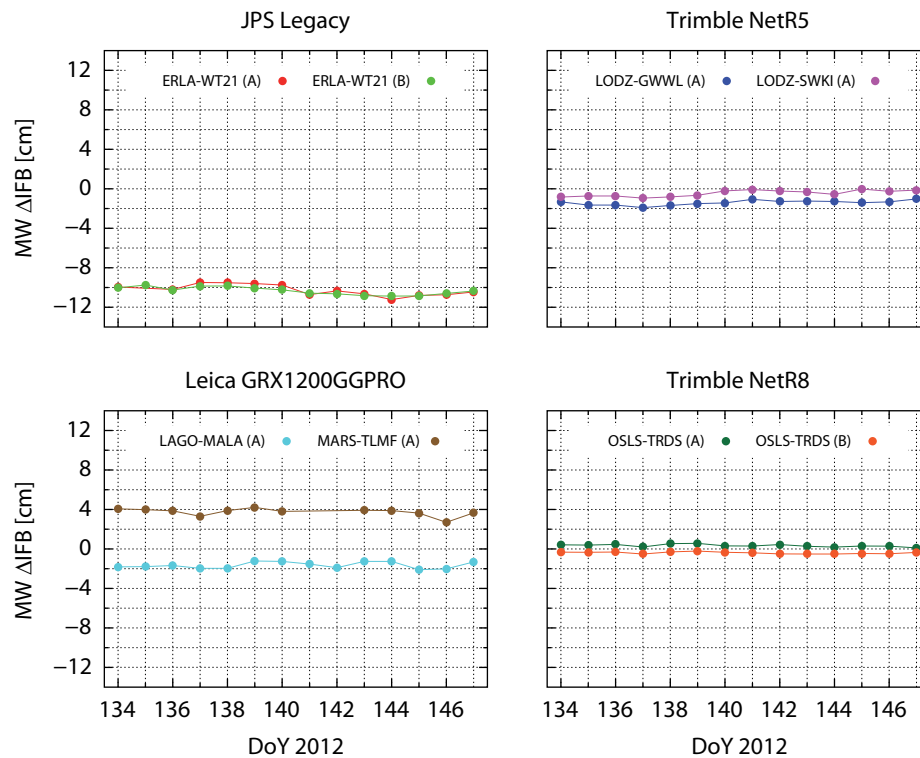


Abb. 5.18: Relative $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen A und B

raum von 14 Tagen nur geringen Schwankungen unterliegen. Die Tag-zu-Tag-Variationen bewegen sich im Bereich weniger Millimeter. Betrachtet man die täglichen IFBs aller Stationspaare, ergibt sich für 85 % (Lösungstyp A) bzw. 67 % (Lösungstyp B) eine Wiederholgenauigkeit kleiner als 5 mm. Bis auf einige wenige Ausnahmen gilt eine generelle Reproduzierbarkeit von unter einem Zentimeter.

Die täglichen IFBs von insgesamt 167 Stationspaaren wurden anschließend zunächst zu einem mittleren IFB pro Stationspaar zusammengefasst, um im Anschluss daran mittlere IFBs pro Empfängertyp abzuleiten. Hierbei ist zu beachten, dass die Vorzeichen der täglichen IFBs als auch des mittleren IFBs eines Stationspaares davon abhängig sind, von welcher der beiden Stationen die Beobachtungen prozessiert wurden und von welcher der beiden Stationen die notwendigen FCBs stammen. Für die vorgenommene statistische Auswertung wurde die Festsetzung getroffen, dass jeweils die Station mit dem im Alphabet zuerst vorkommenden Namen an erster Stelle steht. Erfüllt ein Stationspaar diese Konvention nicht, wurde das Vorzeichen des mittleren IFBs des entsprechenden Stationspaares umgekehrt. Im Fall des Trimble NetR5-Stationspaares LODZ-GWWL bedeutet dies, dass nicht der aus Abbildung 5.18 resultierende negative $IFB_{LODZ, GWWL}$ sondern der positive $IFB_{GWWL, LODZ}$ in die Berechnung der empfängerspezifischen IFBs eingeflossen ist. Diese beruht letztlich auf mittleren IFBs, deren Werte im Bereich zwischen -17 cm bis 23 cm liegen. Mit einer Bandbreite von 40 cm weisen die $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination im Vergleich zu den a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 ein um den Faktor 7 größeres Spektrum auf.

Die mittleren $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination von 11 verschiedenen Empfängertypen sowie die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Tabelle 5.9 aufgelistet. Es ist

ersichtlich, dass die empfängerspezifischen IFBs zum Teil deutlich von Null abweichen. Eher Zufall ist es, dass die Mehrheit der empfängerspezifischen IFBs ein negatives Vorzeichen besitzt. Die Standardabweichungen auf dem Niveau von mehreren Zentimetern zeugen gleichzeitig von einer großen Streuung der in die Mittelbildung eingegangenen IFBs. Für einen lösungstypspezifischen Vergleich können nur die IFBs von Stationspaaren, die mit Empfängern von Typ JPS Legacy arbeiten, herangezogen werden. Während die Standardabweichungen der beiden entsprechenden IFBs auf einem vergleichbaren Niveau liegen, weichen die IFBs selbst um mehr als 1 cm voneinander ab.

Tab. 5.9: Relative $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen A und B für Stationspaare mit identischen Empfängertypen

Empfänger	Lösungstyp	Anzahl	IFB [cm]	Standardabweichung [cm]
Javad TRE_G3T Delta	B	2	-3,2	0,6
JPS Legacy	A	20	-1,4	5,2
	B	35	-0,2	5,5
Leica GR10	A	2	0,7	0,1
Leica GRX1200+GNSS	A	23	0,7	1,7
Leica GRX1200 GG PRO	A	66	1,2	4,8
Novatel OEMV-3	A	21	0,0	1,3
TPS E_GGD	B	6	1,0	14,3
TPS NET-G3	B	2	-8,5	0,1
TPS Odyssey E	B	2	-0,6	0,0
Trimble NetR5	A	45	-0,8	1,9
Trimble NetR8	A	3	-0,7	1,8
	B	2	-0,4	0,0

Trotz der Tatsache, dass lediglich die $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ von Stationspaaren mit identischem Empfängertyp analysiert wurden, lässt sich sowohl aus den mittleren $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ aller 11 Empfängertypen als auch aus den dazugehörigen Standardabweichungen schlussfolgern, dass die GLONASS-Melbourne-Wübbena-Linearkombination nur unter besonderen Voraussetzungen zur Lösung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten geeignet ist.

Aufgrund des zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahrens (vgl. Abschnitt 3.5) führen Probleme bei der Festsetzung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten automatisch auch zu Schwierigkeiten bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination, d. h. die Festsetzungsquote der *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten ist niedriger als erwartet. Infolgedessen erscheint eine kombinierte *fixed*-PPP-Lösung nur unter erschwerten Bedingungen realisierbar. Alternativ kann die *Widelane*-Linearkombination, die jedoch unter dem Einfluss der ionosphärischen Refraktion steht, zur Festsetzung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten verwendet werden.

5.4.5 Lösungstyp C bis H

Entsprechend Tabelle 5.7 wurden auch solche Melbourne-Wübbena-Linearkombination gebildet und letztlich IFBs bestimmt, bei denen die verwendeten FCBs aufbauend auf einem anderen Code-Typ auf der ersten Frequenz abgeleitet wurden. Folglich sind DCB_{P1C1} zu berücksichtigen. Im Fall der Lösungstypen F, G und H erfolgt die Berücksichtigung bei der Ableitung der FCBs. Bei den verwendeten DCB_{P1C1} handelt es sich einerseits um die von CODE zur Verfügung gestellten DCB_{P1C1}^{CODE2} -Korrekturen (Lösungstyp C und F) und andererseits wurden die im Abschnitt 5.3.3 bestimmten stationsspezifischen DCB_{P1C1}^{TUD} zur Korrektur der C₁-Codebeobachtungen herangezogen (Lösungstyp D und E sowie Lösungstyp G und H). Hierbei wurde zusätzlich differenziert, inwieweit bei deren Berechnung dem frequenzabhängigen Einfluss Rechnung getragen wurde (DCB_{P1C1}^{TUD1} oder DCB_{P1C1}^{TUD2}).

Beispielhaft veranschaulicht Abbildung 5.19 die mittleren $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ inklusive den dreifach überhöhten Standardabweichungen aller acht Lösungstypen von vier Stationspaaren. Beide Stationen eines Stationspaares sind mit dem selben Empfängertyp ausgestattet. Auf den Stationen OSLS und TRDS kamen Empfänger vom Typ Trimble NetR5 zum Einsatz. Alle anderen Stationen arbeiteten mit JPS Legacy-Empfängern. Wie vermutet liegen die verschiedenen IFBs eines Stationspaares auf einem ähnlichen Niveau. Mit Ausnahme des $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ des Lösungstyps A des Stationspaares DIEP-GOET bewegen sich die Tag-zu-Tag-Variationen im Bereich weniger Millimeter. Zugleich gibt es aber Differenzen zwischen den IFBs der acht Lösungstypen, die normalerweise das Niveau von einigen wenigen Millimetern nicht übersteigen. Im Fall der Lösungstypen E und H sind allerdings größere Abweichungen erkennbar, da bei der Ableitung der entsprechenden DCB_{P1C1}^{TUD2} der frequenzabhängige Einfluss durch eine zusätzliche Unbekannte mitgeschätzt wurde. Zudem zeigt sich, dass mit den von CODE zur Verfügung gestellten DCB_{P1C1}^{CODE2} zum Teil deutlich schlechtere GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquoten erzielt werden. Bezogen auf die beiden Stationspaare ERLA-WT21 und OSLS-TRDS und den Lösungstyp C liegt diese bei 34% bzw. 69%, sodass für keines der beiden Stationspaare ein $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ berechnet werden konnte.

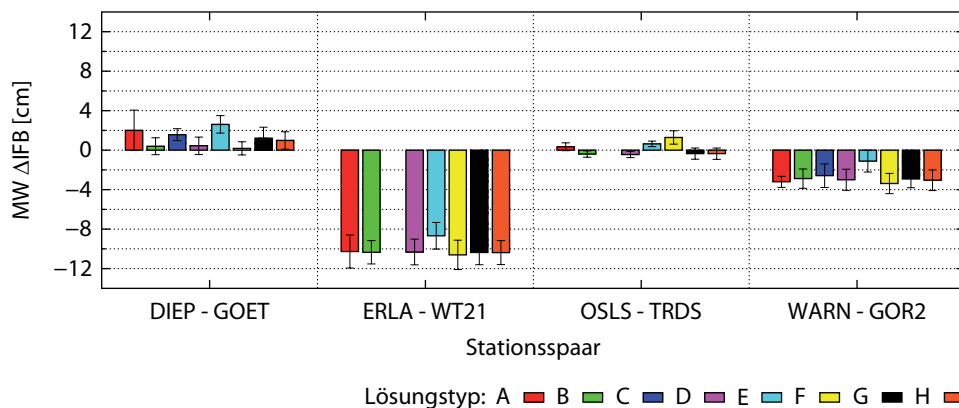


Abb. 5.19: Relative $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination aller acht Lösungstypen

Aus den mittleren IFBs aller Stationspaare und Lösungstypen wurden abschließend mittlere IFBs pro Empfänger- und Lösungstyp abgeleitet. Entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 5.4.4 ist hierbei zu beachten, dass die Vorzeichen der mittleren stations- und lösungstypspezifischen IFBs davon abhängig sind, von welcher der beiden Stationen die Beobachtungen prozessiert wurden

und von welcher der beiden Stationen die notwendigen FCBs stammen. Für die vorgenommene statistische Auswertung wurde die Festsetzung getroffen, dass jeweils die Station mit dem im Alphabet zuerst vorkommenden Namen an erster Stelle steht. Erfüllt ein Stationspaar diese Konvention nicht, erfolgte ein Tausch der Vorzeichen der mittleren IFBs des entsprechenden Stationspaares. Die mittleren IFBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination von sechs verschiedenen Empfängertypen verdeutlichen in Verbindung mit den aus der statistischen Analyse resultierenden Standardabweichungen die gute Übereinstimmung der empfängerspezifischen IFBs (Tabelle 5.10). Gleichzeitig bestätigen die zum Teil deutlich von Null abweichenden IFBs sowie die große Streuung der in die Mittelbildung eingegangenen IFBs die Schlussfolgerungen in Abschnitt 5.4.4, wonach die GLONASS-Melbourne-Wübbena-Linearkombination nur unter besonderen Voraussetzungen zur Lösung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten geeignet ist.

5.4.6 Langzeitstabilität

Trotz der Erkenntnis aus den vorangegangenen Abschnitten, dass die GLONASS-Melbourne-Wübbena-Linearkombination nur unter besonderen Voraussetzungen zur Lösung der GLONASS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten geeignet ist, soll zum Abschluss dieses Kapitels die Langzeitstabilität der $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ analysiert werden. Zur Untersuchung der Langzeitstabilität wurden die im Abschnitt 4.2.2 genannten Datensätze verwendet. Hierbei sind nur solche Beobachtungen und FCBs miteinander kombiniert wurden, deren Melbourne-Wübbena-Linearkombination auf dem selben Code-Typ auf der ersten Frequenz aufbauen (vgl. Lösungstyp A und B in Tabelle 5.7). Insgesamt gibt es 290 mögliche Kombinationen von Stationen.

Wiederum war ein Vorverarbeitungsschritt, der der Berechnung von a priori-Korrekturen dient, notwendig. Aufbauend auf der im Abschnitt 5.4.3 genannten zweiten Variante erfolgte die Bestimmung nur für solche Zeiträume, in denen auf beiden Stationen keine Änderungen am Instrumentarium gab. Je weniger Wechsel an den Empfängern und/oder an den Antennen vorgenommen wurden, desto größer waren die Zeitspannen, anhand deren Daten die Berechnung der a priori-Korrekturen erfolgte. Insgesamt ergeben sich maximal zweimal 488 Tageslösungen pro Stationspaar. Um die Weiterverarbeitung von schlecht bestimmten IFBs auszuschließen, wurden Tageslösungen mit einer GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote unter 80 % eliminiert. Insbesondere Tageslösungen, die mit Beobachtungen oder FCBs von EFBG, HEL2 und HOL2 gebildet wurden, erfüllen diese Forderung entweder gar nicht bzw. ist die Anzahl an relevanten Tageslösungen vergleichbar gering.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.20 die $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ von vier Stationspaaren. Jedes Stationspaar war mit dem selben Empfängertyp ausgestattet, die über den gesamten Untersuchungszeitraum nicht gewechselt wurden. Bei drei der vier Stationspaare kamen Empfänger vom Typ JPS Legacy zum Einsatz. Jeweils ein Empfänger vom Typ Leica GRX1200 GG PRO war auf den Stationen BADH und EUSK verbaut. Aufgrund von zahlreichen, meist auf beiden Stationen gleichzeitig stattgefundenen Firmware-Updates unterteilt sich die Zeitreihe dieses Stationspaares in vergleichsweise viele und zum Teil sehr kurze Blöcke. In Folge von Antennenwechsel ergeben sich jeweils zwei Blöcke für die Zeitreihen der drei anderen Stationspaare.

Tab. 5.10: Relative $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination der Lösungstypen C bis H für Stationspaare mit identischen Empfängertypen

Empfänger	Lösungstyp	Anzahl	IFB [cm]	Standardabweichung [cm]
Javad TRE_G3T Delta	D	2	-3,1	0,1
	E	1	-3,1	
JPS Legacy	C	23	-0,6	4,4
	D	33	-0,3	5,6
	E	33	-0,4	6,0
	F	25	-0,7	5,1
	G	34	-0,3	5,5
	H	29	-1,4	5,2
TPS E_GGD	C	2	10,5	6,5
	D	5	-1,7	14,3
	E	5	3,8	13,6
	F	2	10,4	6,7
	G	4	2,1	13,2
	H	4	2,1	13,4
TPS NET-G3	D	2	-8,5	0,1
	E	2	-7,9	3,3
	G	2	-8,7	0,0
	H	2	-8,6	0,1
TPS Odyssey E	C	1	-3,5	
	D	1	-0,4	
	E	1	3,7	
	F	1	-3,4	
Trimble NetR8	C	3	-6,6	10,3
	D	2	-0,4	0,1
	E	2	-0,1	1,0
	F	1	1,3	
	G	2	-0,4	0,1
	H	2	-0,4	0,1

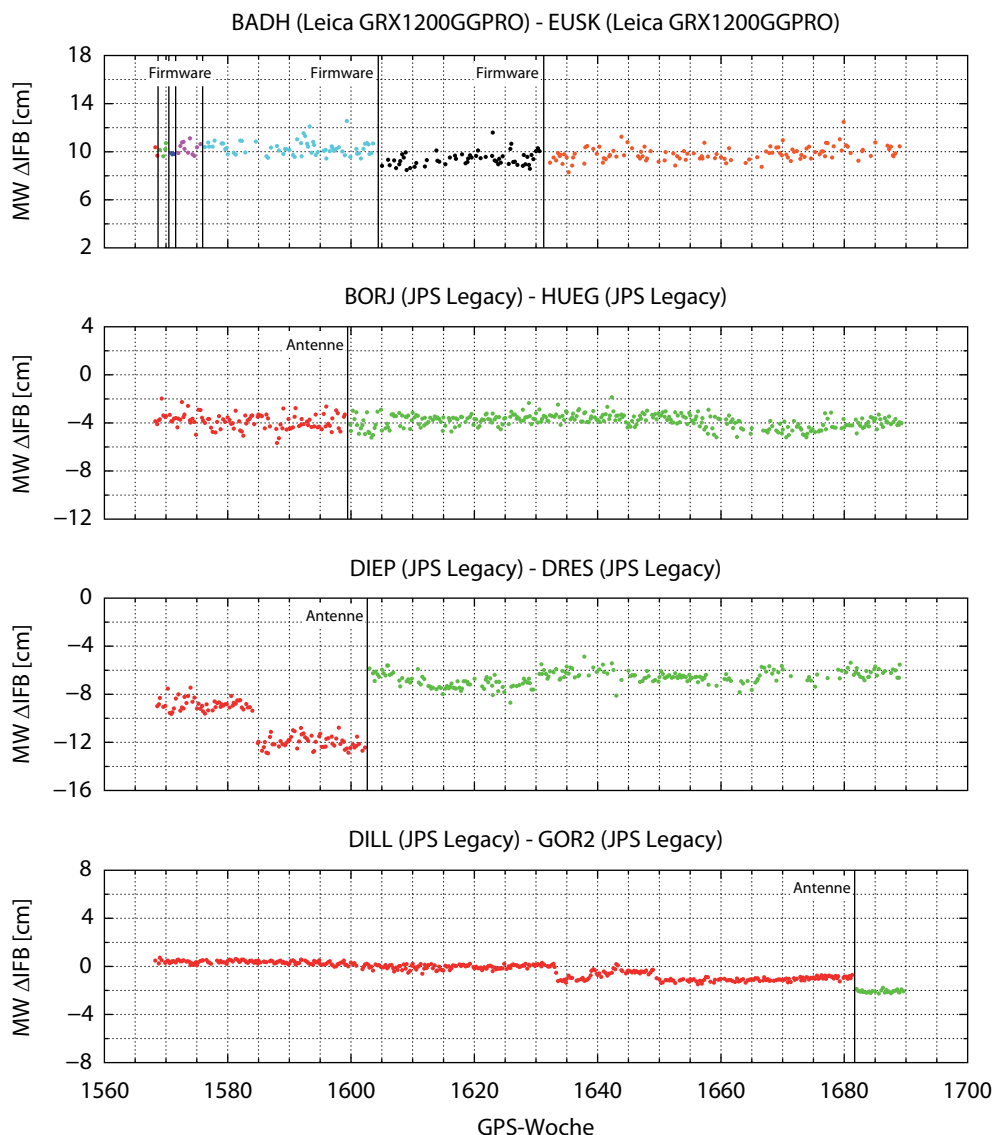


Abb. 5.20: Langzeitstabilität der relativen $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination

Obwohl es sich bei drei Zeitreihen um die IFBs von Stationspaaren handelt, auf denen Empfänger vom Typ JPS Legacy zum Einsatz gekommen sind, zeigen sich deutliche Unterschiede in den IFB-Zeitreihen. Dies ist umso unerklärlicher, da bis zum markierten Antennenwechsel auf allen sechs Stationen eine Antenne vom gleichen Typ (TPSCR3_GGD) zum Einsatz kam. Die Ergebnisse bestätigen damit die Erkenntnisse der beiden vorangegangenen Abschnitte. Gleichwohl wird deutlich, dass Antennenwechsel nicht unbedingt zur Änderung des IFBs führen müssen. Obwohl auf den Stationen BORJ und DRES zu nahezu gleichen Zeitpunkten ein Wechsel der Antenne vom Typ TPSCR3_GGD zum Typ LEIAR25.R3 erfolgte, ändern sich die IFBs im Fall des Stationspaares BORJ-HUEG nicht. Im Fall des Stationspaares DIEP-DRES resultiert aus dem identischen Antennenwechsel eine Änderung des IFBs von 3 cm gegenüber dem ursprünglichen Niveau.

Auffällig ist der Sprung der IFBs im ersten Block des Stationspaares DIEP-DRES. Die LOG-Dateien beider Stationen verzeichnen lediglich den schon genannten Antennenwechsel auf der Station DRES

im September 2010. Dennoch weisen die IFBs nach dem 22. Mai 2010 (DOY 142/2010) ein um -3 cm verändertes Niveau auf, wobei die zeitliche Stabilität der IFBs unberührt bleibt. Da dieses Verhalten in allen IFB-Zeitreihen zu beobachten ist, die mit Beobachtungen bzw. FCBs der Station DRES gebildet wurden, ist davon auszugehen, dass der Sprung durch das Instrumentarium der Station DRES hervorgerufen wird.

Zwei Sprünge, die ebenfalls nicht durch Einträge in den LOG-Dateien zu erklären sind, sind im ersten Block der Zeitreihe des Stationspaares DILL-GOR2 ersichtlich. Im Vergleich zu den IFBs der Stationspaare BADH-EUSK, BORJ-HUEG und DIEP-DRES weisen die IFBs des Stationspaares DILL-GOR2 eine deutlich bessere Wiederholgenauigkeit auf. Unter Berücksichtigung der beiden Sprünge gilt für die IFBs von DILL-GOR2 eine Reproduzierbarkeit von zum Teil unter einem Millimeter. Standardabweichungen im Bereich von 5 mm wurden für die IFBs der drei anderen Stationspaare ermittelt.

Abschließend wurden aufbauend auf den $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ aller Stationspaare für jedes Stationspaar Standardabweichungen berechnet. Um den Einfluss von nicht erklärbaren Sprüngen in den Zeitreihen zu minimieren, erfolgte die Berechnung auf der Basis von Teilstücken, die die IFBs von 14 Tagen beinhalten. Zudem lässt sich auf diese Weise auch ein besserer Zusammenhang mit den Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte herstellen. Mehr als 6000 Teilstücke bildeten letztlich die Grundlage für die Ableitung der Wiederholgenauigkeiten (Abbildung 5.21). 74 % bzw. 94 % aller IFBs weisen eine Standardabweichung kleiner 5 mm bzw. 1 cm auf. Deutlich größere Tag-zu-Tag-Variationen sind eher die Ausnahme, wenngleich es vereinzelt Wiederholgenauigkeiten im Bereich von 2 cm bis 5 cm gibt.

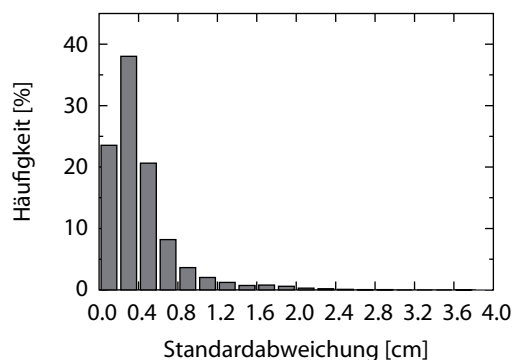


Abb. 5.21: Wiederholgenauigkeit der relativen $IFB_{\Phi, MW}$ der Melbourne-Wübbena-Linearkombination

Letztlich bestätigen die ermittelten Standardabweichungen die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte. Allerdings kann es zu deutlichen Verschlechterungen in den Wiederholgenauigkeiten kommen, wenn die IFBs eines längeren Zeitraums betrachtet werden.

6 Verwendung von verschiedenen Orbit- und Uhrkorrekturen

Die Abweichung der Satellitenorbits von der tatsächlichen Satellitenbahn und die Abweichung der Satellitenuhrkorrektur vom tatsächlichen Verhalten der Satellitenuhr sind streng genommen keine Messabweichungen. Allerdings haben sie durch ihre Einführung in eine GNSS-Auswertung eine unmittelbare Auswirkung auf die Datenauswertung. Daraus resultiert eine Abhängigkeit der Koordinatenlösung von den verwendeten Ephemeriden (Wanninger 2012b). Dieser Sachverhalt gilt für alle in Abschnitt 2.2 genannten Arten der satellitengestützten Positionsbestimmung. Aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln ist jedoch ersichtlich, dass eine differenzierte Sichtweise erforderlich ist, wenn es um den Einfluss von Restabweichungen auf eine PPP-Lösung im Vergleich zum Einfluss auf eine RTK-Lösung geht. Bei der relativen Positionsbestimmung können die Restabweichungen durch Differenzbildung - und einen entsprechenden Abstand zwischen Referenz- und Roverantenne vorausgesetzt - praktisch vollständig eliminiert werden. Im vollen Umfang wirken die Abweichungen der Satellitenorbits und der Satellitenuhrkorrekturen dagegen bei einer PPP-Auswertung. Für kombinierte GPS/GLONASS-PPP-Auswertungen stehen Orbit- und Uhrkorrekturen von vier Analysezentren (*Analysis Center, AC*) des *International GNSS Service (IGS)* zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund liegt der Schwerpunkt in diesem Kapitel auf der Verwendung verschiedener präziser GPS/GLONASS-Orbit- und Uhrkorrekturen. Im Gegensatz zu den vorherigen Kapiteln sind die Untersuchungen nicht nur auf GLONASS begrenzt. Vielmehr sollen die Ergebnisse von GLONASS (WL-Ansatz) mit den Resultaten von GPS (MW- und WL-Ansatz) verglichen werden.

6.1 Übersicht

Präzise Orbit- und Uhrkorrekturen gehören zu den Produkten, die vom IGS zur Verfügung gestellt werden. Für deren Generierung ist der IGS *Analysis Center Coordinator (ACC)* verantwortlich, da jede vom IGS angebotene Lösung mehrere AC-spezifische Lösungen voraussetzt. Diese werden vom IGS ACC gewichtet kombiniert und schlussendlich jedem GNSS-Nutzer als präzise IGS-Produkte kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die Lösungen der einzelnen ACs basieren einerseits auf unterschiedlichen Auswertansätzen und -strategien. Andererseits beruhen die Auswertungen der ACs auf unterschiedlichen Beobachtungsdaten, wenngleich der Großteil der Stationen identisch ist. Insbesondere die unterschiedliche Art und Weise, wie die Beobachtungsdaten prozessiert werden, führt automatisch zu Differenzen zwischen den Korrekturen der einzelnen ACs. Im Fall der GLONASS-Uhrkorrekturen sind die Unterschiede so groß, dass seitens des IGS kein kombiniertes Uhr-Produkt für GLONASS zur Verfügung gestellt wird. Eine mögliche Ursache für die Diskrepanz ist die Nichtberücksichtigung des *Inter-Frequency Biases (IFB)*. Dach u. a. (2012) folgend reduzieren sich die Differenzen zwischen den verschiedenen AC-spezifischen Lösungen erheblich, wenn der IFB bei der Berechnung der Uhrkorrekturen als zusätzliche Unbekannte Berücksichtigung findet. Für eine kombinierte GPS/GLONASS-PPP-Auswertung können die präzisen Orbit- und Uhrkorrekturen

daher nicht herangezogen werden, sodass auf die Produkte ein paar weniger Analysezentren zurückgegriffen werden muss.

Zum jetzigen Zeitpunkt berechnen mit CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*, Schweiz/Deutschland), ESA/ESOC (*European Space Agency/European Space Operations Centre*, Deutschland), GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum, Deutschland), IAC (*Information and Analysis Center of Navigation*, Russland) und NRCan (*Natural Resources Canada*, Kanada) fünf IGS ACs sowohl Orbit- als auch Uhrkorrekturen sowohl für GPS als auch für GLONASS (Tabelle 6.1). Mit Ausnahme der GLONASS-Uhrkorrekturen von CODE sind alle Produkte frei verfügbar, d. h. es stehen komplette Korrektionsdatensätze von vier ACs zur Verfügung.

Tab. 6.1: IGS ACs mit GPS- und GLONASS-Orbit- und Uhrkorrekturen vom Typ *final*

Analysezentrum	Korrektur	Verfügbarkeit		Auflösung
		GPS	GLONASS	
<i>International GNSS Service</i> (IGS)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	nein	300 s
<i>Center for Orbit Determination in Europe</i> (CODE)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	nein	30 s
<i>European Space Agency/European Space Operations Centre</i> (ESA/ESOC)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	ja	30 s
Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	ja	300 s
<i>Information and Analysis Center of Navigation</i> (IAC)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	ja	300 s
<i>Natural Resources Canada</i> (NRCan)	Orbits	ja	ja	900 s
	Sat.-Uhr	ja	ja	30 s

Neben den eigentlichen Korrekturen stellt deren zeitliche Auflösung ein weiteres Unterscheidungsmerkmal dar. Sobald die Beobachtungsdaten ein kleineres Intervall als die Uhrkorrekturen aufweisen, ist eine Interpolation der Uhrkorrekturen notwendig. Die für die Untersuchungen in diesem Kapitel verwendeten Beobachtungsdaten besitzen ein Intervall von 30 s, sodass eine Interpolation der IGS-, GFZ- und IAC-Uhrkorrekturen erforderlich war. Die dabei auftretenden Interpolationsabweichungen vergrößern sich mit zunehmendem Abstand vom Stützpunkt und werden durch eine zusätzliche Abgewichtung der entsprechenden Beobachtungen berücksichtigt. Das kleinste Gewicht erfährt demnach die Beobachtung, die genau in der Mitte zwischen zwei Stützpunkten liegt (Heßelbarth und Wanninger 2008).

Um einen Eindruck von der Qualität der Orbit- und Uhrkorrekturen zu bekommen, wurden die AC-spezifischen Produkte von ESA, GFZ, IAC und NRCan mit dem (kombinierten) IGS-Produkt verglichen. Hierbei ist anzumerken, dass u. a. die Orbit- und Uhrkorrekturen von ESA, GFZ

und NRCan mit einem entsprechenden Gewicht zur kombinierten IGS-Lösung beitragen. Die IAC-Produkte werden entweder vom IGS ACC nicht berücksichtigt bzw. werden sie nicht vom IAC zum IGS ACC übertragen. Im Fall der ESA- und NRCan-Uhrkorrekturen war für den Vergleich eine Ausdünnung auf ein Intervall von 5 min erforderlich, sodass sich alle in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 dargestellten Abweichungen und Standardabweichungen auf die gleiche Epochenanzahl pro Tag beziehen (Orbit: 96, Uhr: 288). Die Datensätze umfassen drei aufeinanderfolgende Wochen im Jahr 2012 (GPS-Wochen 1699 bis 1701) und umschließen den gleichen Zeitraum wie die nachfolgend verwendeten Beobachtungsdaten.

Abbildung 6.1 veranschaulicht, getrennt für die beiden Lagekomponenten (*along track*: in Flugrichtung; *cross track*: senkrecht zur Flugrichtung) und die radiale Komponente sowie für beide GNSS, die systematischen und zufälligen Abweichungen der Orbitkorrekturen von ESA, GFZ, IAC und NRCan in Bezug auf das IGS-Produkt. Abweichungen im Bereich von einem Zentimeter oder kleiner ergeben sich für die beiden Lagekomponenten und beide GNSS. Die Abweichungen der in Richtung Geozentrum zeigenden radialen Komponente sind zum Teil deutlich größer und ausnahmslos von positiver Natur. Systematiken zwischen drei und fünf Zentimetern sind im Fall von GLONASS für alle ACs erkennbar, währenddessen der gleiche Sachverhalt im Fall von GPS nur auf die IAC-Orbitkorrekturen zutrifft. Die zufälligen Abweichungen schwanken zwischen einem und vier Zentimetern. Eine um den Faktor 2 bis 3 größere Variabilität weisen die GPS-Orbitkorrekturen des IAC im Vergleich zu den GPS-Orbitkorrekturen der drei anderen ACs auf. Keine derartige Herabstufung gibt es in Bezug auf IAC im Fall von GLONASS. Im Vergleich der Standardabweichungen von ESA,

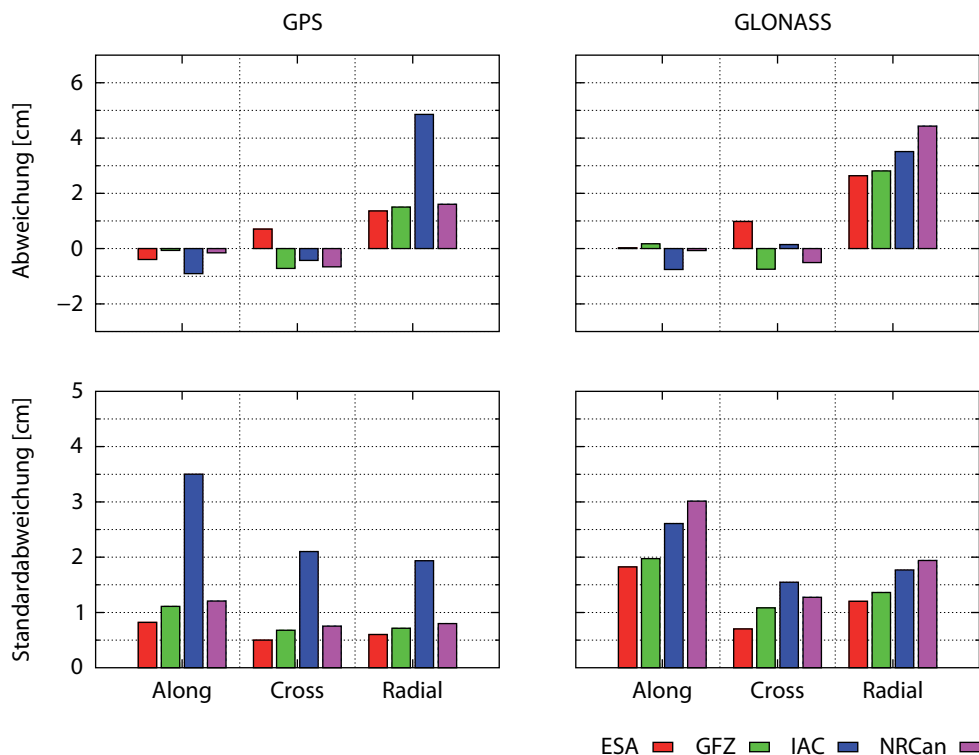


Abb. 6.1: Abweichungen und Standardabweichungen der AC-Orbitkorrekturen in Bezug auf das IGS-Produkt

GFZ und NRCan gilt, dass die ESA-Produkte stets die kleinste und die NRCan-Produkte immer die größte Variabilität besitzen, wobei im Fall von GPS die Unterschiede nur marginal sind.

Aufgrund der fehlenden kombinierten IGS-Uhrkorrekturen für GLONASS sind in Abbildung 6.2 lediglich die Abweichungen und Standardabweichungen der GPS-Uhrkorrekturen von ESA, GFZ, IAC und NRCan in Bezug auf das IGS-Produkt dargestellt. Die Abweichungen sind um zwei Größenordnungen größer als die Abweichungen der Orbitkorrekturen und liegen im Fall von ESA, GFZ und NRCan im Bereich von zwei Metern. Um den Faktor 4 kleiner sind die systematischen Abweichungen der IAC-Uhrkorrekturen. Wie das kombinierte IGS-Produkt sind auch diese an die GPS-Zeitskala angepasst. Die zufälligen Abweichungen der Uhrkorrekturen aller vier ACs übersteigen einen Dezimeter nicht.

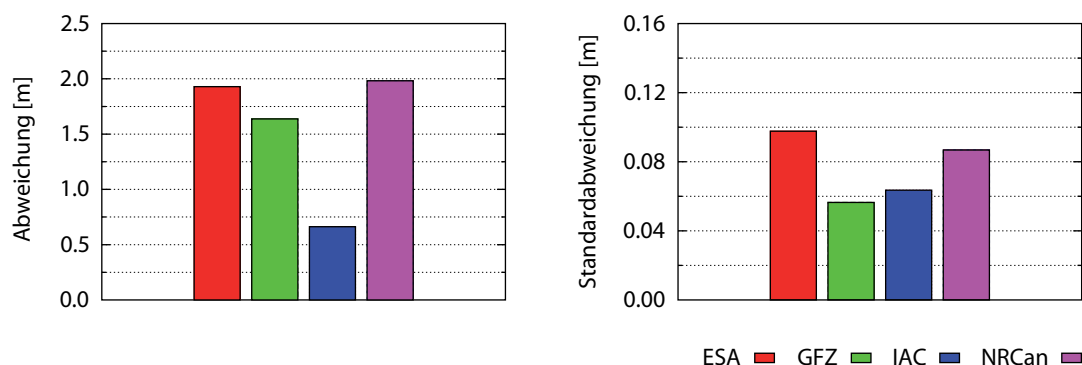


Abb. 6.2: Abweichungen und Standardabweichungen der AC-Uhrkorrekturen in Bezug auf das IGS-Produkt

Da im durchgeführten Vergleich das IGS-Produkt als Referenz fungierte, war in Bezug auf GLONASS-Uhrkorrekturen in dem Sinne keine Analyse möglich. Nichtsdestotrotz wurden die AC-spezifischen Datensätze untereinander ausgewertet. Hierbei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Produkten von ESA, IAC und NRCan. Eine systematische Abweichung von annähernd 60m besteht allerdings zwischen den GLONASS-Uhrkorrekturen der drei genannten ACs und den Korrekturwerten des GFZ. Eine Differenz im Bereich von 200 ns ist ebenso in Dach u. a. (2012) erkennbar.

6.2 Daten

Wie einleitend beschrieben, sollen Orbit- und Uhrkorrekturen verschiedener Analysezentren innerhalb einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung Verwendung finden. Ähnlich den vorangegangenen Untersuchungen kommt dabei der Ableitung von FCBs bzw. der Bestimmung des IFB eine besondere Bedeutung zu. Neben den nicht modellierten bzw. korrigierten atmosphärischen Einflüssen der iono- und troposphärischen Refraktion sind sie hauptverantwortlich für eine erfolgreiche Festsetzung sowohl der GPS- als auch GLONASS-Mehrdeutigkeiten. Um die Wirkung der iono- und troposphärischen Restabweichungen so gering wie möglich zu halten, stammen die für die Untersuchungen in diesem Kapitel verwendeten Beobachtungsdaten von deutschen GREF- und EPN-Stationen (Abbildung 6.3). Die Tatsache, dass auf der großen Mehrheit der Stationen der gleiche Empfängertyp zum Einsatz kam (Tabelle 6.2), spielt für die vorgenommenen Analysen eine

untergeordnete Rolle. Die Beobachtungsdaten umfassen drei aufeinanderfolgende Wochen im Jahr 2012 (GPS-Wochen 1699 bis 1701). Zur Minimierung des ionosphärischen Einflusses auf die *Wide-lane*-Linearkombination wurden die GIM-Modelle des IGS verwendet.

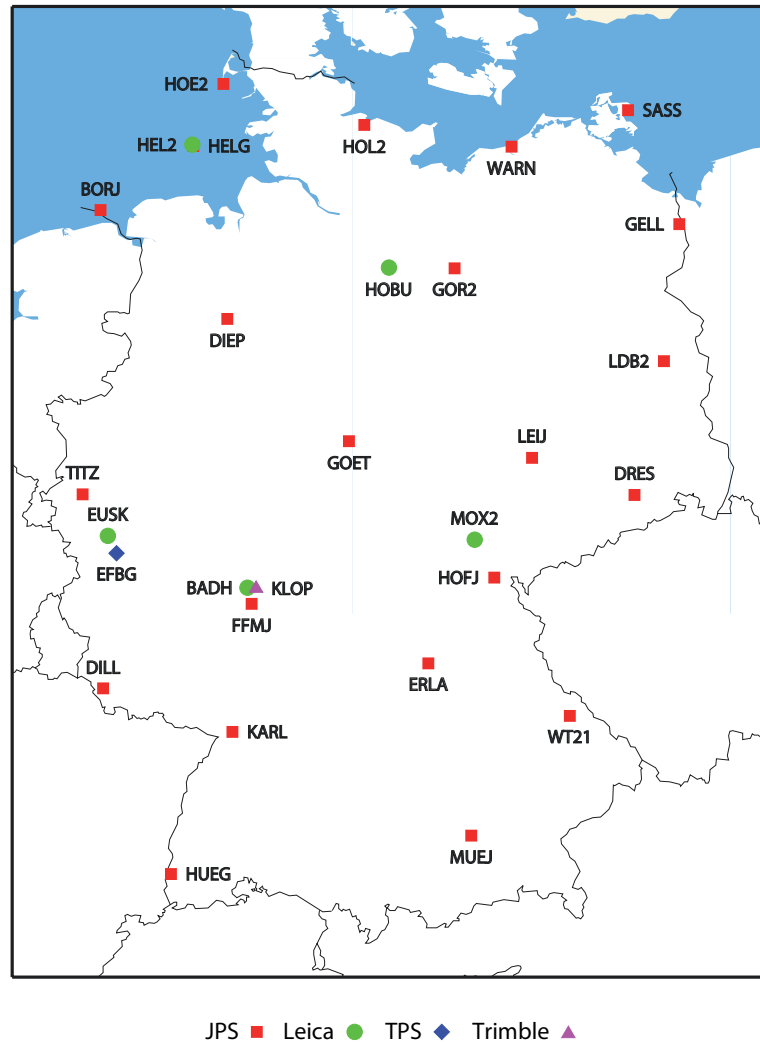


Abb. 6.3: Stationen

Tab. 6.2: Stationen

Hersteller	Typ	Anzahl
JPS	Legacy	22
Leica	GRX1200+GNSS	2
	GRX1200 GG PRO	3
TPS	E_GGD	1
Trimble	NetR5	1

6.3 Ergebnisse

Entsprechend Abschnitt 3.5 wird für GPS und GLONASS in Bezug auf die Linearkombination, mit der die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden, eine unterschiedliche Strategie verfolgt. Nichtsdestotrotz können die GPS-*Widelane*-Mehrdeutigkeiten auch auf der Basis der *Widelane*-Linearkombination festgesetzt werden. Die genannte Tatsache erlaubt sowohl einen direkten Vergleich der GPS-Ergebnisse als auch eine bessere Einordnung der GLONASS-Ergebnisse. Beide Aspekte sind Schwerpunkte in diesem Abschnitt.

6.3.1 Koordinaten

Trotz sorgfältiger Modellierung und Korrektur der die PPP-Parameterschätzung beeinflussenden Messabweichungen hängt die Qualität der geschätzten PPP-Koordinaten im großen Umfang von den Eigenschaften der Orbitkorrekturen ab. Die Untersuchungen im Abschnitt 6.1 hinsichtlich der Güte der GPS/GLONASS-Orbitkorrekturen der vier ACs zeigten, dass insbesondere die Kennzahlen der GPS-Orbitkorrekturen des IAC zum Teil deutliche Unterschiede im Vergleich zu den Kennzahlen der anderen ACs aufweisen. In erster Linie gilt dies für die Variabilität, die im Vergleich um den Faktor 2 bis 3 größer ist.

Aus diesem Grund sollen die aus einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung ohne Mehrdeutigkeitsfestsetzung resultierenden Koordinaten in diesem Abschnitt näher untersucht werden. Die Untersuchung umfasst die Analyse der Wiederholgenauigkeiten als auch der Positionsgenauigkeiten der vier AC-spezifischen Lösungen. Letztere wurden aus den täglichen Abweichungen zur IGS-Lösung (Soll-Lösung) abgeleitet. Dies erlaubt eine einfache Verknüpfung der Ergebnisse in diesem Abschnitt mit den Resultaten in Abschnitt 6.1.

Die Tag-zu-Tag-Variationen der drei Koordinatenkomponenten der vier AC-spezifischen Lösungen sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die angeführte Streuung der IAC-Ephemeriden zu einer im gleichen Verhältnis schlechteren Wiederholgenauigkeit der einzelnen Komponenten führt. Bei Verwendung der Orbit- und Uhrkorrekturen von ESA, GFZ und NRCan ergibt sich eine Reproduzierbarkeit im Bereich von 5 mm (Lage) und 8 mm (Höhe). Die entsprechenden Kennzahlen in Bezug auf die IAC-Lösungen sind um den Faktor 2 schlechter.

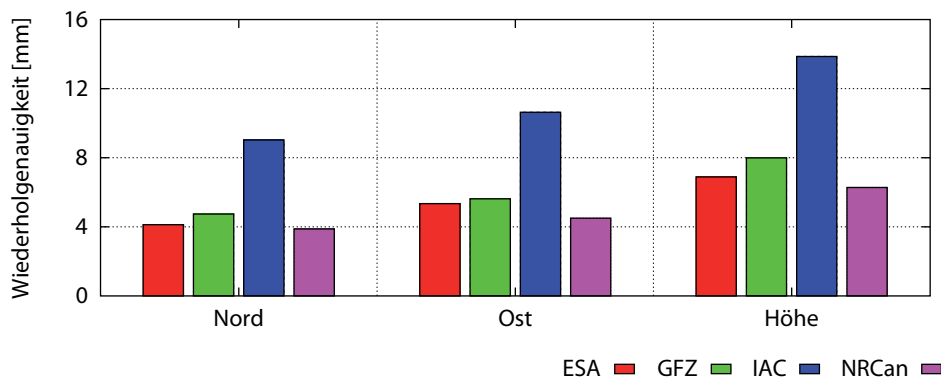


Abb. 6.4: Wiederholgenauigkeiten der AC-spezifischen Koordinaten

Die größere Streuung der IAC-Orbitkorrekturen in Verbindung mit den systematischen Abweichungen in Bezug auf die IGS-Orbitkorrekturen hat nicht nur eine schlechtere zeitliche Stabilität zu Folge, sondern führt auch zu deutlich größeren Diskrepanzen in den einzelnen Koordinatenkomponenten. Die in Abbildung 6.5 dargestellten RMS-Werte sind Standardabweichungen, die aufbauend auf den täglichen Abweichungen zwischen AC-spezifischer und IGS-Koordinate anhand von Gleichung 2.73 berechnet wurden. Wiederum sind die Kennzahlen für ESA, GFZ und NRCan auf einem vergleichbaren Niveau. Die Abweichungen zur IGS-Lösung sind in den beiden Lagekomponenten deutlich unter 10 mm und in der Höhe unter 15 mm. Die entsprechenden Kennzahlen in Bezug auf die IAC-Lösungen sind um den Faktor 2 schlechter.

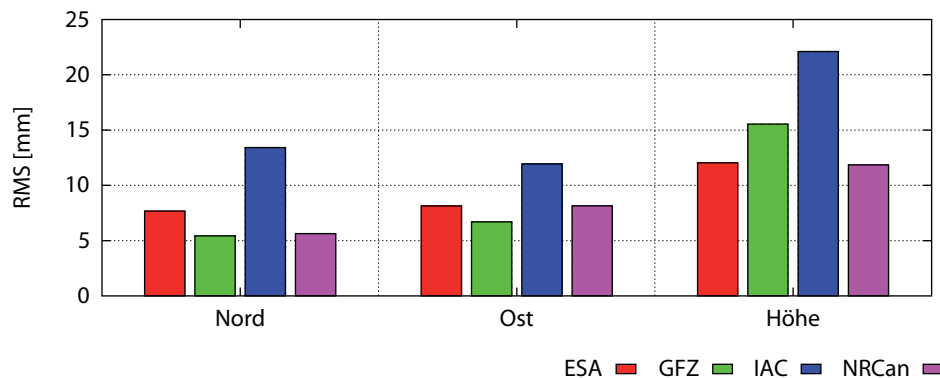


Abb. 6.5: Standardabweichungen der AC-spezifischen Koordinatenabweichungen

6.3.2 Fractional-Cycle Biases (FCB)

Obwohl generell gilt, dass die Melbourne-Wübbena-Linearkombination sowohl von Orbit- als auch von Uhrkorrekturen unabhängig ist, tragen die Ephemeriden dennoch ihren Teil zur Schätzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeit bei. Die korrigierten Beobachtungen sind die Ausgangsdaten für Algorithmen zur Detektierung und Beseitigung von Phasensprüngen (engl. *Cycle-Slips*). Je weniger Phasensprünge die Beobachtungsdaten enthalten, desto mehr kontinuierliche Beobachtungen tragen zur Schätzung einer Mehrdeutigkeit und folglich zur Ableitung des entsprechenden FCB bei. Daher sind geringfügige Unterschiede zwischen den MW-FCBs zu erwarten.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Abschnitt 5.4 erfolgt bei der Bildung der Melbourne-Wübbena-Linearkombination dahingehend keine explizite Differenzierung, ob neben P_2 -Codebeobachtungen C_1 - oder P_1 -Codebeobachtungen zur Bildung der *Code-Narrowlane*-Linearkombination verwendet werden. Ständen sowohl C_1 - als auch P_1 -Codebeobachtungen zur Verfügung, wurde den präzisen Codebeobachtungen der Vorrang gegeben. Folglich wurden im Fall des nur für GPS untersuchten MW-Ansatzes auch nur die Beobachtungen und FCBs von Stationen miteinander kombiniert, deren Codebeobachtungen auf der ersten Frequenz vom gleichen Typ sind.

Zunächst wurden für jeden Tag des Untersuchungszeitraums für alle Stationen FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination berechnet und anschließend zu stationsspezifischen MW-FCBs zusammengefasst. Die MW-FCBs von fünf GPS-Satelliten von vier Stationen sind beispielhaft in Abbildung 6.6 dargestellt. Im Fall von SASS (JPS Legacy) und EFBG (TPS E_GGD) gründet die *Code-Narrowlane*-Linearkombination auf den präzisen Codebeobachtungen, während die Empfänger von

EUSK (Leica GRX1200 GG PRO) und KLOP (Trimble NetR5) auf der ersten Frequenz lediglich die ungenaueren C_1 -Codebeobachtungen zur Verfügung stellen. Wenngleich geringfügige Unterschiede in Bezug auf die AC-spezifischen FCBs eines einzelnen Satelliten erkennbar sind, wird die Unabhängigkeit von den innerhalb der PPP-Auswertung verwendeten präzisen Ephemeriden zudem durch die FCBs verdeutlicht, die aufbauend auf *Broadcast*-Ephemeriden berechnet wurden. Hierbei wird differenziert, ob diese eigenständig oder in Verbindung mit SBAS-Korrekturen verwendet wurden. Entsprechend der geographischen Verteilung der Stationen und der eingeschränkten Gültigkeit der SBAS-Korrekturen für ein bestimmtes Servicegebiet (vgl. Abschnitt 2.1.4) handelt es sich bei den SBAS-Korrekturen um die vom *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) zur Verfügung gestellten Korrekturen.

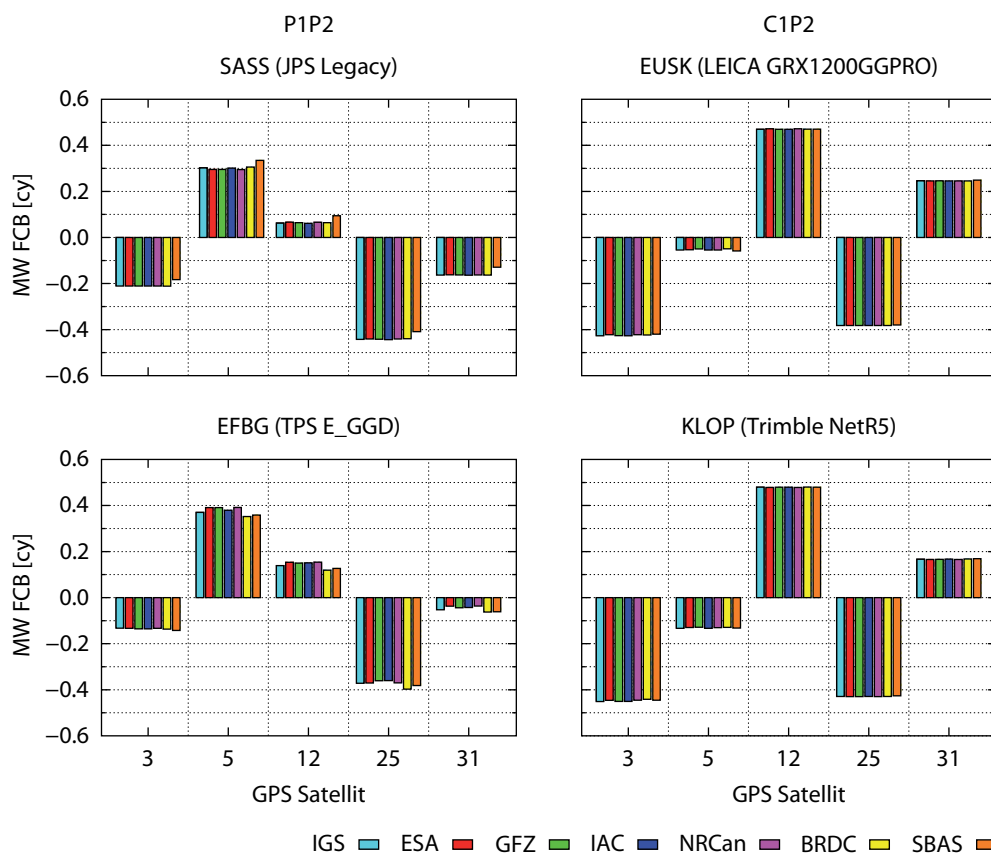


Abb. 6.6: GPS-FCBs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Referenz-Satellit: G14). Zur Bildung der Code-Narrowlane-Linearkombination wurden P_1/P_2 -Codebeobachtungen (links) bzw. C_1/P_2 -Codebeobachtungen (rechts) verwendet.

Obwohl die Anzahl an Stationen und insbesondere die Anzahl an Stationen mit Leica-Empfängern in diesem Abschnitt nicht mit der für die Untersuchungen in Abschnitt 5.4.2 verwendeten Anzahl an Stationen zu vergleichen ist, so bestätigen die Untersuchungen dennoch die dort gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Inkonsistenz der Leica-spezifischen FCBs im Vergleich zu den FCBs von Stationen, auf denen Empfänger anderer Hersteller installiert waren.

6.3.3 Fractional Part (FP)

Gegenstand der Untersuchungen im Abschnitt 6.3.5 sind u. a. die Festsetzungsquoten der WL-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS in Abhängigkeit des MW- und WL-Ansatzes. Vor diesem Hintergrund sollen in diesem Abschnitt einerseits die GPS-FPs der Melbourne-Wübbena- sowie der *Widelane*-Linearkombination und andererseits die GLONASS-FPs der *Widelane*-Linearkombination analysiert werden. In Bezug auf die GLONASS-FPs wird dahingehend differenziert, ob sowohl bei der Ableitung der FCBs als auch bei der eigentlichen PPP-Auswertung die Beobachtungen mit den jeweiligen herstellerspezifischen a priori-Korrekturen aus Tabelle 3.5 korrigiert wurden. Die Verteilung der genannten FPs unter Verwendung der ESA-Orbit- und Uhrkorrekturen ist in Abbildung 6.7 in Abhängigkeit des jeweiligen GNSS dargestellt. Wie erwartet streuen die GPS-FPs der Melbourne-Wübbena-Linearkombination am wenigsten. Im Vergleich der WL-FPs lassen die GLONASS-FPs trotz a priori-Korrektur eine größere Variation erkennen.

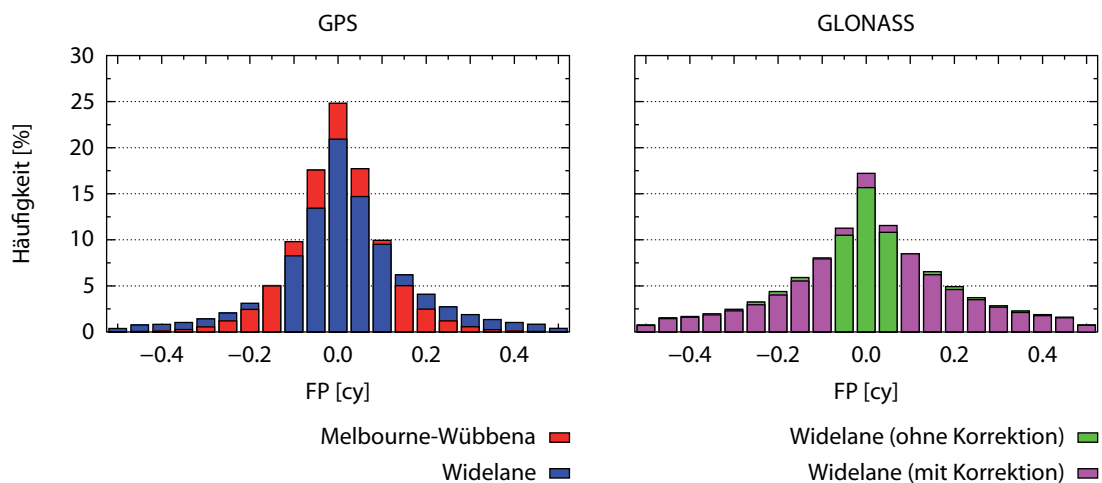


Abb. 6.7: Häufigkeitsverteilung der GPS- und GLONASS-FPs der Melbourne-Wübbena- und *Widelane*-Linearkombination unter Verwendung der ESA-Orbit- und Uhrkorrekturen

Dies belegen auch die in Tabelle 6.3 aufgelisteten Kennzahlen, mit deren Hilfe eine Vorbetrachtung auf die Mehrdeutigkeitsfestsetzung möglich ist. Die GPS-FPs sowohl der Melbourne-Wübbena- als auch der *Widelane*-Linearkombination sowie die GLONASS-FPs der korrigierten *Widelane*-Linearkombination aller vier ACs wurden hierfür zwei unterschiedlichen Tests unterzogen. Zunächst wurde geprüft, welcher Schwellwert notwendig wäre, sodass 80 % aller FPs innerhalb dieser Grenzen liegen (Tabelle 6.3a). Betrachtet man nur die Kennzahlen des jeweiligen in Abschnitt 3.5.1 favorisierten Ansatzes, d. h. GPS MW und GLONASS WL, ergibt sich für GLONASS ein doppelt so großer Bereich. Der Grenzwert im Fall von GPS WL liegt genau dazwischen. Folglich wären im Rahmen der Mehrdeutigkeitsfestsetzung in Abhängigkeit des GNSS und der Linearkombination drei unterschiedliche Schwellwerte notwendig, um ungefähr gleiche Festsetzungsquoten zu erreichen. Zudem wurde evaluiert, wie viele Mehrdeutigkeiten einen Abstand zur Ganzzahligkeit kleiner 0,15 cy aufweisen (Tabelle 6.3b). Derartige Kenngrößen werden normalerweise verwendet, um die Erfolgchancen der Mehrdeutigkeitsfestsetzung zu ermitteln. Bezogen auf diesen Grenzwert bleibt jede 7. GPS-MW-, jede 4. GPS-WL- und jede 3. GLONASS-WL-Mehrdeutigkeit ungelöst. Die Kennzahlen beider Tests weisen keinen Bezug zum AC auf und liegen auf dem selben Niveau.

Tab. 6.3: Merkmale der GPS- und GLONASS-FPs der Melbourne-Wübbena- und *Widelane*-Linearkombination

(a) Schwellwert (Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote: 80 %)

AC	GPS MW [cy]	GPS WL [cy]	GLONASS WL [cy]
IGS	0,13	0,20	—
ESA	0,13	0,19	0,25
GFZ	0,13	0,20	0,25
IAC	0,13	0,20	0,25
NRCan	0,13	0,19	0,25

(b) Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote (Schwellwert: 0,15 cy)

AC	GPS MW [%]	GPS WL [%]	GLONASS WL [%]
IGS	85	71	—
ESA	86	73	63
GFZ	86	72	63
IAC	86	72	64
NRCan	86	73	63

Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurde im Zusammenhang mit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung für alle GNSS und Linearkombinationen ein einheitlicher Schwellwert $t_{FP} = 0,15$ cy verwendet. Infolge der sequentiellen Vorgehensweise beim Festsetzen der Mehrdeutigkeiten (vgl. *Integer Bootstrapping* in Abschnitt 3.4.3) wird erwartet, dass sich die tatsächlichen von den theoretischen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquoten zum Teil deutlich unterscheiden. Dies gilt insbesondere für die GLONASS-Mehrdeutigkeiten der *Widelane*-Linearkombination, deren Festsetzungsquote von der Schätzung des IFB (genauer: Restabweichung ifb_{Φ}) profitieren sollte.

6.3.4 Inter-Frequency Biases (IFB)

Die *Widelane*- und die ionosphären-freie Linearkombination gehören zu den Linearkombinationen, deren Mehrdeutigkeiten durch die Orbit- und Uhrkorrekturen direkt beeinflusst werden. Allerdings ist ausgehend von der theoretischen Vorbetrachtung in Abschnitt 2.3.5 keine Wechselwirkung zwischen den innerhalb einer PPP-Auswertung verwendeten Ephemeriden und den frequenzabhängigen Verzögerungen der GLONASS-Phasenbeobachtungen zu erwarten.

Dass die frequenzabhängigen Effekte im Wesentlichen in Bezug zu den verschiedenen Empfängerherstellern stehen (vgl. Abschnitt 4.3.2), belegen nicht nur die $\Delta IFB_{\Phi, IF}$ von drei Stationspaaren, die beispielhaft in Abbildung 6.8 dargestellt sind, sondern auch die Übereinstimmung aller zusammengehörigen $\Delta IFB_{\Phi, IF}$ auf dem Niveau von Submillimetern.

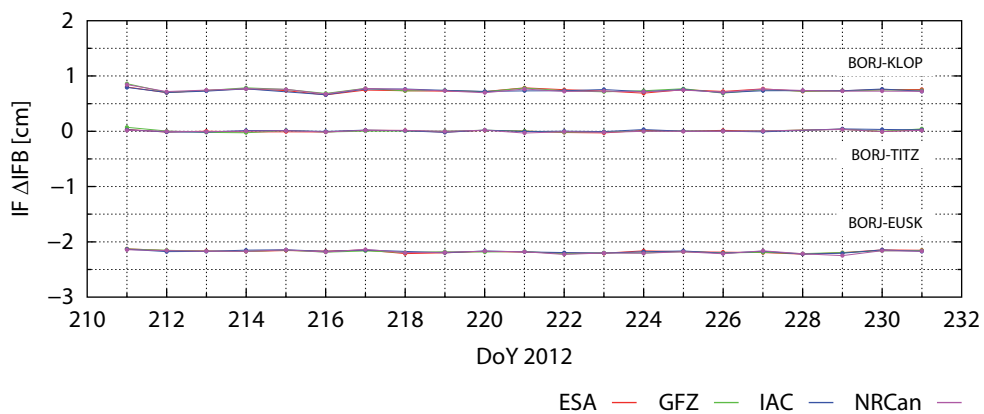


Abb. 6.8: Relative $IFB_{\Phi,IF}$ der ionosphären-freien Linearkombination

6.3.5 Mehrdeutigkeiten

Der letzte Abschnitt dieses Kapitels behandelt zwei wichtige Aspekte der Mehrdeutigkeitslösung. Einerseits werden die Festsetzungsquoten des MW- und WL-Ansatzes im Fall von GPS und lediglich die Festsetzungsquoten des WL-Ansatzes für beide GNSS analysiert. Andererseits soll die Frage beantwortet werden, welchen Einfluss die Auflösung der GLONASS-Mehrdeutigkeiten auf die Festsetzungsquoten der GPS-Mehrdeutigkeiten hat. Erwartungsgemäß sollte der Vorteil einer kombinierten GPS/GLONASS-Mehrdeutigkeitsfestsetzung gegenüber einer nur auf GPS-Beobachtungen beruhenden Mehrdeutigkeitslösung insbesondere bei kurzen Beobachtungszeiten erkennbar sein.

FCB-Ableitung und PPP-Auswertung mit einheitlichen Orbit- und Uhrkorrekturen

Die Analyse der MW- und WL-FPs in Abschnitt 6.3.3 hinsichtlich den theoretischen Festsetzungsquoten hat gezeigt, dass mit deutlichen Unterschieden sowohl zwischen MW- und WL-Ansatz als auch zwischen GPS und GLONASS zu rechnen ist. Eine zuverlässige Einschätzung der beiden Ansätze zur Mehrdeutigkeitslösung sowie eine Gegenüberstellung von GPS und GLONASS ist allerdings nur anhand der tatsächlichen Festsetzungsquoten praktikabel.

Die tatsächlichen Festsetzungsquoten der Mehrdeutigkeiten von 24 h-Datensätzen sind in Abbildung 6.9 in Abhängigkeit des GNSS und der verwendeten Linearkombination dargestellt. Zudem wird zwischen den verschiedenen ACs differenziert, wobei in Bezug auf diese keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind. Im Mittel liegen die Festsetzungsquoten für alle drei Linearkombinationen über 80 % (Tabelle 6.4). Die höchsten Quoten werden bei GPS und dem MW-Ansatz erzielt. Der WL-Ansatz ist sowohl bei GPS als auch bei GLONASS nicht ganz so erfolgreich, beide Systeme sind aber gleichwertig. Nur 4 % der MW-Mehrdeutigkeiten konnten nicht festgesetzt werden. Aufgrund von nicht-modellierten iono- und troposphärischen Effekten ist die Anzahl an ungelösten Mehrdeutigkeiten der reinen *Widelane*-Linearkombination um den Faktor 3 größer. Jede 10. (MW-Ansatz) bzw. fünfte Mehrdeutigkeit (WL-Ansatz) der ionosphären-freien Linearkombination konnte nicht festgesetzt werden.

Der Vergleich der tatsächlichen Festsetzungsquoten mit den theoretischen Festsetzungsquoten (vgl. Tabelle 6.3b) zeigt einen signifikanten Zugewinn an gelösten Mehrdeutigkeiten. Insbesondere der Zuwachs an festgesetzten GLONASS-WL-Mehrdeutigkeiten ist beachtlich. Durch die sequentielle Festsetzung der Mehrdeutigkeiten im Zusammenhang mit der Schätzung des ΔIFB_{Φ} (genauer:

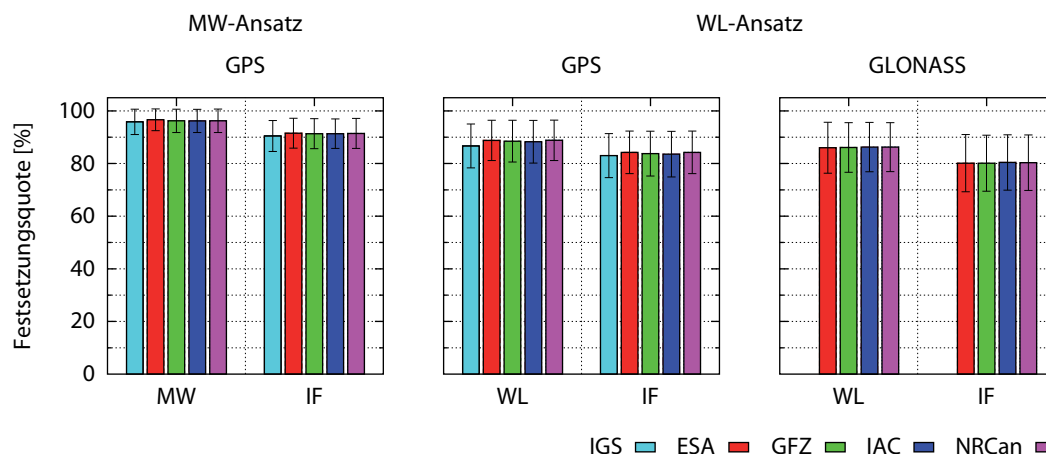


Abb. 6.9: Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS in Abhängigkeit des MW- und WL-Ansatzes

Restabweichung Δifb_{Φ}) kann die Anzahl an ungelösten GLONASS-WL-Mehrdeutigkeiten halbiert werden.

Tab. 6.4: Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS in Abhängigkeit des MW- und WL-Ansatzes

GNSS	MW-Ansatz [%]	WL-Ansatz [%]
GPS	96 / 91	88 / 84
GLONASS	— / —	86 / 80

Es ist einerseits anzumerken, dass die Berechnung der in Abbildung 6.9 und Tabelle 6.4 dargestellten GLONASS-Festsetzungsquoten ohne die entsprechenden Kennzahlen von vier Stationen (DRES, EFBG, FFMJ und MUEJ) durchgeführt wurde. Einzig im Fall von EFBG konnte ein Hinweis, der die zum Teil signifikant schlechteren Festsetzungsquoten erklärt, gefunden werden. Die für die Untersuchungen in Abschnitt 4.3 verwendeten EFBG-Zeitreihen beinhalten eine sprunghafte Verschlechterung der Festsetzungsquoten sowohl der *Widelane*- als auch der ionosphären-freien Linearkombination auf 50 %. Der Sprung steht zwar in unmittelbarem Zusammenhang mit dem im Mai 2011 auf der Station durchgeführten Empfänger- und Antennenwechsel (vgl. Tabelle 4.3), allerdings kann über die Hintergründe nur spekuliert werden.

Andererseits ist anzumerken, dass die Festsetzungsquoten der reinen *Widelane*-Linearkombination eine Entfernungsabhängigkeit aufweisen. Ungeachtet des GNSS verschlechtert sich die Mehrdeutigkeitslösung um 4 % pro 100 km. Bezogen auf Beobachtungen, die mittels WL-FCBs einer 250 km entfernten Station korrigiert werden sollen, ist mit einer WL-Festsetzungsquote von maximal 90 % zu rechnen.

FCB-Ableitung und PPP-Auswertung mit unterschiedlichen Orbit- und Uhrkorrekturen

Im Abschnitt 6.3.2 wurden ausschließlich die MW-FCBs der GPS-Satelliten untersucht. Ein entsprechender Vergleich der WL- und IF-FCBs von GPS und GLONASS ist aufgrund der verbleibenden Restabweichungen bzw. der relativ kurzen Wellenlänge deutlich schwieriger. Eine Gegenüberstellung

auf Ebene der Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten hingegen ist merklich einfacher. Hierzu wurden die FCBs, die sich aus Auswertungen mit den Orbit- und Uhrkorrekturen von GFZ, IAC und NRCan ergeben, als Korrektur innerhalb der auf ESA-Orbit- und Uhrkorrekturen basierenden Prozessierungen verwendet. Alle Einflüsse, die nicht in Bezug zu den unterschiedlichen Orbit- und Uhrkorrekturen stehen, haben insbesondere dann keine Auswirkung auf die PPP-Auswertung und die Mehrdeutigkeitsfestsetzung, wenn die FCBs aus den Beobachtungsdaten abgeleitet sind, die mit ihnen später korrigiert werden sollen.

Nichtsdestotrotz lassen die in Abbildung 6.10 dargestellten mittleren Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS im Vergleich mit den Angaben in Abbildung 6.9 bzw. Tabelle 6.4 eine signifikante Verschlechterung erkennen. Nur jede dritte GPS- bzw. jede fünfte GLONASS-Mehrdeutigkeit der ionosphären-freien Linearkombination kann festgesetzt werden. Bezogen auf die jeweiligen FCBs und deren Übereinstimmung lässt sich eine solche nur im Fall der GPS-WL-FCBs feststellen.

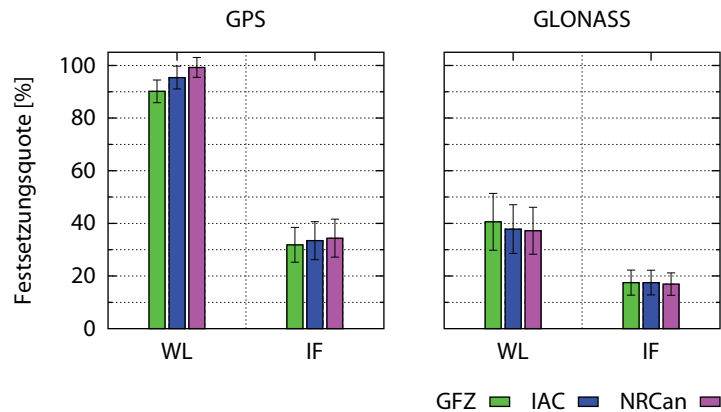


Abb. 6.10: Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS

Die in Tabelle 6.5 dargestellten mittleren Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS aller möglichen AC-Kombinationen bestätigen die zuvor gewonnenen Erkenntnisse. Lediglich im Fall der GPS-WL-FCBs lässt sich eine gewisse Übereinstimmung feststellen.

Tab. 6.5: Festsetzungsquoten der WL- und IF-Mehrdeutigkeiten von GPS und GLONASS

GNSS	AC	ESA [%]	GFZ [%]	IAC [%]	NRCan [%]
GPS	ESA	—	88 / 32	93 / 34	97 / 35
	GFZ	88 / 32	—	90 / 32	83 / 32
	IAC	91 / 33	89 / 32	—	90 / 32
	NRCan	100 / 38	82 / 31	88 / 31	—
GLONASS	ESA	—	41 / 18	38 / 18	37 / 17
	GFZ	38 / 17	—	35 / 16	42 / 18
	IAC	35 / 16	35 / 16	—	37 / 17
	NRCan	36 / 16	41 / 18	37 / 16	—

Konvergenzverhalten

Für eine Verkürzung der Konvergenzzeit ist eine hohe Mehrdeutigkeitsfestsetzungsquote der ionosphären-freien Linearkombination wichtig. Im Kontext der Arbeit können zusätzliche GLONASS-Beobachtungen hierzu einen entscheidenden Beitrag liefern, da sie zur Stabilisierung des funktionalen Modells beitragen. Jegliche Verbesserungen des funktionalen Modells wirken sich auch positiv auf die Festsetzung der GPS-Mehrdeutigkeiten aus. Dies gilt umso mehr, je kürzer die Beobachtungsdauer ist.

Vor diesem Hintergrund wurden die 24-stündigen Beobachtungen des ersten Tages im Untersuchungszeitraum in Blöcke von 5, 10 bis 60 Minuten unterteilt. Anschließend erfolgten zwei Prozessierungen im PPP-Modus: zum einen PPP-Auswertungen ohne Mehrdeutigkeitslösung zur Ableitung der notwendigen FCBs und zum anderen PPP-Auswertungen mit Festsetzung der Mehrdeutigkeiten. In beiden Fällen wurde zwischen einer reinen GPS- und einer kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung unterschieden. Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung gründet im Fall von GLONASS auf dem WL-Ansatz und im Fall von GPS auf dem MW-Ansatz. Letzteres ist gleichbedeutend mit einem zwei-stufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren, welches frei von ionosphärischen Einflüssen 1. Ordnung ist. PPP-Auswertungen erfolgten nur dann, wenn die zur Korrektur verwendeten FCBs von einer Station stammen, deren Entfernung kleiner als 200 km ist.

Von daher ist die Erhöhung der Festsetzungsquote der GPS-Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination unmittelbar auf die zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen und die erwähnte Stabilisierung des funktionalen Modells zurückzuführen (Abbildung 6.11). Im Vergleich der ACs ergeben sich bei Verwendung der Orbit- und Uhrkorrekturen von ESA und NRCan geringfügig bessere Festsetzungsquoten. Ursächlich für die Differenzen ist das Intervall der Uhrkorrekturen und deren unumgängliche Interpolation, sobald die Uhrkorrekturen ein größeres Intervall als die Beobachtungsdaten aufweisen. Die aus der Interpolation resultierenden Abweichungen haben einen umso größeren Einfluss, je kürzer die Beobachtungsdauer ist (Heßelbarth und Wanninger 2008). Eine Interpolation der Uhrkorrekturen ist bei Verwendung der Orbit- und Uhrkorrekturen von GFZ und IAC notwendig (vgl. Tabelle 6.1). Die Anzahl an ungelösten GPS-IF-Mehrdeutigkeiten

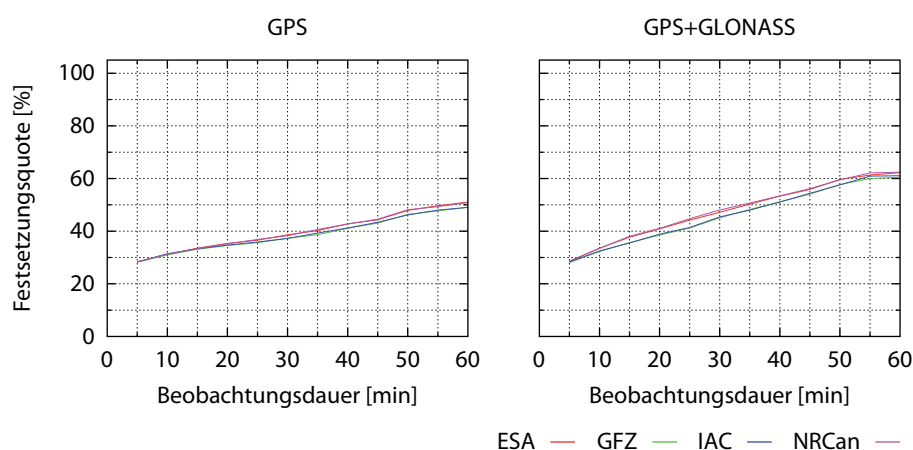


Abb. 6.11: Festsetzungsquoten der IF-Mehrdeutigkeiten von GPS, unterschieden in reine GPS- und kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung

einer kombinierten GPS/GLONASS- gegenüber einer reinen GPS-Auswertung reduziert sich bei Beobachtungszeiten kleiner einer Stunde um bis zu 25 %.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Globale Satellitennavigationssysteme (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) ermöglichen präzise Positionsbestimmungen mit Genauigkeiten auf dem Niveau von Zentimetern oder besser. Relative Auswertetechniken wie *Real-Time Kinematic* (RTK) haben gegenüber absoluten Auswerteverfahren wie *Precise Point Positioning* (PPP) den Vorteil, dass sich die Einflüsse von Messabweichungen deutlich reduzieren. Allerdings erfordern RTK-Anwendungen ein relativ dichtes Netz von Referenzstationen mit maximalen Abständen von wenigen 10er Kilometern. PPP hingegen kommt ohne die direkte Verwendung der Beobachtungsdaten von regionalen Referenzstationen aus. Im Gegenzug ist die Konvergenzzeit aber deutlich schlechter als bei RTK. Voraussetzung für die Verkürzung der PPP-Konvergenzzeit ist die Festsetzung der geschätzten Mehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte.

Die PPP-Mehrdeutigkeitslösung verlangt ein robustes funktionales Modell und beruht auf einem zweistufigen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren, welches frei von ionosphärischen Einflüssen 1. Ordnung ist. Die sowohl auf Phasen- als auch auf Codebeobachtungen basierende Melbourne-Wübbena (MW)-Linearkombination erlaubt hierbei eine einfache Festsetzung der *Widelane* (WL)-Mehrdeutigkeiten. Die eigentliche Parameterschätzung baut auf der ionosphären-freien (IF) Linearkombination, die nun mit der deutlich größeren *Narrowlane*-Wellenlänge berechnet wird, auf (MW-Ansatz). Die Erfolgchancen der Mehrdeutigkeitslösung hängen insbesondere von der Qualität der *Fractional-Cycle Biases* (FCB) ab. Diese werden aus den Beobachtungen einer einzelnen Referenzstation oder eines Referenzstationsnetzes abgeleitet und müssen für jede innerhalb von PPP-Auswertungen verwendete Linearkombination zur Verfügung stehen.

Zur Stabilisierung des im Normalfall lediglich auf den Beobachtungsdaten des amerikanischen *Global Positioning System* (GPS) beruhenden funktionalen Modells können die Beobachtungsdaten des russischen *GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) beitragen. Im Gegensatz zu GPS, das unterschiedliche *Pseudo Random Noise* (PRN)-Codes zur Identifizierung der einzelnen Satelliten einsetzt (*Code Division Multiple Access*, CDMA), übertragen alle GLONASS-Satelliten ihre Signale auf leicht voneinander abweichenden Frequenzen (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA). Infolgedessen weisen die instrumentell bedingten Signalverzögerungen, die in erster Linie durch die digitale Signalverarbeitung im Empfänger zu begründen sind, im Fall von GLONASS eine Abhängigkeit von der Frequenz auf (*Inter-Frequency Bias*, IFB).

In Bezug auf die Melbourne-Wübbena-Linearkombination ist die Beeinflussung durch instrumentelle Verzögerungen gleichzusetzen mit einer kombinierten Beeinträchtigung durch instrumentelle Phasen- und Codeverzögerungen. Untersuchungen der Beobachtungsdaten von 169 EPN- und GREF-Stationen, auf denen 20 verschiedene Empfängertypen von acht Herstellern zum Einsatz kamen, zeigen, dass $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ zwar geschätzt werden können. Doch selbst die $\Delta IFB_{\Phi, MW}$ von Stationspaaren mit identischen Empfängertypen weichen zum Teil deutlich von Null ab. Standardabweichungen der empfängerspezifischen IFBs auf dem Niveau von mehreren Zentimetern verdeutlichen zudem

die enorme Streuung. Die Ergebnisse zeigen, dass das konventionelle Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren nur bedingt auf GLONASS übertragbar ist. Im Rahmen der Arbeit wurde daher eine alternative PPP-Mehrdeutigkeitsfestsetzungsstrategie erarbeitet, die ohne die direkte Verwendung von Codebeobachtungen auskommt. Zur Festsetzung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten wird statt der Melbourne-Wübbena-Linear kombination die pure *Widelane*-Linear kombination genutzt (WL-Ansatz). Letztere unterliegt allerdings dem gesamten Einfluss der ionosphärischen Refraktion, sodass die Einführung von ionosphärischen Korrekturen unabdingbar ist. Mittels globaler Ionosphärenmodelle (*Global Ionospheric Maps*, GIM) wird dem ionosphärischen Effekt 1. Ordnung entgegen gewirkt. Jedoch resultieren aus der begrenzten zeitlichen als auch räumlichen Auflösung der GIM-Informationen Restabweichungen, die sich negativ auf die Mehrdeutigkeitsfestsetzung auswirken.

Die Langzeitstabilität des frequenzabhängigen Effektes auf GLONASS-Phasenbeobachtungen ist Voraussetzung für die Anwendung von linearen Modellen als auch von herstellerspezifischen a priori-Korrekturen. Mit ihnen kann ein Großteil des frequenzabhängigen Einflusses vorab entfernt werden. Ausgehend von den Beobachtungsdaten von mehr als zwei Jahren von 29 GREF-Stationen wurden absolute IFBs der ionosphären-freien Linear kombination berechnet. Für mehr als 80 % der stations-spezifischen $IFB_{\Phi,IF}$ gilt eine Wiederholgenauigkeit von besser als einem Millimeter. Antennenwechsel als auch herstellerspezifische Änderungen am Empfänger haben in den meisten Fällen keinen signifikanten Einfluss auf den IFB_{Φ} . Nichtsdestotrotz können Modifikationen am Empfänger zu Änderungen der IFB_{Φ} im Bereich von mehreren Zentimetern führen, sodass die bisherigen a priori-Korrekturen für Empfänger mit dieser Firmware ihre Gültigkeit verlieren und mit erheblichen Problemen bei der Mehrdeutigkeitslösung zu rechnen ist.

Einen Rückschluss auf die instrumentellen Verzögerungen der GLONASS-Codebeobachtungen ermöglicht die Analyse der Residuen der ionosphären-freien Code-Linear kombination, aus denen satellitenspezifische Codeabweichungen (*Code Delay*, CD) abgeleitet wurden. Die CDs können mehrere Meter erreichen und unterscheiden sich selbst für Stationen mit Empfängern desselben Herstellers zum Teil deutlich voneinander. Zumeist ist eine Modellierung der CDs als lineare Funktion der Frequenznummer möglich. Vereinzelt kommt aber auch eine Approximation mit einem Polynom höheren Grades in Betracht. Dies setzt allerdings voraus, dass die CDs als Funktion der Frequenznummer keine Unstetigkeiten oder Unregelmäßigkeiten aufweisen. Die $IFB_{C,IF}$ von Stationen mit TPS-Empfängern weisen die größte Streuung auf. In allen anderen Fällen wäre die Bestimmung eines herstellerspezifischen $IFB_{C,IF}$ praktikabel.

In Abhängigkeit vom GNSS und Satellitentyp senden Satelliten C/A- und/oder P-Codebeobachtungen aus. Infolge von instrumentellen Verzögerungen sind die Codebeobachtungen verfälscht und es bestehen zwischen ihnen satellitenabhängige Differenzen (*Differential Code Biases*, DCB). Bei PPP-Auswertungen und gleichzeitiger Verwendung der präzisen Uhrkorrekturen des *International GNSS Service* (IGS) sind insbesondere die $DCB_{P_1C_1}$ von Interesse. $DCB_{P_1C_1}$ können zum einen aus dem direkten Vergleich von C_1 - und P_1 -Codebeobachtungen bestimmt werden. Zum anderen ist eine Ableitung aber ebenso aus dem Vergleich zweier Melbourne-Wübbena-Linear kombinationen Φ_{MW,C_1P_2} und Φ_{MW,P_1P_2} , die beide mit identischen Phasenbeobachtungen gebildet werden, möglich. Die Mehrheit der berechneten GLONASS- $DCB_{P_1C_1}$ können als lineare Funktion der Frequenznummer modelliert werden, wobei für 80 % der täglichen IFB_{DCB,P_1C_1} eine Wiederholgenauigkeit kleiner 5 mm gilt. Die IFB_{DCB,P_1C_1} von Stationen mit TPS-Empfängern weisen wiederum die größte Streuung auf.

Im Rahmen einer kombinierten GPS/GLONASS-PPP-Auswertung mit Mehrdeutigkeitslösung stellt die Linearkombination zur Festsetzung der GNSS-spezifischen *Widelane*-Mehrdeutigkeiten den größten Unterschied dar. Nichtsdestotrotz kann die auf der *Widelane*-Linearkombination aufbauende Strategie alternativ auch auf GPS angewendet werden. Die Festsetzungsquoten der ionosphären-freien Linearkombination liegen in allen drei Fällen im Mittel über 80 %. Die höchsten Quoten werden bei GPS und dem MW-Ansatz erzielt. Der WL-Ansatz ist aufgrund von iono- und troposphärischen Restabweichungen sowohl bei GPS und als auch bei GLONASS nicht ganz so erfolgreich. Im Vergleich beider GNSS bleiben im Fall von GPS weniger Mehrdeutigkeiten ungelöst.

Die erhöhte Stabilität des funktionalen Modells, die von den zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen ausgeht, ist umso bedeutsamer, je kürzer die Beobachtungsdauer ist. Jegliche Verbesserungen des funktionalen Modells wirken sich ebenso positiv auf die Festsetzung der GPS-Mehrdeutigkeiten aus. Die Anzahl an ungelösten GPS-Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination reduziert sich bei Beobachtungszeiten kleiner einer Stunde um bis zu 25 %. Je mehr Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Linearkombination festgesetzt werden können, desto größer sind die Chancen zur Verkürzung der Konvergenzzeit.

Die im Rahmen der Arbeit erarbeitete und untersuchte alternative Mehrdeutigkeitsfestsetzungsstrategie zur GLONASS-Mehrdeutigkeitslösung gründet auf der Tatsache, dass die bisher zur Verfügung stehenden GLONASS-Signale ausnahmslos auf dem FDMA-Ansatz basieren. Als Folge der Modernisierung des Weltraumsegments werden die zukünftigen GLONASS-K2-Satelliten sowohl Signale nach dem FDMA- als auch Signale nach dem CDMA-Verfahren aussenden. Die Mehrdeutigkeiten der nach dem CDMA-Ansatz erzeugten Phasenbeobachtungen können wie im Fall von GPS aufbauend auf dem konventionellen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren festgesetzt werden.

Die Anzahl an operationellen Satelliten der beiden sich im Aufbau befindlichen GNSS *BeiDou Satellite Navigation System* (BDS) und GALILEO steigt kontinuierlich an. Die Hinzunahme der BDS- und/oder GALILEO-Phasen- und Codebeobachtungen in Multi-GNSS-PPP-Auswertungen erhöht abermals die Stabilität des funktionalen Modells, wodurch sich die Konvergenzzeit weiter verkürzen sollte. BDS und GALILEO setzen wie GPS ausschließlich das CDMA-Verfahren zur Identifizierung der einzelnen Satelliten ein, sodass das konventionelle Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahren zur Mehrdeutigkeitslösung verwendet werden kann.

Die Erfolgchancen der Mehrdeutigkeitsfestsetzung anhand des konventionellen Mehrdeutigkeitsfestsetzungsverfahrens hängen im Wesentlichen von der Tatsache ab, inwieweit die MW-FCBs verschiedener Empfängertypen miteinander übereinstimmen. Zukünftige Untersuchungen auf dem Gebiet der Multi-GNSS-PPP-Mehrdeutigkeitslösung müssen sich daher mit der Fragestellung beschäftigen, ob es in Bezug auf GLONASS, BDS und GALILEO vergleichbare Abweichungen zwischen den empfängerspezifischen MW-FCBs wie im Fall von GPS gibt. Die Modellierung bestehender Differenzen ist Voraussetzung für *Fixed*-PPP mit verschiedenen Empfängertypen.

Literaturverzeichnis

- Aggrey, J. und Bisnath, S. (2014). *Analysis and Modelling of Pseudorange and Carrier-phase Biases in GNSS Precise Point Positioning*. Proceedings of ION GNSS+ 2014, S. 2512–2522.
- Al-Shaery, A., Zhang, S. und Rizos, C. (2012). *An enhanced calibration method of GLONASS inter-channel bias for GNSS RTK*. GPS Solutions, 17(2):165–173.
- Banville, S., Collins, P. und Lahaye, F. (2013a). *Concepts for undifferenced GLONASS ambiguity resolution*. Proceedings of ION GNSS+ 2013, S. 1186–1197.
- Banville, S., Collins, P. und Lahaye, F. (2013b). *GLONASS ambiguity resolution of mixed receiver types without external calibration*. GPS Solutions, 17(3):275–282.
- Banville, S., Santerre, R., Cocard, M. und Langley, R. B. (2008). *Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution*. Proceedings of ION NTM 2008, S. 711–719.
- Bar-Sever, Y. E. (1996). *A new model for GPS yaw attitude*. Journal of Geodesy, 70(11):714–723.
- Bassiri, S. und Hajj, G. A. (1993). *Higher-order ionospheric effects on the Global Positioning System observables and means of modeling them*. Manuscripta Geodaetica, 18:280–289.
- Bauer, M. (2011). *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Wichmann, Berlin, Offenbach. 6., neu bearb. u. erw. Auflage.
- Becker, M. (2009). *Status der Modernisierung von GPS und GLONASS und Perspektiven weiterer GNSS*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 5(5):297–305.
- Bisnath, S. (2007). *What is carrier phase wind-up*. Inside GNSS, 2(5):32–35.
- Bisnath, S. und Gao, Y. (2009). *Precise Point Positioning: A Powerful Technique with a Promising Future*. GPS World, April 2009:43–50.
- Blewitt, G. (1989). *Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km*. Journal of Geophysical Research, 94(B8):187–203.
- Böhm, J., Niell, A. E., Tregoning, P. und Schuh, H. (2006a). *Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data*. Geophysical Research Letters, 33.
- Böhm, J. und Schuh, H. (2007). *Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis*. Journal of Geodesy, 81(6-8):403–408.
- Böhm, J., Werl, B. und Schuh, H. (2006b). *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*. Journal of Geophysical Research, 111(B2).

- Brunner, F. K., Hartinger, H. und Troyer, L. (1999). *GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA-D model*. Journal of Geodesy, 73(5):259–267.
- Cai, C. und Gao, Y. (2007). *Performance Analysis of Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS*. Proceedings of ION GNSS 2007, S. 858–865.
- Cai, C. und Gao, Y. (2013a). *GLONASS-based precise point positioning and performance analysis*. Advances in Space Research, 51(3):514–524.
- Cai, C. und Gao, Y. (2013b). *Modeling and assessment of combined GPS-GLONASS precise point positioning*. GPS Solutions, 17(2):223–236.
- Choy, S. (2011). *High accuracy precise point positioning using a single frequency GPS receiver*. Journal of Applied Geodesy, 5(2):59–69.
- Chuang, S., Wenting, Y., Weiwei, S., Yidong, L., Yibin, Y. und Rui, Z. (2013). *GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning*. GPS Solutions, 17(4):439–451.
- CODE (2012). Global Ionosphere Maps Produced by CODE. <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere>.
- CODE (2015). Receiver name lists. ftp://ftp.unibe.ch/aiub/bcwg/cc2noncc/receiver_p1c1bias.lis.
- Collins, P. (1999). *An overview of GPS inter-frequency carrier phase combinations*. Geodetic Survey Division (GSD), University of New Brunswick (UNB), Ottawa, Ontario, Canada.
- Collins, P. (2008). *Isolating and estimating undifferenced GPS Integer ambiguities*. Proceedings of ION NTM 2008, S. 720–732.
- Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F. und Heroux, P. (2010). *Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing*. Navigation, 57(2):123–135.
- Collins, P., Lahaye, F., Heroux, P. und Bisnath, S. (2008). *Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model*. Proceedings of ION GPS 2008, S. 1315–1322.
- Cooley, B. (2014). *GPS Program Update*. Proceedings of ION GNSS+ 2014, S. 2870–2885.
- Dach, R., Schaer, S. und Meindl, M. (2012). *Comparison of IGS AC GLONASS clock correction results*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Dach, R., Schmid, R., Schmitz, M., Thaller, D., Schaer, S., Lutz, S., Steigenberger, P., Wübbena, G. und Beutler, G. (2011). *Improved antenna phase center models for GLONASS*. GPS Solutions, 15(1):49–65.
- Dilssner, F., Springer, T., Gienger, G. und Dow, J. (2010). *The GLONASS-M satellite yaw-attitude model*. Advances in Space Research, 47(1):160–171.
- Dong, D.-N. und Bock, Y. (1989). *Global Positioning System Network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California*. Journal of Geophysical Research, 94(B4):3949–3966.
- Dow, J., Neilan, R. E. und Rizos, C. (2009). *The International GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems*. Journal of Geodesy, 83(3-4):191–198.

- Gabor, M. J. und Nerem, R. S. (1999). *GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences*. Proceedings of ION GPS 1999, S. 1569–1578.
- Gao, Y. und Shen, X. (2001). *Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-Based Precise Point Positioning*. Proceedings of ION GPS 2001, S. 1532–1539.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C. und Liu, J. (2008). *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*. Journal of Geodesy, 82(7):389–399.
- Geng, J., Meng, X., Dodson, A. H. und Teferle, F. N. (2010a). *Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison*. Journal of Geodesy, 84(9):569–581.
- Geng, J., Meng, X., Teferle, F. N. und Dodson, A. H. (2010b). *Performance of Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution for 1- to 4-Hour Observation Periods*. Survey Review, 42(316):155–165.
- Geng, J., Teferle, F. N., Shi, C., Meng, X., Dodson, A. H. und Liu, J. (2009). *Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data*. GPS Solutions, 13(4):263–270.
- Ghoddousi-Fard, R. (2012). *DCB estimation at NRCAN: Status and Future Plans*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Gibbons, G. (2008). *Russia Approves CDMA Signals for GLONASS, Discussing Common Signal Design*. Inside GNSS.
- GLONASS (2008). *GLONASS Interface Control Document, Version 5.1*.
- GPS (2000). *Vice President Gore Announces New Global Positioning System Modernization Initiative*.
- Gurtner, W. und Estey, L. (2007). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format, Version 2.11. <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex211.txt>.
- Gurtner, W. und Estey, L. (2009). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.01. <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex301.pdf>.
- Gurtner, W. und Estey, L. (2013). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.02. <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex302.pdf>.
- Hauschild, A. (2010). IGSMail-6319: Technical Note on SVN47 (PRN22) DCB change. <http://igsb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2010/007509.html>.
- Hauschild, A. (2012). *PRN22 (SVN47) DCB anomaly*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Herring, T. A. (1992). *Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data*. Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, S. 157–164.
- Hebelbarth, A. (2009). *GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP)*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 134:278–286.
- Hebelbarth, A. (2011). *Statische und kinematische GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 667.

- Heßelbarth, A. und Wanninger, L. (2008). *Short-term Stability of GNSS Satellite Clocks and its Effects on Precise Point Positioning*. Proceedings of ION GNSS 2008, S. 1855–1863.
- Heßelbarth, A. und Wanninger, L. (2013). *SBAS Orbit and Satellite Clock Corrections for Precise Point Positioning*. GPS Solutions, 17(4):465–473.
- Hilla (2010). The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c). <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3c.txt>.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und Wasle, E. (2008). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more*. Springer Verlag, Wien [u.a.].
- IGS (2015). IGS Products. <http://igs.org/products>. Letzter Zugriff am 28.2.2015.
- Ipatov, V. P. und Shebshaevich, B. V. (2010). *GLONASS CDMA: Some Proposals on Signal Formats for Future GNSS Air Interface*. Inside GNSS, Juli/August 2010:46–51.
- Jokinen, A., Feng, S., Schuster, W., Ochieng, W., Hide, C., Moore, T., Hill, C. und Milner, C. (2012). *Improving Fixed-ambiguity Precise Point Positioning (PPP) Convergence Time and Accuracy by using GLONASS*. Proceedings of ION GNSS 2012, S. 3708–3727.
- Joosten, P. und Tiberius, C. (2000). *Fixing the ambiguities: Are you sure they're right?* GPS World, 11(5):46–51.
- Kim, D. und Langley, R. B. (2000). *GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues*. Proceedings of 7th GNSS Workshop - International Symposium on GPS/GNSS.
- Kouba, J. (2009a). A Guide to using International GNSS services (IGS) Products. <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kouba, J. (2009b). *A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites*. GPS Solutions, 13(1):1–12.
- Kouba, J. und Heroux, P. (2001). *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products*. GPS Solutions, 5(2):12–28.
- Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.-P. und Bijac, J. (2008). *Real Time Zero-difference Ambiguities Fixing and Absolute RTK*. Proceedings of ION NTM 2008, S. 747–755.
- Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.-P., Broca, P. und Cerri, L. (2009). *Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination*. Navigation, 56(2):135–149.
- Leandro, R. F., Langley, R. B. und Santos, M. C. (2007). *Estimation of P2-C2 Biases by Means of Precise Point Positioning*. Proceedings of ION AM 2007, S. 225–231.
- Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. Wiley, Hoboken, NJ. 3. Auflage.
- Li, J., Yang, Y., Xu, J., He, H., Guo, H. und Wang, A. (2013). *Performance Analysis of Single-Epoch Dual-Frequency RTK by BeiDou Navigation Satellite System*. In: Sun, J., Jiao, W., Wu, H. und Shi, C. (Hrsg.), *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*. Lecture Notes in Electrical Engineering, 245: 133–143, Springer, Berlin, Heidelberg.

- Li, P. und Zhang, X. (2014). *Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning*. GPS Solutions, 18(3):461–471.
- Li, X. und Zhang, X. (2012). *Improving the Estimation of Uncalibrated Fractional Phase Offsets for PPP Ambiguity Resolution*. Journal of Navigation, 65(3):513–529.
- Li, X., Zhang, X. und Guo, F. (2009). *Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS*. Proceedings of ION GNSS 2009, S. 2449–2459.
- Luo, X., Richter, B. und Cole, A. (2014). *GLONASS Only and BeiDou Only RTK Positioning*. Proceedings of ION GNSS+ 2014, S. 653–661.
- MacLeod, K. (2012). IGSMail-6784: Receiver INdependent EXchange (RINEX) Format Version 3.02 Released. <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2013/007974.html>.
- Meindl, M., Schaer, S., Hugentobler, U. und Beutler, G. (2004). *Tropospheric Gradient Estimation at CODE: Results from Global Solutions*. Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(1B):331–338.
- Melbourne, W. (1985). *The Case for Ranging in GPS Based Geodetic Systems*. Proceedings of 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, S. 373–386.
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Khachikyan, R., Weber, G., Langley, R., Mervart, L. und Hugentobler, U. (2014). *IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science*. Inside GNSS, 9:42–49.
- Niell, A. E. (1996). *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*. Journal of Geophysical Research, 101(B2):3227–3246.
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York. 2., überarb. und erw. Auflage.
- Petit, G. und Luzum, B. (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36.
- Prasad, R. und Ruggieri, M. (2005). *Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems*. Artech House.
- Ray, J. (1999). IGSMail-2320: Handling mixed receiver types. <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999/msg00211.html>.
- Ray, J. (2000). IGSMail-2744: new pseudorange bias convention. <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2000/002818.html>.
- Ray, J. (2002). IGSMail-3737: C1/P1 biases for Leica and Trimble 5700 receivers. <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2002/003811.html>.
- Ray, J. und Gurtner, W. (2010). RINEX Extensions to Handle Clock Information. http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex_clock302.txt.
- Reußner, N. und Wanninger, L. (2011). *GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution*. Proceedings of ION GNSS 2011, S. 712–716.

- Reußner, N. und Wanninger, L. (2012). *GLONASS Inter-frequency Code Biases and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution*. IGS Workshop 2012. http://www.uwm.edu.pl/kaig/igs_workshop_2012/.
- Reußner, N. und Wanninger, L. (2013). *Carrier-phase Multipath Detection and Localization at GNSS Reference Stations*. GNSS Precise Point Positioning Workshop: Reaching Full Potential 2013.
- Revniviykh, S. (2012). *GLONASS Status and Modernization*. Proceedings of ION GNSS 2012, S. 538–552.
- Rho, H. und Langley, R. B. (2007). *Dual-frequency GPS Precise Point Positioning with WADGPS Corrections*. Navigation, 54(2):139–152.
- Romero, I. (2012). IGSMail-6571: CC2NONCC important software update v6.5. <http://igsb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/007761.html>.
- Roßbach, U. (2001). *Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS*. Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen der Univ. der Bundeswehr, Bd. 70, München.
- Rothacher, M. und Schmid, R. (2010). ANTEX: The Antenna Exchange Format Version 1.4. <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/antex14.txt>.
- Saastamoinen, J. (1973). *Contributions to the theory of atmospheric refraction, part II*. Bulletin Geodesique, 107:13–34.
- Schaer, S. (2001). IGSMail-3212: CODE DCB data archive initiated. <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2001/msg00060.html>.
- Schaer, S. (2012a). *From differential to absolute code bias values*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Schaer, S. (2012b). *Overview of GNSS biases*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Schaer, S. (2014). IGSMail-6993: CODE GIM products with 1-hour resolution. <http://igsb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2014/008183.html>.
- Schaer, S., Beutler, G. und Rothacher, M. (1998a). *Mapping and predicting the ionosphere*. IGS AC WS 1998.
- Schaer, S., Gurtner, W. und Feltens, J. (1998b). IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1. <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/ionex1.pdf>.
- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M. und Rothacher, M. (2007). *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas*. Journal of Geodesy, 81(12):781–798.
- Schönemann, E. (2011). *A new Approach for GNSS Analysis in a Multi-GNSS and Multi-Signal Environment*. Journal of Geodetic Science, 1(3):204–214.
- Schönemann, E. (2013). *Analysis of GNSS raw observations in PPP solutions*. Number 42. Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie, Darmstadt.

- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York. 2., vollst. überarb. und erw. Auflage.
- Shi, J. und Gao, Y. (2014). *A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods*. GPS Solutions, 18(4):519–528.
- SIDC (2014). *The International Sunspot Number*. International Sunspot Number Monthly Bulletin and online catalogue. <http://www.sidc.be/SILSO/>.
- Sleewaegen, J.-M., Simsky, A. und de Wilde, W. (2012a). *GLONASS inter-channel biases in high-end receivers*. IGS Workshop on GNSS Biases 2012. <http://www.biasws2012.unibe.ch/>.
- Sleewaegen, J.-M., Simsky, A., de Wilde, W., Boon, F. und Willems, T. (2012b). *Origin and Compensation of GLONASS Inter-frequency Carrier Phase Biases in GNSS Receivers*. Proceedings of ION GNSS 2012, S. 2995–3001.
- Springer, T. und Dach, R. (2010). *GPS, GLONASS and more - Multiple Constellation Processing in the International GNSS Service*. GPS World, 21(6):48–58.
- Takac, F. und Zelzer, O. (2008). *The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX*. Proceedings of ION GNSS 2008, S. 348–355.
- Teunissen, P. J. G. (1993). *Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities*. Invited Lecture. Section IV Theory and Methodology, IAG General Meeting, Beijing, China.
- Teunissen, P. J. G. (1995). *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation*. Journal of Geodesy, 70(1-2):65–82.
- Teunissen, P. J. G. (1999). *An optimality property of the integer least-squares estimator*. Journal of Geodesy, 73(11):587–593.
- Teunissen, P. J. G. und Kleusberg, A. (1998). *GPS for Geodesy*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg [u.a.].
- Torge, W. (2003). *Geodäsie*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York. 2., vollst. überarb. und erw. Auflage.
- Wanninger, L. (2000). *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 508.
- Wanninger, L. (2003). *Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation*. 5. GPS-Antennenworkshop, Frankfurt.
- Wanninger, L. (2006). *Netz-RTK*. 66. DVW-Seminar, 21./22.02.2006, Darmstadt. In: *GPS und Galileo - Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen*. DVW-Schriftenreihe, Band 49/ 2006, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 59–69.
- Wanninger, L. (2008). *The Future is Now - GPS + GLONASS + SBAS = GNSS*. GPS World, Juli 2008:42–48.
- Wanninger, L. (2011). *Qualitätssicherung bei GNSS-Diensten*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 1/2011:8–17.
- Wanninger, L. (2012a). *Carrier-phase Inter-frequency Biases of GLONASS Receivers*. Journal of Geodesy, 86(2):139–148.

- Wanninger, L. (2012b). *GNSS-Messungen*. In: Möser, M., Hoffmeister, H., Müller, G., Staiger, R., Schlemmer, H. und Wanninger, L. (Hrsg.), *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen*, Kapitel 6.9, S. 406-430, Wichmann, Heidelberg, 4. völlig neu bearbeitete Auflage.
- Wanninger, L., Frevert, V. und Wildt, S. (2000). *Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 125:8–16.
- Wanninger, L. und Wallstab-Freitag, S. (2007). *Auswertung von GLONASS-Trägerphasenbeobachtungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 132:292–297.
- Wanninger, L. und Wildt, S. (1997). *Identifikation von Mehrwegeeffekten in GPS-Referenzstationsbeobachtungen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 104:12–15.
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I. und Lichten, S. M. (1993). *Effects of antenna orientation on GPS carrier phase*. manuscripta geodaetica, 18:91–98.
- Wübbena, G. (1988). *GPS carrier phases and clock modeling*. In: Groten, E. und Strauß, R. (Hrsg.), *GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying*. Lecture Notes in Earth Sciences, Band 19, S. 381–392, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wübbena, G. (1989). *The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models*. Proceedings of the 5th International Symposium on Satellite Positioning, S. 452–461.
- Wübbena, G. (2003). *Zum Einfluss des Antennennahfeldes*. 5. GPS-Antennenworkshop, Frankfurt.
- Yamada, H., Takasu, T., Kubo, N. und Yasuda, A. (2010). *Evaluation and Calibration of Receiver Inter-channel Biases for RTK-GPS/GLONASS*. Proceedings of ION GNSS 2010, S. 1580–1587.
- Yunck, T. P. (1993). *Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning*. Geophysical Monograph 73, IUGG Volume 13, 1-16.
- Zhang, X., Li, P. und Guo, F. (2013). *Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data for global single receiver*. Advances in Space Research, 51(1):153–161.
- Zinoviev, A. E. (2005). *Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status*. Proceedings of ION GNSS 2005, S. 1046–1057.
- Zinoviev, A. E., Veitsel, A. V. und Dolgin, D. A. (2009). *Renovated GLONASS: Improved Performances of GNSS Receivers*. Proceedings of ION GNSS 2009, S. 3271–3277.
- Zumberge, J. F., Hefflin, 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.