



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Fakultät Umweltwissenschaften

---

# GNSS-Precise Point Positioning (PPP) mittels ionosphären-freier Auswertung von Einfrequenz-Messungen

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

vorgelegt von

**M.Sc. Hael Sumaya**

geboren am 10. Januar 1984 in Barin

Gutachter:

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

Herr Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck  
Karlsruher Institut für Technologie

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger  
Universität Stuttgart

Dresden, 03. Mai 2019



## Kurzfassung

Die klassische *Precise Point Positioning* PPP-Lösung ermöglicht eine absolute Positionsbestimmung im Zentimeterbereich. Dazu sind kontinuierliche Code- und Phasenbeobachtungen auf zwei Frequenzen erforderlich. Die Bereitstellung dieser Beobachtungen verlangt hochwertige und teure Ausrüstungen. Im Gegensatz zu diesen teuren GNSS-Messgeräten werden seit längerer Zeit kostengünstige Geräte für die relative Positionsbestimmung mit Zentimetergenauigkeit, z. B. RTK verwendet. Diese Ausrüstungen stellen nur Beobachtungen auf der ersten Frequenz zur Verfügung und können damit die ionosphärischen Korrekturen mittels der ionosphären-freien Linearkombination der Phasenbeobachtungen nicht bestimmen. Die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen können aber durch eine ionosphären-freie Linearkombination zwischen Code- und Phasenbeobachtungen beseitigt werden. Dieser Ansatz der ausschließlichen Nutzung der ersten Frequenz wird als Einfrequenz-PPP-Lösung bezeichnet. Aus ökonomischer Sicht ist diese Lösung von großer Bedeutung. Die schlechte Genauigkeit der Codebeobachtungen aufgrund der Codemehrwegeeffekte, des Messrauschens und der Codeverzögerungsvariationen *group delay variations* (GDV) ist der Hauptgrund für die geringe Positionsgenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung.

Die GDV wurden in Bezug auf Zweifrequenzphasenbeobachtungen kalibriert und zu entsprechenden Modellen, die von der Frequenz, dem Nadir-Winkel und dem Elevationswinkel abhängig sind, zusammengefasst. Die zeitliche Stabilität der Korrekturmodelle wurde nachgewiesen, sodass diese Modelle ohne zeitliche Beschränkung zur Korrektur von GDV verwendet werden können.

Bei der Verwendung von hochwertigen GNSS-Ausrüstungen zeigte die Einfrequenz-PPP-Lösung die geringste Genauigkeit in der Höhenkomponente, etwa 5-mal schlechter als in der Nordkomponente. Durch das Anbringen der Korrekturmodelle bezüglich der GDV an die Codebeobachtungen konnte diese Genauigkeit auf das Doppelte erhöht werden. Zusätzlich ist keine Abhängigkeit der Höhengenaugkeit vom Antennentyp mehr erkennbar. Bei der Auswertung von Daten preisgünstiger GNSS-Ausrüstungen mittels Einfrequenz-PPP-Lösung lagen die RMS-Werte der Abweichungen zur Solllösung für alle drei Koordinatenkomponenten unter einem Dezimeter. Das Anbringen der Code-Korrekturen steigert die Genauigkeit der Höhe und der Nordkomponente um einen Faktor von zwei bzw. vier. Mit diesen erreichbaren Genauigkeiten und den günstigen Beschaffungskosten bildet die Einfrequenz-PPP-Lösung eine gute und preiswerte Alternative zur klassischen PPP-Lösung.

## Abstract

The classic Precise Point Positioning (PPP) solution enables centimeter accuracy positioning with a single station. Dual-frequency code and phase observations are required. The provision of such observations requires high quality and expensive equipment. In contrast, inexpensive GNSS equipment has been used for some time for relative positioning, e.g. RTK with centimeter accuracy. This equipment provides observations on one frequency only and, therefore, the ionosphere-free linear combination of the phase observations cannot be computed. But, the ionospheric delays can also be eliminated by an ionosphere-free linear combination of code and phase observations. This approach is called single-frequency PPP solution. From an economic perspective, this solution is very important. However, the accuracy is severely affected by code multipath effects, measurement noise, and group delay variations (GDV).

GDV can be calibrated with respect to dual-frequency phase observations. Correction models depending on frequency, nadir angle and elevation angle, were generated in this thesis. The temporal stability of the correction models was confirmed. Thus, these models can be used without time limitation.

By using high quality GNSS equipment, the single frequency PPP solution showed lower accuracy in the height component (about 5 times worse) than in the north component. In addition, this accuracy depends on the antenna type. After application of the correction models, this accuracy can be enhanced by a factor of two. And no further dependence of the height accuracy on the antenna type could be found. The evaluation of the single frequency PPP solution obtained by low-cost equipment leads to a good accuracy (RMS values less than one decimeter for the three coordinate components). Applying the code correction values increases the height accuracy by a factor of two and the north accuracy by a factor of four. Concerning the low-cost equipment and the achievable accuracy, the single frequency PPP can be regarded as a good alternative to the classic dual-frequency PPP.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1	Einleitung .....	13
1.1	Motivation.....	13
1.2	Aktueller Stand der Forschung.....	14
1.3	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	17
2	Grundlagen .....	21
2.1	GNSS.....	21
2.1.1	GPS.....	21
2.1.2	GLONASS .....	22
2.2	Referenz- und Koordinatensysteme.....	23
2.2.1	Internationales Terrestrisches Referenzsystem.....	24
2.2.2	Das World Geodetic System 1984 (WGS84).....	25
2.2.3	Parametry Zemli (PZ-90.02) .....	25
2.3	Zeitsysteme .....	26
2.3.1	Sonnenzeit – UT – UT1 .....	26
2.3.2	Atomzeit (TAI) und koordinierte Weltzeit (UTC).....	27
2.3.3	Das GPS-Zeitsystem .....	28
2.3.4	Das GLONASS-Zeitsystem.....	29
2.4	Positionsbestimmung.....	29
2.4.1	Codebeobachtungen als primäre Messgröße .....	31
2.4.2	Phasenbeobachtungen als primäre Messgröße .....	32
2.5	Ausgleichsrechnung und Statistik.....	34
2.5.1	Funktionales Modell .....	34
2.5.2	Stochastisches Modell.....	36
2.5.3	Parameterschätzung mit dem Gauß-Markov-Modell.....	37
2.5.4	Eliminierung von Unbekannten .....	39
2.5.5	Sequentielle Ausgleichung.....	41
2.5.6	Statistik.....	42
3	Precise Point Positioning mit einem Einfrequenz-Empfänger.....	43
3.1	Präzise Satellitenpositionen und -uhrkorrekturen .....	44
3.1.1	IGS.....	44
3.1.2	Präzise Satellitenkoordinaten .....	46
3.1.3	Präzise Satellitenuhrkorrektur.....	47
3.1.4	Satellitenantennenkorrekturen .....	48
3.1.5	Phase Wind-up.....	49

3.2	Atmosphärische Korrekturen.....	49
3.2.1	Troposphäre.....	50
3.2.2	Ionosphäre.....	52
3.3	Instrumentelle Verzögerungen.....	55
3.4	Korrekturen an der Station.....	56
3.4.1	Empfangsantennenkorrekturen.....	56
3.4.2	Erdzeiten, Polbewegung und ozeanische Auflasten.....	57
3.4.3	Mehrwegeeffekte.....	57
3.5	Auswertung von GRAPHIC-Beobachtungen.....	58
3.5.1	Beobachtungsgleichungen.....	58
3.5.2	Funktionales Modell.....	61
3.5.3	Stochastisches Modell.....	62
3.5.4	Sequentielle Ausgleichung der statischen Beobachtungen.....	64
4	Modellierung von GDV.....	65
4.1	Motivation.....	65
4.2	Einführung.....	69
4.3	Methodik.....	70
4.3.1	Analyse der Code-Beobachtungen anhand der MP-Linearkombination.....	70
4.3.2	Trennung der Satellitenantennen-GDV von Empfangsantennen-GDV.....	72
4.3.3	Satelliten- und Empfangsantennenphasenkorrekturen.....	75
4.4	Bestimmung der GDV.....	79
4.4.1	GDV der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen.....	79
4.4.2	GDV der Empfangsantennen.....	90
4.5	Zeitliche Stabilität der GDV.....	93
5	Untersuchungen zur Verwendung hochwertiger Empfangsantennen bei der Einfrequenz-PPP-Lösung.....	99
5.1	Wasoft.....	99
5.1.1	Warino.....	99
5.1.2	Wappp.....	100
5.2	Datensatz und Auswertekonfiguration.....	101
5.3	Untersuchung zur Genauigkeit der Solllösung.....	105
5.4	Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Empfangsantenne, der Frequenz, dem GNSS und den Auswirkungen der GDV.....	107
5.4.1	Erreichbare Genauigkeit ohne Korrektur der GDV.....	108
5.4.2	Auswirkung der GDV auf die Positionsgenauigkeit.....	113
6	Untersuchungen zur Genauigkeit der PPP-Lösung in Abhängigkeit von den Beschaffungskosten.....	119
6.1	Daten.....	120
6.1.1	Verwendete preisgünstige Empfänger und Empfangsantenne.....	120
6.1.2	Datensatz 1.....	121
6.1.3	Datensatz 2.....	122

6.2	Auswirkungen des verwendeten Empfängertyps auf die Positionsbestimmung .....	124
6.3	L1-Einfrequenz-PPP-Lösung mit preisgünstigen GNSS-Empfängern .....	127
6.3.1	Bestimmung der GDV der preisgünstigen Antenne TW3870 .....	127
6.3.2	Erreichbare Positionsgenauigkeit .....	128
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	133
	Literaturverzeichnis .....	137
	Anhang.....	147

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitgleichung (Bauer, 2011).....	27
Abbildung 2: geografische Verteilung der Stationen mit vorgegebenen Koordinaten und Geschwindigkeiten in IGS14-Realisierung des ITRF2014-Referenzrahmens (Dach, R. 2017). ....	45
Abbildung 3: Lageabweichungen der Einfrequenz-PPP-Lösung [cm].....	66
Abbildung 4: Differenzen und Standardabweichungen der Einfrequenz-PPP-Lösung für die Höhenkomponente .....	67
Abbildung 5: Abweichungen der Höhenkomponente vor und nach dem Antennenwechsel von drei IGS-Referenzstationen (vgl. Tab. 7) .....	68
Abbildung 6: Beispiel der MP-Werte als Funktion des Elevationswinkels (blaue Punkte), elevationsabhängige RMS-Werte (grüne gestrichelte Linie) und Regressionsmodell (rote geschlossene Linie) (Wanninger et al., 2015).....	71
Abbildung 7: Beziehung zwischen dem Nadir-Winkel eines Satelliten und dem Elevationswinkel der Empfangsantenne (Schmid & Rothacher, 2003) .....	73
Abbildung 8: Beziehung zwischen dem Nadir-Winkel der GPS- bzw. GLONASS-Satellitenantennen und dem Elevationswinkel auf einer Station auf der Erdoberfläche .....	74
Abbildung 9: Darstellung des IGS-Offsets im Vergleich zu den Offsets für L1 und L2, alle in Z-Richtung (Wanninger et al., 2015) .....	76
Abbildung 10: Ausgewählte Beobachtungsstationen für die vier ausgewählten Antennentypen.....	80
Abbildung 11: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen von Teilnetz 1 zur Gesamtlösung (46 Stationen), oben für GPS-Satelliten, unten für GLONASS-Satelliten.....	81
Abbildung 12: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen von Teilnetz 4 zur Gesamtlösung (46 Stationen), oben für GPS-Satelliten, unten für GLONASS-Satelliten.....	81
Abbildung 13: Verwendete Referenzstationen zur Bestimmung der GDV der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen .....	83
Abbildung 14: Differenzen zwischen den einzelnen Antennentypenlösungen und der geänderten Gesamtlösung (35 Stationen). satellitenspezifische GPS-GDV für die ionosphären-freie Linearkombination aus C1 und P2 .....	85
Abbildung 15: Differenzen zwischen den einzelnen Antennentypenlösungen und der geänderten Gesamtlösung (35 Stationen). satellitenspezifische GLONASS -GDV für die ionosphären-freie Linearkombination aus C1 und P2.....	86
Abbildung 16: GDV der 31 GPS-Satelliten auf der Basis der Beobachtungsdaten von 35 Referenzstationen .....	87
Abbildung 17: GDV der 23 GLONASS-Satelliten auf der Basis der Beobachtungsdaten von 35 Referenzstationen .....	88
Abbildung 18: GDV des Satelliten G04/SVN49 .....	89
Abbildung 19: GDV der drei Antennenmodelle, die zur Bestimmung der Satelliten-GDV verwendet wurden. ...	92
Abbildung 20: GDV der 12 Antennenmodelle .....	93
Abbildung 21: GDV der 12 Antennenmodelle für den Untersuchungszeitraum Woche-März 2016.....	95
Abbildung 22: GDV der 12 Antennenmodelle für den Untersuchungszeitraum Woche-Sept 2016 .....	95
Abbildung 23: RMS-Werte der Abweichungen der Ergebnisse zwischen den drei untersuchten Wochen im Jahr 2016.....	96
Abbildung 24: RMS-Werte der Abweichungen Woche 1843 zu den Referenzwerten der Woche-Juni.....	96
Abbildung 25: Strategie zum Anbringen der PZO und PZV an die Beobachtungen, für Zweifrequenz-PPP-Auswertung und Einfrequenz-PPP-Auswertung ohne Korrektur der GDV .....	104
Abbildung 26: Strategie zum Anbringen der PZO und PZV und der Korrekturwerte der GDV an die Beobachtungen, für Einfrequenz-PPP-Auswertung mit Korrektur der GDV.....	105
Abbildung 27: Standardabweichungen der Ost-, Nord- und Höhenkomponenten der Zweifrequenz-PPP-Lösung für die untersuchten Referenzstationen (GPS & GLONASS) .....	106
Abbildung 28: Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung von L1 auf der Basis von GPS-Beobachtungen (oben) und von GPS/GLONASS Beobachtungen (unten). RMS-Werte bzgl. der Solllösung, die für die mit derselben Antenne ausgestatteten Stationen berechnet wurden.....	109

Abbildung 29: Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung L2 auf der Basis von GPS Beobachtungen (oben) und von GPS/GLONASS Beobachtungen (unten). RMS-Werte bzgl. der Solllösung, die für die mit derselben Antenne ausgestatteten Stationen berechnet wurden. ....	109
Abbildung 30: Höhenabweichungen (als Mittelwerte und deren Standardabweichungen) der L1-PPP-Lösung (oben) und der L2-PPP-Lösung (unten), jeweils aus kombinierter GPS/GLONASS Auswertung. ....	111
Abbildung 31: Abweichungen der L1- und L2-PPP-Lösungen zur Soll-Lösung in Nord- und Ost-Richtung, GPS/GLONASS Auswertung .....	112
Abbildung 32: RMS-Werte der Abweichungen zwischen der Einfrequenz-PPP-Lösung und der Soll-Lösung für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe. Es handelt sich um die Auswertung mit/ohne Codekorrekturen auf L1. Zum Vergleich die Auswertung mit/ohne Hinzunahme der GLONASS Satelliten. ....	115
Abbildung 33: RMS-Werte der Abweichungen zwischen der Einfrequenz-PPP-Lösung und der Soll-Lösung für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe. Es handelt sich um die Auswertung mit/ohne Codekorrekturen auf L2. Zum Vergleich die Auswertung mit/ohne Hinzunahme der GLOASS-Satelliten.....	116
Abbildung 34: Höhenabweichungen (als Mittelwert und deren Standardabweichung) der L1-Lösung (oben) und L2-Lösung (unten). Aus kombinierter GPS/GLONASS-Auswertung, mit angebrachten GDV.....	117
Abbildung 35: GNSS-Empfänger A07-N-11 der Firma Alberding GmbH .....	120
Abbildung 36: Tallysman TW3870 GNSS-Antenne, aufgebaut auf einem Pfeiler des Messdaches auf dem Beyer-Bau der TU Dresden.....	121
Abbildung 37: Konfiguration der Messung für den Datensatz 1. Die Empfänger wurden mittels Antennensplitters an die Empfangsantenne angeschlossen.....	122
Abbildung 38: Messaufbau für den Datensatz 2 .....	123
Abbildung 39: Konfiguration der Messung für den Datensatz 2. Die Empfänger wurden mittels Antennensplitters an die Empfangsantenne angeschlossen.....	123
Abbildung 40: Positionsgenauigkeit (als RMS-Werte) aus der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung. Auswertung von kombinierten GPS/GLONASS Beobachtungen verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der hochwertigen Antenne TRM57971.00.....	126
Abbildung 41: GDV Korrekturwerte für die Empfangsantenne TW3870 .....	128
Abbildung 42: Positionsgenauigkeit (als RMS-Werte) aus der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung. Auswertung von GPS allein und kombinierten GPS/GLONASS Beobachtungen verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der preisgünstigen Antenne TW3870.....	130

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklungs- und Modernisierungsphasen der GPS Satelliten, Stand Oktober 2017 .....	21
Tabelle 2: Parameter des WGS-84-Ellipsoids .....	25
Tabelle 3: Parameter des (PZ-90.02)-Ellipsoids .....	26
Tabelle 4: IGS-Produkte für GPS (IGS, 2019) .....	45
Tabelle 5: IGS-Produkte für GLONASS (IGS, 2019).....	46
Tabelle 6: Beschreibung der 10 ausgewählten IGS Stationen .....	66
Tabelle 7: Datum und Typ des Antennenwechsels .....	67
Tabelle 8: Z-Offset-Werte von GPS-Satellitenantennen .....	78
Tabelle 9: Z-Offset-Werte von GLONASS-Satellitenantennen.....	78
Tabelle 10: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur Gesamtlösung, GPS (alle Werte in cm) .....	82
Tabelle 11: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur Gesamtlösung, GLONASS (alle Werte in cm) .....	82
Tabelle 12: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur veränderten Gesamtlösung (35 Stationen), GPS, (alle Werte in cm) .....	84
Tabelle 13: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur veränderten Gesamtlösung (35 Stationen), GLONASS, (alle Werte in cm).....	84
Tabelle 14: Die 12 Antennenmodelle und die dazugehörigen ausgewählten Referenzstationen zur Bestimmung der GDV .....	91
Tabelle 15: Die Untersuchungszeiträume zur Bestimmung der GDV im Jahr 2016 .....	94
Tabelle 16: RMS-Werte der Abweichungen verschiedener Zeiträume zu Referenzwerte im Juni 2016 (cm).....	97
Tabelle 17: Ausgewählte Stationen gegliedert nach verwendeter Antenne und verwendetem Empfänger zur Untersuchung der Genauigkeit der PPP-Lösung .....	103
Tabelle 18: Einfache Standardabweichungen der PPP-Lösung aller Stationen. Verglichen werden die Mittelwerte der GPS-Auswertung mit denen der GPS/GLONASS-Auswertung.....	107
Tabelle 19: Genauigkeit beider Lösungen auf L1 und L2 ohne Anbringung von GDV.....	113
Tabelle 20: Genauigkeit beider Lösungen auf L1 und L2, mit Korrektur der GDV .....	118
Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der Antenne TRM57971.00 für die drei Koordinatenkomponenten. ....	126
Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der Antenne TW3870 bezüglich der drei Koordinatenkomponenten. .	129

# Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Analytical Center</i>
ANTEX	<i>ANTenna EXchange Format</i>
ARP	<i>Antennenreferenzpunkt</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CM	<i>Center of Mass</i>
CIO	<i>Conventional International Origin</i>
CLK	<i>Clock Information file</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
CNES	<i>Centre National d'Etudes Spatiales</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DOY	<i>Day Of Year</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EPN	<i>EUREF Permanent Network</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESOC	<i>European Space Operations Centre</i>
FCB	<i>Fractional-Cycle Bias</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
EMR	<i>Natural Resources Canada, früher: Energy, Mines and Resources</i>
GDV	<i>Group Delay Variations</i>
GFZ	<i>Deutsches GeoForschungsZentrum</i>
GIM	<i>Global Ionospheric Map</i>
GLONASS	<i>GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema</i>
GMF	<i>Global Mapping Function</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPT	<i>Global Pressure and Temperature</i>
GRAPHIC	<i>GRoup And PHase Ionospheric Correction</i>
GRG	<i>Space geodesy team of the CNES, Toulouse, France</i>
IAC	<i>Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Russian</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IFB	<i>Inter-frequency biases</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IONEX	<i>IONosphere map EXchange Format</i>
LEO	<i>Low Earth Orbiter</i>
MF	<i>Mapping Function</i>

MkQ	<i>Methode der kleinsten Quadrate</i>
MP	<i>Multipath observable</i>
NMF	<i>Niell Mapping Function</i>
PPP	<i>Precise Point Positioning</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PZ-90	<i>Parametry Zemli 1990</i>
PZO	<i>Phasenzentrumsoffset</i>
PZV	<i>Phasenzentrumsvariationen</i>
RCP	<i>right circularly polarized</i>
RINEX	<i>Receiver INdependent EXchange Format</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTK	<i>Real-Time Kinematic</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPP	<i>Single Point Positioning</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VMF1	<i>Vienna Mapping Function 1</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Oberbegriff *Global Navigation Satellite System* (GNSS) fasst das bestehende amerikanische *Global Positioning System* (GPS), das russische System *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* (GLONASS) sowie die beiden im Aufbau befindlichen Systeme Beidou der Volksrepublik China (bzw. Compass) und das europäische System Galileo zusammen. Die Verwendung von GNSS für die geodätischen Vermessungsaufgaben ist heutzutage von großer Bedeutung. Dazu gehört die präzise satellitengestützte Positionsbestimmung.

Zahlreiche Mess- und Auswerteverfahren wurden in den letzten Jahren mit dem Ziel entwickelt, höhere Positionsgenauigkeiten (cm-Genauigkeit) in möglichst kurzer Messzeit zu erreichen. Die meisten GNSS-Nutzer mit höheren Genauigkeitsanforderungen verwenden das differenzielle Auswerteverfahren zur Positionsbestimmung wie z. B. Netz-RTK (*Real Time Kinematic*). Die Nachteile dieser Technik liegen darin, dass lokale oder regionale Referenzstationen zur Verfügung stehen müssen. Für eine Station, die als Referenz arbeitet, ist die Kenntnis genauer Koordinaten Voraussetzung. In vielen Gebieten sind diese nicht verfügbar. Die Qualität der erreichbaren Genauigkeit ist außerdem stark abhängig von dem Abstand zwischen den zwei Stationen (Adekunle, 2014), so dass diese Technik für zahlreiche potentielle GNSS-Nutzer auf der Welt nicht anwendbar ist.

Im Gegensatz zur relativen Positionsbestimmung kann mit einer neuen Technik, die ohne eigene Referenzstation auskommt, dieses Problem umgangen werden. Diese Technik wird als *Precise Point Positioning* (PPP) bezeichnet. PPP ist ein GNSS-Auswerteverfahren zur absoluten präzisen Positionsbestimmung unter Verwendung von kontinuierlichen Phasen- und Codebeobachtungen. Mitte der 90er Jahre begannen erste Entwicklungen zu PPP (Zumberge et al., 1997). Die Methode benötigt die präzisen Satellitenpositionen und Satellitenuhrkorrekturen, die im Internet zum jetzigen Zeitpunkt für verschiedene GNSS kostenlos zur Verfügung gestellt werden. Mit der PPP-Zweifrequenz-Lösung kann eine zentimetergenaue Positionsbestimmung ohne simultane Messungen an lokalen oder regionalen Referenzstationen erreicht werden (Heßelbarth, 2011).

Die Kosten der PPP-Verfahren sind abhängig von der Fähigkeit und Qualität der Empfangsantenne und des Empfängers, Zweifrequenzmessungen von Code- und Phasenbeobachtungen für mehrere Satellitensysteme durchzuführen. Sie betragen viele tausend Euro und liegen daher für viele Anwender fernab des Finanzierbaren. Aus ökonomischer Sicht stellt sich die Frage, ob sich genaue Positionsbestimmungen auch mit preisgünstigeren GNSS Messgeräten realisieren lassen.

Da die Beschaffungskosten von Einfrequenz-Antennen/Empfängern weniger als 20% der Beschaffungskosten von Zweifrequenz-Empfängern betragen, ist die PPP-Lösung unter Verwendung von Einfrequenz-Empfängern von großer Bedeutung. Zurzeit erreicht aber die Lösung auf der Basis von Einfrequenzmessungen nur eine deutlich geringere Positionsgenauigkeit im Vergleich zur PPP-Lösung aus Zweifrequenz-Beobachtungen.

Durch neue Untersuchungen zur Abhängigkeit von Mess- und Auswerteverfahren soll die PPP-Lösung mit Einfrequenz-Empfängern im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt und bezüglich der Genauigkeit verbessert werden. Dabei sind folgende Themen schwerpunktmäßig zu betrachten:

- Kann die Positionsgenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung unter Verwendung von Satelliten mehrerer GNSS verbessert werden?
- Welche Positionsgenauigkeit ist in Abhängigkeit von den Beschaffungskosten verschiedener Einfrequenz-Antennen/Empfänger erreichbar?
- Welchen Einfluss haben die verschiedenen Verfahren zur Korrektur der ionosphärischen Fehler im Sinne der PPP-Lösung - z. B. die Korrekturmodelle oder Linearkombination zwischen Code- und Phasemessung *GRoup And PHase Ionospheric Correction* (GRAPHIC)?
- Wie beeinflusst die Qualität der Codebeobachtungen die Positionsgenauigkeit?
- Wie können die Codebeobachtungen hinsichtlich der Codeverzögerungsvariationen (*group delay variations* GDV) kalibriert werden?
- Welche Verbesserung in der Positionsgenauigkeit erwartet man durch Korrekturmodelle der GDV?

## 1.2 Aktueller Stand der Forschung

Mitte der 90er Jahre wurden erste Entwicklungen zu PPP gestartet (Zumberge et al., 1997). Die Voraussetzungen für die PPP-Lösung sind die präzisen Satellitenpositionen, Satellitenuhrkorrekturen und die Antennenkorrekturen. Der *International GNSS Service* (IGS) und seine Analysezentren stellen dem Nutzer diese Produkte zur Verfügung. Mit der PPP-Zweifrequenz-Lösung kann die erste Ordnung der ionosphärischen Einflüsse durch die ionosphären-freie Linearkombination zwischen zwei Frequenzen beseitigt werden. Zusätzliche Abweichungen, wie Mehrwegeeffekte, Signalbeugung u.v.m. müssen ebenso korrigiert oder soweit wie möglich vermieden werden. Mit dieser Lösung ist man daher in der Lage, eine zentimetergenaue Positionsbestimmung ohne simultane Messungen an lokalen oder regionalen Referenzstationen zu erreichen (Heßelbarth, 2011).

Aufgrund der günstigen Preise von Einfrequenz GNSS-Messgeräten im Vergleich zum Zweifrequenz-Empfänger und der nur zur Verfügung stehenden Einfrequenzbeobachtungen wie in *Low Earth Orbit* LEO-Satelliten wurden in den letzten Jahren einige Untersuchungen zu PPP-Lösungen mit Einfrequenz-

Empfängern durchgeführt. Der Hauptunterschied zwischen beiden PPP-Verfahren liegt in dem Behandeln des ionosphärischen Einflusses. Dies bildet den offensichtlichen Grund für die niedrige Genauigkeit bei Einfrequenz-PPP-Lösungen besonders bezüglich der Höhe (Øvstedal, 2002).

Da die ionosphärischen Effekte auf Code- und Phasenmessungen von gleicher Größe mit umgekehrtem Vorzeichen behaftet sind, ist man in der Lage, diese Effekte durch eine ionosphären-freie Linearkombination aus Phasen- und Codemessungen zu eliminieren. Diese Methode wurde ausführlich von Witchayangkoon (2000) untersucht. Es wurde gezeigt, dass die ionosphären-freie Einfrequenz-PPP-6-Stunden-Lösung für die Beobachtungen mit geringen Mehrwegeeffekten die gleiche Genauigkeit wie die PPP-Zweifrequenz-Lösung erreichen kann (Witchayangkoon, 2000).

Solange das Code-Messrauschen relativ groß im Vergleich zum Phasen-Messrauschen ist, können die Phasenmessungen zur Verringerung des Code-Rauschens dienen. Dieser Algorithmus wird als Glättung der Pseudostrecken bezeichnet. Anhand dieses Algorithmus wurden unterschiedliche Ansätze zur Minimierung der Fehlerquellen im Sinne von Einfrequenz-PPP untersucht (Le & Tiberius, 2007). Im Rahmen dieser Forschung wurde ein optimaler Filter entwickelt. Meist kann eine Genauigkeit von 0.5 m in der Lage und 1 m in Höhe erreicht werden. Unter günstigen Bedingungen wurde die Genauigkeit auf bis zu 2 dm in der Lage und 5 dm in Höhe gesteigert (Le & Tiberius, 2007).

Da der ionosphärische Einfluss die Hauptfehlerquelle für PPP mit Einfrequenz-Messungen bildet, wurden unterschiedliche Methoden zur Eliminierung dieses Fehlers verglichen und bewertet (Chen & Gao, 2005). Die benutzten Methoden sind das KLOBUCHAR-Modell, *Global Ionospheric Model* (GIM)-Modell und die Schätzung der ionosphärischen Effekte durch ihre Einführung als Unbekannte in der Ausgleichung. In dieser Forschung wurden drei GPS-Stationen geprüft, die in unterschiedlichen geografischen Breiten liegen. Es wurde festgestellt, dass durch die Verwendung des KLOBUCHAR-Modells eine geringere Genauigkeit im Vergleich zu den anderen Methoden erreicht wurde. In mittleren Breiten bieten das GIM-Modell und das geschätzte Ionosphärenmodell fast gleich gute Ergebnisse. Am Äquator wird eine geringere Genauigkeit im Gegensatz zu anderen Breiten erwartet (Chen & Gao, 2005).

Die Verwendung von preisgünstigen GPS-Einfrequenz-Empfängern wurde von Beran (2008) geprüft. Auf der Basis von Pseudorange- und zeitdifferenzierten Trägerphasenbeobachtungen wurde ein Bearbeitungsansatz nach der Methode der kleinsten Quadrate entwickelt. Durch diesen Ansatz wurden zuerst die von hochwertigen GPS-Empfängern gewonnen L1-Beobachtungen geprüft, die eine Messgenauigkeit von 2 dm für die Lage und 3 dm für die Höhe aufwiesen. Anschließend wurde dieser Ansatz eingesetzt, um die von preisgünstigen GPS-Empfängern gewonnen L1-Beobachtungen zu bewerten. Wie erwartet, haben die preisgünstigen Empfänger schlechtere Ergebnisse gezeigt. Die Genauigkeit lag innerhalb von einigen dm für die Lage und weniger als 2 m für die Höhe (Beran, 2008).

Der Einfluss der Beobachtungsgewichtung auf die Positionierungsgenauigkeit, die unterschiedlichen Methoden zum Korrigieren von ionosphärischen Effekten und die Verwendung von verschiedenen Ephemeriden (z. B. IGS, rapid, Broadcast) wurden von Choy (2009) für die Einfrequenz-PPP-Lösung untersucht. In Rahmen dieser Forschung wurde die erreichbare Genauigkeit der PPP-Lösung mit preisgünstigen sowie mittelpreisigen Empfängern verglichen. Beim Post-Processing wurden IGS Rapid für präzise Ephemeriden sowie GIMs zum Eliminieren des ionosphärischen Einflusses verwendet. Das Verhältnis der A-Priori-Gewichtung zwischen Code und Phase wurde mit 1:50 festgesetzt. Mit der PPP-Lösung von 4 Stunden wurde festgestellt, dass die preisgünstigen Empfänger eine Positionsgenauigkeit von 1 m für die Lage und 1.4 m für die Höhe erreichen können (Choy, 2009).

Die Einfrequenz-PPP-Lösung auf der Basis von GRAPHIC-Beobachtungen wurde zur Orbitbestimmung von LEO-Satelliten anhand von Einfrequenz-Beobachtungsdaten (Bock et al., 2009) oder zur Positionsbestimmung (Muellerschoen et al., 2004, Choy, 2009, Shi et al., 2012) verwendet.

Bock et al. (2009) haben drei Möglichkeiten zur Beseitigung der ionosphärischen Refraktion miteinander verglichen. Zusätzlich zu einem Ionosphärenmodell und GRAPHIC wurde ein Ionosphärenparameter in der Auswertung mitgeschätzt. Die Genauigkeit der LEO-Orbit-Bestimmung war das Ziel dieser Untersuchung. Die beste Genauigkeit wurde bei der Anwendung von GRAPHIC-Verfahren erzielt. Die GRAPHIC-Linear kombination wird vom Coderausachen und den Code-Mehrwegeeffekten dominiert. Trotzdem liefert die PPP-Lösung mittels dieser Art der Ionosphärenbehandlung bessere Ergebnisse bei der Positionsbestimmung im Vergleich zu den Ionosphärenmodellen. Das GRAPHIC-Verfahren benötigt aber eine längere Konvergenzzeit (Shi et al., 2012).

Cai et al. (2017) haben einen Ansatz zur Beschleunigung der Konvergenzzeit der Einfrequenz-PPP-Lösung entwickelt, in dem GIMs als Pseudo-Beobachtungen verwendet werden. Die ionosphärischen Effekte und instrumentellen Verzögerungen werden zusätzlich zu den unbekannt Parametern der PPP-Lösung geschätzt. In diesem Ansatz wurden die Beobachtungen aller verfügbaren GNSS (GPS, GLONASS, Galileo und Beidou) in einem nicht-kombinierten Beobachtungsmodell ausgewertet. Zur Bewertung des Ansatzes wurden die Daten von 12 Referenzstationen des MGEX-Projektes (Multi-GNSS Experiment) über eine Woche ausgewertet und analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einfrequenz-PPP-Lösung mit diesem Ansatz und 4 GNSS-Konstellationen die Konvergenzzeit um 56%, 47% und 41% für die Ost-, Nord- und Höhenkomponenten im Vergleich zur Auswertung mit nur GPS-Beobachtungen verkürzte.

Die Einfrequenz-PPP-Lösung mittels preisgünstiger Empfänger (u-blox) wurde für die Identifizierung und Kartierung von Fahrspuren auf einer Autobahn erfolgreich demonstriert (Bakker & Tiberius, 2017). Es wurde jedoch gezeigt, dass die Leistung stark von der Anzahl der verfügbaren Satelliten abhängt. Deswegen ist die Erweiterung von GPS zu Multi-GNSS notwendig, insbesondere bei reduzierter Sichtbarkeit des Himmels.

Ab Version 7.0 des Android-Betriebssystems werden die GNSS-Rohdaten in der Anwendungsprogrammierschnittstelle zur Verfügung gestellt. Dies eröffnet die Möglichkeit zur präzisen Positionierung mit Android-Geräten mittels z.B. externer GNSS-Korrekturen. Ein Beispiel ist das Tablet Nexus 9 (Håkansson, M., 2018), das nicht nur die Code- sondern auch die Phasenbeobachtungen auf der ersten Frequenz aufzeichnet. Die Mehrwegeeffekte stellen eine große Herausforderung für die präzise Positionsbestimmung bei Verwendung von Smartphones und Tablets dar (Håkansson, M., 2018).

Smolyakov, I., & Langley, R. (2018) befassen sich mit den Voraussetzungen für mobile Plattformen, die mit preisgünstigen Einfrequenz-Empfängern und Patch-Antennen ausgestattet sind, damit alle verfügbaren GNSS-Signale effizient genutzt werden können. Verschiedene Techniken wurden zur Minimierung des Einflusses von non-line-of-sight-Signalen und Mehrwegeeffekten auf die finale Lösung untersucht, wie z.B. die Gewichtung basierend auf der Satellitenelevation und dem Signal-Rausch-Verhältnis sowie der Ausschluss bestimmter Satelliten bei der Verarbeitung. Es wurde gezeigt, dass die Code-Mehrwege-Linearkombination, die auf den Beobachtungen einer Frequenz und der Korrektur der Ionosphäre mittels GIM basiert, eine wirksame Maßnahme ist, um den Einfluss des Mehrwege-Signals auf ein Navigationssignal zu verfolgen. Diese Analyse von Code-Mehrwegen und der daraus berechneten Varianzen wurden in einer Gewichtungstechnik implementiert. Mit dieser Technik wurde die Positionsgenauigkeit mittels GPS-Satelliten im statischen Fall um mehr als 50% gesteigert. Somit bildet dieser Algorithmus eine effektive Technik für die Verwendung von Beobachtungen mit preisgünstigen Patch-Antennen.

Wanninger et al. (2017) haben die GDV als nadir-abhängige Werte für die GPS- Satellitenantennen und elevationsabhängige Werte für die Empfangsantennen bestimmt. Die Kalibrierung der GDV auf einer Frequenz erfolgt mit Hilfe der MP-Linearkombination in Bezug auf die Phasenbeobachtungen auf zwei Frequenzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Einflüsse der GDV-Korrekturwerte auf die Positionsbestimmung mittels Einfrequenz-PPP-Lösung mit GRAPHIC-Verfahren unter Verwendung von GPS-Beobachtungen untersucht. Die Genauigkeit der Höhe wurde durch Anbringen der Korrekturwerte erheblich verbessert. Hinsichtlich der Lagekomponente konnte keine Änderung der Genauigkeit festgestellt werden.

### **1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit**

Wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, wurde die PPP-Lösung mit dem Einfrequenz-Empfänger mehrmals untersucht und ihr Genauigkeitspotential analysiert. Es wurde jedoch keine stabile Einfrequenz-PPP-Lösung im Gegensatz zur Lösung mit Zweifrequenz-Messungen erzielt. Außerdem wurde durch diese Untersuchungen festgestellt, dass die Einfrequenz-PPP-Lösung stark von der Messumgebung abhängig ist. Deswegen kann nur unter optimalen Bedingungen eine gute Messgenauigkeit erreicht werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die umfangreiche Genauigkeitsanalyse der 24-Stunden-Einfrequenz-PPP-Lösung anhand einer Software im Post-Processing. Die Software WaPPP wurde von

Herrn L. Wanninger entwickelt (Wanninger, 2016). Es soll erforscht werden, welche Positionsgenauigkeit durch die 24 Stunden Einfrequenz-PPP-Lösung mit Auswertung der durch hochwertigen Empfänger gewonnenen Einfrequenz-Beobachtungen erzielt wird und welche Einflüsse die GDV auf diese Genauigkeit haben. Wie erfolgt eine Modellierung der GDV, damit ihre Einflüsse auf die Positionsgenauigkeit eliminiert werden. Zum Schluss wird untersucht, inwieweit die Einfrequenz-PPP-Lösung unter Verwendung von preisgünstigen GNSS-Messgeräten eine präzise Positionsbestimmung erzielen kann und ob die kombinierte Auswertung der GPS/GLONASS-Beobachtungen und das Einführen der erzeugten Code-Korrekturwerte die Positionsgenauigkeit steigern können.

Das 2. Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der verwendeten GNSS sowie ihre Zeit- und ihre Koordinatensysteme. Dann werden unterschiedliche Aspekte zur satellitengestützten Positionsbestimmung hinsichtlich der Beobachtungsgröße und Auswerte- sowie Messverfahren erläutert. Außerdem werden die auftretenden Messabweichungen und ihre Ursachen dargestellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels befasst sich mit den Grundlagen der Ausgleichsrechnung und Statistik.

Das 3. Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Einfrequenz-PPP-Lösung. Die Beschreibung der verfügbaren Produkte wie z. B. die präzisen Satellitenorbits und die Satellitenuhrkorrekturen sowie die Antennenkorrekturen ist Bestandteil dieses Kapitels. In Bezug auf die Eliminierung oder mindestens Reduzierung verschiedener Messabweichungen wie z. B. der ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen werden verschiedene Verfahren erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Beschreibung des stochastischen und funktionalen Modells der Einfrequenz-PPP-Lösung.

Das 4. Kapitels widmet sich der Modellierung der GDV für C1 und P2 Codebeobachtungen der GPS- und GLONASS-Satelliten. Nach einer kurzen Motivation und Einleitung werden das mathematische Modell und die benötigten Vorarbeiten zur Modellierung ausführlich erklärt. Weiterhin erfolgt die Bestimmung der GDV als nadir-abhängige Modelle für die Sendeantennen und als elevationsabhängige Modelle für die Empfangsantennen. Anschließend wird die zeitliche Stabilität der Korrekturwerte untersucht und bestätigt.

Schwerpunkt des 5. Kapitels sind Untersuchungen zur erreichbaren Positionsgenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung bei Verwendung von hochwertigen Empfangsantennen. Die verwendeten Softwaremodule zur Auswertung werden am Anfang des Kapitels beschrieben. Als Datensatz dienen die Referenzstationen verschiedener Netze von drei aufeinanderfolgenden GPS-Wochen im Jahr 2016. Die Stationen wurden mit 12 unterschiedlichen Empfangsantennen ausgestattet, die die Signale der beiden Frequenzen von GPS und GLONASS empfangen können, damit die Untersuchungen Aussagen hinsichtlich der Auswirkung des Antennentyps und der kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertung auf die PPP-Lösung ermöglichen. Abschließend wird gezeigt, welche Verbesserungen in der Höhengenaugkeit

mittels Einfrequenz-PPP-Lösung durch Anbringen der erzeugten Code-Korrekturmodelle an die Beobachtungen erzielt werden.

Einfrequenz-PPP-Lösungen benötigen nur Beobachtungen auf einer Frequenz. Damit liegt der Hauptvorteil dieser Lösung in der möglichen Anwendung auf die durch preisgünstige GNSS-Ausrüstungen erworbenen Daten. Das 6. Kapitel befasst sich mit der Positionsgenauigkeit hinsichtlich der verwendeten Ausrüstungen und ihrer Beschaffungskosten. Eigene Messungen werden durch die preisgünstige TW3870 von Tallysman in Kombination mit dem preisgünstigen Empfänger A07-N-11 der Alberding GmbH sowie mit anderen hochwertigen Antennen/Empfängertypen durchgeführt. Die Positionsgenauigkeit wird in Abhängigkeit vom Empfängertyp analysiert. Anschließend wird die erreichbare Positionsgenauigkeit für die drei Komponenten (Ost, Nord und die Höhe) mittels Auswertung der preisgünstigen Daten untersucht. Zusätzlich wird gezeigt, ob das Einführen von Code-Korrekturwerte positive Einflüsse auf die Positionsbestimmung hat.

Die wichtigsten Ergebnisse werden im Kapitel 7 zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen gegeben.



## 2 Grundlagen

### 2.1 GNSS

Der Begriff GNSS fasst alle Satellitennavigationssysteme zusammen. Zwei davon, GPS und GLONASS, sind schon im Regelbetrieb, das heißt sie arbeiten mit voller Leistungsfähigkeit. Die anderen, Galileo und Beidou, befinden sich noch im Aufbau. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Entwicklung und Modernisierung der im Rahmen dieser Arbeit genutzten Systeme GPS und GLONASS.

#### 2.1.1 GPS

Das amerikanische Navigationssatellitensystem, *Navigational Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System*, (NAVSTAR GPS) wurde vom US-Verteidigungsministerium für militärische Zwecke entwickelt und aufgebaut. Der erste GPS-Satellit wurde im Jahr 1978 ins All geschossen. Mitte 1995 erreichte GPS seine volle Leistungsfähigkeit mit 24 Satelliten, auf 6 Bahnebenen mit je 4 Satelliten. Die Satellitenbahnen haben eine Halbachse von 26560 km und eine Neigung gegenüber dem Erdäquator von 55°. Auf Grund dieser Bedingungen beträgt die Umlaufzeit eines Satelliten genau einen halben Sterntag. Ein Sterntag ist vier Minuten kürzer als ein Sonnentag. Infolgedessen wiederholt jeder Satellit jeden Tag seine Bahn zirka vier Minuten früher (Xu & Xu, 2016 und Bauer, 2011).

Im April 2019 waren 31 GPS-Satelliten verschiedener Generationen (1 Block IIA, 11 Block IIR, 7 Block IIR-M und 12 Block IIF) im Betrieb. Dazu gehören nicht die Reservesatelliten, die im Bedarfsfall reaktiviert werden (GOV, 2019).

Art	Block IIA	Block IIR	Block IIR-M	Block IIF	GPS III
<b>In Betrieb</b>	0	12	7	12	In der Produktion
<b>Zivile Signale</b>	C/A Code auf L1, P(Y) Code auf L1 & L2	C/A Code auf L1, P(Y) Code auf L1 & L2	Alle vorherigen Signale, Zweites Signal auf L2 (L2C)	Alle vorherigen Signale, Signal auf L5 (L5)	Alle vorherigen Signale, Neues Signal auf L1 (L1C)
<b>Geplante Lebensdauer</b>	7,5 Jahre	7,5 Jahre	7,5 Jahre	12 Jahre	15 Jahre
<b>Startzeitraum</b>	1990-1997	1997-2004	2005-2009	2010-2016	Ab 2018

Tabelle 1: Entwicklungs- und Modernisierungsphasen der GPS Satelliten, Stand Oktober 2017

In der Tabelle 1 sind einige Merkmale der verschiedenen Generationen von GPS-Satelliten hinsichtlich der Signale und der geplanten Lebensdauer aufgeführt. Für die Block IIA- (A: *advanced*) und IIR-Satelliten (R: *replenishment*) war eine Lebensdauer von 7,5 Jahren geplant (Whitney, 2015).

Die Modernisierungsphase begann mit dem Start des ersten Satelliten vom Typ Block IIR-M (M: *modernized*). Neben dem zivilen Signal auf der ersten Frequenz L1 C/A senden mit L2C die Satelliten Block IIR-M ein zweites Signal auf der zweiten Frequenz aus. Im Jahr 2010 wurde der erste Satellit der Generation Block IIF in seine Umlaufbahn gebracht. Seitdem steht mit L5 ein weiteres ziviles Signal auf der dritten Frequenz zur Verfügung. Außerdem wurde die nominelle Lebensdauer dieser Satellitengeneration auf 12 Jahren erhöht. Zurzeit sind die Satelliten vom Typ III in der Produktion. Das Besondere an dieser dritten Satellitengeneration ist das zusätzliche zivile Signal L1C auf der ersten Frequenz. Weiterhin wird eine höhere Lebensdauer von 15 Jahren erwartet (Whitney, 2015, GOV, 2016).

Durch Verwendung verschiedener *Pseudo Random Noise* (PRN) Codes zur Identifizierung der einzelnen Satelliten kann jeder GPS-Satellit die gleiche Frequenz benutzen. Dieses Verfahren wird als *Code Division Multiple Access* (CDMA) bezeichnet (Bauer, 2011). Das heißt, jeder GPS-Satellit überträgt seine Daten auf den drei Frequenzen: L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) und L5 (1176,45 MHz) (Xu et al., 2016).

## 2.1.2 GLONASS

Die Abkürzung GLONASS leitet sich vom russischen „*GL*Obal'*naya NAV*igatsioannaya *Sputnikovaya Sistema*“ her und bedeutet Globales Satellitennavigationssystem. Das GLONASS-Raumsegment wurde für eine nominale Konstellation von 24 Satelliten entwickelt, die auf drei Bahnebenen verteilt sind. Ihre Inklination ist  $64,8^\circ$  gegenüber dem Erdäquator. Die GLONASS-Satelliten haben eine Höhe von 19100 km. Diese führt zu einer Umlaufzeit von 11 h 15 min 44 s (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, Bhatta, 2011).

Im Dezember 1996 wurde die vollständige Konstellation von GLONASS erreicht. Aufgrund der politischen und ökonomischen Schwierigkeiten, sowie der im Vergleich zu GPS kürzeren Lebensdauer der GLONASS-Satelliten, nahm die Anzahl der verfügbaren Satelliten dramatisch auf sieben Satelliten im Jahr 2002 ab (Bhatta, 2011). Die Anweisungen zum Wiederaufbau und Modernisierung von GLONASS wurden im Jahr 2001 durch die russische Regierung genehmigt und übernommen. Die folgenden Punkte bilden das Ziel dieses Programmes (Bhatta, 2011):

- Modernisierung der GLONASS-M-Satelliten und Entwicklung der GLONASS-K-Satelliten,
- Erneuerung des Bodensegments,

- Forschung und Entwicklung zu einer internationalen Kooperation der Nutzer von GLONASS.

In der Folge wurde die vollständige GLONASS-Konstellation wiederaufgebaut. Im Juni 2019 befinden sich 24 Satelliten im Betrieb (IAC, 2019). Die meisten davon sind GLONASS-M Satelliten, die eine Lebensdauer von 7 Jahre haben. Diese senden ein zweites ziviles Signal auf der Frequenz L2 aus. Von der nächsten Generation der GLONASS-K Satelliten wird eine höhere Lebensdauer von 10-12 Jahren erwartet. Außerdem senden die Satelliten der neueren und erneuerten Generation (GLONASS-K und GLONASS-M ab 2014) ein drittes ziviles Signal aus (Karutin, 2015).

Im Gegensatz zu allen anderen GNSS nutzt GLONASS zur Identifizierung der einzelnen Satelliten eine andere Technik, die als (*Frequency Division Multiple Access*) FDMA-Technik bezeichnet wird. Bei dieser Technik sendet jeder GLONASS-Satellit seine Signale auf einer eigenen Frequenz, jedoch mit dem gleichen PRN-Code. Die Formeln zur Berechnung der Trägerfrequenzen der GLONASS-Signale lauten (Bauer, 2011)

$$\begin{aligned}
 f_{k1} &= f_{01} + k * \Delta f_1; & f_{01} &= 1602 \text{ MHz}; & \Delta f_1 &= 562,5 \text{ KHz} \\
 f_{k2} &= f_{02} + k * \Delta f_2; & f_{02} &= 1246 \text{ MHz}; & \Delta f_2 &= 437,5 \text{ KHz} \\
 k &= -7 \dots +6
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Die Variable k wird als ein Teil der Navigationsnachricht mit gesendet (Bauer, 2011).

## 2.2 Referenz- und Koordinatensysteme

Um die Satellitenbewegung beschreiben zu können, werden Referenzsysteme benötigt, die durch den Ursprung des Koordinatensystems, die Orientierung der Koordinatenachsen und den Maßstab definiert werden. Diese Referenzsysteme werden in der Praxis durch bestimmte Punkte auf der Erdoberfläche (z. B. Fundamentalstationen) realisiert. Die praktische Realisierung eines Referenzsystems trägt die Bezeichnung Referenzrahmen (Seeber, 2003).

In der Satellitengeodäsie lassen sich zwei wichtige Referenzsysteme benutzen. Zur Beschreibung der Satellitenbewegung ist in der Praxis ein astronomisches (zälestisches) Koordinatensystem notwendig, das zwei Eigenschaften aufweist:

- 1- Der Koordinatenursprung befindet sich entweder in Ruhelage, oder er führt eine lineare Bewegung durch.
- 2- Die Koordinatenachsen sind raumfest.

Aufgrund der Erddrehung haben Punkte auf der Erdoberfläche (z. B. Stationen) jedoch keine raumfesten Koordinaten. Deswegen sind die astronomischen Koordinatensysteme nicht geeignet und es wird im

Gegensatz dazu ein erdfestes Referenzsystem benötigt. Die Zusammenhänge zwischen beiden Referenzsystemen müssen bekannt sein. In den folgenden Abschnitten sollen zuerst das Internationale Terrestrische Referenzsystem und dann die GNSS-Referenzsysteme beschrieben werden (Bauer, 2011).

### 2.2.1 Internationales Terrestrisches Referenzsystem

Um die Positionsbestimmung entweder auf der Erdoberfläche (wie Stationen) oder in der Nähe der Erdoberfläche (wie Satelliten) durchführen zu können, muss ein terrestrisches Referenzsystem definiert werden. In diesem Koordinatensystem entspricht die Z-Achse der Rotationsachse der Erde. Da die Rotationsachse und die Hauptträgheitsachse der Erde nicht zusammenfallen, führt das zu einer ständigen Verlagerung der Rotationachse (Polbewegung). Infolgedessen ist das terrestrische Koordinatensystem beweglich und zeitabhängig. Hier spricht man von einem „momentanen“ terrestrischen Koordinatensystem.

Zur Definition erdfester und zeitunabhängiger Koordinatensysteme wurde festgelegt, dass die „konventionelle“ Lage der Erdachse (*Conventional International Origin (CIO)*) der mittleren Lage des Pols für die Periode von 1900 bis 1905 entspricht (Bauer, 2011).

Das *International Terrestrial Reference System (ITRS)* wurde durch den *International Earth Rotation Service (IERS)* festgelegt und wie folgt definiert.

- Der Koordinatenursprung liegt im Massenzentrum der Erde, einschließlich Ozeanen und Atmosphäre.
- Die Z-Achse ist die Rotationsachse der Erde, welche durch den CIO festgelegt wurde.
- Die X-Achse geht durch den mittleren Meridian von Greenwich.
- Die Y-Achse entsteht bei Drehung der X-Achse um  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn.
- Die Längeneinheit ist das SI-Meter.

Die Realisierung des ITRS ist das *International Terrestrial Reference Frame (ITRF)*, welches durch die kartesischen Koordinaten und linearen Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen auf der Erdoberfläche festgelegt wurde (Seeber, 2003).

Es gibt verschiedene Realisierungen des ITRF. Sie unterscheiden sich in den Jahreszahlen (z. B. ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000) (Görres, 2010). Das aktuelle ITRF ist ITRF14. Die Differenzen zwischen den verschiedenen ITRF betragen normalerweise nicht mehr als 10 mm. Die Transformationsparameter der verschiedenen ITRF müssen ebenfalls bekannt sein (Kouba, 2003).

## 2.2.2 Das World Geodetic System 1984 (WGS84)

Um die Positionsbestimmung im Satellitensystem GPS realisieren zu können, wird das *World Geodetic System* (WGS-84) als Grundlage für die Bestimmung der Broadcast-Bahnen verwendet (Görres, 2010). Es ist durch die Koordinaten der Stationen des GPS-Bodensegments gegeben. Das WGS-84 in der aktuellen Realisierung weicht vom ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) nur wenige Zentimeter ab (Bauer, 2011).

Das WGS-84 ist wie folgt definiert:

- Der Koordinatenursprung befindet sich im Massenzentrum der Erde.
- Die Z-Achse entspricht der konventionellen festgelegten mittleren Rotationsachse der Erde.
- Die X-Achse ist die Schnittlinie zwischen der Ebene des Nullmeridians des WGS-84 und der Ebene des mittleren astronomischen Äquators.
- Die Y-Achse ergänzt das rechtwinklige Koordinatensystem. (GPS.GOV, 1995).

Das Ellipsoid des WGS-84 lässt sich durch vier Parameter definieren, siehe Tabelle 2 (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Es gibt verschiedene Realisierungen des WGS84, z.B. WGS84(G730) und WGS84(G1762).

Parameter	Beschreibung
$a = 6\,378\,137.0\text{ m}$	große Halbachse
$f = 1/298.257\,223\,563$	Abplattung
$\omega = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11}\text{ rad/s}$	Rotationsgeschwindigkeit der Erde
$\mu = 3\,986\,004.418 \cdot 10^8\text{ m}^3/\text{s}^2$	Geozentrische Gravitationskonstante

Tabelle 2: Parameter des WGS-84-Ellipsoids

## 2.2.3 Parametry Zemli (PZ-90.02)

Das bei GLONASS verwendete Referenzsystem heißt (PZ-90.02). PZ-90.02 lässt sich wie folgt definieren (GLONASS ICD, 2008).

- Der Koordinatenursprung liegt im Massenzentrum der Erde.
- Die Z-Achse ist die mittlere Rotationsachse der Erde. Die Ausrichtung ist gegeben durch den *Conventional International Pole* (CIP), welcher vom *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) empfohlen wurde.

- Die X-Achse liegt in der Äquatorebene und zeigt in die Richtung des Nullmeridians.
- Die Y-Achse ergänzt das rechtwinklige Koordinatensystem.

Die wesentlichen Systemdefinitionen, wie die Lichtgeschwindigkeit, die Rotationsgeschwindigkeit der Erde und die Parameter des Ellipsoids befinden sich in der folgenden Tabelle 3 (GLONASS ICD, 2008, Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Parameter	Beschreibung
$a = 6\,378\,136\text{ m}$	große Halbachse
$f = 1/298.257\,839\,303$	Abplattung
$\omega = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11}\text{ rad/s}$	Rotationsgeschwindigkeit der Erde
$\mu = 3\,986\,004.4 \times 10^8\text{ m}^3/\text{s}^2$	Geozentrische Gravitationskonstante

Tabelle 3: Parameter des (PZ-90.02)-Ellipsoids

## 2.3 Zeitsysteme

Da die Satellitenposition zeitabhängig ist und sich die Punkte auf der Erdoberfläche (z. B. Bodenstationen) im astronomischen Referenzsystem als Funktionen mit der Zeit bewegen, hat die Zeit in der Satellitengeodäsie eine besondere Bedeutung. Im Folgenden sollen die weltweit verwendeten Zeitsysteme und die mit GNSS verbundenen Zeitsysteme erläutert werden (Bauer, 2011).

### 2.3.1 Sonnenzeit – UT – UT1

Als einfache Zeiteinheit wird die Rotationsdauer der Erde gewählt. Zur Realisierung dieser Zeiteinheit können zwei aufeinanderfolgende Höchststände der Sonne an einem Ort beobachtet werden. Diese Zeiteinheit wird als wahrer Sonnentag und die Zeitskala als Sonnenzeit bezeichnet. Der Sonnenhöchststand durch den Meridian von Greenwich wird als 12:00 Uhr wahre Sonnenzeit angesehen.

Wegen der folgenden Ursachen hat der Sonnentag im Lauf eines Jahres keinen konstanten Wert:

- Während des Umlaufs der Erde um die Sonne auf einer Bahnellipse hat die Geschwindigkeit keinen unveränderlichen Wert, das führt zur unterschiedlichen Länge des wahren Sonnentages.
- Der zweite Grund liegt darin, dass die Rotationsachse der Erde nicht senkrecht auf der Ekliptik steht.

Aus den vorstehenden Gründen kann der wahre Sonnentag als ungeeignetes Maß für die Zeit angesehen werden. Im Gegensatz dazu spielt der Sonnentag für den Lebensrhythmus des Menschen eine große Rolle.

Um die vorstehenden Probleme lösen zu können, lässt sich ein „mittlerer Sonnentag“ definieren, der im Lauf eines Jahres einen konstanten Wert hat. Das Zeitsystem wird in diesem Fall „mittlere Sonnenzeit“ genannt. Die Abbildung 1 zeigt die Abweichung der mittleren Sonnenzeit von der wahren Sonnenzeit (Bauer, 2011).

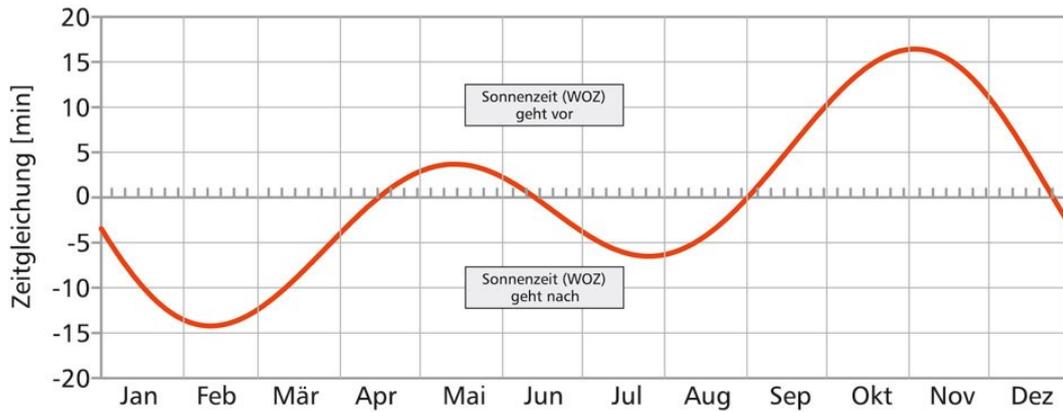


Abbildung 1: Zeitgleichung (Bauer, 2011)

Die Weltzeit *Universal Time* (UT) ist die mittlere Sonnenzeit für den Nullmeridian von Greenwich.

UT ergibt sich aus den Beobachtungen auf 50 astronomischen Stationen.

Da die Polbewegung der Erde zu unterschiedlichen Weltzeiten (UT) in den Beobachtungsstationen führt, wurde vereinbart, dass eine Reduktion der beobachteten UT auf den konventionellen Pol (CIO) durchgeführt werden muss. Die daraus resultierende Zeit wird UT1 genannt (Bauer, 2011).

### 2.3.2 Atomzeit (TAI) und koordinierte Weltzeit (UTC)

Aus verschiedenen Gründen, wie im vorstehenden Abschnitt erwähnt, ist die aus der Erdrotation abgeleitete Zeiteinheit nicht genau genug, insbesondere für die Physik. Im Jahr 1967 wurde von der Internationalen Kommission für Maß und Gewicht die genaueste Zeiteinheit (SI-Sekunde) definiert.

„Die SI-Sekunde ist 9.192.631.770-mal die Periode der ausgesandten Strahlung, die dem Übergang zwischen zwei Hyperfeinenergieniveaus des Grundzustandes des Cäsium 133-Atoms entspricht“ (Bauer, 2011)

Das der SI-Sekunde entsprechende Zeitsystem wurde Atomzeit, *Temps Atomic International* (TAI), genannt. Am 1. Januar 1958 stimmte TAI mit UT1 überein.

Die Verlangsamung der Erdrotation führt zu einem Ansteigen der Differenz zwischen TAI und UT1. Beispiele für diese zunehmenden Differenzen

TAI – UT1 = +30.8 s am 1. Januar 1998

= +31.9 s am 1. Januar 2001

= +32.3 s am 1. Januar 2003

= +36.4 s am 1. Januar 2017

Für verschiedene Anwendungen, insbesondere in der Navigation, wird eine Zeitskala gefordert, die einerseits eine sehr genaue und einheitliche Zeiteinheit hat und andererseits eine bestmögliche Anpassung an UT1 liefert. Deshalb wurde im Jahr 1972 *Universal Time Coordinated* (UTC) eingeführt. UTC und TAI unterscheiden sich durch eine ganzzahlige Anzahl von Sekunden (Schaltsekunden). Im Juni 2019 beträgt n 37 Sekunden.

UTC = TAI – n (1s) (Seeber, 2003).

### 2.3.3 Das GPS-Zeitsystem

GPS hat sein eigenes Zeitsystem, das von TAI abhängig ist und in UTC referenziert wird. Das GPS-Zeitsystem wird durch die GPS-Woche und die Sekunden innerhalb der Woche bezeichnet. Der Anfang der GPS-Woche ist um Mitternacht zwischen Samstag und Sonntag. Die Differenz zwischen dem GPS-Zeitsystem und TAI ist konstant und beträgt 19 Sekunden.

TAI – GPS-Zeit = 19,000 s (Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

Der 5. Januar 1980, 0:00 Uhr UTC-Zeit wurde als Anfangsepoche des GPS-Zeitsystems definiert.

Das GPS-Zeitsystem weicht von UTC ab, weil es eine kontinuierliche Zeitskala ist, während UTC mit ganzzahligen Schaltsekunden regelmäßig korrigiert wird (GPS.GOV, 1995).

Beispielweise ist die Differenz zwischen dem GPS-Zeitsystem und UTC seit dem 1. Januar 2017, 18 Sekunden. Diese Differenz ist mit einer Genauigkeit von 100 Mikrosekunden bekannt und wird den GPS-Nutzern in der GPS-Navigationsnachricht mitgeteilt (Bauer, 2011).

### 2.3.4 Das GLONASS-Zeitsystem

Das Bodensegment von GLONASS ist mit sehr genauen Atomuhren ausgestattet, die das GLONASS-Zeitsystem erzeugen (Bauer, 2011).

Im Gegensatz zum GPS-Zeitsystem wird das GLONASS-Zeitsystem an UTC angeglichen (Schaltsekunden). Diese Korrekturen werden ungefähr einmal pro Jahr (oder pro 1,5 Jahre) durchgeführt. GLONASS-Nutzer werden darüber mindestens 3 Monate vor der geplanten Korrektur informiert (GLONASS ICD, 2008).

Der Zusammenhang zwischen dem GLONASS-Zeitsystem und UTC ist mit einer Genauigkeit von einer Mikrosekunde bekannt und wird den GLONASS-Nutzern in der GLONASS-Navigationsnachricht mitgeteilt.

Da das GLONASS-Zeitsystem sich auf die Moskauer Zeitzone bezieht, existiert ein konstanter Unterschied von 3 Stunden zwischen dem GLONASS-Zeitsystem und der UTC-SU-Zeit.

$$t(\text{GLONASS}) = \text{UTC}(\text{SU}) + 3 \text{ h } 00 \text{ min } 00 \text{ s} \quad (\text{Bauer, 2011})$$

## 2.4 Positionsbestimmung

GNSS gibt dem Nutzer die Möglichkeit, genaue Informationen über seine Position, Geschwindigkeit sowie die Zeit fast überall auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu erhalten. Zur Positionsbestimmung müssen sogenannte Pseudostreckenmessungen zwischen den GNSS-Satelliten und dem Nutzer durchgeführt werden. Sind die Position der Satelliten und Satellitenuhrkorrekturen zum Messzeitpunkt bekannt, kann die Position des GNSS-Nutzers bestimmt werden.

Die GNSS-Beobachtungen umfassen im wesentlichen Code-, Phasen- und Doppler-Messungen. Obwohl die Beobachtung von Code und Phase zur Bestimmung der Pseudostrecken verwendet werden kann, unterscheiden sie sich deutlich hinsichtlich der Genauigkeit, Eindeutigkeit und ionosphärischen Laufzeitverzögerung. Die Mehrdeutigkeit der Phasenmessungen ist der größte Nachteil im Vergleich zur eindeutigen Codebeobachtung. Hingegen weisen die Phasenbeobachtungen eine höhere Genauigkeit wegen des geringen Messrauschens auf. Die ionosphärische Laufzeitverzögerung hat bei Code- und Phasenbeobachtungen die gleiche Größe, nur mit umgekehrten Vorzeichen (Seeber, 2003).

Die mathematische Beschreibung einer Code- bzw. Phasenbeobachtung  $(C_a^i, \Phi_a^i)$  zwischen einem sichtbaren Satellit  $i$  und einer Empfangsantenne  $a$  lautet (Wanninger, 2000):

$$C_{a,f}^i = R_a^i + C_0 * [\delta t_a + h_{a,f,c} - \delta t^i - h_{f,c}^i] + I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,c}^i + A_{a,f,c}^i + \varepsilon_{a,f,c}^i \quad (2)$$

$$\Phi_{a,f}^i = R_a^i + C_0 * [\delta t_a + h_{a,f,\phi} - \delta t^i - h_{f,\phi}^i] - I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,\phi}^i + A_{a,f,\phi}^i + \lambda_f * N_{a,f}^i + \varepsilon_{a,f,\phi}^i \quad (3)$$

mit

$$R_a^i = |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \quad (4)$$

Wobei:

- $R_a^i$ : Entfernung zwischen Satellit i und Empfänger a [m]
- $C_0$ : Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s]
- $\delta t_a$ : Empfängeruhrabweichung [s]
- $h_a$ : instrumentelle Signalverzögerungen im Empfänger [s]
- $\delta t^i$ : Satellitenuhrfehler [s]
- $h^i$ : instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten [s]
- $I_a^i$ : ionosphärische Laufzeitverzögerung [m]
- $T_a^i$ : troposphärische Laufzeitverzögerung [m]
- $O_a^i$ : Orbitfehler [m]
- $M_a^i$ : Mehrwegeausbreitungsfehler [m]
- $A_a^i$ : Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m]
- $\varepsilon_a^i$ : zufällige Messfehler [m]
- $\lambda_f$ : Wellenlänge [m]
- $N_a^i$ : Phasenmehrdeutigkeit [-]
- $\vec{X}^i, \vec{X}_a$ : Ortsvektoren in den globalen kartesischen Koordinaten X, Y, Z [m]

Die satellitengestützte Positionsbestimmung erfolgt durch absolute oder relative Auswertung der GNSS-Beobachtungen. Werden simultane Messungen zu den Satelliten von mindestens zwei Stationen verwendet, handelt es sich um eine relative Positionsbestimmung. In diesen Verfahren wird der Basislinienvektor zwischen beiden Stationen berechnet. Durch Addition dieses Vektors zu den bekannten Koordinaten einer Station (Referenzstation) ergeben sich die gesuchten Koordinaten der zweiten Station. Hingegen reichen für eine absolute Positionsbestimmung simultane Messungen von nur einer Station

zu den Satelliten aus. Zahlreiche Messabweichungen müssen bei diesen Verfahren minimiert oder vollständig eliminiert werden. Im Folgenden wird die Auswertung der GNSS-Beobachtungen zur Positionsbestimmung hinsichtlich ihrer verwendeten Messgrößen und ihrer Verfahren erläutert.

### **2.4.1 Codebeobachtungen als primäre Messgröße**

Bei Verwendung von Codebeobachtungen als primäre Messgröße in der Auswertung ist der GNSS-Nutzer in der Lage, seine Position je nach Anwendung relativ oder absolut zu bestimmen.

#### Absolute Positionsbestimmung

Die absolute Positionsbestimmung mit Codebeobachtungen wird als die klassische Anwendung von GNSS angesehen. Die Gl. ( 2 ) beschreibt die Codebeobachtung zur Bestimmung von Pseudostrecken zwischen einem Satellit und einem Empfänger und zusätzlich die dabei auftretenden Messabweichungen. Hierbei sind die Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrabweichungen durch *broadcast*-Ephemeriden gegeben. Des Weiteren bilden die drei Koordinatenkomponenten des Empfängers und die Empfängeruhrabweichung die vier Unbekannten im Auswerteprozess. Damit sind vier simultane Messungen zu mindestens vier Satelliten erforderlich (Leick, 2004). Die Positionsgenauigkeit hängt in diesem Verfahren von der Genauigkeit der Navigationsnachricht und der Satellitenkonstellation ab. Zur Verbesserung der Geometrie werden in der Praxis nicht nur vier Satelliten, sondern alle sichtbaren Satelliten beobachtet. Zur Reduzierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen ist ein Korrekturmodell für Einfrequenz-Empfänger (C/A-Code-Nutzer) anzubringen. Bei Nutzung von Zweifrequenz-Empfängern besteht die Möglichkeit, eine ionosphären-freie Linearkombination aus zwei Codebeobachtungen zu bilden. Damit kann die Genauigkeit der Lösung mit Zweifrequenz Code-Beobachtungen deutlich gesteigert werden (Leick, 2004).

#### Relative Positionsbestimmung

Um viele GNSS-Messabweichungen zu vermindern oder sogar zu eliminieren kann eine relative GNSS-Auswertung zur Anwendung kommen. Dazu muss sich eine Station mit bekannten Koordinaten in der Nähe der zu bestimmenden Position befinden. Es müssen simultane Messungen von beiden Stationen zu ausreichend vielen Satelliten durchgeführt werden, Dieses Verfahren wird als differenzielles GNSS (DGNSS) bezeichnet. Durch die Differenzbildung werden die Satellitenuhrabweichung eliminiert sowie die troposphärischen und ionosphärischen Laufzeitverzögerungen und die Einflüsse der Orbitabweichung verringert. Die erzielbare Genauigkeit der Nutzerposition mit diesem Verfahren liegt im Bereich von 1 m (Bauer, 2011).

## 2.4.2 Phasenbeobachtungen als primäre Messgröße

### Absolute Positionsbestimmung

Eine absolute Positionsbestimmung kann unter Verwendung von Phasenbeobachtungen durchgeführt werden. Dank ihrer im Vergleich zur Codebeobachtung höheren Genauigkeit wird die Positionsgenauigkeit gesteigert. Dieses Verfahren wird als *Precise Point Positioning* (PPP) bezeichnet. Obwohl die PPP-Lösung hauptsächlich auf Phasenbeobachtungen basiert, können jedoch die Codebeobachtungen zur Berechnung der Näherungskordinaten verwendet werden. Die Gl. ( 4 ) beschreibt die Phasenbeobachtung und ihre Messabweichungen auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger. Eine zusätzliche Unbekannte (die Mehrdeutigkeit) wird in dieser Gleichung dargestellt, die im Auswerteprozess auf einen ganzzahligen Wert festgesetzt werden muss, damit eine Positionsgenauigkeit auf dem Niveau von Zentimetern erwartet werden kann. Neben der Festsetzung der Mehrdeutigkeit müssen mehrere Messabweichungen korrigiert werden. Die Verwendung von präzisen Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen sind für diese Lösung unverzichtbar (Heßelbarth, 2011). In den nächsten Kapiteln wird die PPP-Lösung vertiefend erläutert.

### Relative Positionsbestimmung

Ähnlich der relativen GNSS-Auswertung unter Verwendung von Codebeobachtungen als primäre Messgröße können auch Phasenbeobachtungen verwendet werden. Diese differenziellen Verfahren werden dann unter anderem als *Real-Time Kinematic* (RTK) bezeichnet, wenn eine Echtzeitlösung angestrebt wird. Mit RTK ist eine Genauigkeit von 1 bis 2 cm erreichbar (Bauer, 2011). Im Gegensatz zur absoluten Positionsbestimmung benötigt RTK keine präzisen Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen. Es sind aber simultane Beobachtungen auf zwei Stationen zu mehreren Satelliten erforderlich. Von einer der beiden Stationen müssen die Koordinaten bekannt sein. Diese wird als Referenzstation bezeichnet, die andere Station mit unbekanntem Koordinaten als Roverstation. Als Ergebnis des Auswertungsprozesses lassen sich die Komponenten des Basislinienvektors zwischen beiden Stationen (Referenz- und Roverstation) berechnen. Infolgedessen addiert man die absoluten Koordinaten der Referenzstation zu den berechneten Komponenten des Basislinienvektors und erhält so die absoluten Koordinaten der Roverstation.

Die Differenzbildung der Phasenbeobachtungen verringert oder eliminiert sogar verschiedene GNSS-Messabweichungen. Hierbei werden zwei Arten, einfache oder doppelte Differenzbildung unterschieden. Bei einfacher Differenzbildung ( $\Delta$  Operator) zwischen zwei Empfängern a, b zum selben Satelliten werden die Satellitenuhrabweichung und instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten beseitigt (Wanninger, 2000). Die Positionsgenauigkeit beim RTK hängt wesentlich von der Länge der Basislinie

ab. Bei kurzen Basislinien weisen beide Stationen geringe Unterschiede der ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen und der Orbitmessabweichungen auf. In diesem Fall vereinfacht sich die Gleichung der Phasendifferenz zu (Wanninger, 2000)

$$\Delta\Phi_{ab,f}^i = \Delta R_{ab}^i + C_0 * [\Delta\delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,\phi}] + \Delta M_{ab,f,\phi}^i + \lambda_f * \Delta N_{ab,f}^i + \varepsilon_{ab,f,\Delta\Phi}^i \quad (5)$$

Mit

$$\Delta R_{ab}^i = R_b^i - R_a^i = |\vec{X}^i - \vec{X}_b| - |\vec{X}^i - \vec{X}_a| = |\vec{X}^i - \vec{X}_a - \Delta\vec{X}_{ab}| - |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \quad (6)$$

- $\Delta\vec{X}_{ab}$ : Basislinienvektor zwischen beiden Stationen [m]

Hierbei können die Mehrdeutigkeiten nicht auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden (*float*-Lösung). Im Gegensatz dazu hat der Mehrdeutigkeitsterm bei den doppelten Differenzen (Operator) die Eigenschaft der Ganzzahligkeit (*fixed*-Lösung). Die doppelte Differenzbildung der Phasenbeobachtungen erfolgt durch die Differenzen der einfachen Empfängerdifferenzen zwischen zwei Satelliten. An dieser Stelle fällt zusätzlich zu den durch einfache Differenzen beseitigten Messabweichungen die Empfängerdrift heraus. Für kurze Basislinien gilt die folgende Gleichung zur Differenzbildung (Wanninger, 2000)

$$\nabla\Delta\Phi_{ab,f}^{ij} = \nabla\Delta R_{ab}^{ij} + \nabla\Delta M_{ab,f,\phi}^{ij} + \lambda_f * \nabla\Delta N_{ab,f}^{ij} + \varepsilon_{ab,f,\nabla\Delta\Phi}^{ij} \quad (7)$$

Beim RTK ist die Zentimeter-Positionsgenauigkeit auf die Bestimmung und Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeit angewiesen, die bei größeren Entfernungen der Stationen (ab 20 km) insbesondere wegen des ionosphärischen Restfehlers nicht mehr erzielbar ist. Eine Erweiterung des RTK zu Netz-RTK ist damit unverzichtbar. Hierbei handelt es sich um eine Auswertung unter Einbeziehung nicht nur einer einzelnen Referenzstation, sondern eines Netzes von mindestens drei Referenzstationen. Das Besondere an Netz-RTK im Vergleich zu RTK ist die Möglichkeit der Steigerung des Referenzstationsabstands auf bis zu 50 km. Ausführliche Informationen zu RTK und Netz-RTK finden sich in der Literatur z. B. bei Wanninger (2006) oder Takac et al. (2008).

## 2.5 Ausgleichsrechnung und Statistik

Zur GNSS-Positionsbestimmung wird eine Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten Quadrate (MkQ), dem sogenannten Gauß-Markov-Modell, verwendet. Die GNSS Code- und Phasenbeobachtungen von mehreren Epochen zu den jeweils sichtbaren Satelliten werden als Messgrößen angesehen, die zum Beobachtungsvektor  $L_{n,1}$  zusammengefasst werden, wobei  $n$  die Anzahl der Beobachtungen angibt:

$$L_{n,1}^T = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n] \quad (8)$$

Es sind  $u$  Parameter zu bestimmen. Diese bilden den  $X(u,1)$  Parameter- oder Unbekanntenvektor

$$X_{u,1}^T = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_u] \quad (9)$$

Es handelt sich um eine Ausgleichungsaufgabe im eigentlichen Sinn, wenn die Anzahl der Beobachtungen größer als die Anzahl der Parameter ist. In diesem Fall können nicht nur die Parameter bestimmt werden, sondern auch Qualitätsaussagen getroffen werden (Niemeier, 2008).

Die Prinzipien des Ausgleichungsansatzes werden im nächsten Kapitel dargestellt.

Das Gauß-Markov-Modell besteht aus funktionalem und stochastischem Teil.

### 2.5.1 Funktionales Modell

Das funktionale Modell beschreibt die funktionalen Beziehungen zwischen den Messgrößen und den unbekanntem Parametern. Die Aufstellung dieser mathematisch-physikalischen Beziehungen ist der erste Schritt der Ausgleichung. Werden die Beobachtungsgrößen und Parameter als wahre oder theoretische Größen ( $\tilde{L}_i, \tilde{X}_i$ ) angesehen, kann die Funktion zwischen einer Beobachtung und allen eingeführten Parametern wie folgt dargestellt werden:

$$\tilde{L}_i = f_i(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_u) \quad (10)$$

Bei einer Messung handelt es sich jedoch nicht um wahre Beobachtungen, sondern um tatsächliche Beobachtungen, die immer mit einer Messunsicherheit behaftet sind. Zur Umformung der ursprünglichen Funktion muss für jede tatsächliche Beobachtung eine Verbesserung eingeführt werden. Außerdem gelten für diese Funktion keine wahren Parameter, sondern geschätzte Werte ( $\hat{X}_i$ ), da die wahren Werte nicht bekannt sind. Für die Beziehung zwischen den Messergebnissen und den Unbekannten ergibt sich folgende Formel:

$$L_i + v_i = f_i(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_u) \quad (11)$$

Eine Voraussetzung für die Parameterschätzung ist der lineare Zusammenhang zwischen den Messgrößen und den Parametern. Da die GNSS-Beobachtungsgleichungen nicht linear sind, müssen sie linearisiert werden. Die Reihenentwicklung nach Taylor bietet die Möglichkeit zur Linearisierung einer Funktion. Dazu ist eine Näherungslösung der unbekannt Parameter  $X^0$  erforderlich. Mit Beschränkung der Taylor-Reihe auf die Glieder 1. Ordnung erhält man die folgende allgemeine Darstellung dieser Linearisierung für n Beobachtungen und dementsprechend n unterschiedliche Funktionen (Niemeier, 2008)

$$L_i + v_i = f_i(X_1^0, X_2^0, \dots, X_u^0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_1}\right)_{x^0} * \hat{x}_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_2}\right)_{x^0} * \hat{x}_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_u}\right)_{x^0} * \hat{x}_u \quad (12)$$

Die partiellen Ableitungen können abgekürzt dargestellt werden durch:

$$a_{ij} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j}\right)_{x^0} \quad (13)$$

und bilden insgesamt die Design- oder Koeffizientenmatrix

$$A_{(n,u)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1u} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nu} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die Näherungswerte für die Messgrößen  $L^0$  werden mit den Näherungen der Parameter  $X^0$  bestimmt

$$L_i^0 = f_i(X_1^0, X_2^0, \dots, X_u^0) \quad (15)$$

Der Vektor der gekürzten Beobachtungen ergibt sich damit zu:

$$l = L - L^0 \quad (16)$$

Der Vektor der ausgeglichenen Parameter  $\hat{X}$  besteht aus den fixen (nichtstochastischen) Näherungswerten  $X^0$  und den stochastischen Zuschlägen  $\hat{x}$

$$\hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad (17)$$

Für die endgültige, linearisierte Form des funktionalen Modells ergibt sich, in Matrizendarstellung, wie folgt (Xu & Xu, 2016):

$$l_{(n,1)} + v_{(n,1)} = A_{(n,u)} * \hat{x}_{(u,1)} \quad (18)$$

## 2.5.2 Stochastisches Modell

Das stochastische Modell beschreibt die Abschätzungen zur Genauigkeit bzw. zur Messunsicherheit für die Messgrößen. Diese a priori-Genauigkeiten haben über die funktionalen Zusammenhänge einen Einfluss auf die zu schätzenden Genauigkeitsmaße der Unbekannten. Die  $(n, n)$ -Kovarianzmatrix stellt im Falle normalverteilter Beobachtungen die vollständige Genauigkeitsaussage für einen  $(n, 1)$ -Beobachtungsvektor dar:

$$\Sigma_{ll(n,n)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Deren Hauptdiagonalelemente bilden die Varianzen der Beobachtungen  $\sigma_i^2$ . Die weiteren Elemente liefern Angaben über mögliche Kovarianzen bzw. Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen. Wird auf die Angabe von Korrelationen zwischen den Beobachtungen verzichtet, ergibt sich die Kovarianzmatrix als Diagonalmatrix

$$\Sigma_{ll(n,n)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Häufig stehen keine vollständigen Genauigkeitsinformationen  $\Sigma_{ll}$  zur Verfügung, sondern nur Aussagen über Genauigkeitsrelationen zwischen den Beobachtungen, die in der Kofaktormatrix  $Q_{ll}$  dargestellt werden. Die Kovarianzmatrix lässt sich daher in

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 * Q_{ll} \quad (21)$$

Zerlegen, wobei  $\sigma_0^2$  die Varianz der Gewichtseinheit ist.

Die Inverse der Kofaktormatrix bildet die Gewichtsmatrix eines Beobachtungsvektors

$$P = (Q_{ll})^{-1} \quad (22)$$

Mit Gleichung (21) gilt für die Gewichtsmatrix im Falle unkorrelierter Beobachtungen auch:

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 / \sigma_1^2 & & & & 0 \\ & \sigma_0^2 / \sigma_2^2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & \sigma_0^2 / \sigma_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & & & & 0 \\ & P_{22} & & & \\ & & \ddots & & \\ 0 & & & \ddots & \\ & & & & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Wird  $\sigma_0^2=1$  angenommen, sind die Gewichte der Einzelbeobachtungen gegeben durch  $P_{ii} = 1/\sigma_i^2$ . Somit wird deutlich, dass eine Beobachtung mit einer großen Standardabweichung  $\sigma_i$  nur ein geringes Gewicht  $P_{ii}$  besitzt.

### 2.5.3 Parameterschätzung mit dem Gauß-Markov-Modell

Der Parameterschätzungsansatz für die Beobachtungen mit a priori-Kovarianzinformationen nach Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) ist bekannt als Gauß-Markov-Modell. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt wurde, beschreibt die Formel (18) das funktionale Modell. Das stochastische Modell ist durch die Formel (21) gegeben.

Die MKQ-Schätzung fordert eine Minimierung der gewichteten Verbesserungsquadratsumme (Xu et al., 2016, Verhagen & Teunissen, 2017):

$$v^T P v = (\hat{x}^T A^T - l^T) P (A \hat{x} - l) \Rightarrow \min \quad (24)$$

Um das Minimum einer Funktion zu bestimmen, wird die erste Ableitung der Funktion zu Null gesetzt. Durch die weiteren Ausführungen nach (Niemeier, 2008) erhält man schließlich die Berechnungsformel für den Lösungsvektor  $\hat{x}$ :

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (25)$$

Stellt man die Normalgleichungsmatrix  $N$  als Inverse der Kofaktormatrix der Unbekannten:

$$N = A^T P A = Q_{xx}^{-1} \quad (26)$$

und das Absolutglied des Normalgleichungssystems  $n$  mit

$$n = A^T P l \quad (27)$$

dar, vereinfacht sich die Formel ( 25 ) zu

$$\hat{x} = (N)^{-1} n \quad (28)$$

Zudem wird der Verbesserungsvektor mit

$$v = A\hat{x} - l \quad (29)$$

berechnet. Als Genauigkeitsmaß der Unbekannten dient die gewichtete Verbesserungsquadratsumme  $\Omega$ ,

$$\Omega = v^T P v \quad (30)$$

Zur Bestimmung der empirischen Varianz der Gewichtseinheit  $s_0^2$  wird

$$s_0^2 = \frac{\Omega}{f} \quad (31)$$

angesetzt, wobei  $f = n - u$  die Freiheitsgrade beschreibt, also der Differenz zwischen der Anzahl der Beobachtungen  $n$  und der Anzahl der Unbekannten  $u$  entspricht. Abschließend ergibt sich die Kovarianzmatrix der Unbekannten  $\Sigma_{xx}$  zu:

$$\Sigma_{xx} = s_0^2 * Q_{xx} \quad (32)$$

Deren Hauptdiagonalelemente enthalten die Varianzen der ausgeglichenen Parameter.

## 2.5.4 Eliminierung von Unbekannten

Es müssen im Ausgleichungsprozess manchmal Unbekannte mitgeschätzt werden, obwohl deren Ergebnisse nicht von Interesse sind. Diese können vor der Schätzung der primären Unbekannten durch Blockzerlegung des funktionalen Modells eliminiert werden. Damit kann die Dimension der Normalgleichungsmatrix so klein wie möglich gehalten werden. Hierbei wird das linearisierte Ausgangsmodell in Subvektoren bzw. Submatrizen zerlegt. Der  $(u, 1)$  Vektor der Unbekannten setzt sich aus dem  $(p, 1)$  Vektor der primären Unbekannten und dem  $(q, 1)$  Vektor der zu eliminierenden Unbekannten zusammen (Niemeier, 2008).

$$\hat{x}_{(u,1)} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{1(p,1)} \\ \hat{x}_{2(q,1)} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Durch die Aufteilung der Koeffizientenmatrix A ergibt sich aus der Gl. ( 18 ):

$$v_{(n,1)} = \begin{bmatrix} A_{1(n,p)} & A_{2(n,q)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{1(p,1)} \\ \hat{x}_{2(q,1)} \end{bmatrix} - l_{(n,1)} \quad (34)$$

Das stochastische Modell verändert sich nicht. Für die Normalgleichungsmatrix Gl. ( 26 ) und das Absolutglied des Normalgleichungssystems ( 27 ) folgen:

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$n = A^T P l = \begin{bmatrix} A_1^T P l \\ A_2^T P l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Das Gesamtsystem der Normalgleichung schreibt man in dieser Blockstruktur wie folgt:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Die zweite Gleichung aus ( 37 ) wird in die erste eingesetzt und dies führt zu:

$$(N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21}) \hat{x}_1 = n_1 - N_{12} N_{22}^{-1} n_2 \quad (38)$$

oder sachlogisch abgekürzt:

$$\bar{N} \hat{x}_1 = \bar{n} \quad (39)$$

Mit

$$\bar{N} = N_{11} - N_{12}N_{22}^{-1}N_{21} \quad (40)$$

und

$$\bar{n} = n_1 - N_{12}N_{22}^{-1}n_2 \quad (41)$$

Die Matrizen  $\bar{N}$  und  $\bar{n}$  lassen sich auch direkt aus der modifizierten Designmatrix  $\bar{A}$  und dem modifizierten gekürzten Beobachtungsvektor  $\bar{l}$  berechnen, wobei

$$\bar{A} = A_1 - A_2N_{22}^{-1}N_{21} \quad (42)$$

und

$$\bar{l} = l - A_2N_{22}^{-1}n_2 \quad (43)$$

ist.

Der Lösungsvektor  $\hat{x}_1$  der primären Unbekannten ergibt sich zu:

$$\hat{x}_1 = \bar{N}^{-1} \bar{n}, \quad (44)$$

Die Verbesserungen im reduzierten Modell lassen sich wie folgt berechnen:

$$v = \bar{A}\hat{x}_1 - \bar{l} \quad (45)$$

Abschließend ist die empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit definiert mit:

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - u}} \quad (46)$$

## 2.5.5 Sequentielle Ausgleichung

Um weitere Beobachtungen zu einem Beobachtungssatz hinzunehmen, für den bereits eine vollständige Auswertung vorliegt, führt man eine sogenannte sequentielle Ausgleichung durch. Ein Beispiel dafür sind kontinuierlich aufdatierte GNSS-Messungen von mehreren Messepochen. Bei Eingang einer neuen Messepoche muss damit nicht die ganze Auswertung neu gestartet, sondern nur die Auswertung der neuen Daten im Resultat berücksichtigt werden (Niemeier, 2008).

Ausgangsmodell ist das funktionale und stochastische Modell, siehe Gl. ( 18 ) und Gl. ( 23 ). Nun wird dieses Modell um einen zusätzlichen Beobachtungsvektor  $l_z$  mit  $n_z$  Elementen erweitert. Die Anzahl und Art der Parameter im  $\hat{x}_z$  Vektor bleibt unverändert. Das vollständige Modell wird wie folgt dargestellt (Xu & Xu, 2016)

$$\begin{bmatrix} l \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_z \end{bmatrix} \hat{x}_z \quad (47)$$

$$\Sigma_{ll_z} = s_0^2 Q_{ll_z} = s_0^2 \begin{bmatrix} Q_{ll} & 0 \\ 0 & Q_{zz} \end{bmatrix} = s_0^2 \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & P_{zz}^{-1} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Die folgenden Formeln gelten für die Normalgleichungsmatrix und das Absolutglied im erweiterten Modell.

$$N_{zz} = \begin{bmatrix} A^T & A_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ A_z \end{bmatrix} = A^T P A + A_z^T P_{zz} A_z \quad (49)$$

$$n_z = \begin{bmatrix} A^T & A_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ l_z \end{bmatrix} = A^T P l + A_z^T P_{zz} l_z \quad (50)$$

Folglich ergibt sich der gekürzte Parametervektor  $\hat{x}_z$  zu:

$$\hat{x}_z = N_{zz}^{-1} n_z \quad (51)$$

## 2.5.6 Statistik

Zur Betrachtung von Positionsgenauigkeiten werden die Abweichungen zwischen den Sollwerten und den Beobachtungen verwendet. Ist der wahre Wert einer Zufallsgröße unbekannt, wird häufig das arithmetische Mittel als „bester“ Wert oder als optimaler Schätzer für diese Zufallsgröße verwendet. Der Mittelwert  $\bar{X}$  einer Messreihe  $L_i$  von  $n$  Beobachtungen ergibt sich zu

$$\bar{X} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n L_i \quad (52)$$

Dann werden die empirischen Standardabweichungen bei Vorliegen des arithmetischen Mittels  $\bar{X}$  wie folgt berechnet

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |L_i - \bar{X}|^2} \quad (53)$$

### 3 Precise Point Positioning mit einem Einfrequenz-Empfänger

Die satellitengestützte Positionsbestimmung erfolgt durch Auswertung der Code- und/oder Phasenbeobachtungen zwischen der GNSS-Antenne und dem GNSS-Satelliten. Die zur Auswertung verwendeten Beobachtungen sowie die benutzten Auswerteverfahren spielen eine entscheidende Rolle für die Positionsgenauigkeit. Dabei werden bei der klassischen absoluten Positionsbestimmung mit Codebeobachtungen als primärer Messgröße Genauigkeiten im Meterbereich erreicht. Im Gegensatz dazu ermöglichen die relativen Auswerteverfahren mit Phasenbeobachtungen eine zentimetergenaue Positionsbestimmung oder noch besser. Dazu müssen zusätzlich die Koordinaten einer Station (Referenzstation) bekannt sein. Durch Differenzbildung der Phasenbeobachtungen können verschiedene GNSS-Messabweichungen minimiert oder sogar vollständig eliminiert werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Positionsgenauigkeit vom Abstand zwischen der Referenzstation und der beobachteten Station unterliegen diese Auswerteverfahren Beschränkungen bezüglich der Basislinienlänge. Je weiter der GNSS-Nutzer von der Referenzstation entfernt ist, desto größer sind die verbleibenden Restfehler, welche die Positionsgenauigkeit negativ beeinflussen (Kouba, 2009). Hier bietet das *Precise Point Positioning* (PPP) die Möglichkeit der Abhilfe, sodass die Position, ähnlich den relativen Auswerteverfahren, mit einer erreichbaren Genauigkeit im Zentimeterbereich bestimmt werden kann. Da hier keine Referenzstationen mit bekannten Koordinaten verwendet werden, kann diese Genauigkeit nur erreicht werden, indem ein Großteil der GNSS-Messabweichungen modelliert wird, um sie dann beim Nutzer korrigieren zu können (Kouba, 2009, Zumberge et al., 1997).

Die GNSS-Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen bilden die Datengrundlage bei der klassischen PPP-Auswertung. Damit besteht die Möglichkeit, die ionosphären-freie Linearkombination zwischen zwei Frequenzen zu bilden und somit die ionosphärischen Effekte erster Ordnung zu beseitigen. Auf der Basis von Messungen auf nur einer Frequenz besteht die Möglichkeit eine ionosphären-freie Kombination aus Code- und Phasenbeobachtungen zu bilden, da die Code- und Phasenbeobachtungen um den gleichen Beitrag der ionosphärischen Laufzeitverzögerung verfälscht sind, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen. Diese Kombination hat aber eine geringere Genauigkeit als mit Phasenbeobachtungen (Xu & Xu, 2016). Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Korrekturen, Modellierungen und Ausgleichungsverfahren der PPP-Lösung unter Verwendung der Code- und Phasenbeobachtungen auf nur einer Frequenz.

## 3.1 Präzise Satellitenpositionen und -uhrkorrekturen

Um die Nutzerposition zu bestimmen, benötigt man die Position und den Signalaussendezeitpunkt der bewegten Satelliten. Die Satellitenkoordinaten und –uhrkorrekturen stehen dem Nutzer in zwei Arten zur Verfügung, entweder als *broadcast*-Ephemeriden (Bestandteil der Navigationsnachricht) oder als präzise Ephemeriden. Zur Berechnung der *broadcast*-Ephemeriden werden zuerst durch die Monitorstationen Code- und Phasenbeobachtungen zu den Satelliten durchgeführt. Anschließend berechnet die *master control station* die Satellitenbahn und Satellitenuhr (Bauer, 2011, Seeber, 2003).

Die *broadcast*-Ephemeriden werden an den GNSS-Nutzer als Kepler-Elemente wie bei GPS oder als kartesische Koordinaten wie bei GLONASS übermittelt. Die *broadcast*-Satellitenkoordinaten besitzen eine geringere Genauigkeit gegenüber den präzisen Koordinaten, insbesondere die Radial-Komponente. Die *broadcast*-Ephemeriden von GPS sind im Vergleich der GNSS am genauesten. Die quadratische mittlere Abweichung *Root Mean Square* RMS beträgt 1 m für die *broadcast*-Satellitenkoordinaten und 3  $\mu$ s für die *broadcast*-Satellitenuhrkorrektur im Vergleich zu den präzisen Produkten (Sumaya, 2013).

Die berechnete Satellitenposition und Satellitenuhrkorrektur weichen von den wahren Werten ab. Diese Abweichungen oder sogenannten Satellitenorbitfehler und Satellitenuhrabweichung sind zwar keine Messabweichungen, haben aber Einfluss auf die Datenauswertung, sowie auf die Positionsbestimmung. Die Größe der Einflüsse auf die Positionsbestimmung unterscheidet sich deutlich entsprechend dem jeweiligen Ansatz der Datenauswertung (relativ oder absolut). Im Gegensatz zu relativen Auswertungsverfahren wirken die Abweichungen der Satellitenorbits und Satellitenuhren bei den undifferenzierten Beobachtungen der PPP-Lösung in voller Größe. Hierbei ist die Genauigkeit der *broadcast*-Ephemeriden nicht ausreichend. Aus diesem Grund sind präzise Ephemeriden unverzichtbar, welche durch den *International GNSS Service* (IGS) zur Verfügung gestellt werden (Heßelbarth, 2011).

### 3.1.1 IGS

Der IGS wurde 1994 als Service der *International Association of Geodesy* (IAG) gegründet (Dow et al., 2009, IGS, 2017). Mehr als 200 Institutionen und zurzeit 12 Analysezentren (engl. *IGS Analysis Centers*, ACs) arbeiten dabei freiwillig und nichtkommerziell zusammen. Die GPS/GLONASS-Beobachtungen von etwa 500 global verteilten Stationen (siehe Abbildung 2) dienen dabei als Datengrundlage. Die Daten werden von den ACs analysiert und kombiniert, damit die folgenden Produkte, sowohl in Echtzeit, als auch mit zeitlichen Verzögerungen und somit für Anwendungen im Post-Processing, zur Verfügung gestellt werden können (Bauer, 2011, IGS, 2017, Dow et al., 2009):

- präzise Bahndaten.
- präzise Stations- und Satellitenuhrkorrekturen.

- atmosphärische Parameter.
- Koordinaten und Geschwindigkeiten der IGS-Stationen. Seit der GPS Woche 1934 (29.01.2016) nutzt der IGS die IGS14-Realisierung des ITRF2014-Referenzrahmens. Es enthält die Koordinaten und Geschwindigkeiten für 252 Stationen, wobei bei der Generierung der IGS-Produkte nur 51 gut globalverteilte Stationen (blaue Rauten in Abbildung 2) als sogenannten Kernstationen für die Datumsdefinition verwendet werden (Dach, R. 2017).
- Erdorientierungsparameter (Kouba, 2003, Kouba, 2015).

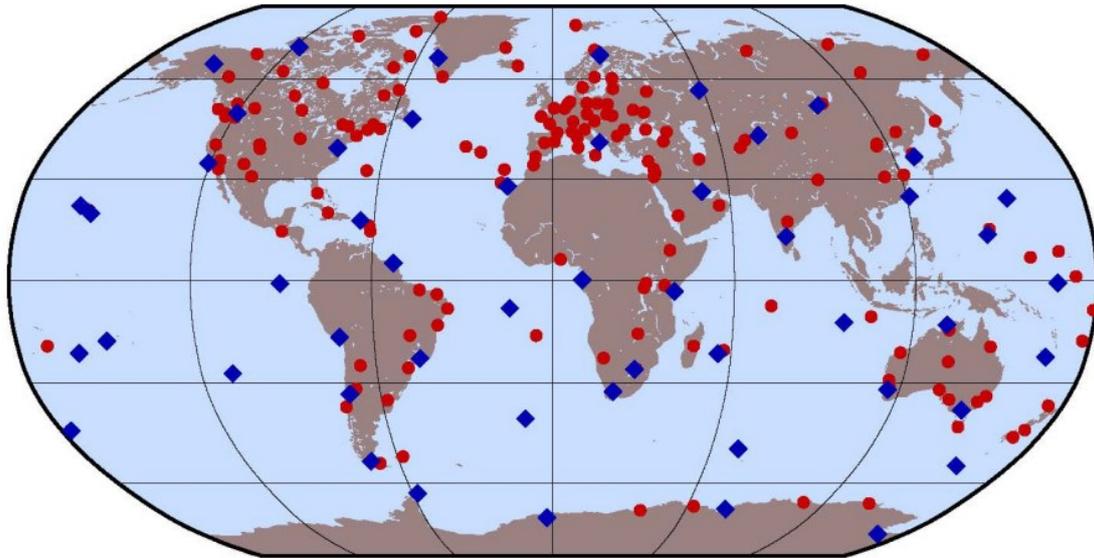


Abbildung 2: geografische Verteilung der Stationen mit vorgegebenen Koordinaten und Geschwindigkeiten in IGS14-Realisierung des ITRF2014-Referenzrahmens (Dach, R. 2017).

Produkt		Genauigkeit	Verfügbarkeit	Aufdatierung	Datenintervall
<i>ultra-rapid (predicted half)</i>	Orbits	≈5 cm	Echtzeit	3/ 9 /15 /21 Uhr UTC	15 min
	Sat.Uhren	≈1,5 ns			
<i>ultra-rapid (observed half)</i>	Orbits	≈3 cm	3-9 h	3/ 9 /15 /21 Uhr UTC	15 min
	Sat.Uhren	≈0,05 ns			
<i>rapid</i>	Orbits	≈2,5 cm	17-41 h	Um 17 Uhr UTC täglich	15 min
	Sat.Uhren	≈0,025 ns			5 min
<i>final</i>	Orbits	≈2,5 cm	12-18 d	Jeden Donnerstag	15 min
	Sat.Uhren	≈0,02 ns			5 min/30 s

Tabelle 4: IGS-Produkte für GPS (IGS, 2019)

Produkt	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Aufdatierung	Datenintervall	
<i>final</i>	Orbits	≈3 cm	12-18 d	Jeden Donnerstag	15 min

Tabelle 5: IGS-Produkte für GLONASS (IGS, 2019)

### 3.1.2 Präzise Satellitenkoordinaten

Die *broadcast*-Ephemeriden, die GPS als Kepler-Elemente und GLONASS als kartesische Koordinaten im PZ-90.02 (siehe Abschnitt 2.2.3) als Bestandteil der Navigationsnachricht aussendet, sind für den GNSS-Nutzer in Echtzeit verfügbar. Daraus lassen sich die Satellitenpositionen und Satellitenuhrkorrekturen berechnen (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Die geringe Genauigkeit der *broadcast*-Ephemeriden (1 m bei GPS und bei GLONASS schlechter) ist nicht ausreichend für verschiedene präzise Anwendungen wie PPP. Um hier Abhilfe zu schaffen, stellt der IGS, oder genauer deren ACs, verschiedene präzise Bahndaten zur Verfügung (Warren, 2003). Diese Produkte unterscheiden sich in ihrer Verfügbarkeit, Genauigkeit und Auflösung (vgl. Tabelle 4 und 5). Dazu gehören z. B. die sogenannten *final-Orbits*. Diese werden von acht ACs berechnet und stehen nach ca. 12-18 Tagen zur Verfügung. Die erreichbare Genauigkeit der *final-Orbits* beträgt ungefähr 2,5 cm für GPS und 3 cm für GLONASS und ist immer besser als bei den *rapid*- und *ultra-rapid-Orbits* (IGS, 2017). Die *ultra-rapid-Orbits* stehen in Echtzeit zur Verfügung und zeigen, wegen der guten Modellierung der Satellitenbahnen, im Vergleich zu den *finals* keinen deutlichen Unterschied in der Genauigkeit (für GPS 2,5 cm). Alle von den ACs produzierten Bahndaten werden im SP3-Datenformat (*Standard Product 3*) als komprimierte Dateien gespeichert (Hilla, 2010).

Das Datenintervall bei allen Produkten beträgt 15 min und ist somit fast immer größer als das Beobachtungsdatenintervall. Deshalb muss zwischen den Stützstellen interpoliert werden, um so für jede Epoche der Beobachtungsdaten einen Funktionswert präzisieren zu können. Eine mögliche Interpolation mit geringem Rechenaufwand stellen die Lagrange-Polynome dar. Die allgemeine Formel lautet (Xu & Xu, 2016):

$$y(t) = \sum_{j=0}^m L_j(t) * y(t_j) , \quad (54)$$

wobei

$$L_j(t) = \prod_{k=0, k \neq j}^m \frac{(t - t_k)}{(t_j - t_k)} \quad (55)$$

$$, k \neq j$$

und  $y(t_j)$  der gegebene Funktionswert zur Zeit  $t_j$  ist,  $m$  gibt den Grad des Polynoms an.

### 3.1.3 Präzise Satellitenuhrkorrektion

Obwohl die Atomuhren der Satelliten sehr genau sind, weicht die jeweilige Satellitenzeit von der nominalen Zeit des jeweiligen GNSS ab. Die Abweichungen der individuellen Satellitenuhren werden regelmäßig durch das Kontrollsegment überwacht. Auftretende Abweichungen von der Zeit des GNSS werden durch ein Polynom zweiter Ordnung beschrieben, dessen Koeffizienten mit der Navigationsnachricht (*broadcast*-Ephemeriden) ausgestrahlt werden (Leick, 2004).

Die *broadcast*-Satellitenuhrkorrekturen mit einer Genauigkeit von 2,5 ns sind für die undifferenzierten Beobachtungen der PPP-Lösung nicht ausreichend. Der IGS bietet präzise Satellitenuhrkorrekturen sowohl im SP3-Format mit einem Datenintervall von 15 min an, als auch in einem speziell für Uhrkorrekturen entwickelten clk-Datenformat (Ray et al., 1999) mit einem Datenintervall von entweder 5 min oder 30 s. Diese IGS-Produkte für GPS (siehe Tabelle 4) unterscheiden sich deutlich in ihrer Genauigkeit, Verfügbarkeit und dem Intervall der ausgegebenen Daten. Je größer der Zeitraum bis zur Veröffentlichung der Uhrenprodukte ist, desto höher wird die Genauigkeit. Die höchste Genauigkeit erreichen die *final*-Satellitenuhrkorrekturen mit 0,02 ns. Diese stehen dem Nutzer aber erst nach 12-18 Tagen zur Verfügung.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt veröffentlicht der IGS keine präzisen Satellitenuhrkorrekturen für GLONASS, obwohl mehrere ACs wie z. B. das *Natural Resources Canada* (früher *Energy, Mines and Resources* EMR), das *GeoForschungsZentrum in Potsdam* (GFZ), das *Space geodesy team of the CNES* (GRG), das *European Space Operations Center* (ESA/ESOC) und das *Information and Analysis Center of Navigation* (IAC) diese Produkte mit einem Datenintervall von 5 min oder 30 s zur Verfügung stellen (JunPin et al., 2013). Im Allgemeinen besitzen die GLONASS-Satellitenuhrkorrekturen gegenüber den entsprechenden GPS-Korrekturen eine geringere Genauigkeit aufgrund der schlechteren Verteilung der GLONASS-Referenzstationen. Außerdem werden von den einzelnen ACs verschiedene Strategien zur Berücksichtigung und Modellierung der *inter-frequency biases* (IFB) verwendet. Dies führt zu einem großen Unterschied in der Genauigkeit der GLONASS-Satellitenuhrkorrekturen zwischen den Lösungen der ACs (JunPin et al., 2013, Dach et al., 2010, Dach et al., 2012).

Haben die ausgewerteten Beobachtungen ein kleineres Datenintervall gegenüber dem Intervall der verfügbaren Satellitenuhrkorrekturen, ist eine Interpolation zwischen den Stützstellen der Uhrkorrekturen notwendig. Die Satellitenuhrstabilität und die Phaseninterpolation als Verdichtungsmöglichkeit der

Uhrkorrekturen von ESOC, sowie deren Auswirkungen auf die PPP-Lösung unter Verwendung von GPS/GLONASS-Zweifrequenzbeobachtungen wurden ausführlich von Heßelbarth und Wanninger (2008) und Heßelbarth (2011) untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit war eine Interpolation der Satellitenuhrkorrekturen nicht erforderlich.

### 3.1.4 Satellitenantennenkorrekturen

Das Massenzentrum eines GNSS-Satelliten und das mittlere Phasenzentrum der Satellitenantenne sind nicht identisch. Die Trennung dieser beiden Bezugspunkte stellt bestimmte Anforderungen an die satellitenbasierten Korrekturen. Während sich die präzisen Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen auf das Massenzentrum beziehen, haben die *broadcast*-Ephemeriden in der Navigationsnachricht sowie die Code- und Phasenbeobachtungen das mittlere Antennenphasenzentrum des Satelliten als Bezugspunkt (Kouba, 2015). Die Differenz zwischen den zwei Bezugspunkten des Satelliten ist das Phasenzentrumoffset (PZO). Außerdem werden die Abweichungen der tatsächlich ausgesendeten Signale vom mittleren elektronischen Phasenzentrum der Satellitenantenne durch nadir-abhängige Phasenzentrumvariationen (PZV) gegeben und bilden mit dem PZO die Phasenzentrumkorrekturen.

Im Jahr 1996 führten mehrere ACs des IGS relative GPS-Antennenphasenkorrekturen als block-spezifische Korrekturen ein. Die relativen Korrekturen ermöglichen die Modellierung eines nicht-sphärischen Phasengangs der Empfangsantenne. Diese Korrekturen enthalten das Phasenzentrumoffset sowie die Phasenzentrumvariationen als Funktion des Elevationswinkels. Diese Korrekturen wurden bis zur Umstellung von relativen auf absolute Phasenzentrumkorrekturen für Empfangsantennen im Jahr 2006 verwendet. Aufgrund der erheblichen Unterschiede zwischen individuellen und block-spezifischen Satellitenkorrekturen, hauptsächlich in z-Richtung, sind satellitenspezifischen Korrekturen notwendig (Schmid et al., 2007). Seit der Umstellung von relativen auf absolute Empfangsantennenkorrekturen sind die Phasenzentrumoffsets in z-Richtung für GPS-Satelliten nicht mehr block-spezifisch, sondern satellitenspezifisch und bilden mit den aus Herstellerangaben entnommenen Werten für die x- und y-Exzentrizität die Phasenzentrumkorrekturen (Schmid et al., 2007). Für GLONASS-Satelliten wurden die Satellitenantennenphasenkorrekturen nach der Berechnung der Phasenzentrumkorrekturen an Empfangsantennen für GLONASS-Signale bestimmt (Dach et al., 2010). Zur Bearbeitung und Speicherung der Antennenphasenkorrekturen wurde das ANTEX-Dateiformat (*ANTenna Exchange Format*) entwickelt (Rothacher & Schmid, 2010). Der IGS stellt eine ANTEX-Datei (aktuell igs14.atx) zur Verfügung, die ständig laufend gehalten wird. Sie enthält die Werte des Phasenzentrumoffsets in x- y- und z-Richtung für jeden einzelnen GPS-, GLONASS-, Galileo- und Beidou-Satelliten. Zusätzlich werden die nadir-abhängigen Phasenzentrumvariationen für GPS- und GLONASS-Satelliten in dieser Datei zur Verfügung gestellt.

Da im Rahmen einer PPP-Auswertung präzise Ephemeriden verwendet werden, die sich auf das Massenzentrum des Satelliten beziehen, sind die Korrekturen des Satellitenphasenzentrumoffsets und ihrer Variationen unverzichtbar. Diese Korrekturen werden an die Phasenbeobachtungen angebracht. Die Korrekturwerte in der `igs08.atx` beziehen sich auf die ionosphären-freie Linearkombination und sind somit zur Korrektur des Phasenzentrumoffsets und ihrer Variationen an die ionosphären-freie Linearkombination anzubringen (Schmid et al., 2007).

### **3.1.5 Phase Wind-up**

GNSS-Satelliten senden rechtsdrehend zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen (*right circularly polarized* (RCP)) aus. Deswegen sind die Phasenmessungen von der relativen Orientierung der Satelliten- und Empfangsantennen abhängig. Dreht sich die Satellitenantenne oder die Empfangsantenne um  $360^\circ$ , ändert sich die Trägerphase um einen Zyklus. Dieser Effekt wird als Phase Wind-up bezeichnet. Bei statischen Anwendungen wird die Empfangsantenne fest über dem Messpunkt aufgebaut und rotiert somit nicht. Dagegen rotiert die Satellitenantenne ständig aufgrund der Ausrichtung des Solarpanels zur Sonne. Damit ändert sich ständig die Station-Satelliten- Geometrie (Wu et al., 1993, Kouba, 2015).

Die Phase Wind-up Korrektur kann bei differenziellen Auswerteverfahren über kleine Entfernungen von ein paar hundert Kilometern wegen des kleinen Betrags des Effektes vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu ist dieser Effekt für die nicht-differenzielle Positionsbestimmung, wie z. B. die PPP-Auswertung, signifikant. Alle Herleitungen zur Berechnung des Phase Wind-up Effekts sind in der Literatur ausführlich beschrieben (Wu et al., 1993, Heßelbarth, 2011, Kouba, 2015).

## **3.2 Atmosphärische Korrekturen**

Das von einem Satelliten ausgesendete Signal durchquert auf seinem Weg bis zu dem auf der Erdoberfläche befindlichen Empfänger die Erdatmosphäre, die in diesem Zusammenhang „störende“ Eigenschaften hat. Es kommt zu einer Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung des Signals. An dieser Stelle betrachtet man zum einen die Wirkung der Neutrosphäre auf die Signale, welche die Troposphäre und die Stratosphäre umfasst, und zum anderen die Wirkung des ionisierten Teils der Atmosphäre, welche deshalb als Ionosphäre bezeichnet wird (Bauer, 2011).

Der folgende Abschnitt beschreibt die Einflüsse der Troposphäre und Ionosphäre auf die PPP-Lösung und die Möglichkeiten zu deren Korrektur.

### 3.2.1 Troposphäre

Die unteren Schichten der Atmosphäre, die Stratosphäre und Troposphäre, sind elektrisch neutral (keine freien Elektronen und Ionen). Trotzdem führen sie wegen der Gasmoleküle, deren Dichte mit abnehmender Höhe stetig zunimmt, zur Refraktion, die als troposphärische Refraktion bezeichnet wird. Diese Refraktion ist für Mikrowellen unabhängig von der Frequenz und wirkt somit auf Code- und Phasenmessungen identisch (Bauer, 2011, Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Aufgrund ihres völlig unterschiedlichen Verhaltens lassen sich, zur Beschreibung der troposphärischen Laufzeitverzögerung, die Atmosphärenbestandteile in einen trockenen (Index  $h$ , *hydrostatic*) und einen feuchten Anteil (Index  $w$ , *wet*) aufspalten (Hopfield, 1971). Etwa 90% der troposphärischen Laufzeitverzögerung wird durch die trockene oder sogenannte hydrostatische Komponente verursacht. Dieser Anteil ist maßgeblich vom Luftdruck abhängig. Der feuchte Anteil hingegen hängt in hohem Maße vom stark variierenden Wasserdampfgehalt ab und ist damit schwer zu modellieren (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Die Laufzeitverzögerung eines Signals ergibt sich aus der Summe der beiden zenitalen Verzögerungen  $Z_h$  und  $Z_w$ , jeweils multipliziert mit den dazugehörigen Mappingfunktionen  $m_h(E)$  und  $m_w(E)$ , wobei  $E$  den Elevationswinkel bezeichnet, unter welchem das GNSS-Signal auf die Empfangsantenne trifft. Die Mappingfunktionen erlauben den Übergang der zenitalen Verzögerung auf einen beliebigen Elevationswinkel. Es gilt folgende Formel (Böhm et al., 2006b):

$$T(E) = Z_h * m_h(E) + Z_w * m_w(E), \quad (56)$$

wobei die troposphärische Laufzeitverzögerung  $Z_h$  im Zenit für den trockenen Anteil zirka 90% der gesamten troposphärischen Laufzeitverzögerung ausmacht. Diese kann mit Hilfe des Luftdrucks  $P_0$  auf der Station (in mbar), der Breite  $\varphi$  und der Höhe  $H$  (in km) der Station nach Saastamoinen (1973) bestimmt werden

$$Z_{h[m]} = \frac{0,0022768 * P_{0[mbar]}}{1 - 0,00266 * \cos(2\varphi) - 0,00028H_{[km]}} \quad (57)$$

Zur Modellierung des restlichen feuchten Anteils der Verzögerung im Zenit gibt Saastamoinen (1973) folgende Gleichung an:

$$Z_w = 0,002277 * \left( \frac{1255}{T_0} + 0,05 \right) * P_w, \quad (58)$$

mit:

$T_0$ : Temperatur (vereinfachend mit 288 K)

$P_w$ : Partialdampfdruck des Wasserdampfes. Er variiert zeitlich und räumlich und ist damit schwer an der Station festzulegen.

Zur Umrechnung der Zenitverzögerungen auf eine beliebige Elevation wird eine Mappingfunktion verwendet. Herring (1992) entwickelte eine häufig benutzte Form der Mappingfunktion, die sowohl für den hydrostatischen als auch den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung verwendet werden kann.

$$m_E = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}} \quad (59)$$

Von dieser Formel wurden die drei nachfolgend beschriebenen hydrostatischen und feuchten Mappingfunktionen abgeleitet. Die Koeffizienten für den hydrostatischen Anteil  $a_h$ ,  $b_h$ , und  $c_h$  sowie für den feuchten Anteil  $a_w$ ,  $b_w$ , und  $c_w$  werden bei der Niell-Mappingfunktion (NMF), der globalen Mappingfunktion *Global Mapping Function* (GMF) und der Wiener Mappingfunktion *Vienna Mapping Function 1* (VMF1) unterschiedlich bestimmt.

Aus den Messdaten von Radiosonden der nördlichen Halbkugel entwickelte Niell (1996) eine Mappingfunktion. Während die Koeffizienten der hydrostatischen Mappingfunktion von der Breite und der Höhe der Station sowie dem Tag des Jahres abhängen, sind sie für die feuchte Mappingfunktion nur von der Breite der Station abhängig. Obwohl die NMF wegen der Unabhängigkeit von tatsächlichen Wetterdaten an der Station von Vorteil ist, hat sie aufgrund der Nichtberücksichtigung der geografischen Länge und eines breitenabhängigen Biases auf der Südhalbkugel eine räumliche Beschränkung (Böhm et al., 2006a). Zur Verbesserung der NMF sind neuere Mappingfunktionen aus numerischen Wettermodellen abgeleitet worden, wie die VMF1 und die GMF (Böhm et al., 2006a, Böhm et al., 2006b). Die Parameter beider Mappingfunktionen wurden mithilfe von Strahlverfolgung bestimmt. Die Koeffizienten der GMF wurden aus einer Entwicklung der VMF1 in Kugelflächenfunktionen aus einem globalen Gitter abgeleitet. Zur Bestimmung der GMF-Koeffizienten werden die Stationskoordinaten (Länge, Breite und Höhe) sowie der Tag des Jahres benötigt. Die GMF bietet eine bessere Genauigkeit als die NMF und ein kleineres Bias in der Höhe im Vergleich zur VMF1 (Böhm et al., 2006a).

Heßelbarth (2011) hat die Auswirkungen verschiedener Troposphärenmodelle auf die statische Positionsbestimmung (PPP-Lösung mit Zweifrequenz) untersucht. Hierbei werden die drei Mappingfunktio-

nen NMF, VMF1 und GMF verwendet und verglichen. Die Standardabweichungen der drei Mappingfunktionen zeigten ein hohes Genauigkeitsniveau. Wird die Elevationsmaske auf  $10^\circ$  gesetzt, haben die Standardabweichungen in der Lage und Höhe fast identische Werte (maximal 2 mm Differenz). In diesem Fall haben die verschiedenen Mappingfunktionen keine Auswirkung auf die statische Positionsbestimmung mit PPP-Lösung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zuerst die Laufzeitverzögerung im Zenit für den hydrostatischen Anteil mittels eines Standardmodells (*Global Pressure and Temperature* GPT/Saastamoinen) erfasst und anhand der hydrostatischen Mappingfunktion von GMF (Böhm et al., 2007) umgerechnet, um damit dann die Code- und Phasenbeobachtungen vorab zu korrigieren. Die Laufzeitverzögerung im Zenit für den feuchten Anteil und der Restfehler des hydrostatischen Anteils werden als Unbekannte im Laufe der Ausgleichung geschätzt.

### 3.2.2 Ionosphäre

Der obere Teil der Atmosphäre (70 bis ungefähr 1000 km Höhe) besteht aus Protonosphäre und Ionosphäre (Seeber, 2003). Die Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne verursacht eine Aufspaltung der Gasmoleküle in freie Elektronen und positive Ionen und führt zu einer Ionisierung der Gasmoleküle. Die Ionosphäre wird durch die Anzahl der Elektronen pro  $m^2$ , als Elektronendichte  $N_e$  bezeichnet, beschrieben. Der Einfluss der Ionosphäre auf ein Signal ist vom gesamten Elektronengehalt (*Total Electron Content*, TEC) abhängig, der dem Integral der Elektronendichte entlang des Signalwegs vom Satelliten zum Empfänger entspricht. Als Maßeinheit für TEC wird  $TECU = 10^{16}$  Elektronen pro  $m^2$  verwendet. Der Elektronengehalt variiert zeitlich und räumlich. In der Äquatorregion ist der Elektronengehalt am höchsten (Bauer, 2011).

Unter dem Begriff ionosphärische Refraktion versteht man zum einen die Abweichung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und zum anderen die Krümmung des Signalwegs. Da die Strahlkrümmung nur einen geringen Einfluss auf die Signallaufzeit hat, ist sie im Allgemeinen zu vernachlässigen. Die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit aufgrund des Ionosphäreneinflusses ist für die Signale frequenzabhängig. Außerdem haben die Code- und Phasenmessungen den gleichen Betrag erster Ordnung der ionosphärischen Refraktion aber mit entgegengesetztem Vorzeichen (Seeber, 2003).

Die Ionosphäre stellt für das Signal ein dispersives Medium dar. Das heißt, die ionosphärische Laufzeitverzögerung ist frequenzabhängig und für die Code- und Phasenbeobachtungen unterschiedlich. Basierend auf der Frequenzabhängigkeit kann die erste Ordnung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung durch Bilden der ionosphären-freien Linearkombination zwischen zwei Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  eliminiert werden. Die ionosphären-freie Linearkombination der Code- ( $C_0$ ) und Phasenbeobachtung ( $\Phi_0$ ) ergibt

sich aus den Codebeobachtungen  $C_1$  und  $C_2$  bzw. den Phasenbeobachtungen  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  wie folgt (Dach et al., 2015):

$$C_0 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 * C_1 - f_2^2 * C_2) \quad (60)$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 * \Phi_1 - f_2^2 * \Phi_2) \quad (61)$$

Obwohl die ionosphären-freie Linearkombination der Phasenbeobachtungen ein erhöhtes Messrauschen (3-mal mehr) und Mehrwegeausbreitungseinflüsse im Vergleich zu den originalen Signalen besitzt, ist es das beste Verfahren zur Beseitigung des Ionosphäreinflusses für die PPP-Auswertung mit zwei Frequenzen. Dieses Verfahren kann im Fall der Verfügbarkeit der Beobachtungen von nur einer Frequenz, wie z. B. bei der Einfrequenz-PPP-Lösung nicht verwendet werden. Die Beseitigung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen ist deshalb eine große Herausforderung für GNSS-Einfrequenz-Nutzer (Shi et al., 2012). In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze zur Behandlung der ionosphärischen Refraktion für Einfrequenzbeobachtungen verfolgt.

#### Ionosphärische Modelle:

Es wurden mehrere Modelle zur Erfassung der ionosphärischen Refraktion entwickelt. Ein weit verbreiteter Algorithmus wurde von Klobuchar (1987) entwickelt. Für die Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung benötigt das Klobuchar-Modell acht Koeffizienten, die als Teil der GPS-Navigationsnachricht ausgesendet werden. Das Klobuchar-Modell dient zur ionosphärischen Korrektur der Codebeobachtungen für GPS-Einfrequenz-Nutzer. Durch dieses Modell können etwa 50% der ionosphärischen Effekte korrigiert werden. Es ist von der geographischen Position des Nutzers sowie von der Elevation und dem Azimut des Satelliten abhängig (Klobuchar, 1987).

Der IGS und seine Analysezentren stellen globale Ionosphärenkarten (GIM) zur Verfügung. Ein Beispiel ist das Analysezentrum *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE). CODE generiert seit dem Jahr 1996 tägliche Karten der globalen Elektronengehaltsverteilung *Total Electron Content* (TEC) als Teil der von CODE durchgeführten Datenverarbeitung für den IGS. Die GIM sind aus den Zweifrequenzphasenbeobachtungen der von CODE verwendeten Referenzstationen abgeleitet. Zum Generieren dieser Produkte wird die geometriefreie Linearkombination analysiert, die hauptsächlich das Ionosphärensignal enthält (Schaer, 1999). Diese Produkte sind im *IONosphere map EXchange*, kurz IONEX-Format, mit einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden und einer räumlichen Auflösung von  $5^\circ \times 2,5^\circ$

(Länge x Breite) abgespeichert. Sie stehen im Internet<sup>1</sup> für die Auswertung im Post-Processing zur Verfügung.

#### GRAPHIC:

Da die Ionosphäre die Code- und Phasenbeobachtungen mit gleichem Betrag aber umgekehrtem Vorzeichen beeinflusst, kann eine ionosphären-freie Linearkombination aus Code- und Phasenbeobachtungen  $\Phi_{GPH}$  auf einer Frequenz gebildet werden. Diese wird als GRAPHIC (*GRoup And Phase Ionospheric Correction*) (Gold et al., 1994, Yunck, 1993) oder als *quasi-phase*-Beobachtung (Choy, 2009) bezeichnet:

$$\Phi_{GPH,1} = \frac{C_1 + \Phi_1}{2} \quad (62)$$

$$\Phi_{GPH,2} = \frac{C_2 + \Phi_2}{2} \quad (63)$$

$C_1$ ,  $C_2$  und  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  sind die Code- und Phasenbeobachtungen auf beiden Frequenzen.

Die Einfrequenz-PPP-Lösung auf der Basis von (62) wurde zur Orbitbestimmung von LEO-Satelliten anhand von Einfrequenz-Beobachtungsdaten (Bock et al., 2009) oder zur Positionsbestimmung (Muellerschoen et al., 2004, Choy, 2009, Shi et al., 2012) verwendet.

Bock et al. (2009) haben drei Möglichkeiten zur Beseitigung der ionosphärischen Refraktion miteinander verglichen. Zusätzlich zu einem Ionosphärenmodell und GRAPHIC wurde ein Ionosphärenparameter in der Auswertung mitgeschätzt. Die Genauigkeit der LEO-Orbit-Bestimmung war das Ziel dieser Untersuchung. Die beste Genauigkeit wurde bei der Anwendung von GRAPHIC erzielt. Die GRAPHIC-Linearkombination wird vom Coderausachen und den Code-Mehrwegeeffekten dominiert. Trotzdem liefert die PPP-Lösung mittels dieser Art der Ionosphärenbehandlung bessere Ergebnisse bei der Positionsbestimmung im Vergleich zu den Ionosphärenmodellen. GRAPHIC benötigt aber eine längere Konvergenzzeit (Shi et al., 2012). Da sich diese Arbeit nur mit 24 Stunden-Lösungen beschäftigt, wird die GRAPHIC-Kombination zur Eliminierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen angewendet.

---

<sup>1</sup> <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>

### 3.3 Instrumentelle Verzögerungen

Durch die Hardware sowohl im Satelliten als auch im Empfänger werden Laufzeitverzögerungen verursacht. Das bedeutet, dass die durch die Satellitenuhr gegebene Zeit nicht exakt mit der Zeit der Signalgenerierung zusammenfällt. Dies gilt auch für die Signalverarbeitung im Empfänger. Die instrumentellen Verzögerungen beeinflussen die Code- und Phasenbeobachtungen aller Frequenzen und aller GNSS. Die Bestimmung dieser instrumentellen Laufzeitverzögerungen ist für die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte von großer Bedeutung. Bei der Schätzung der Mehrdeutigkeiten im Rahmen der PPP-Auswertung werden verschiedene Biases wie z. B. der Satellitenphasenbias berechnet. Der Phasenbias des Empfängers wird zu verschiedenen Parametern zusammengefasst, wie z. B. die Empfängeruhrabweichung und die Mehrdeutigkeit (Banville et al., 2008).

Auf die Signale von GPS ist ein grober C/A-Code (*coarse/acquisition*) und ein präziser P-Code (*precise*) aufmoduliert. Die Verzögerungen bei der Signalgenerierung und bei der Signalverarbeitung führen zu Verfälschungen der Codebeobachtungen. Diese Abweichungen werden als Differenzen der verschiedenen Codesignale bestimmt, die als (DCB) *Differential Code Biases* bezeichnet werden. Sie sind vom Satelliten und dem verwendeten Empfänger abhängig (Dach et al., 2015). Man unterscheidet zwischen P1P2-DCB, P1C1-DCB und P2C2-DCB. P1P2-DCBs sind für GPS-Satelliten vom Satellitentyp abhängig. Während die GPS-Satelliten des Blocks IIF negative P1P2-DCBs haben, weisen alle älteren GPS-Satelliten positive Werte auf. Die Satelliten vom Typ IIR-B zeigen deutlich größere P1P2-DCBs im Vergleich zu anderen GPS-Satellitengenerationen. Die P1C1-DCBs und die P2C2-DCBs sind 3-mal kleiner als die P1P2-DCBs. Das Analysezentrum CODE berechnet die DCBs für GPS- und GLONASS-Satelliten und stellt sie als monatliche Produkte zur Verfügung<sup>2</sup>.

Seit der GPS-Woche 1056 (02.04.2000) erfolgt die Bestimmung der präzisen Satellitenkoordinaten und -uhrkorrekturen unter Verwendung der P1- und P2-Codebeobachtungen. Werden mit einem GNSS-Empfänger beide, also P1- und P2-Codebeobachtungen, aufgezeichnet und verwendet, ist das Anbringen von P1P2-DCBs an die Codebeobachtungen bei einer PPP-Auswertung nicht notwendig. Andererseits führt die Verwendung der C1-Codebeobachtungen wegen der P1C1-DCBs in der PPP-Auswertung (ionosphären-freie Code-Linearkombination und Melbourne-Wübbena-Linearkombination) zu Widersprüchen (Schönemann et al., 2011). Deswegen müssen die C1-Codebeobachtungen bei der PPP-Zweifrequenz-Lösung dementsprechend korrigiert werden (Kouba, 2009).

Bei der Einfrequenz-PPP-Lösung mit Nutzung eines Ionosphärenmodells sind die DCB-Korrekturen unverzichtbar und führen bei Nichtberücksichtigung wegen ihrer zeitlichen Stabilität zu Fehlern in der Positionsbestimmung von mehreren Metern. Im Gegensatz dazu ist die PPP-Einfrequenz-Lösung mit GRAPHIC weniger empfindlich für die Widersprüche zwischen P1C1- und P1P2-DCB auf Grund der

---

<sup>2</sup> <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>

Mehrdeutigkeitsschätzung. Trotz der Verwendung von C1-Codebeobachtungen können die DCB-Korrekturen bei der Verwendung von GRAPHIC vernachlässigt werden (Kouba, 2015).

### **3.4 Korrekturen an der Station**

Die stationsabhängigen Einflüsse beeinträchtigen die Positionsbestimmung mittels PPP-Auswertungen sowohl mit Zweifrequenz- als auch Einfrequenz-Beobachtungsdaten. Dazu gehören das Antennenphasenzentrumsoffset (PZO) und dessen Variationen (PZV), Mehrwegeeffekte, Erdgezeiten, Polbewegung und ozeanische Auflasten. Außerdem weisen die Empfangsantennen azimut- und elevationsabhängige Variationen der Codebeobachtungen auf. Diese sind zusätzlich von der Frequenz abhängig. Die GDV werden im Kapitel 4 ausführlich beschrieben und modelliert. Weiterhin werden dort ihre Einflüsse auf die Einfrequenz-PPP-Lösung untersucht.

#### **3.4.1 Empfangsantennenkorrekturen**

Die Abweichung zwischen dem mechanischen Zentrum einer GNSS-Empfangsantenne und dem mittleren elektronischen Phasenzentrum wird als Phasenzentrumsoffset (PZO) bezeichnet. Des Weiteren ist das elektronische Phasenzentrum eine Funktion der Signalrichtung und auch der Signalfrequenz. Dies wird als Phasenzentrumvariation (PZV) bezeichnet. PZO und PZV stellen zusammen die Empfangsantennenkorrekturen dar (Wanninger et al., 2006). Diese Korrekturen werden für GNSS-Empfangsantennen antennenspezifisch oder baugruppenspezifisch durch Labor- oder Feldkalibrierung bestimmt. Bei den Feldkalibrierverfahren wird zwischen absoluter und relativer Kalibrierung unterschieden. Die absolute Feldkalibrierung erfolgt durch einen Roboter. Bei diesen Verfahren wird die zu kalibrierende Antenne kontrolliert gedreht und gekippt, sodass direkte, absolute Kalibrierwerte erhalten werden. Gleichzeitig kann weitestgehend eine Beeinflussung der Antennenkorrekturen durch Mehrwegeeffekte vermieden werden. Bei einfachen relativen Kalibrierverfahren wird auf die Kippung verzichtet. Die zu kalibrierende Antenne wird nur kontrolliert gedreht. Die Beobachtungen werden unter Zuhilfenahme von Beobachtungen einer festen Referenzantenne in unmittelbarer Nähe zur Ableitung der relativen Antennenkorrekturen verwendet. Sind zusätzlich die Antennenkorrekturen der Referenzantenne verfügbar, können die absoluten Kalibrierwerte der zu kalibrierende Antenne extrahiert werden. Die Mehrwegeeffekte auf die Antennenkorrekturen werden durch dieses Verfahren praktisch nur für die horizontale Komponente eliminiert (Wanninger, 2002, Schmolke et al., 2015).

Im Gegensatz zur Feldkalibrierung können GNSS-Antennen auch im Labor kalibriert werden. Dabei werden künstliche Satellitensignale zur Ausmessung der Antenne verwendet. Zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten werden die Laborräume mit Absorbermaterial ausgekleidet (Campbell et al., 2004). Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit der Kalibrierung neuer Satellitensignale, die noch nicht in ausreichender Zahl im Felde verfügbar sind.

Die Phasenzentrumoffsetkorrekturen werden als x-, y- und z-Exzentrizitäten und deren Variationen als elevations- und/oder azimutabhängige Korrekturwerte berechnet. Zur Speicherung und Verarbeitung der Antennenkorrekturen wird das ANTEX-Format verwendet (Rothacher et al., 2010). Mit diesem Dateiformat lassen sich Antennenkorrekturen nicht nur für Empfangsantennen, sondern auch für Satellitenantennen speichern. Im Fall der Satellitenantennen sind die Antennenkorrekturen für die ionosphären-freie Linearkombination der beiden GPS- oder GLONASS-Frequenzen verfügbar, im Fall der Empfangsantennen stehen sie als frequenzspezifische Korrekturen zur Verfügung. Aus diesem Grund können im Rahmen der Einfrequenz-PPP-Auswertung die Empfangsantennenkorrekturen für die Code- und Phasenbeobachtungen der originalen Frequenzen direkt verwendet werden.

### **3.4.2 Erdzeiten, Polbewegung und ozeanische Auflasten**

Global betrachtet, unterliegt eine Station periodischen Bewegungen, die einige Dezimeter erreichen können und nicht in den entsprechenden ITRF „regulierten“ Positionen enthalten sind. Da die meisten periodischen Stationsbewegungen in großen Gebieten auf der Erdoberfläche nahezu gleich sind, werden sie bei der relativen Positionsbestimmung mit Basislinien kleiner als 100 km nicht berücksichtigt. Bei der PPP-Auswertung hingegen sind Modelle zur Korrektur dieser Bewegungen unverzichtbar. Die Ursachen für diese ständige Bewegung sind vor allem die Erdzeiten und die ozeanischen Auflasten. Weitere Verschiebungseffekte, die kleiner als 1 cm sind, wie z. B. die atmosphärischen und die Grundwasserauflasten, können in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden (Kouba, 2009). An dieser Stelle soll auf eine Beschreibung der Korrekturmodelle zu periodischen Stationsbewegungen aufgrund der Erdzeiten, Polbewegung und ozeanischen Auflasten verzichtet werden. Weitere Informationen dazu finden sich u. a. in Kouba, (2009), Heßelbarth, (2011) und Petit et al., (2010).

### **3.4.3 Mehrwegeeffekte**

Das vom Satelliten ausgesendete Signal kann die Empfangsantenne nicht nur auf direktem Weg, sondern auch auf einem reflektierten Weg erreichen. Diese Reflexionen können durch Objekte in der Antennenumgebung wie Straßen, Gebäude, Autos oder Ähnliches hervorgerufen werden. Die Überlagerung von direktem und reflektiertem Signal führt zu Abweichungen, Mehrwegeeffekten (engl. *multipath*) (Bauer, 2011).

Die Mehrwegeausbreitung ist frequenzabhängig und beeinflusst sowohl die Code- als auch die Phasenbeobachtungen. Der Einfluss auf den P-Code ist zwei Größenordnungen größer als auf Phasenbeobachtungen. Die maximale Abweichung wegen der Phasenmehrwegeeffekte beträgt nicht mehr als ein Viertel ihrer Wellenlänge (Georgiadou und Kleusberg, 1988).

Die Code-Mehrwegeeinflüsse haben eine besondere Bedeutung, wenn die Code- und Phasenlinearkombination zur Mehrdeutigkeitslösung verwendet wird. Die Mehrwegeeffekte verstärken sich um den Faktor 3 bei der ionosphären-freien Linearkombination zwischen zwei Frequenzen. Die GRAPHIC-Beobachtungen werden mit der Hälfte der Codemehrwegeeffekte beeinflusst (Choy, 2009).

Aufgrund der Bewegung des Satelliten besitzen die resultierenden Mehrwegeeffekte eines statischen Empfängers einen periodischen Charakter (Seeber, 2003). Eine Reduzierung der Mehrwegeeffekte kann durch digitale Filterung, Kalibrierung der Station, einer Antennengrundplatte oder einer Choke-Ring-Antenne erreicht werden (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Außerdem sollte die Empfängerumgebung sorgfältig ausgewählt werden (Seeber, 2003).

Viele Verbesserungen der Empfängertechnik führten in den letzten Jahren zu einer Verringerung der Empfindlichkeit gegenüber Codemehrwegeeffekten (Wanninger et al., 2000). Entsprechende Techniken helfen jedoch bei Phasenmehrwegeeffekten nicht. Da die Mehrwegeeinflüsse von der Umgebung und dem Antennentyp stark abhängig sind, liegt die wirksamste Technik zur Verringerung dieser Fehler in der Wahl des Messstandorts und des Antennentyps.

Diese Arbeit befasst sich mit der Minimierung der Mehrwegeeinflüsse mittels der elevationsabhängigen Gewichtung der Beobachtungen. Weiterhin wurde die Elevationsmaske auf  $10^\circ$  festgesetzt. Somit werden alle Beobachtungen mit einer Elevation unter  $10^\circ$  von den Berechnungen ausgeschlossen, da diese stärker von Mehrwegeeffekten beeinflusst werden als Beobachtungen hochstehender Satelliten. Außerdem werden die Mehrwegeeffekte durch die Mittelbildung über lange Beobachtungszeiten (24 Stunden) minimiert.

## **3.5 Auswertung von GRAPHIC-Beobachtungen**

Dieser Abschnitt beschreibt die Auswertung von Beobachtungen nach dem Einfrequenz- PPP-Verfahren im Vergleich zur traditionellen PPP-Zweifrequenz-Ausgleichung. Die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, wie sie im Abschnitt 2.5 beschrieben wurde, sowie die Korrekturen bezüglich der Messabweichungen, wie sie in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels erläutert wurden, bilden die Grundlage für die folgende Auswertung.

### **3.5.1 Beobachtungsgleichungen**

Die erweiterten Beobachtungen der undifferenzierten Code- und Phasenmessungen, siehe Gl. 2 und 3, werden mit den entsprechenden Korrekturen, wie in diesem Kapitel beschrieben, korrigiert. Die vereinfachten korrigierten Beobachtungsgleichungen sind mit ionosphärischen Laufzeitverzögerungen und Messrauschen behaftet.

Bei einer traditionellen PPP-Auswertung mit Zweifrequenzbeobachtungen wird die erste Ordnung der ionosphärischen Effekte durch die ionosphärenfreie Linearkombination eliminiert. Anhand der beiden Gl. 60 und 61 können die korrigierten Code- und Phasenbeobachtungen der ionosphären-freien Linearkombination  $C_0^i$  und  $\Phi_0^i$  für GPS- und GLONASS-Satelliten wie folgt darstellt werden:

$$C_0^i = R_a^i + c_0 * [\delta t_a + \delta t^i] + m(e_a^i) * ZV_a^i + G_a^i + \varepsilon_{a,c}^i \quad (64)$$

$$\Phi_0^i = R_a^i + c_0 * [\delta t_a + \delta t^i] + m(e_a^i) * ZV_a^i + G_a^i + \lambda_f * N_a^i + \varepsilon_{a,\phi}^i \quad (65)$$

mit

$$R_a^i = |\vec{X}^i - \vec{X}_a| = \sqrt{(X^i - X_a)^2 + (Y^i - Y_a)^2 + (Z^i - Z_a)^2} \quad (66)$$

und

- $R_a^i$ : Entfernung zwischen Satellit i und Empfänger a [m]
- $c_0$ : Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s]
- $\delta t_a, \delta t^i$ : Empfänger- und Satellitenuhrabweichung [s]
- $\varepsilon_a^i$ : zufällige Messfehler [m]
- $\lambda_f$ : Wellenlänge [m]
- $N_a^i$ : Phasenmehrdeutigkeit [-]
- $\vec{X}^i, \vec{X}_a$ : Ortsvektoren in globalen kartesischen Koordinaten X, Y, Z [m]

und bezüglich der Troposphäre:

- $m(e_a^i)$ : elevationsabhängige Mappingfunktion [-]
- $ZV_a^i$ : Zenitverzögerung [m] (feuchte Komponente und trockener Restfehler)
- $G_a^i$ : horizontaler Gradient [m].
- $e_a^i$ : Elevationswinkel.

Bei der Einfrequenz-PPP-Auswertung wird ebenfalls die erste Ordnung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen beseitigt, hier jedoch durch die GRAPHIC-Gl. (62). Darüber hinaus ist das Beobachtungsmodell gegeben durch (Kouba et al., 2017):

$$\Phi_{GP,H,f1} = R_a^i + c_0 * [\delta t_a + \delta t^i] + m(e_a^i) * ZV_a^i + \lambda_{f1} * N_{GP,H}^i + \varepsilon_{a,GP,H}^i \quad (67)$$

Mit

- $N_{GP,H}^i \approx -\frac{N_{a,f1}^i}{2}$ , GRAPHIC *float*-Mehrdeutigkeit
- $\varepsilon_{a,GP,H}^i$ : zufällige Messfehler in der GRAPHIC-Beobachtung [m]

Aufgrund des Einflusses der Codebeobachtung hat die GRAPHIC-Beobachtung ein größeres Rauschniveau im Vergleich zur den originalen Phasenbeobachtungen. Das GRAPHIC-Rauschen beträgt ungefähr die Hälfte des Rauschens der Codebeobachtungen, wenn das Rauschen der Phasenbeobachtungen vernachlässigt wird (Montenbruck, 2003).

Der trockene Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerungen wird durch ein Modell erfasst und korrigiert. Der verbleibende restliche Fehler des trockenen Anteils und der feuchte Anteil werden in der Ausgleichung mitgeschätzt. Dies befindet sich in den Gl. 64, 65 und 67 als Zenitverzögerung  $ZV_a^i$  und Mappingfunktion  $m(e_a^i)$ . Um der zeitlichen Variabilität des feuchten Anteils Rechnung zu tragen, wird im Ausgleichungsprozess mit einer Auflösung von z. B. 2 Stunden gearbeitet. Somit gelten die geschätzten Parameter immer nur für ein bestimmtes Intervall von beispielsweise 2 Stunden. Also ergeben sich bei einer 24-Stunden-Datenauswertung 13 troposphärische Unbekannte (Reußner, 2015). Da die zeitliche Variabilität des feuchten Anteils einen geringeren Einfluss auf die Positionsbestimmung im Vergleich zum Messrauschen der GRAPHIC-Beobachtung hat, wurde bei der Einfrequenz-PPP-Lösung die zeitliche Auflösung von  $ZV_a^i$  auf 12 Stunden gesetzt.

Pro Satellit muss eine Phasenmehrdeutigkeit geschätzt werden und zusätzlich muss eine Phasenmehrdeutigkeit angesetzt werden, wenn der Satellit, beispielsweise nach einer Signalunterbrechung, welche eine *Cycle Slips* erzeugt, wieder sichtbar ist. Damit ist die Anzahl der zu bestimmenden Mehrdeutigkeiten von der Anzahl der sichtbaren Satelliten und der Anzahl der *Cycle Slips* abhängig. Je mehr Mehrdeutigkeiten wegen Signalunterbrechungen zu bestimmen sind, desto instabiler wird das Gleichungssystem. Deswegen verlangt eine PPP-Auswertung mit hohen Genauigkeitsanforderungen Beobachtungsdaten von guter Qualität.

Die Empfängeruhrabweichung ist für jedes GNSS unterschiedlich. Bei einer kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung ist die Anzahl der Unbekannten wegen der Empfängeruhrabweichung auf zwei pro Epoche zu setzen oder ein Offset-Wert zu schätzen.

### 3.5.2 Funktionales Modell

Das funktionale Modell beschreibt die mathematischen und physikalischen Beziehungen zwischen den Messgrößen und den Unbekannten, vgl. 2.5.1. Die Messgrößen sind bei einer Zweifrequenz-PPP-Auswertung die ionosphären-freien Code- und Phasenbeobachtungen und im Fall der Einfrequenz-PPP-Auswertung die GRAPHIC-Beobachtungen (siehe Gl. 67).

Aufgrund der Nicht-Linearität der Beobachtungsgleichungen 64, 65 und 66 ist die Designmatrix nicht unmittelbar aufstellbar. Die Gleichungen müssen erst linearisiert werden, üblicherweise geschieht dies mit einer Reihenentwicklung nach Taylor, siehe Gl. 12. Dazu werden zusätzlich Näherungswerte der Unbekannten benötigt. Die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten bilden die Elemente der Designmatrix.

Die zu bestimmenden Unbekannten lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Zum einen sind das die primären Parameter, die als Ergebnis der Ausgleichung von Bedeutung sind. Sie bestehen aus den Stationskoordinaten und den Zenitverzögerungen der troposphärischen Laufzeitverzögerung und den Phasenmehrdeutigkeiten. Zum anderen sind das die zu eliminierenden Parameter (Empfängeruhrabweichungen). Die sich daraus ergebenden zwei Subvektoren des Parametervektors ergeben sich zu:

$$\hat{x}_1 = [dx_a \ dy_a \ dz_a \ ZV_a^i \ N^1 \ N^2 \ \dots \ N^n]^T \quad \hat{x}_2 = [\delta t_a]^T \quad (68)$$

wobei  $dx_a, dy_a, dz_a$  die Koordinatenzuschläge der Station bezüglich der eingeführten Näherungswerte beschreiben.  $N^1, N^2, \dots, N^n$  sind die Mehrdeutigkeiten der ionosphären-freien Phasenbeobachtungen im Fall der Zweifrequenz-PPP-Auswertung oder der GRAPHIC-Beobachtungen im Fall der Einfrequenz-PPP-Auswertung.

Entsprechend lässt sich die Designmatrix  $A$  für jede Epoche in zwei Submatrizen aufteilen.  $A_1$  enthält die partiellen Ableitungen nach den primären Parametern, die Matrix  $A_2$  die partiellen Ableitungen nach den Empfängeruhrabweichungen.

$$A_1 = [A_{1,\vec{x}_a} \ A_{1,Z} \ A_{1,N}] \quad (69)$$

$$A_2 = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1]^T \quad (70)$$

Die Matrix  $A_1$  hat  $n$  Zeilen, wobei  $n$  der Anzahl der Beobachtungen einer Epoche entspricht. Die ersten drei Spalten werden durch die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Stationskoordinaten  $X_a, Y_a$  und  $Z_a$  belegt. Die Teilmatrix  $A_{1,Z}$  enthält die Koeffizienten der elevationsabhängigen Mappingfunktion. Anschließend ist der Koeffizient der Phasenmehrdeutigkeit auf 1 zu setzen.

Die Matrix  $A_2$  beschreibt die partiellen Ableitungen nach den Empfängeruhrabweichungen von GPS. Werden GPS und GLONASS kombiniert, muss die Matrix auf zwei Spalten entsprechend den beiden GNSS gesetzt werden.

Der gekürzte Beobachtungsvektor ergibt sich aus den Differenzen zwischen den korrigierten Beobachtungen und den Näherungswerten für die Beobachtungen. Bei der Zweifrequenz-PPP-Auswertung enthält dieser Vektor die gekürzten Phasen- und Codebeobachtungen der ionosphären-freien Linearkombination:

$$l = [\phi_0^1 \ \phi_0^2 \ \dots \ \phi_0^n \ C_0^1 \ C_0^2 \ \dots \ C_0^n]^T \quad (71)$$

Für die Einfrequenz-PPP-Auswertung besteht dieser Vektor aus den gekürzten GRAPHIC-Beobachtungen:

$$l = [\phi_{GPH}^1 \ \phi_{GPH}^2 \ \dots \ \phi_{GPH}^n]^T \quad (72)$$

### 3.5.3 Stochastisches Modell

Nach Abschnitt 2.5.2 beinhaltet das stochastische Modell die Genauigkeitsangaben der Beobachtungsgrößen. Es ist damit von größter Bedeutung, da es die Ausgleichung stark beeinflusst. Die Kovarianzmatrix ergibt sich, nach Verzicht auf die Korrelationen zwischen den Beobachtungen, als Diagonalmatrix der Varianzen der Beobachtungen (siehe Gl. 20) zu:

$$\Sigma_{ll(n,n)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (73)$$

Daraus folgt die Gewichtsmatrix, nach Gl. 22:

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 / \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_0^2 / \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_0^2 / \sigma_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & & & 0 \\ & P_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (74)$$

$\sigma_0^2$  ist die Varianz der Gewichtseinheit. Wird  $\sigma_0^2$  auf  $1 \text{ m}^2$  gesetzt, sind die Gewichte lediglich von den Standardabweichungen der Beobachtungen abhängig. Bezüglich der Gewichtung soll auf folgendes hingewiesen werden:

- Im Rahmen einer Zweifrequenz-PPP-Auswertung werden sowohl die Phasen- als auch die Codebeobachtungen verwendet. Das Rauschen der ionosphären-freien Codebeobachtungen ist 100-mal schlechter als das der ionosphären-freien Phasenbeobachtungen. Dies führt dazu, dass die Phasenbeobachtungen gegenüber den Codebeobachtungen um den Faktor 10000 höher abgewichtet werden.
- Handelt es sich um eine kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung, muss auf die Gewichtung von GPS- zu GLONASS-Beobachtungen geachtet werden. Obwohl die Phasenresiduen beider Systeme nahezu identisch sind, sind die GLONASS-Codebeobachtungen um den Faktor 2 ver-räuschter als die GPS-Codebeobachtungen. Folglich ist nur eine Gewichtungsfunktion für die Phasenbeobachtungen beider Systeme notwendig. Hingegen sollten die GLONASS-Codebeobachtungen gegenüber GPS-Codebeobachtungen um den Faktor 4 abgewichtet werden (Heßelbarth, 2011, Reußner, 2015).
- Im Fall der Einfrequenz-PPP-Lösung sollte die Varianz der GRAPHIC-Beobachtungen  $\sigma_{\Phi_{GPH}}^2$  4-mal kleiner als die Varianz der Codebeobachtungen  $\sigma_P^2$  sein (Choy, 2009). Hier kann die Varianz der Phasenbeobachtungen im Vergleich zur Codebeobachtungen vernachlässigt werden.

$$\sigma_{\Phi_{GPH}}^2 = \frac{1}{4} (\sigma_P^2 + \sigma_{\Phi}^2) \quad (75)$$

- In allen Fällen hat die Elevation des Satelliten einen bestimmten Einfluss auf die Gewichtung der Beobachtungen. Je tiefer ein Satellit steht, desto größer werden die Messabweichungen,

insbesondere der troposphärischen Restfehler und der Mehrwegeeffekte. Folglich wird die a priori Standardabweichung der Beobachtungen als Funktion der Satellitenelevation bestimmt. Daraus ergeben sich die Gewichte der Beobachtungen (Heßelbarth, 2011, Reußner, 2015).

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit einer empirischen elevationsabhängigen Gewichtungsfunktion gearbeitet, die auf den Standardabweichungen der resultierenden Verbesserungen der GRAPHIC-Beobachtungen beruht.

### **3.5.4 Sequentielle Ausgleichung der statischen Beobachtungen**

Bei einer statischen Auswertung verändern sich die gesuchten Koordinaten während des Auswertungsprozesses nicht. Die Aufteilung der Unbekannten in primäre und zu eliminierende Parameter erfolgt durch die Vektoren (siehe Gl. 67). Die Gl. 69 und 70 beschreiben die entsprechenden Koeffizientenmatrizen  $A_1$  und  $A_2$  für jede Epoche. Weiterhin lassen sich die Normalgleichungsmatrix und das Absolutglied des Normalgleichungssystems durch die Gl. 40 und 41 berechnen. Anschließend wird der Parametervektor für die jeweilige Epoche durch die Gl. 44 bestimmt. Die Kofaktormatrix der Parameter ergibt sich als Inverse der Normalgleichungsmatrix. Sie enthält die Genauigkeitsangaben der Unbekannten.

Bei einer Auswertung von z. B. 24 Stunden-Daten handelt es sich um tausende Beobachtungsepochen. Zur Auswertung dieser großen Anzahl von Beobachtungen wird auf die Vorteile der sequenziellen Ausgleichung zurückgegriffen (siehe Abschnitt 2.5.5). Bei der Auswertung jeder neuen Messepoche wird das Resultat der vorherigen Beobachtungsepochen berücksichtigt. Das vollständige Modell wird in den Gl. 47 bis 51 dargestellt.

## 4 Modellierung von GDV

Im vorherigen Kapitel wurden die theoretischen Grundlagen zur Einfrequenz-PPP-Lösung erklärt. Die dabei auftretenden GNSS-Messabweichungen wurden ebenfalls theoretisch beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden Positionsbestimmungen mittels Einfrequenz-PPP aus 24 Stunden Daten betrachtet. Zum Vergleich werden Soll-Koordinaten herangezogen, die aus einer Zweifrequenz-PPP-Lösung berechnet wurden. Weitere Informationen zur Genauigkeit der Soll-Lösung und zu den verwendeten Parametern für die Einfrequenz-PPP-Lösungen sind im Kapitel 5 beschrieben. Dieses Kapitel widmet sich der Modellierung von GDV.

### 4.1 Motivation

Dieser Abschnitt erläutert die Notwendigkeit der Berücksichtigung von GDV bei Verwendung der ionosphären-freien Kombination aus Code- und Phasenbeobachtungen auf einer Frequenz. Dies wird anhand eines Beispiels gezeigt. Dazu wurden RINEX-Daten von 10 IGS-Referenzstationen im gesamten Juli 2014 (Doy 182-212/2014) mit dem Programm WaPPP (Wanninger, 2016) ausgewertet. Die Stationen sind weltweit verteilt und mit unterschiedlichen Antennentypen sowie Empfängertypen ausgestattet, siehe Tabelle 6. Für die Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen wurden die *final*-Produkte der ESA (*European Space Agency*) verwendet. Zur Bestimmung der Soll-Lösung wurden die kompletten Beobachtungsdaten verwendet. Anschließend wurden die Beobachtungen ausgedünnt, sodass nur noch L1-Daten von GPS Satelliten übrigblieben. Mit diesen wurden dann L1-Einfrequenz-Lösungen berechnet. Ausführliche Informationen zur Auswertestrategie finden sich in den Kapiteln 5 und 6. Zur Betrachtung der Positionsgenauigkeit werden Abweichungen zwischen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung und der Soll-Lösung ermittelt.

Es wird zwischen der Genauigkeit der Lage und der Höhe unterschieden. In Abbildung 3 ist die Lagegenauigkeit dargestellt, also die Abweichung der Einfrequenz-PPP-Lösung von der Soll-Lösung als 2D-Fehler der Ost- und Nordkomponente.

Station	Land	Antenne	Empfänger
stjo	Kanada	AOAD/M_T NONE	JAVAD TRE_G3T DELTA
chur	Kanada	ASH701945E_M NONE	TPS NET-G3A
badg	Russland	JAVRINGANT_DM JVDM	JAVAD TRE_G3TH DELTA
leij	Deutschland	LEIAR25.R3 LEIT	JAVAD TRE_G3TH DELTA
pado	Italien	LEIAR25.R4 NONE	LEICA GR10
func	Portugal	LEIAT504GG NONE	LEICA GRX1200GGPRO
nnor	Australien	SEPCHOKE_MC NONE	SEPT POLARX4
svtl	Russland	TPSCR.G3 TPSH	JAVAD TRE_G3TH DELTA
reun	Frankreich	TRM55971.00 NONE	TRIMBLE NETR9
syog	Antarktika	TRM59800.00 SCIS	TRIMBLE NETR9

Tabelle 6: Beschreibung der 10 ausgewählten IGS Stationen

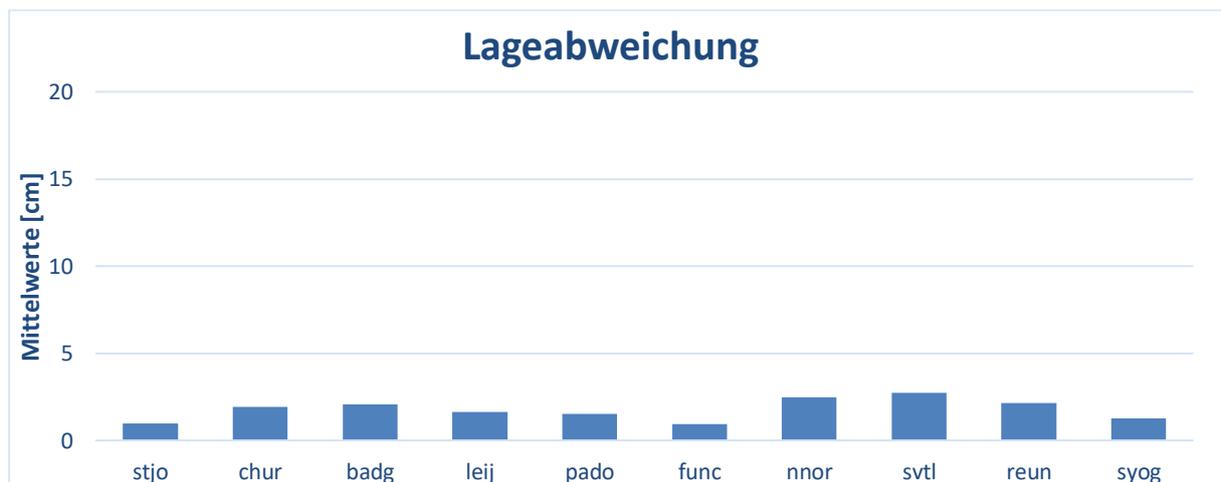


Abbildung 3: Lageabweichungen der Einfrequenz-PPP-Lösung [cm]

Die Einfrequenz-PPP-Lösung weist eine sehr gute Lagegenauigkeit auf (Abbildung 3). Keine deutlichen systematischen Effekte in der Lageabweichung konnten festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist die Höhengenaugkeit bei Verwendung des PPP-Auswerteverfahrens deutlich schlechter. Die Abbildung 4 zeigt die Abweichungen der Einfrequenz-PPP-Lösung zur Soll-Lösung für die Höhe. Hierfür wurden die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen für den Monat Juli für jede Station bestimmt. Zum einen ist die Genauigkeit der Höhe deutlich schlechter als die der Lage. Zum anderen ist aus der Abbildung 4 erkennbar, dass die Einfrequenz-PPP-Lösung systematische Effekte in der Höhenkomponente aufweist. Die 10 ausgewählten Referenzstationen sind mit unterschiedlichen Empfangsantennen ausgestattet. Die Abweichungen bei allen Antennen, außer dem Antennentyp

LEIAR25.R3, besitzen negative Vorzeichen. Anscheinend kann vermutet werden, dass für diese systematischen Effekte eine Abhängigkeit vom Antennentyp vorliegt.

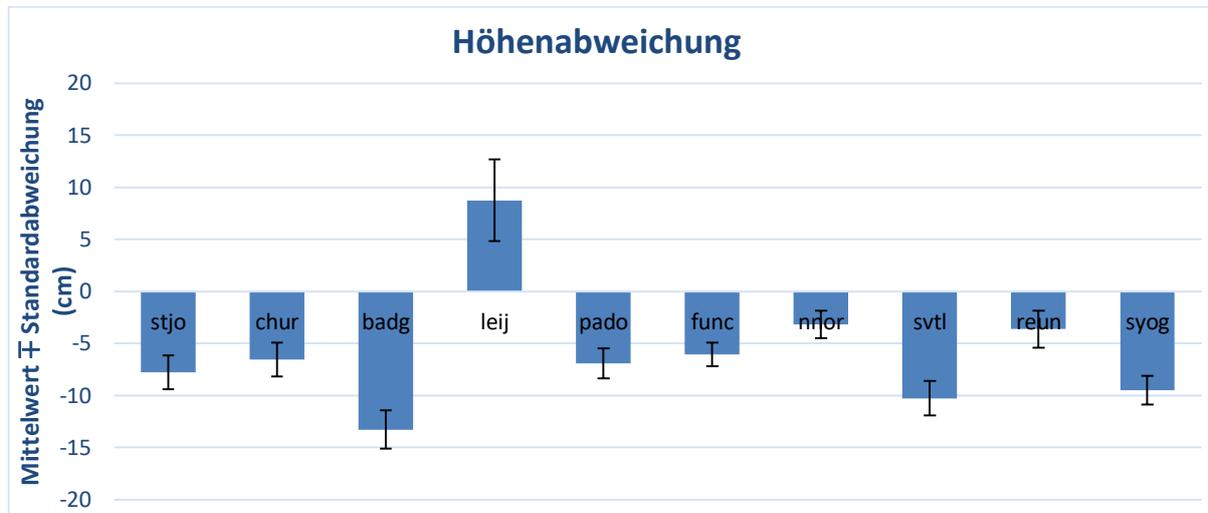


Abbildung 4: Differenzen und Standardabweichungen der Einfrequenz-PPP-Lösung für die Höhenkomponente

Die Auswirkung des Antennentyps auf die Einfrequenz-PPP-Lösung soll im Weiteren ausführlich untersucht werden. Dazu wurden 3 IGS-Referenzstationen ausgewählt, bei denen ein Antennenwechsel durchgeführt wurde (siehe Tabelle 7). Der Antennentyp AOAD/M\_T wurde auf beide Referenzstationen ALIC und TOW2 im Jahr 2011 durch den Antennentyp LEIAR25.R3 ersetzt. Bei der IGS-Referenzstation WARN wurde am 15.09.2010 ebenfalls ein Antennenwechsel vom Typ TPSCR3\_GGD zum Antennentyp LEIAR25.R3 vollzogen.

Station	Land	Untersuchungszeit- raum	Antennenwechsel	Datum des An- tennenwechsel
alic	Australien	Jahr 2011	AOAD/M_T NONE → LEIAR25.R3 NONE	DOY 201, 2011
tow2	Australien	DOY 100, 2011 bis DOY 365, 2011	AOAD/M_T AUST → LEIAR25.R3 NONE	DOY 266, 2011
warn	Deutsch- land	DOY 182, 2010 bis DOY 335, 2010	TPSCR3_GGD CONE → LEIAR25.R3 LEIT	DOY 258, 2010

Tabelle 7: Datum und Typ des Antennenwechsels

Zur Untersuchung der Auswirkung des Antennenwechsels wurden die Daten vor und nach dem jeweiligen Antennenwechsel mittels Einfrequenz-PPP-Tageslösung ausgewertet. Die Höhenkomponente der Koordinatenlösung wurde mit der Höhe der Soll-Lösung verglichen. Diese Abweichungen lassen sich für den jeweiligen Untersuchungszeitraum berechnen. Abbildung 5 zeigt die berechneten Abweichungen in der Höhenkomponente für die drei Referenzstationen. Bei allen drei Stationen treten große

Sprünge in der Höhe am Tag des Antennenwechsels auf. Trotz des gleichen Empfängers, derselben Umgebungsbedingungen und desselben Auswerteverfahrens beträgt der Sprung auf Grund des Antennenwechsels bei der Station ALIC ca. 20 cm.

Es ist festzustellen, dass für diesen Auswerteansatz eine systematische Abweichung besonders in der Höhe vorliegt, die deutlich vom Antennentyp abhängig ist. Mögliche Ursachen können die Code-Mehrwegeinflüsse und die GDV sein, die unterschiedliche Wirkungen auf die verwendeten Antennentypen haben. Da Codebeobachtungen im Rahmen der Einfrequenz-PPP-Lösung als primäre Messgröße verwendet werden, hat die Qualität dieser Beobachtungen eine besondere Bedeutung für die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Die Beeinträchtigung dieser Qualität durch die GDV kann zu Abweichungen in der Höhenkomponente führen. Folglich ist eine Modellierung der GDV zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit notwendig.

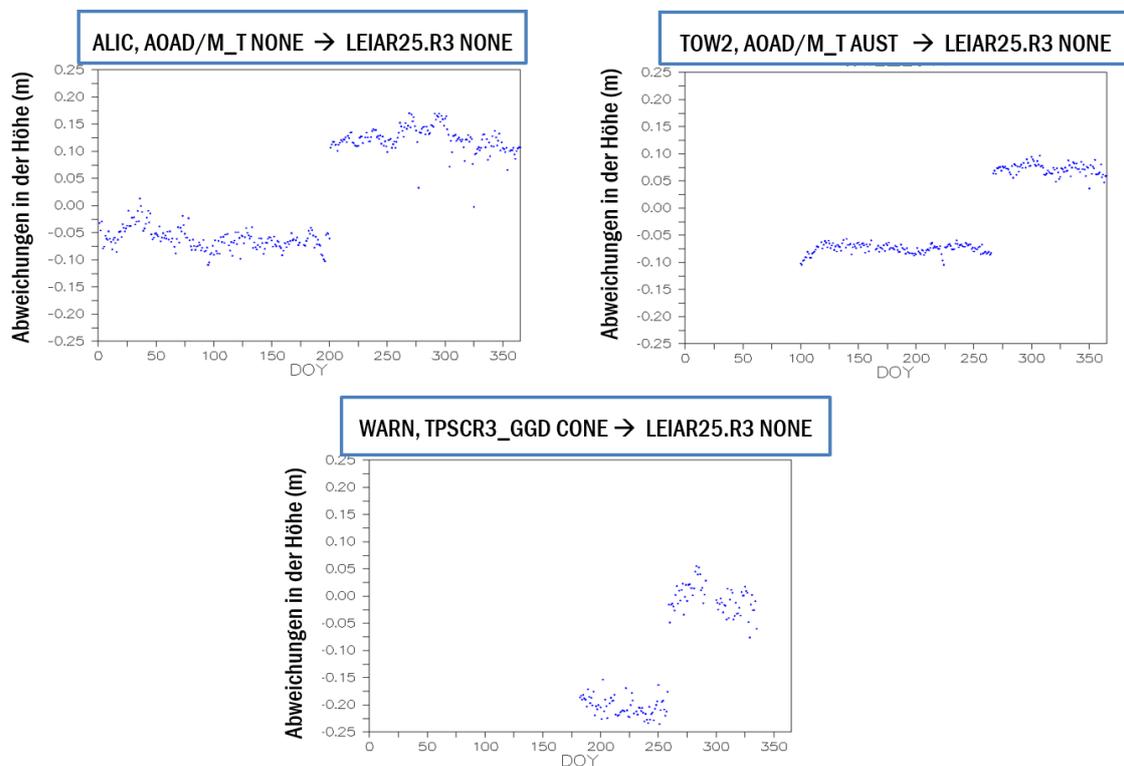


Abbildung 5: Abweichungen der Höhenkomponente vor und nach dem Antennenwechsel von drei IGS-Referenzstationen (vgl. Tab. 7)

## 4.2 Einführung

Codebeobachtungen sind nicht nur durch frequenz- und satellitenabhängige differenzielle Code-Abweichungen (*Differential Code Biases*, DCB) verfälscht, sondern auch von frequenz- und elevationsabhängigen GDV betroffen. Die GDV sind im Falle des außergewöhnlichen GPS-Satelliten SVN49 sehr genau bekannt (Stansell und Lack, 2009). Dieser Satellit ist der einzige GPS Block IIR-M Satellit mit einer zusätzlichen Signalerzeugungseinheit auf L5. Die Code-Differenzen zwischen Horizont und Zenit erreichen etwa 4 m für die ionosphären-freie Linearkombination der Codebeobachtungen. Dieser Effekt wird durch die Reflexion des L1- und L2-Signals an dem speziellen, zusätzlichen für L5 verwendeten Anschluss hervorgerufen. Dies führt zu einer Verzögerung von etwa 30 Nanosekunden des reflektierten Signalwegs. Hierbei werden die Verzögerungen wie Mehrwegeeffekte angesehen (Springer et al., 2009). Andere Block IIR und IIR-M GPS-Satelliten besitzen elektronische Ausrüstungen, die mit denen von Satellit SVN49 vergleichbar sind. Folglich können dort ähnliche Differenzen der Codebeobachtungen entstehen. Speziell die Satelliten SVN55 und SVN43 wurden daraufhin untersucht (Springer et al., 2009). Ihre GDV sind eine Größenordnung kleiner als bei Satellit SVN49. Haines et al. (2010) hat sich ebenfalls mit GDV bei GPS-Satelliten beschäftigt. Auf der Basis von Daten mehrerer Jahre der GRACE und TOPEX/Poseidon (T/P)-Missionen wurden GPS-GDV geschätzt (Haines et al., 2010, Haines et al., 2012 und Haines et al., 2015). Es wurde festgestellt, dass die GPS-Satelliten von Typ Block IIR größere GDV als die Block IIA- oder IIF-Satelliten aufweisen. Außerdem liegen für GPS-Satelliten von Typ Block IIA ähnliche GDV vor. Die Korrekturwerte von Haines et al. (2015) können jedoch nur für die ionosphären-freie Linearkombination der Code-Beobachtungen verwendet werden und sind nicht für die Korrektur der Codebeobachtungen auf L1 und L2 geeignet.

Nicht nur die Sendeantennen, sondern auch die Empfangsantennen weisen GDV auf. Murphy et al., (2007) wiesen GDV von mehr als einem Meter für zwei Antennentypen auf dem C/A-Code nach. Wübbena et al. (2008) haben elevationsabhängige GDV von sechs verschiedenen Empfangsantennen durch eine absolute Feldkalibrierung mit einem Roboter modelliert. Diese Technik wurde ursprünglich für die Kalibrierung der Phasenzentrumvariationen (PZV) entwickelt. Die kalibrierten Antennen besitzen unterschiedliche Eigenschaften zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten. Entweder sind sie vom Typ Dorne Margolin oder sie besitzen ein spezielles Design gegen Mehrwegeeffekte wie z. B. die Antenne der Firma Trimble mit der Bezeichnung: TRM55971.00. Die Größe der Variationen für die ionosphären-freie Code-Linearkombination betrug einen Meter für Satellitenelevationen unter 30°. Die Abweichungen der GDV zwischen den sechs unterschiedlichen Empfangsantennen waren gering und erreichten nur 0,2 m (Wübbena et al., 2008). Das Institut für Erdmessung der Universität Hannover hat das Verfahren zur absoluten Feldkalibrierung von elevations- und azimutabhängigen Phasenzentrumvariationen weiterentwickelt. Mit Hilfe dieses Verfahrens konnte Kersten et al. (2012) die GDV für einige

Antennen schätzen und modellieren. Es wurden dabei nicht nur elevations- sondern auch azimutabhängige und antennenspezifische GDV in Größenordnungen von bis zu einigen dm gefunden. Dieses Verfahren hat eine Genauigkeit von 0,15 ns (Kersten et al., 2012).

Das Ziel dieses Kapitels ist die Modellierung von GDV von C/A- und P2-Code-Beobachtungen auf beiden Frequenzen L1 und L2, zum einen für GPS- und GLONASS-Satellitenantennen und zum anderen für Empfangsantennen. Dies wurde durch eine Kalibrierung der Codebeobachtungen in Bezug auf Zweifrequenzphasenbeobachtungen erreicht.

## 4.3 Methodik

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen zur Bestimmung der GDV mittels der Analyse der MP-Linearkombination.

### 4.3.1 Analyse der Code-Beobachtungen anhand der MP-Linearkombination

Durch die MP-Linearkombination können bestimmte Eigenschaften von GNSS-Codebeobachtungen analysiert werden. Die MP-Linearkombination ist eine spezielle Linearkombination zwischen Einfrequenzcode- und Zweifrequenzphasenbeobachtungen. Sie wurde zuerst von Rocken et al. (1995) erwähnt. Der Begriff MP-Linearkombination wurde häufig zum Aufzeigen der Wirkung von Hochfrequenz-Mehrwegeeffekten auf Codebeobachtungen verwendet. Der Hauptvorteil der MP-Linearkombination liegt darin, dass nur die Beobachtungen von einer GNSS-Empfangsantenne benötigt werden. Außerdem können die Codebeobachtungen auf mehreren Frequenzen separat betrachtet werden.

Die MP-Linearkombination wird abgeleitet aus der Code-Messung  $C$  [m] auf der Frequenz  $i$  und der Linearkombination der Phasenmessungen  $\Phi$  [m] auf zwei Frequenzen  $i$  und  $j$  (Wanninger et al., 2017).

$$MP_i = C_i + (m_{ij} - 1) * \Phi_i - m_{ij} * \Phi_j - B, \quad (76)$$

wobei der Linearfaktor  $m_{ij}$  aus den Wellenlängen  $\lambda$ [m] der zwei Frequenzen  $i$  und  $j$  berechnet wird

$$m_{ij} = \frac{2\lambda_i^2}{\lambda_i^2 - \lambda_j^2} \quad (77)$$

Dieser Faktor  $m_{ij}$  hat besondere Eigenschaften: es werden nicht nur die ionosphärischen und troposphärischen Verzögerungen, sondern auch alle geometrische Beträge (wie z. B. Orbit, Uhren und Antennenabweichungen) aufgehoben. Aufgrund der Verwendung der Phasenmessungen enthält die MP-Linearkombination die Phasen-Mehrdeutigkeiten von beiden Frequenzen. Die Mehrdeutigkeit ändert sich mit

dem Auftreten eines *cycle slips* und beim Wiederaufgehen eines Satelliten und kann durch Hard- und Software verursachte Verzögerungsdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Beobachtungen nicht voneinander getrennt werden. Die Abweichungen bezüglich der Mehrdeutigkeiten werden in Gl. 76 zu B zusammengefasst. B kann für jeden kontinuierlichen Mehrdeutigkeitsblock als konstant angesehen werden. Infolgedessen werden keine absoluten MP-Werte bestimmt, sondern nur die MP-Variationen innerhalb solcher Blöcke. Bei der Verarbeitung mehrerer MP-Sequenzen in einer kombinierten Analyse sind die verschiedenen Abweichungen von B zu berücksichtigen. Außerdem muss zur Trennung des absoluten Niveaus der MP-Werte dieser Abweichungen eine Bedingung eingeführt werden. Üblicherweise wird die Bedingung der Null-Mittelwerte über alle MP-Werte verwendet (Abbildung 6). Im Folgenden wird der MP-Wert bei Satellitenantennen mit  $0^\circ$  Nadir-Winkel bzw. bei Empfangsantennen mit  $90^\circ$  Elevationswinkel auf null festgesetzt.

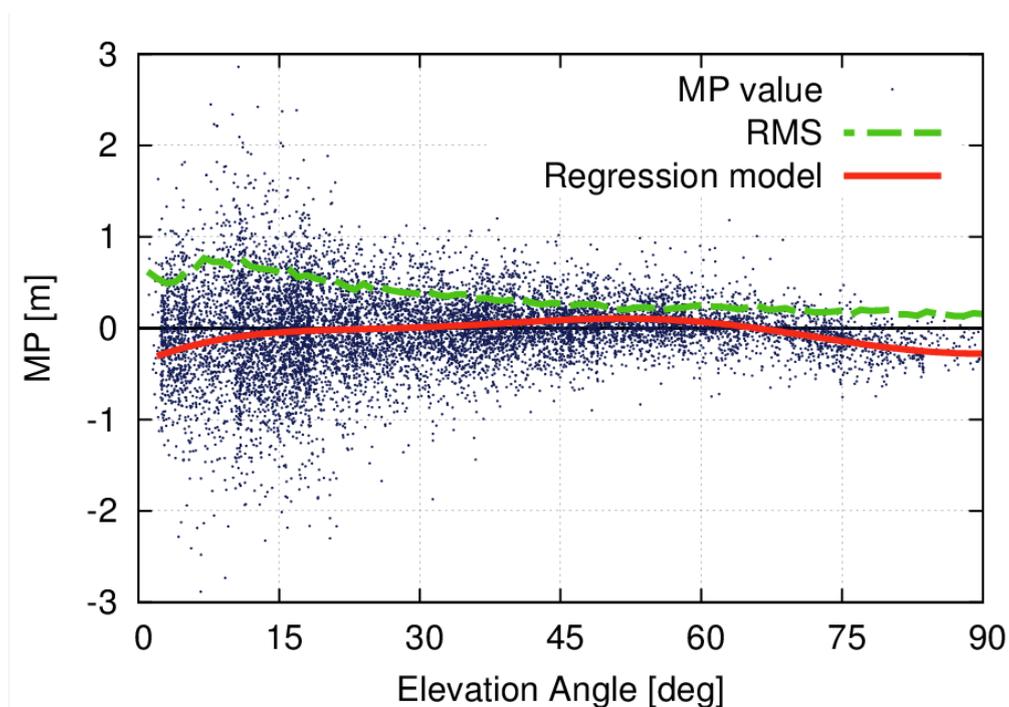


Abbildung 6: Beispiel der MP-Werte als Funktion des Elevationswinkels (blaue Punkte), elevationsabhängige RMS-Werte (grüne gestrichelte Linie) und Regressionsmodell (rote geschlossene Linie) (Wanninger et al., 2015)

In der Hauptsache zeigen die MP-Linearcombinationen die Hochfrequenz-Mehrwegeeffekte und das Messrauschen der Code-Beobachtungen. Letztere werden durch einzelne RMS-Werte für jede individuelle Code-Beobachtung von einem Empfänger quantifiziert. Wird die Elevationsabhängigkeit berücksichtigt, lassen sich RMS-Werte für jeden Elevationschritt von z. B.  $1^\circ$  bestimmen (siehe Abbildung 6). Im Gegensatz zu den Hochfrequenz-Variationen handelt es sich in dieser Modellierung um die Nieder-Frequenz-Variationen. Diese enthalten Informationen zu GDV, aber in Verbindung mit Code-Mehrwegeeffekten, und werden als Funktion des Nadir-Winkels bei den Satellitenantennen oder des Elevationswinkels bei den Empfangsantennen modelliert.

Da der *Phase-wind-up*-Effekt einen systematischen Einfluss auf die Werte der MP-Linearkombination von einigen Zentimetern hat, ist eine Modifikation des Algorithmus zum Korrigieren dieses Effekts notwendig (Wu et al., 1993). Im Gegensatz zur Standard-MP-Berechnung werden die Phasenbeobachtungen um den *Phase-wind-up*-Effekt korrigiert. Andere Abweichungen zwischen Code- und Phasenbeobachtungen, wie die ionosphärischen Effekte höherer Ordnung, die in Gl. 60 ignoriert werden, sind nicht mehr zu berücksichtigen, weil sie einen kleinen Einfluss (nicht mehr als 1 cm) haben (Bassiri und Hajj, 1993).

Um die Nieder-Frequenz-Variationen der MP-Werte in einem mathematischen Modell darzustellen, lassen sich die Koeffizienten einer Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen mit maximalem Grad  $n \leq n_{max}$  und maximaler Ordnung  $m_{max} \leq n$  schätzen. Damit lässt sich die Abhängigkeit von der Elevation  $e$  und dem Azimut  $\alpha$  beschreiben (Wanninger et al., 2017).

$$MP(e, \alpha) = \sum_{n=1}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(e)) * (a_{nm} \cos(m\alpha) + b_{nm} \sin(m\alpha)), \quad (78)$$

wobei

$P_{nm}$  eine vollständig normierte zugeordnete Legendre-Funktion ist und

$a_{nm}$  und  $b_{nm}$  die zu schätzenden Parameter bilden.

Obwohl azimutabhängige GDV sowohl für die Satellitenantennen (Haines et al., 2015) als auch für die Empfangsantennen (Kersten et al., 2012) bestätigt wurden, werden im Rahmen dieser Modellierung für die Code-Beobachtungen von den hochwertigen Antennen nur elevationsabhängige GDV behandelt, da die azimutabhängigen GDV nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Höhenkomponente der Einfrequenz-PPP-Lösung haben. Um keine azimutabhängigen GDV zu bestimmen, wird  $m_{max} = 0$  gesetzt. Außerdem wird der höchste Grad  $n_{max}$  auf 5 festgestellt, was den 5 zu schätzenden Koeffizienten entspricht.

### 4.3.2 Trennung der Satellitenantennen-GDV von Empfangsantennen-GDV

Die Nadir-abhängigen GDV der Satellitenantennen und die elevationsabhängigen GDV der Empfangsantennen werden zu einem kombinierten Effekt zusammengefasst. Der Nadir-Winkel des Satelliten ( $Z'$ ) steht mit dem Elevationswinkel der Empfangsantenne ( $Z$ ) auf der Erdoberfläche in Zusammenhang (siehe Abbildung 7) durch (Schmid & Rothacher, 2003)

$$\sin(Z') = \frac{R}{r} * \sin(Z) \quad (79)$$

$R$  ist der Erdradius und  $r$  ist der geometrische Abstand des Satelliten vom Massenzentrum der Erde, der mit der kreisförmigen Halbachse der Satellitenumlaufbahnen übereinstimmt. Obwohl die Halbachse einer Satellitenbahn sich zwischen den einzelnen GNSS erheblich unterscheidet, haben alle Satelliten in einem GNSS-System fast den gleichen Wert der Halbachse. Diese führt zu einem nahezu gleichen Faktor ( $R/r$ ) für alle Satelliten in einem GNSS-System. Es wird ein Wert für GPS-Satelliten sowie ein Wert für GLONASS-Satelliten angenommen.

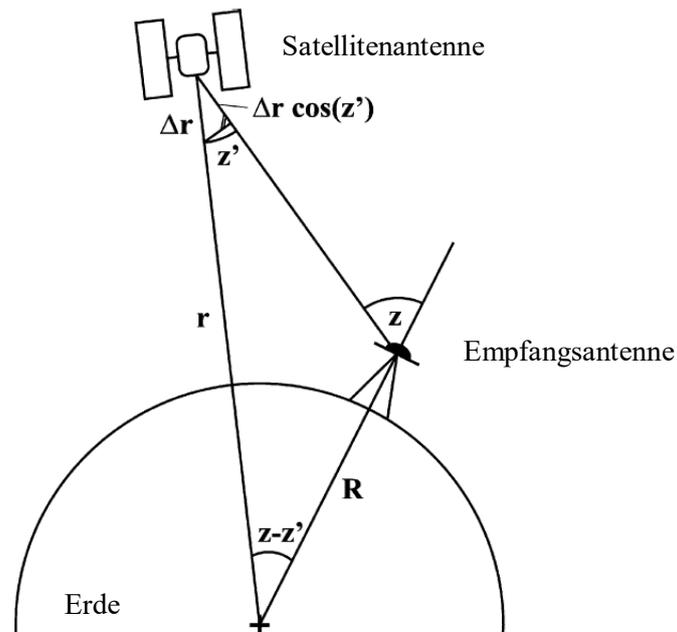
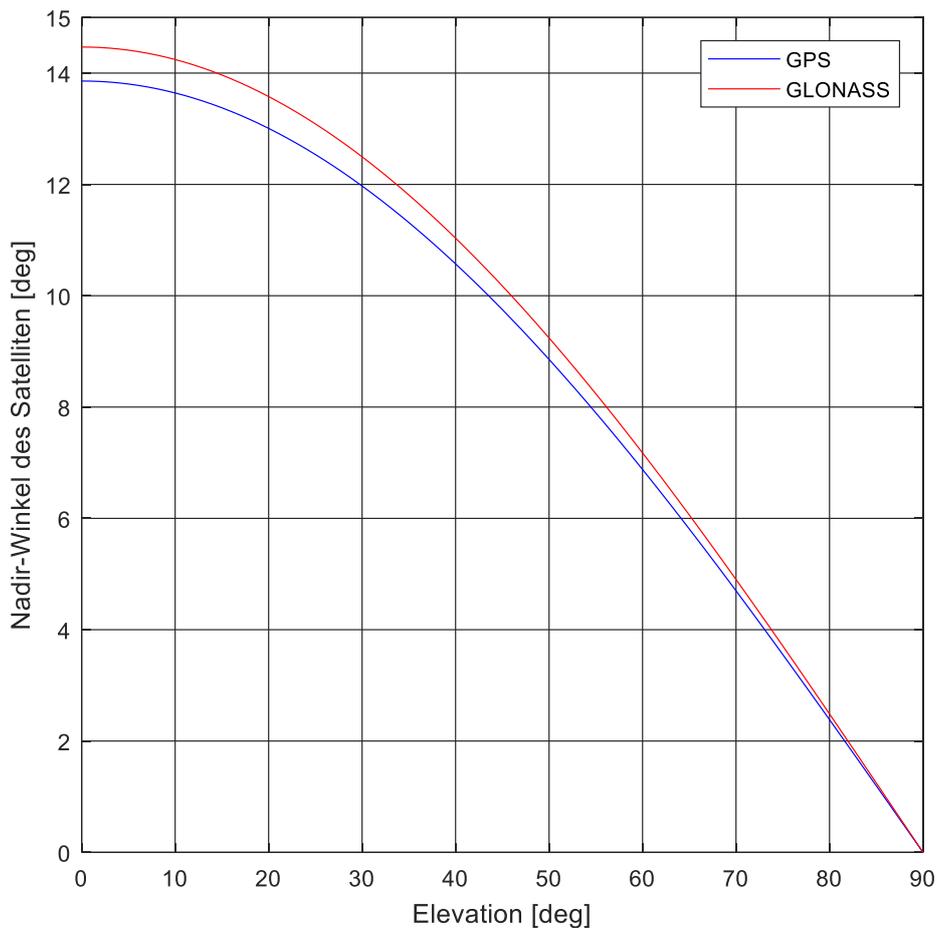


Abbildung 7: Beziehung zwischen dem Nadir-Winkel eines Satelliten und dem Elevationswinkel der Empfangsantenne (Schmid & Rothacher, 2003)

Der Elevationsbereich von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  auf einer Referenzstation auf der Erdoberfläche entspricht dem Nadir-Winkel-Bereich von  $0^\circ$  bis  $14^\circ$  an der Satellitenantenne (Abbildung 8). Es besteht für höhere Elevationswinkel nahezu ein linearer Zusammenhang mit den entsprechenden Nadir-Winkeln. Hingegen werden die untersten 30% des Elevationsbereichs in die obersten 15% des Nadir-Winkel-Bereichs abgebildet (siehe Abbildung 8).



**Abbildung 8: Beziehung zwischen dem Nadir-Winkel der GPS- bzw. GLONASS-Satellitenantennen und dem Elevationswinkel auf einer Station auf der Erdoberfläche**

Die GDV der Satelliten- und der Empfangsantennen sind auf Grund der Beziehung in Gl. 79 nicht voneinander trennbar. Aus GNSS-Beobachtungen können nur kombinierte Effekte berechnet werden. Um die Trennung zwischen beiden Antennen zu erreichen, werden vier Dorne-Margolin-Empfangsantennen zur Definition eines Referenzniveaus für die Kalibrierung verwendet. Bezüglich der Kalibrierung wird angenommen, dass die vier Antennen die gleichen Werte in Bezug der GDV liefern. Dann wird diese Annahme ausführlich untersucht. Zum Schluss werden nur die Referenzantennen ausgewählt, die die Annahme wirklich erfüllen. Dementsprechend sind alle GDV, für die Satelliten- sowie Empfangsantennen berechnet werden, lediglich relative Korrekturen in Bezug auf die ausgewählten Dorne-Margolin-Antennen.

### 4.3.3 Satelliten- und Empfangsantennenphasenkorrekturen

Die Kalibrierung der GDV auf einer Frequenz erfolgt mit Hilfe der MP-Linearkombination in Bezug auf die Phasenbeobachtungen auf zwei Frequenzen. Hierbei müssen sich alle diese drei Beobachtungen auf einen gemeinsamen Referenzpunkt an den Satelliten- sowie den Empfangsantennen beziehen. Liegen die Kalibrierwerte der GDV in einem Genauigkeitsniveau von einigen Zentimetern, sollten die Auswirkungen der nicht korrigierten Antennenreferenzpunkte auf die Codebeobachtungen kleiner als dieses Niveau sein. Für die Empfangsantennen wird ein gemeinsamer Referenzpunkt der Zweifrequenzphasenbeobachtungen durch das Anbringen der absoluten Antennenkorrekturen (Phasenzentrumoffsets und ihre Variationen) an die Beobachtungen erreicht. Das IGS hat diese Korrekturen für mehr als 200 Antennentypen für GPS- und GLONASS-Signale auf L1 und L2 veröffentlicht (Dow et al., 2009, Schmid et al., 2015). Diese Werte wurden durch Feldkalibrierung bestimmt und haben eine Genauigkeit von besser als einem Zentimeter (Wübbena et al., 1997, Wübbena et al., 2006).

Für die Satellitenantennen werden die Antennenkorrekturen anders bestimmt. Anhand der Analyse der IGS-Referenzstationsbeobachtungen schätzt der IGS nur den satellitenspezifischen Offset für Z-Komponente und blockspezifische nadir-abhängige Variationen. Diese Korrekturen beziehen sich auf die ionosphären-freie Linearkombination (Schmid et al., 2007, Schmid et al., 2015). Sie bilden mit den von den Herstellern angegebenen Werten für die X- und Y- Komponenten die Phasenzentrumoffsets und ihre Variationen. Diese sind für jeden individuellen GPS- und GLONASS- Satelliten in der ANTEX-Datei dokumentiert (Schmid, 2010). Das ANTEX-Format ist eigentlich zur Speicherung der Korrekturen für die originalen Frequenzen L1 und L2 entworfen worden und nicht für die ionosphären-freie Linearkombination L0. Um diese Einschränkung der ANTEX-Formatbeschreibung zu überwinden, enthalten alle ANTEX-Daten identische Satellitenantennenkorrekturen für L1- und L2-Signale. Damit ist man in der Lage, wieder die Korrekturwerte für die ionosphären-freie Linearkombination von identischen L1 und L2 zu erhalten. Da die GDV der Satelliten im Rahmen dieser Arbeit nicht für die ionosphären-freie Linearkombination, sondern für die originalen Frequenzen modelliert werden, sind die vom IGS veröffentlichten Werte nicht nutzbar.

Wird das Phasen-Offset der Satellitenantenne in Z-Richtung nicht um  $\Delta z$  (m) korrigiert, führt das zu einer Auswirkung von  $\Delta v$  (m) auf die nadir-abhängige GDV.  $\Delta v$  kann durch die Differenz zwischen den Effekten beim minimalen Nadir-Winkel ( $\mu_{min} = 0^\circ$ ) und beim maximalen Winkel ( $\mu_{max} \approx 14^\circ$ ) durch:

$$\Delta v = (\cos \mu_{min} - \cos \mu_{max}) * \Delta z = 0,03\Delta z \quad (80)$$

beschrieben werden.

Zur Bestimmung der GDV mit einem Genauigkeitsniveau von einigen Zentimetern darf der Fehler des Offsets in Z-Richtung 0,5 m nicht überschreiten. Die Offset-Werte in Z-Richtung des IGS betragen für

GPS-Satelliten des Blocks IIA oder GLONASS-M jedoch ungefähr 2,5 m. Diese Abweichungen sind ganz beträchtlich, vor dem Hintergrund, dass der geometrische Abstand zwischen dem Satellitenmassenzentrum und der Satellitenantenne nur etwa 1 m beträgt. Infolgedessen ist die Differenz der Offset-Werte in Z-Richtung zwischen der ionosphären-freien Linearkombination und den originalen Frequenzen mit höchster Wahrscheinlichkeit größer als 0,5 m. Aus diesem Grund werden die Offset-Werte in Z-Richtung zum Korrigieren der Phasenzentrumoffsets und ihrer Variationen auf L1 und L2 nicht verwendet.

Um verbesserte Werte für L1 und L2 zu erhalten wurde ein frequenzspezifischer Offset in Z-Richtung anhand der IGS-Offsets geschätzt. In diesem Zusammenhang werden aber die IGS-Werte für X- und Y-Komponenten und die nadir-abhängigen Phasenzentrumvariationen nicht geändert.

Anhand von Informationen der Systembetreiber über die Satellitendimensionen wird eine geometrische Distanz zwischen dem Satellitenmassenzentrum (*center of mass*, COM) und der Basis der Antennenelemente angenommen.  $Z_{12}$  bildet die erste grobe Schätzung für die L1- und L2-Phasenzentrumoffsets in Z-Richtung und liegt genau in der Mitte zwischen dem tatsächlichen Offset von L1 und L2. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 9.

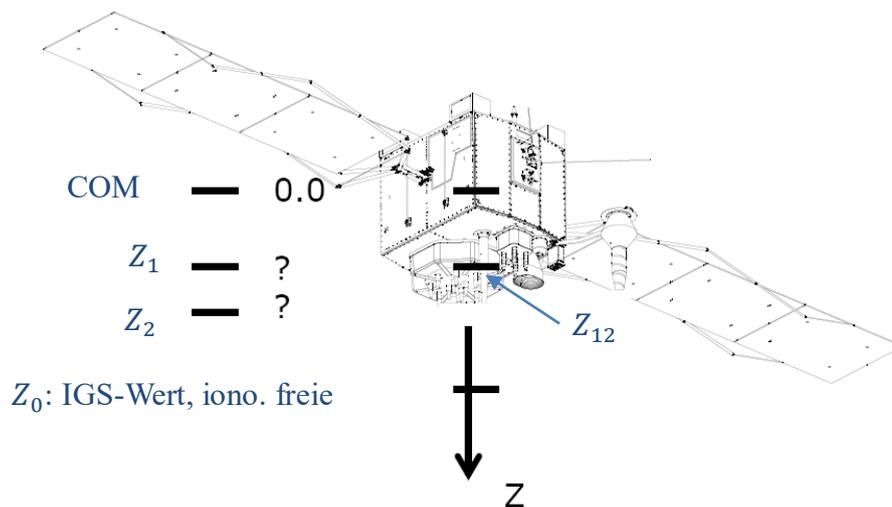


Abbildung 9: Darstellung des IGS-Offsets im Vergleich zu den Offsets für L1 und L2, alle in Z-Richtung (Wanninger et al., 2015)

Der Zusammenhang der Offsets lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$Z_{12} = (Z_1 + Z_2)/2 \quad (81)$$

$$Z_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} * Z_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} * Z_2, \quad (82)$$

Wobei  $f_1$  und  $f_2$  für die entsprechende Frequenz steht, für GPS (L1=1575,42, L2=1227,60 MHz) und für GLONASS (L1=1602, L2=1246 MHz).

Gleichungen 81 und 82 können verwendet werden um folgenden Zusammenhang herzustellen:

$$Z_1 = Z_{12} - d \quad (83)$$

$$Z_2 = Z_{12} + d \quad (84)$$

$$d = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} * (Z_{12} - Z_0) \quad (85)$$

Trotz des Mangels an Informationen und Bildern über die Gestalt und die physikalischen Dimensionen der GPS- wie auch der GLONASS-Satelliten werden zur Annahme eines zuverlässigen und recht genauen Wertes (mit einer Unsicherheit von einigen Dezimetern) für die geometrische Distanz  $Z_{12}$  Informationen von verschiedenen Quellen verwendet, z. B. *Los Angeles Air Force Base on IIR and IIF satellites* (LAAFB, 2012b; LAAFB, 2012a), von der Bodenkalibrierung der Satellitenantennen des Block IIA (Mader und Czopek, 2002), (Bar-Sever et al., 2009), von *Information and analysis center for Positioning, Navigation and Timing* (IAC, 2019) und von (Montenbruck et al., 2015). Hierbei wurde die Abmessung des Satelliten, insbesondere die Höhe, betrachtet. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten GNSS-Satelliten unterscheiden sich in der Höhe des Satelliten ganz gering (zwischen 2,2 m für IIR Block bis 2,7 m für GLONASS M (LAAFB, 2012b, LAAFB, 2012a und IAC, 2019)). Entsprechend dieser Satellitenhöhe werden für alle Satelliten eines GPS-Blocks bzw. einer GLONASS-Satelliten-Generation identische  $Z_{12}$ -Werte angenommen. Für GPS-Satelliten des Block IIR beträgt der Wert 1,5 m und für Block IIF 1,6 m (siehe Tabelle 8). Der  $Z_{12}$ -Wert ist bei den GLONASS-M Satelliten 1,6 m und bei den GLONASS-K1 Satelliten 1,5 m (siehe Tabelle 8). Auf der Basis der vom IGS veröf-

fentlichen Werte für den Z-Offset und unter Verwendung der Gl. 83, 84 und 85 können die frequenzspezifischen  $Z_1$ - und  $Z_2$ -Offsets berechnet werden. Diese Werte sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen der berechneten  $Z_1$ - und  $Z_2$ -Werte von den  $Z_0$ -Werten des IGS im Falle der GLONASS-M-Satelliten und auch der GPS-Satelliten des Block IIR-M ungefähr 1 m sind. Zur Untersuchung der Auswirkung der Phasenkalibrierung auf die Bestimmung der GDV in Bezug auf die Zweifrequenzphasenmessung werden zum einen die  $Z_0$ -IGS-Werte zum Korrigieren des Phasenzentrumoffsets und zum anderen die berechneten  $Z_1$  und  $Z_2$  -Werte verwendet. Bei Verwendung der  $Z_0$ -IGS Werte sind die Ergebnisse deutlich schlechter, besonders für die GPS-Satelliten des Block IIR-M und für die GLONASS-M-Satelliten. Bei Berücksichtigung der  $Z_1$  und  $Z_2$  frequenzspezifischen Werte zeigen die Ergebnisse für alle Satellitentypen ein ähnliches Genauigkeitsniveau.

GPS Satelliten-Block	Individuelle IGS Satellitenkorrekturen $Z_0$ (Datei: igs08.atx) [m]	Angenommene geometrische Distanz COM-Antennenphasenzentrum $Z_{12}$ [m]	Berechnete Z-Offset-Werte $Z_1$ für L1 und $Z_2$ für L2 [m]	
			IIR-A	1,0428 ... 1,5064
IIR-B	0,7786 ... 0,9058	1,5	1,3237 ... 1,3458	1,6452 ... 1,6763
IIR-M	0,6811 ... 0,9711	1,5	1,2998 ... 1,3708	1,6292 ... 1,7002
IIF	1,5613 ... 1,6000	1,6	1,5905 ... 1,6000	1,6000 ... 1,6095

Tabelle 8: Z-Offset-Werte von GPS-Satellitenantennen

GLONASS Satellitengeneration	Individuelle IGS Satellitenkorrekturen $Z_0$ (Datei: igs08.atx) [m]	Angenommene geometrische Distanz COM-Antennenphasenzentrum $Z_{12}$ [m]	Berechnete z-Offset-Werte $Z_1$ für L1 und $Z_2$ für L2 [m]	
			GLONASS-M	2,1794 ... 2,7436
GLONASS-K1	2,050 ... 2,0668	1,5	1,6354 ... 1,6395	1,3605 ... 1,3646

Tabelle 9: Z-Offset-Werte von GLONASS-Satellitenantennen

## 4.4 Bestimmung der GDV

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Bestimmung der GDV als nadir-abhängige Werte für die GPS- und GLONASS-Satellitenantennen und elevationsabhängige Werte für die Empfangsantennen gezeigt.

### 4.4.1 GDV der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen

Zur Schätzung der GDV individuell für jede Satellitenantenne über den gesamten Nadir-Winkelumfang von  $0^\circ$  bis  $14^\circ$  benötigt man ein globales Netz von Referenzstationen. Primäre Untersuchungen dazu ergaben, dass die GDV zeitlich stabil sind. Diese Zeitstabilität wird im Kapitel 4.5 ausführlich behandelt. Da ein GNSS-Satellit seine Bodenspur nach einer gewissen Zeit wiederholt, bietet eine Verlängerung des Beobachtungszeitraumes auf einige Wochen bzw. Monate keinen Mehrwert an Informationen. Deshalb werden zur Bestimmung der GDV nur die Beobachtungsdaten der Woche 20.-26.06.16 ausgewertet. Zur Gewährleistung einer stabilen Lösung für alle GNSS-Satelliten werden vier voneinander unabhängige Teilnetze gebildet. Jedes Teilnetz besteht aus 11-12 weltweit verteilten Referenzstationen, die mit identischen Empfangsantennen ausgestattet sind. Die folgenden vier Antennentypen AOAD/M\_T, ASH701945?\_M, LEIAT504GG und TRM59800.00 sind zwar von unterschiedlichen Firmen hergestellt. Es sind aber alles Dorne-Margolin-Modelle. Abbildung 10 zeigt die ausgewählten Referenzstationen bezüglich der ausgewählten Antennentypen. Außerdem werden nur Referenzstationen verwendet, deren MP-RMS-Werte kleiner als 0,5 m im Elevationsbereich zwischen  $10^\circ$  und  $90^\circ$  sind. Infolgedessen wird erwartet, dass diese Antennentypen ähnliche GDV aufweisen. Neben der weltweiten Verteilung und den kleinen MP-RMS-Werten sind von jeder ausgewählten Referenzstation mindestens 6 Tage Beobachtungsdaten verfügbar. Zusätzlich müssen alle Referenzstationen GPS- und GLONASS-Signale empfangen. Um eine ausreichende Anzahl von weltweit gut verteilten Referenzstationen zu finden, konnten folgende Punkte nicht berücksichtigt werden:

- Antennendom: verschiedene Typen von Domen oder keine,
- Empfänger: verschiedene Hersteller oder unterschiedlichen Typen vom selben Hersteller,
- Ungleichheit von sechs sehr ähnlichen Ashtech-Antennentypen, ASH701945?\_M, wobei das Fragezeichen mit A, B, C, D, E oder G ersetzt werden muss,
- Netze: verschiedene gemischte Netze, IGS, NGS (*National Geodetic Survey*), *Geoscience Australia*, und EPN (*EUREF Permanent Network*)

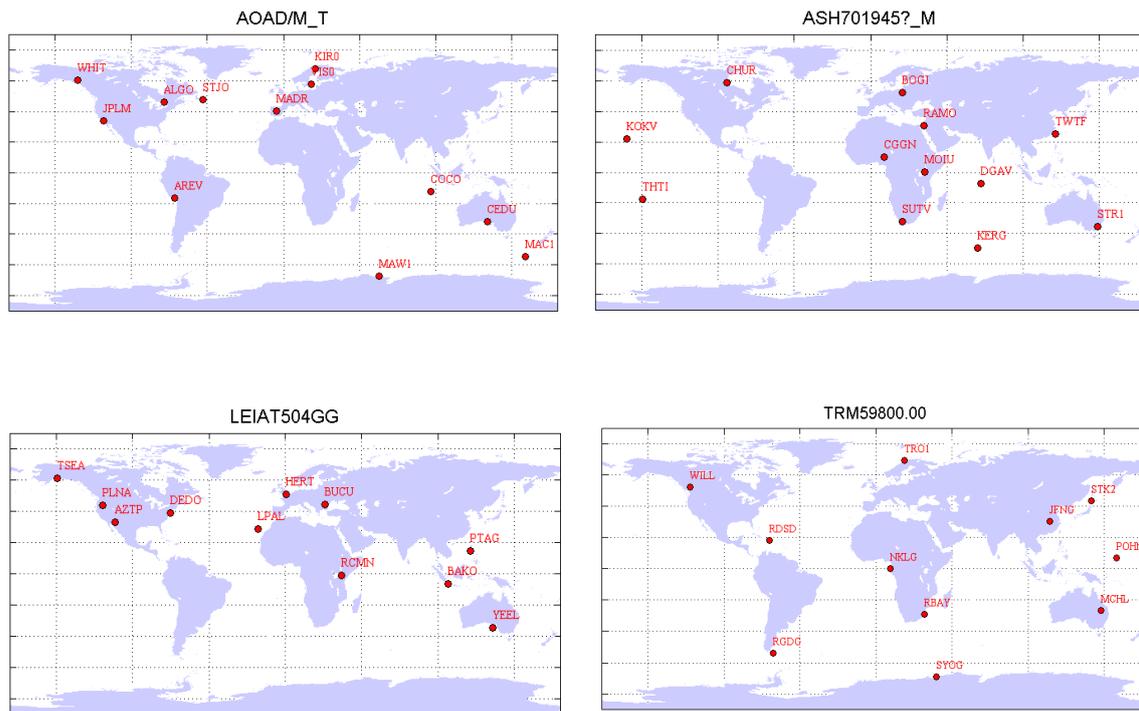


Abbildung 10: Ausgewählte Beobachtungsstationen für die vier ausgewählten Antennentypen

Während die Empfänger aller ausgewählten Referenzstationen C1- und P2-Codebeobachtungen von GPS und GLONASS liefern, bieten nur einige davon darüber hinaus P1-, C2- oder C5-Codebeobachtungen. Deshalb werden im Rahmen dieser Modellierung nur die GDV für C1 und P2 analysiert und bestimmt. Weiterhin wird die ionosphären-freie Linearkombination aus diesen beiden Codebeobachtungen gebildet.

Es wurde angenommen, dass die vier von unterschiedlichen Firmen hergestellten Antennentypen ähnliche Eigenschaften in Bezug auf ihre elevationsabhängigen GDV besitzen. Nur so kann ein „Absolut“-niveau für alle weiteren Ergebnisse identifiziert werden. Der Schwerpunkt in diesem Kontext liegt darin, eine kombinierte Lösung von verschiedenen Antennentypen zu finden, die große Ähnlichkeit hinsichtlich der GDV aufweisen. Zur Beurteilung dieser Ähnlichkeit der vier unabhängigen Teilnetz-Lösungen wird eine Gesamtlösung aus dem gesamten Netz aller 46 Referenzstationen bestimmt. Weiterhin werden die Abweichungen der einzelnen Teilnetz-Lösungen zu dieser Gesamtlösung für jeden GPS- und GLONASS-Satelliten berechnet und miteinander verglichen. Abbildung 11 zeigt die RMS-Werte für das Teilnetz 1, dessen Referenzstationen mit der Empfangsantenne AOAD/M\_T ausgestattet sind. Es sind die Werte für alle 31 GPS- (oben) und 23 GLONASS-Satelliten (unten) hinsichtlich der C1-Code-Beobachtungen (Farbe Magenta) und der P2-Code-Beobachtungen (Farbe Rot) dargestellt.

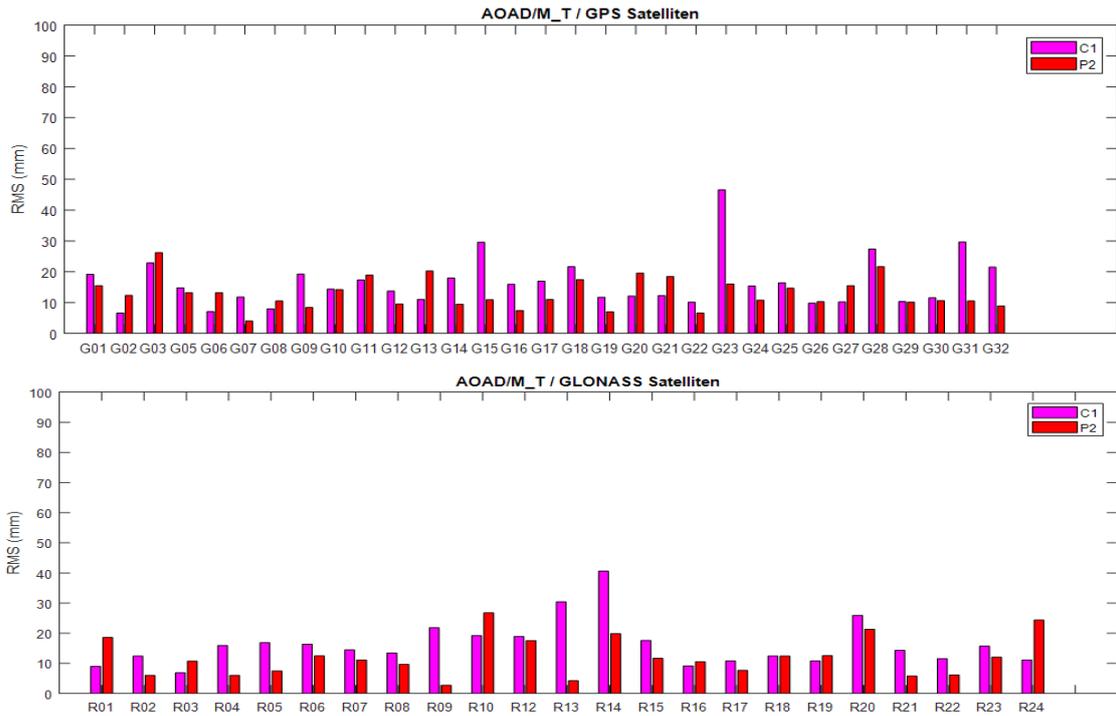


Abbildung 11: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen von Teilnetz 1 zur Gesamtlösung (46 Stationen), oben für GPS-Satelliten, unten für GLONASS-Satelliten

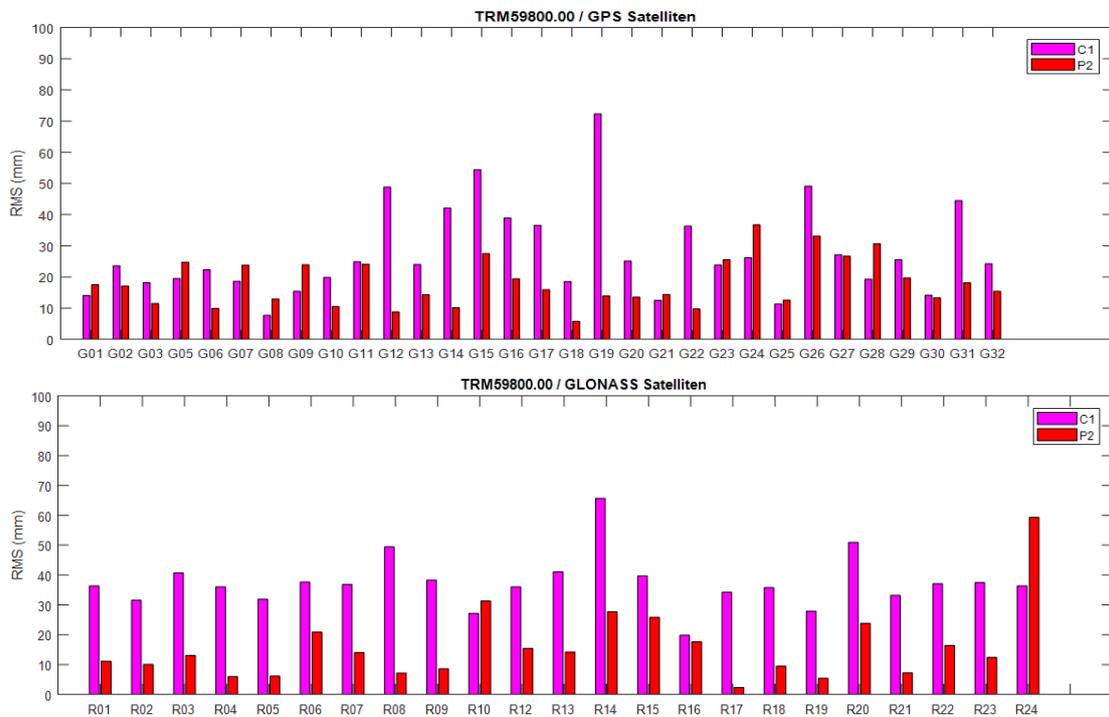


Abbildung 12: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen von Teilnetz 4 zur Gesamtlösung (46 Stationen), oben für GPS-Satelliten, unten für GLONASS-Satelliten

In Abbildung 11 ist deutlich zu erkennen, dass die meisten RMS-Werte unter 2 cm liegen. Ähnliche RMS-Werte wurden für die Teilnetze 2 und 3 erhalten. Im Gegensatz dazu weist das Teilnetz 4 RMS-Werte auf, die größer als 2 cm sind, besonders für C1-Codebeobachtungen (siehe Abbildung 12). Die Referenzstationen des Teilnetzes 4 sind mit der Empfangsantenne TRM59800.00 ausgestattet.

Um eine klare Aussage auf die Frage zu erhalten, ob die vier Teilnetze ähnliche Eigenschaften in Bezug auf die GDV besitzen, ist nur ein RMS-Wert für jede einzelne Lösung hinsichtlich des GNSS (GPS oder GLONASS) heranzuziehen. Beruhend auf den Differenzen zwischen der einzelnen Lösung eines Teilnetzes und der Gesamtlösung (46 Stationen) aller Satelliten in einem GNSS wird ein RMS-Wert ermittelt. Diese RMS-Werte werden in Tabelle 10 für GPS und in Tabelle 11 für GLONASS zusammengefasst. Beide Tabellen zeigen die RMS-Werte für die vier Teilnetze bezüglich C1, P2 und der ionosphären-freien Linearkombination P0.

	<b>Teilnetz 1</b>	<b>Teilnetz 2</b>	<b>Teilnetz 3</b>	<b>Teilnetz 4</b>
<b>Empfangsantennentyp</b>	AOAD/M_T,	ASH701945?_M	LEIAT504GG	TRM59800.00
<b>C1</b>	2,2	2,3	2,1	3,3
<b>P2</b>	1,5	1,5	2,1	2,0
<b>P0</b>	5,4	5,9	5,9	8,0

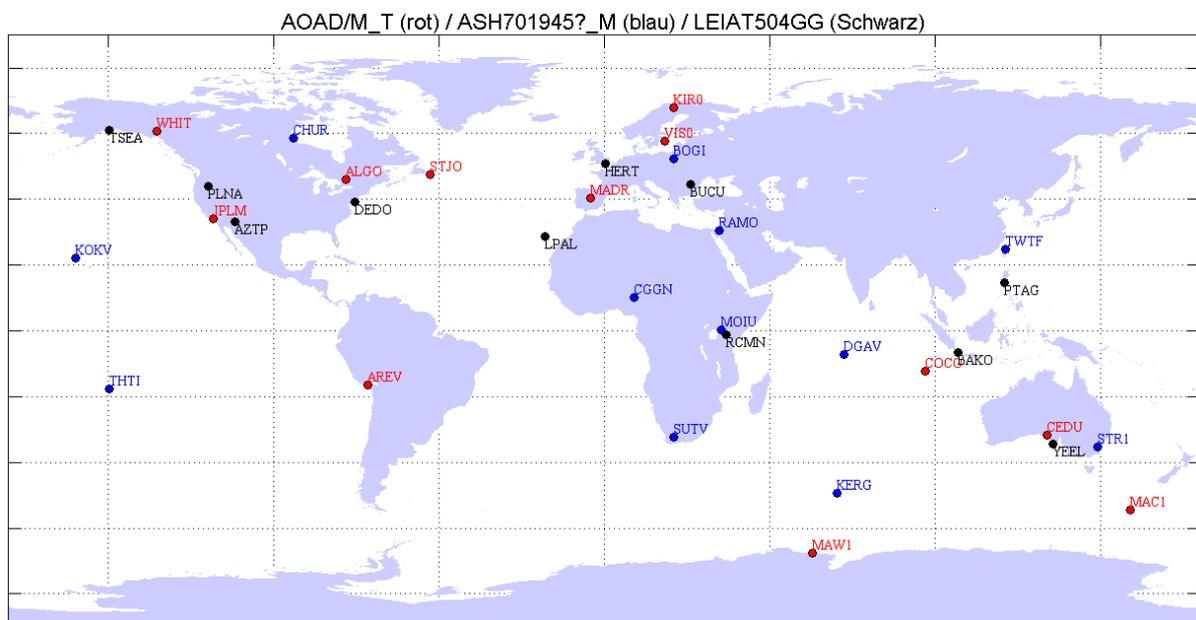
Tabelle 10: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur Gesamtlösung, GPS (alle Werte in cm)

	<b>Teilnetz 1</b>	<b>Teilnetz 2</b>	<b>Teilnetz 3</b>	<b>Teilnetz 4</b>
<b>Empfangsantennentyp</b>	AOAD/M_T,	ASH701945?_M	LEIAT504GG	TRM59800.00
<b>C1</b>	1,8	2,7	1,4	4,1
<b>P2</b>	1,5	1,5	1,7	2,7
<b>P0</b>	3,9	5,9	4,0	9,8

Tabelle 11: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur Gesamtlösung, GLONASS (alle Werte in cm)

Die Abweichungen der ersten drei einzelnen Lösungen zur Gesamtlösung (46 Stationen) liegen sowohl für GPS als auch für GLONASS als RMS im Bereich 1,4-2,7 cm für die C1-Codebeobachtungen und im Bereich 1,5-2,1 cm für P2. Lediglich die Lösung des Teilnetzes 4 (TRM59800.00) liegt nicht im Bereich von 2 cm, sondern die RMS-Werte sind im Vergleich zu den anderen Lösungen doppelt so groß. Die Abweichung dieser Lösung erreicht für die ionosphären-freie Linearkombination aus C1 und P2 als RMS sogar 10 cm. Im Gegensatz dazu überschreitet dieser Wert bei allen anderen Lösungen 6 cm nicht.

Aus all diesen Ergebnissen muss geschlossen werden, dass die Annahme über die Ähnlichkeit der vier Teilnetze bezüglich der GDV falsch ist. Teilnetz 4 (TRM59800.00) liefert GDV, die mit anderen Teilnetzen bzw. anderen Antennentypen nicht übereinstimmen. Die Gründe dafür sind unklar. Obwohl die vier Antennen vom Typ Dorne-Margolin sind und fast ähnliche Ausstattung haben, weisen nur drei Antennentypen davon (AOAD/M\_T, ASH701945?\_M und LEIAT504GG) sehr große Ähnlichkeit hinsichtlich der GDV sowohl für GPS als auch für GLONASS auf. Die Ergebnisse dieser drei Typen bestätigen sich damit auch gegenseitig. Infolgedessen ist es möglich, eine kombinierte Gesamtlösung nur von diesen drei Teilnetzen zu bilden. Die Referenzstationen mit der Empfangsantenne TRM59800.00 werden also aus der Auswertung ausgeschlossen. Somit werden die verbleibenden 35 Referenzstationen (siehe Abbildung 13) zur Bestimmung der GDV der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen verwendet.



**Abbildung 13: Verwendete Referenzstationen zur Bestimmung der GDV der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen**

Nach der Berechnung der Gesamtlösung unter Einbeziehung von 35 anstatt 46 Stationen ändern sich die RMS-Werte in den Tabelle 10 und 11. Die neue Bestimmung der Werte bestätigt wieder die sehr ähnlichen GDV für die drei Empfangsantennen. Die Genauigkeit liegt unter 2 cm für beide Codebeobachtungen sowohl für C1 und P2 als auch für GPS und GLONASS.

	Teilnetz 1	Teilnetz 2	Teilnetz 3
Empfangsantennentyp	AOAD/M_T,	ASH701945?_M	LEIAT504GG
C1	1,2	1,5	2,0
P2	1,1	1,2	1,7
P0	3,3	3,7	5,4

Tabelle 12: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur veränderten Gesamtlösung (35 Stationen), GPS, (alle Werte in cm)

	Teilnetz 1	Teilnetz 2	Teilnetz 3
Empfangsantennentyp	AOAD/M_T,	ASH701945?_M	LEIAT504GG
C1	0,8	1,9	1,3
P2	0,9	0,9	1,4
P0	2,0	4,4	2,5

Tabelle 13: RMS-Werte für die Abweichungen der einzelnen Lösungen zur veränderten Gesamtlösung (35 Stationen), GLONASS, (alle Werte in cm)

In den Tabellen im Anhang A sind die Korrekturwerte für die GDV der 31 GPS- bzw. 23 GLONASS-Satelliten bezüglich der Nadir-Winkel des Satelliten aufgelistet. Die Korrekturwerte wurden für die C1- und die P2-Codebeobachtungen bestimmt.

Die Abbildung 14 und 15 zeigen die Differenzen zwischen den Ergebnissen basierend auf dem einzelnen Antennentyp und der geänderten Gesamtlösung (35 Stationen). Die ionosphären-freie Linearkombination zwischen C1 und P2 der satellitenspezifischen GDV sind in diesen Abbildungen für GPS und GLONASS dargestellt. Diese Abweichungen, die zwischen dem Nadir-Winkel  $1^\circ$  und  $13^\circ$  fast null sind, bestätigen wieder die weiter oben gezeigten, für die drei Antennentypen ähnlichen GDV.

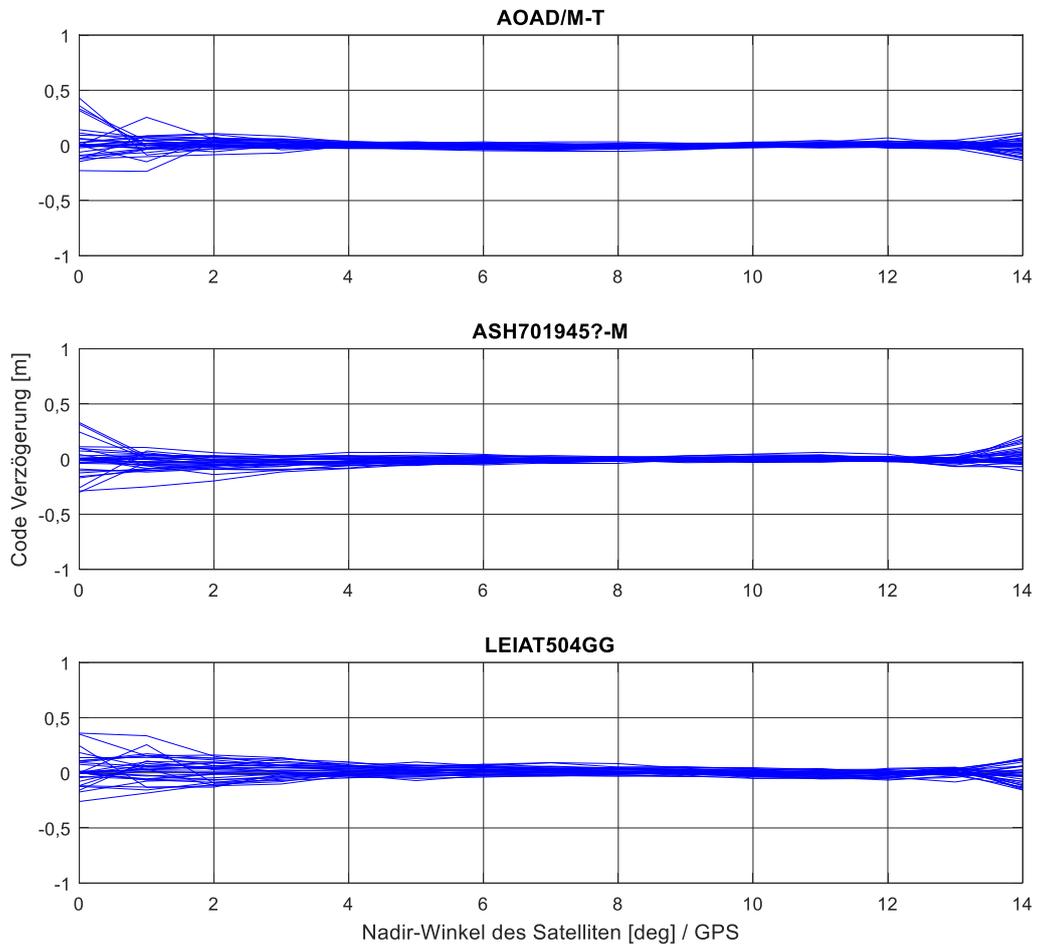
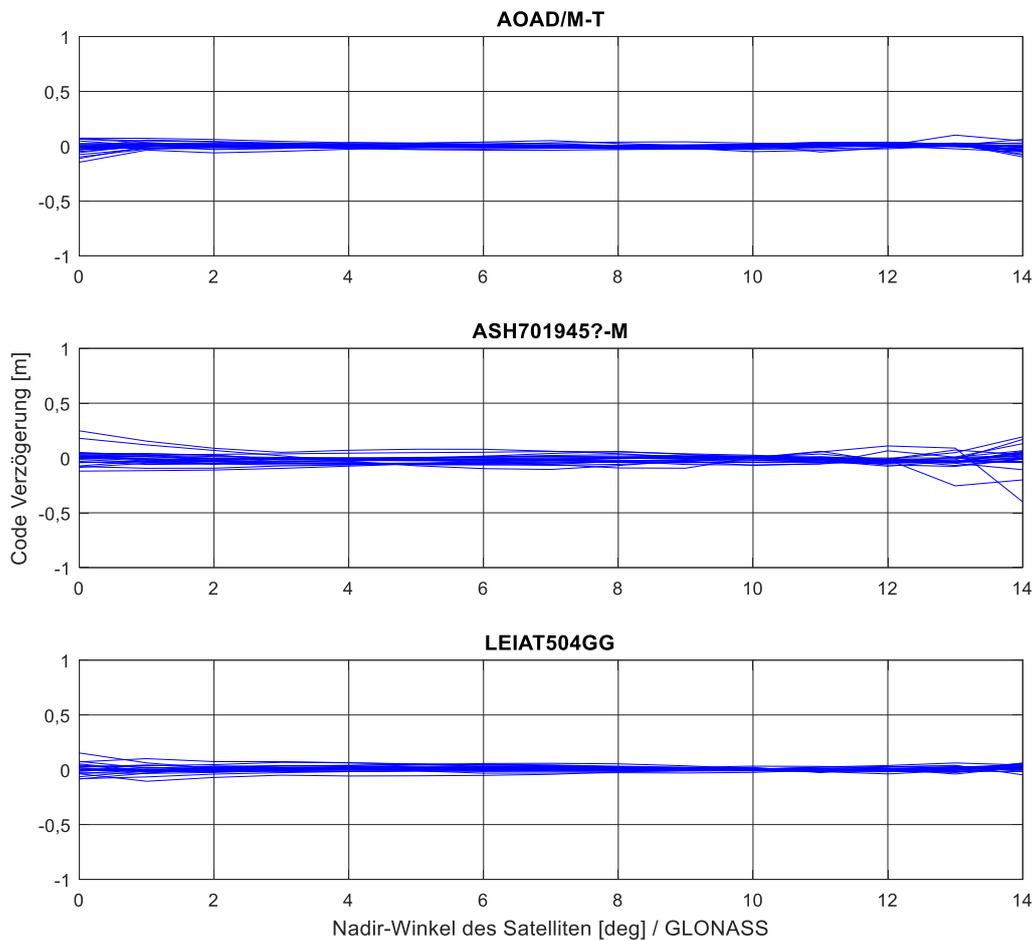


Abbildung 14: Differenzen zwischen den einzelnen Antennentypenlösungen und der geänderten Gesamtlösung (35 Stationen), satellitenspezifische GPS-GDV für die ionosphären-freie Linearkombination aus C1 und P2



**Abbildung 15: Differenzen zwischen den einzelnen Antennentypenlösungen und der geänderten Gesamtlösung (35 Stationen). satellitenspezifische GLONASS -GDV für die ionosphären-freie Linearkombination aus C1 und P2**

Unterschiede zwischen den GPS-Satellitentypen bezüglich der GDV sind in Abbildung 16 dargestellt. Dabei sind die Variationen für C1 (oben, Farbe Magenta), P2 (Mitte, Farbe Rot) und die ionosphären-freie Linearkombination (unten, Farbe Blau) aufgetragen. Die GPS-Satelliten in Abbildung 16 sind entsprechend ihrer Blöcke geordnet (Block IIR auf der linken Seite und Block IIF auf der rechten Seite). Es ist deutlich zu sehen, dass die GPS-Satelliten des Blocks IIR größere GDV im Vergleich zu den Satelliten des Blocks IIF aufweisen. Das gilt für C1-, P2- und die P0-Codebeobachtungen. Zwischen den GPS-Satelliten vom Typ IIR-A, IIR-B und IIR-M wurden keine deutlichen Differenzen identifiziert.

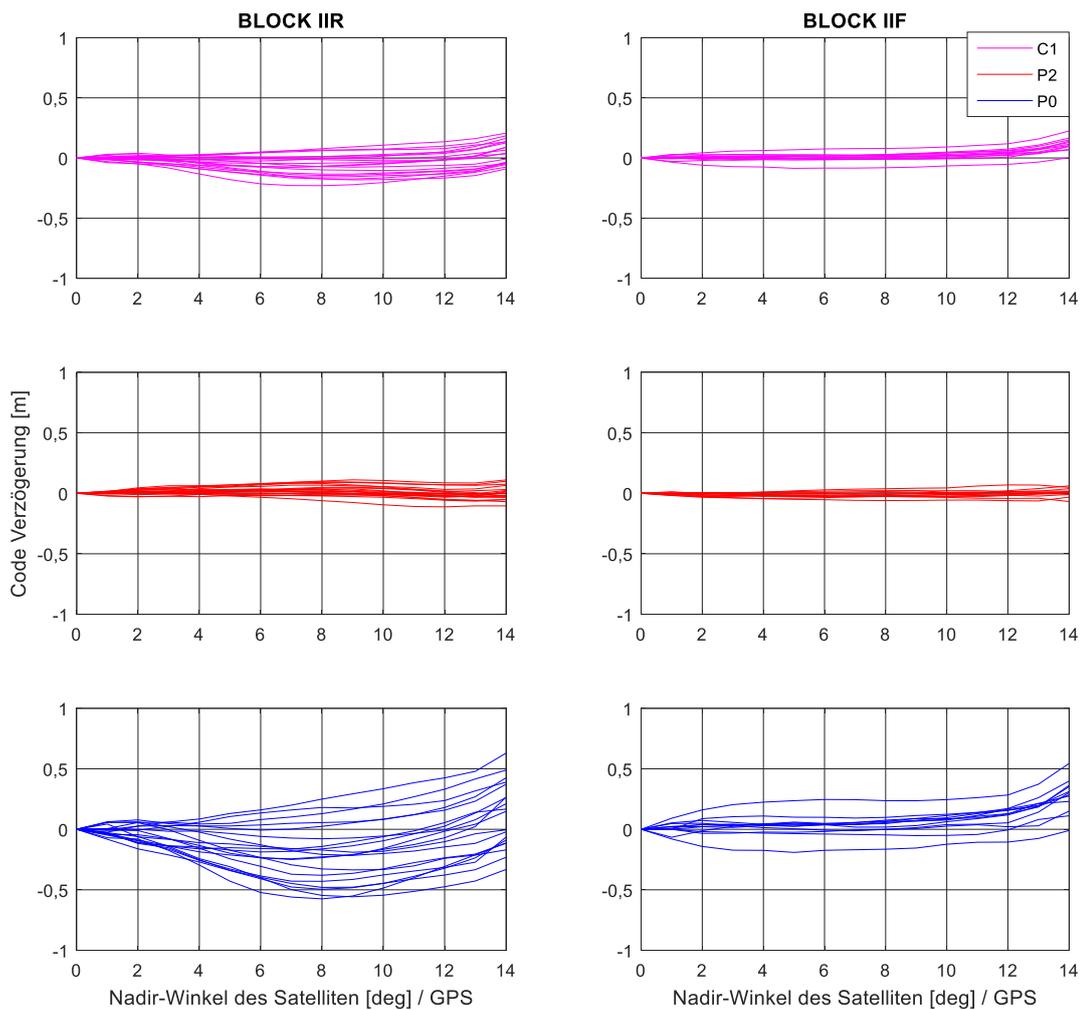


Abbildung 16: GDV der 31 GPS-Satelliten auf der Basis der Beobachtungsdaten von 35 Referenzstationen

Abbildung 17 zeigt die GDV der GLONASS-Satelliten für C1-, P2- und P0-Beobachtungen. Die Variationen der GLONASS-Satelliten sind mit den Variationen der GPS-Block-IIF-Satelliten vergleichbar. Zum Zeitpunkt der Untersuchung (Woche: 20.-26.06.2016) waren 23 GLONASS-Satelliten aktiv, 22 davon waren GLONASS-M-Satelliten. Der einzige GLONASS-K1-Satellit (R802) hat die kleinsten GDV im Vergleich zu den GLONASS-M-Satelliten, siehe Abbildung 17. Dies gilt sowohl für C1- als auch für P2-Codebeobachtungen. Solange die neuen Generationen von GPS- und GLONASS-Satelliten kleinere GDV als die alten Generationen aufweisen, kann vermutet werden, dass diese Fehler in der Zukunft behandelt werden oder mindestens so gering bleiben.

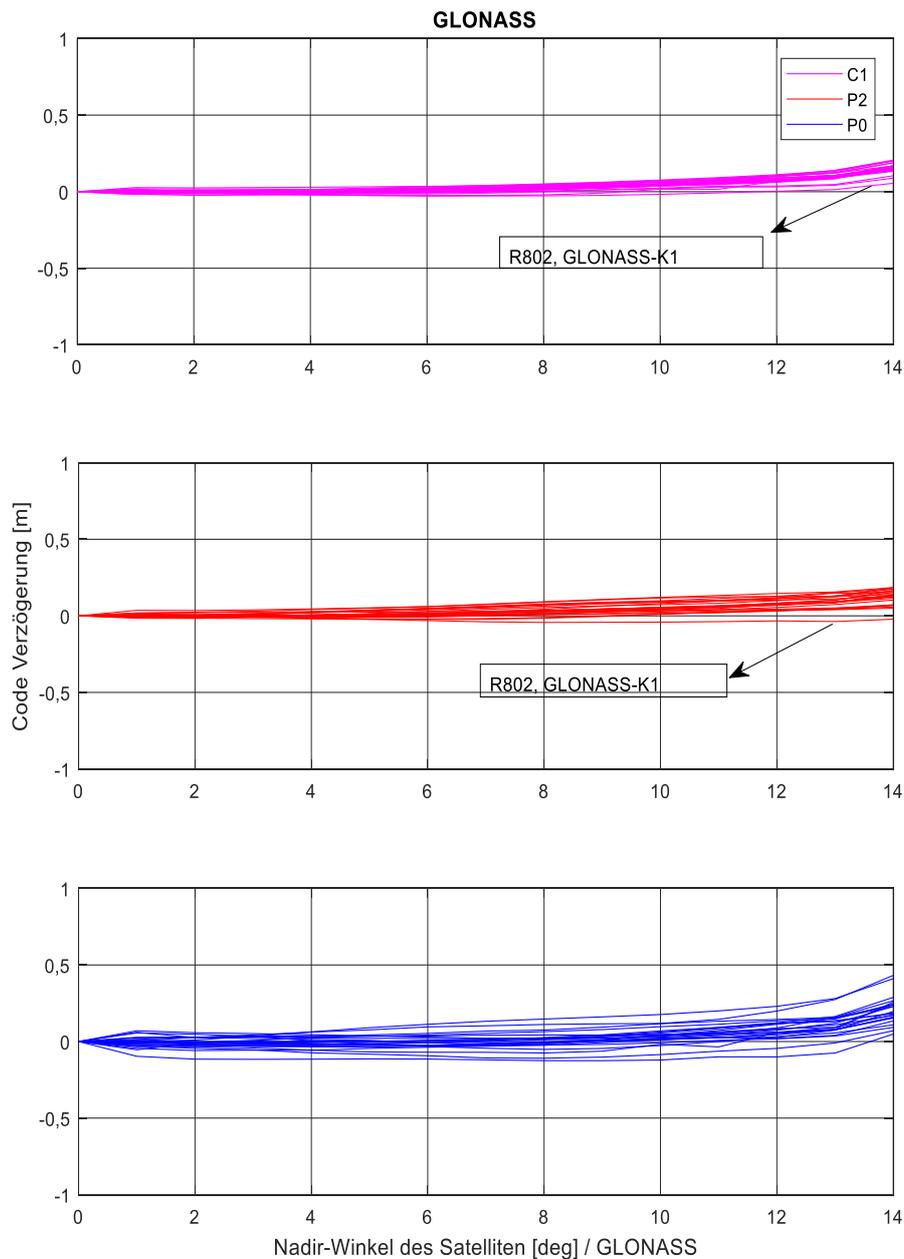


Abbildung 17: GDV der 23 GLONASS-Satelliten auf der Basis der Beobachtungsdaten von 35 Referenzstationen

Die Signale des außergewöhnlichen GPS-Satelliten G04 (SVN49) wurden von 9 Referenzstationen empfangen. Diese sind mit den Empfangsantennen AOAD/M\_T und ASH701945?\_M ausgestattet. Von diesem Satelliten ist bekannt, dass er sehr hohe GDV aufweist. Deswegen ist er auf *unhealthy* gesetzt worden und gehört damit nicht zur GPS-Satellitenkonstellation (El-Arini et al., 2010, Ericson et al., 2010, Springer et al., 2009 und Hauschild et al., 2012). Die Code-Fehlerbeträge für diesen Satelliten

sind abhängig davon, ob der Empfänger der Station mit besonderer Technik zur Eliminierung von Mehrwegeeffekten ausgestattet ist oder nicht (Hauschild et al., 2012, Ericson et al., 2010). Die GDV dieses Satelliten sind in der Abbildung 18 für C1, P2 und P0 dargestellt. Die C1-GDV betragen 1,2 m und 0,3 m für P2. Diese Ergebnisse stimmen näherungsweise mit den von El-Arini u. a. (2010) veröffentlichten Ergebnissen von diesem Satelliten überein.

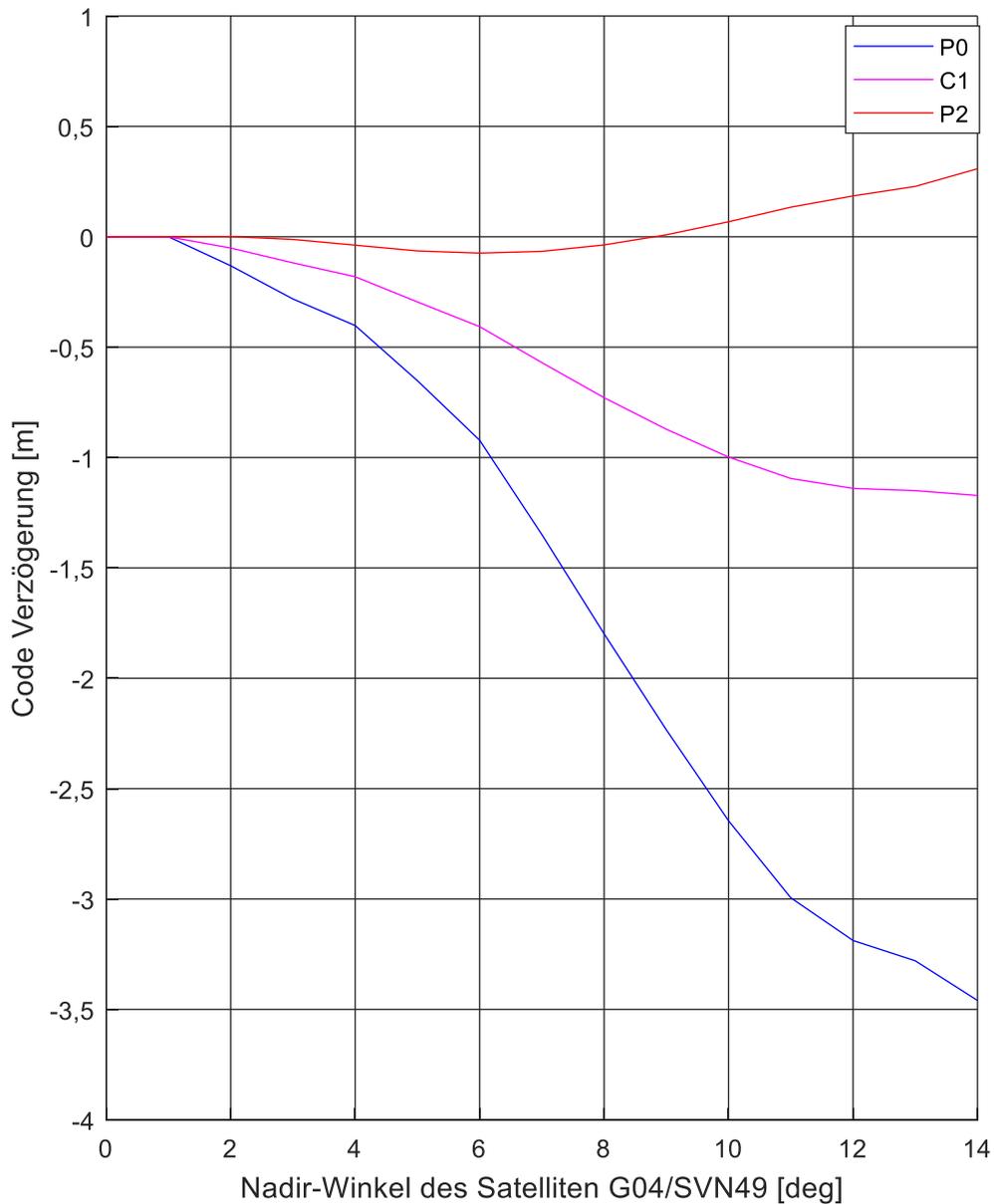


Abbildung 18: GDV des Satelliten G04/SVN49

Der GLONASS-Satellit PRN11 wurde am 24.06.16 von Satellit R723 zu R853 gewechselt. Dieser Tag liegt innerhalb des Untersuchungszeitraumes (20.-26.06.16). Deswegen liegt keine Modellierung der GDV dieses Satelliten vor. Da die C1-Codebeobachtungen das Niveau von einem Meter erreichten, wurde der Satellit von der Auswertung ausgenommen.

#### 4.4.2 GDV der Empfangsantennen

Im zweiten Schritt lassen sich die GDV für die 12 geodätischen Empfangsantennenmodelle bestimmen. Dazu wurden die Daten der 132 Referenzstationen für den Zeitraum 20.-26.06.16 ausgewertet. Für jedes Antennenmodell außer dem SEPCHOKE\_MC-Modell stehen 10-12 Stationen zur Verfügung. Die zur Bestimmung der Satelliten-GDV eingesetzten Stationen wurden dafür wiederverwendet. Um eine ausreichende Anzahl verfügbarer Stationen zu finden, wurden gemischte Netze mit unterschiedlichen Empfängermodellen gebildet. Außerdem wurde das eventuelle Vorhandensein einer Antennenwetterschutzhaube nicht beachtet. Die einzige Beschränkung bei der Auswahl der Stationen lag darin, dass für alle Stationen Codebeobachtungen auf C1 und P2 von GPS und GLONASS für mindestens 5 Tage des Untersuchungszeitraumes vorhanden sein mussten. Vor der Auswertung mittels MP-Beobachtungen wurden die folgenden Punkte beachtet:

- Um einen eindeutigen Referenzpunkt für beiden Phasenbeobachtungsgrößen auf L1 und L2 zu realisieren, müssen die Werte für die Antennenphasenzentrumsoffsets und ihre Variationen für die Satelliten- sowie die Empfangsantennen an die Phasenbeobachtungen angebracht werden. Für die Empfangsantennen werden die vom IGS angebotenen Werte verwendet. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass für einige Antennen, z. B. die AOAD M\_T, keine PZO-Werte für die GLONASS-Signale verfügbar sind. Da die Unterschiede der PZO-Werte zwischen GPS und GLONASS für die gleichen Signale sehr klein sind, können sie in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Damit lassen sich die GDV mit Zentimetergenauigkeit bestimmen. Infolgedessen werden die PZO-Werte von GPS zum Korrigieren der GLONASS-Phasenbeobachtungen verwendet.
- Zur Korrektur der Codebeobachtungen auf C1 und P2 bezüglich der GDV der GPS- und GLONASS-Satelliten werden die Werte der Anhänge A-1 und A-2 verwendet.

Da die geografische Verteilung der Stationen keinen Einfluss auf die Bestimmung der GDV der Empfangsantennen hat, werden die ausgewählten Referenzstationen nicht in einer Karte gezeigt, sondern in der Tabelle 14 aufgelistet.

Antennenmodell	Anzahl der Stationen	Datensätze vom CDDIS-Archiv (hauptsächlich IGS-Stationen)	Datensätze von anderen Archiven: N – NGS, A – Geoscience Australia, E - EPN
AOAD M_T	12	mac1 maw1 cedu coco arev whit jplm algo madr kir0 vis0 stj0	
ASH701945?_M	12	str1 kokv twtf kerg dgav sutv moiu cggn ramo bogi chur thti	
LEIAT504GG	11	ptag bako rcmm lpal hert bucu	plna (N) dedo (N) aztp (N) tsea (N) yeel (A)
TRM59800.00	11	syog mchl pohn stk2 jfng tro1 nklg rbay rgdg rdsd will	
JAV_RINGANT_G3T	12	rio2 ous2 lpgs sutm wind mizu kit3 tash bik0 ulab obe4 pots	
LEIAR25.R3	12	alic tow2 thtg kat1 naur koug pbri lck3 lck4 sofi graz wtzr	
LEIAR25.R4	12	yel2 wroc krgg riga pado ohi2 ohi3 mgue meli mas1 hkws bzrg	
JAVRINGANT_DM	10	badg bogt brmu brux cusv maju mkea sey2 solo zeck	
SEPCHOKE_MC	6	cebr kiru kour nnor redu vill	
TPSCR.G3	12	bake clar cmp9 cord dakr frdn godn gope hlfx holp kuuj rock	
TRM55971.00	12	aspa chti cnmr guug savo ufpr	scoa (E) entz (E) trds (E) smne (E) osls (E) stas (E)
TRM57971.00	11	auck isba mqzg lmmf mars unbj wgtm ebre dund brst grac	

**Tabelle 14: Die 12 Antennenmodelle und die dazugehörigen ausgewählten Referenzstationen zur Bestimmung der GDV**

Da die drei Antennenmodelle AOAD/M\_T, ASH701945?\_M und LEIAT504GG zur Ermittlung der GPS- und GLONASS-Satelliten-GDV benutzt wurden, kann für diese Auswertung angenommen werden, dass die GDV dieser drei Antennen Null sind. Es gibt jedoch verschiedene Gründe, warum die Abweichungen in der Realität verschieden von Null sind. Diese Abweichungen werden hervorgerufen durch Unterschiede zwischen den drei Antennenmodellen oder zwischen den individuellen Empfängern oder hervorgerufen durch Codemehrwegeeffekte insbesondere für niedrige Elevationen. In Abbildung 19 sind die GDV für diese drei Antennenmodelle entsprechend der Codebeobachtungen auf C1, P2 und P0 für GPS und GLONASS dargestellt. Es ist deutlich die Nähe der GDV zu null zu erkennen, besonders für die Elevationen über 10°. Die Abweichungen liegen unter 2,5 cm für C1 und unter 1,5 cm für P2. Diese Ergebnisse bestätigen abermals die Annahme, dass diese drei Antennenmodelle sehr ähnliche

Eigenschaften bezüglich der GDV besitzen, und sind ein weiterer Grund dafür, dass die Bestimmung der Nadir-abhängigen GDV der Satelliten unter Verwendung dieser drei Antennenmodelle erfolgen kann.

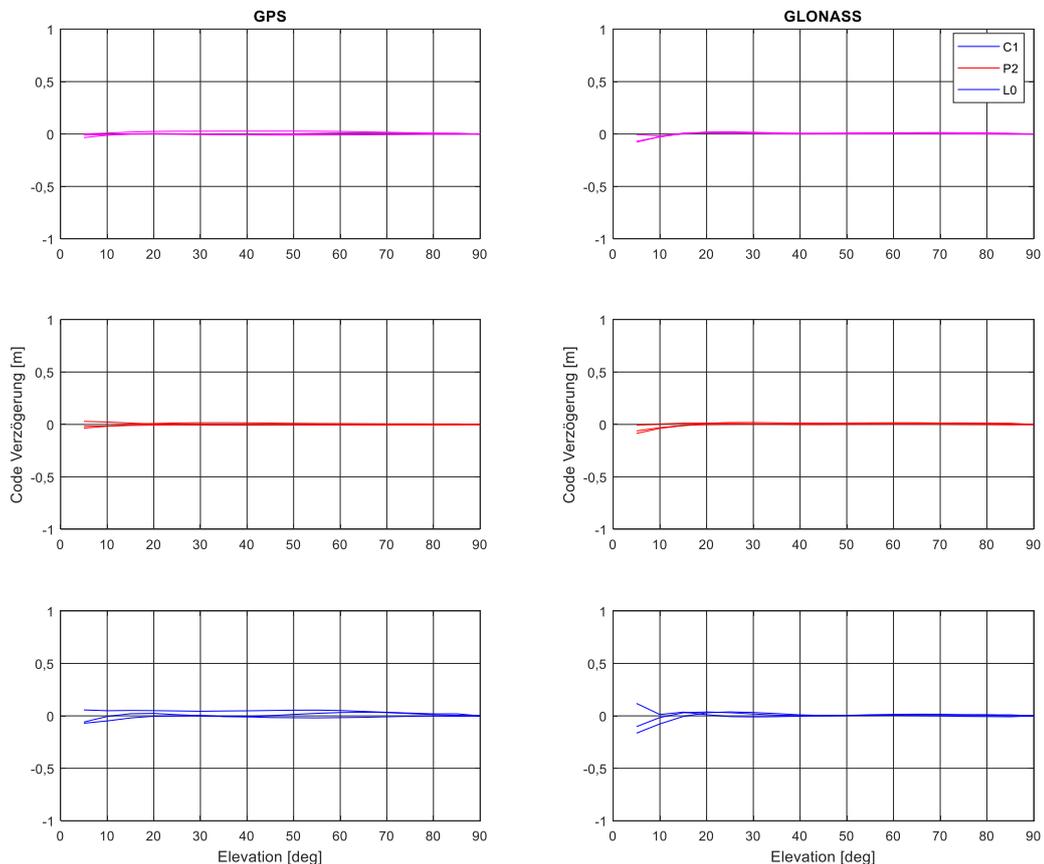


Abbildung 19: GDV der drei Antennenmodelle, die zur Bestimmung der Satelliten-GDV verwendet wurden.

Die restlichen neun Antennenmodelle zeigen mehrere Stufen der GDV (Abbildung 20). Zusätzlich zu den drei Referenzantennen weisen einige Antennen sehr kleine GDV wie z. B. die JAVRINGANT\_DM für Elevationen über  $20^\circ$  auf. Dies gilt sowohl für GPS- als auch für GLONASS-Signale. Erhebliche Abweichungen von Null wurden für die Antennenmodelle LEIAR25.R3 und JAV\_RINGANT\_G3T erhalten (Abbildung 20). Es ist hier zu beachten, dass die zwei Revisionen der Antenne LEIAR25 (R3 und R4) ähnliche physikalische Dimensionen und ähnliche Phasenzentrumoffset-Werte haben, beide Antennen weisen jedoch unterschiedliche GDV sowohl für C1 als auch für P2 für GPS und GLONASS auf (Abbildung 20).

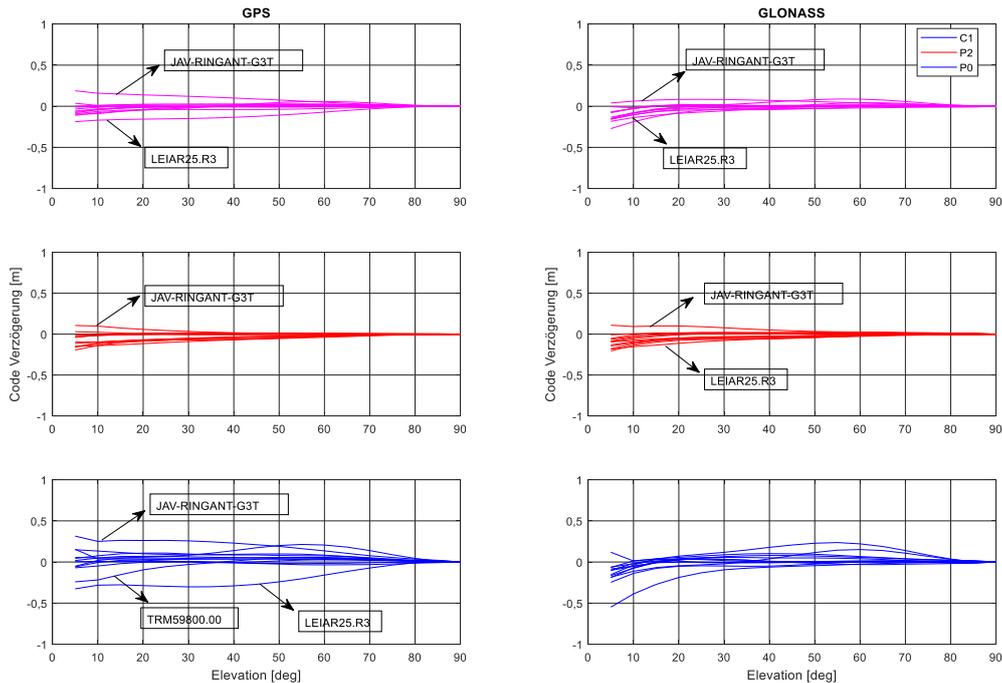


Abbildung 20: GDV der 12 Antennenmodelle

## 4.5 Zeitliche Stabilität der GDV

Codebeobachtungen kommen bei verschiedenen präzisen GNSS-Anwendungen zum Einsatz. Da die GDV der Satelliten- sowie der Empfangsantennen negative Auswirkungen auf die Qualität der Codebeobachtungen haben, kann die Bestimmung und die Korrektur dieser Variationen zu einer Verbesserung der Positionsgenauigkeit führen. Da Codebeobachtungen oftmals als primäre Messgröße in einer GNSS-Auswertung verwendet werden, wird im Kapitel 5 untersucht, inwieweit die GDV die PPP-Lösung von Einfrequenzempfängern beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Modellierung der GDV nur für eine Woche im Juni 2016. Es wurde davon ausgegangen, dass die GDV zeitlich stabil sind. Somit stellt sich also die Frage, ob diese Annahme zutrifft oder nicht! Im Folgenden soll untersucht werden, ob die erzeugten Korrekturwerte der Codebeobachtungen unabhängig von der Beobachtungszeit verwendbar sind.

Zur Beantwortung dieser wichtigen Frage wurde die Modellierung dreimal im Jahr 2016 mit einem zeitlichen Abstand von drei Monaten wiederholt. Hierbei handelt es sich um jeweils eine Woche vor und nach der schon untersuchten Woche im Juni. Die Tabelle 15 zeigt die drei Untersuchungszeiträume im Jahr 2016. Zur Vereinfachung wurden die drei untersuchten Wochen mit Woche-März, Woche-Juni, Woche-Sept bezeichnet. Zusätzlich liegen Ergebnisse aus dem Jahre 2015 zum Vergleich vor

(Wanninger et al., 2017). Dort wurde die Bestimmung der GPS-GDV für die GPS Woche 1843, 03-09.05-2015 durchgeführt.

<b>Woche-März</b>	<b>Woche-Juni</b>	<b>Woche-Sept</b>
20-26.03.16	20-26.06.2016	20-26.09.2016
<i>DoY</i> 80-86/2016	172-178/2016	264-270/2016

**Tabelle 15: Die Untersuchungszeiträume zur Bestimmung der GDV im Jahr 2016**

Ein Ziel dieser Arbeit ist es festzustellen, ob verschiedene Empfangsantennen zeitlich stabile GDV aufweisen. Die Daten der 132 Referenzstationen (siehe Tabelle 14) wurden entsprechend der Untersuchungszeiträume ausgewertet. Nach der Korrektur der Satelliten-GDV wurden die GDV der 12 Empfangsantennen bestimmt. Für die Korrektur der Satelliten-GDV wurden dieselben Werte aus den Anhängen A-1 und A-2 für die drei Untersuchungszeiträume in 2016 benutzt. In diesem Zusammenhang muss darauf geachtet werden, dass die Satelliten-GDV zeitlich stabil sind, so kann dies auch zur zeitlichen Stabilität der GDV auf den Empfangsantennen führen. Stimmen dagegen die Ergebnisse der drei Wochen am Ende der Untersuchung miteinander überein, so bestätigt dies, dass die zeitliche Stabilität nicht nur für die Empfangsantennen, sondern auch für die Satellitenantennen gibt. Anders gesagt, es ist ausreichend, die zeitliche Stabilität der GDV auf den Empfangsantennen zu untersuchen.

Die Abbildung 21 und 22 zeigen die elevationsabhängigen GDV der 12 Empfangsantennen hinsichtlich der C1-, P2- und P0-Codebeobachtungen der GPS- und GLONASS-Signale in der Woche-März und -Sept. Diese Ergebnisse sind mit der Abbildung 20 vergleichbar.

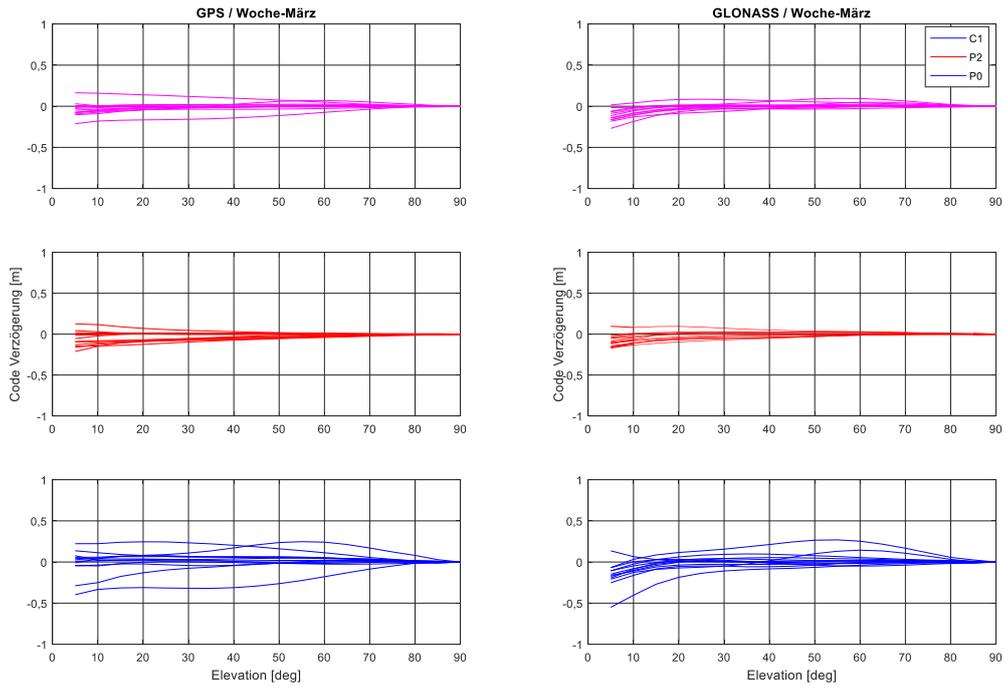


Abbildung 21: GDV der 12 Antennenmodelle für den Untersuchungszeitraum Woche-März 2016

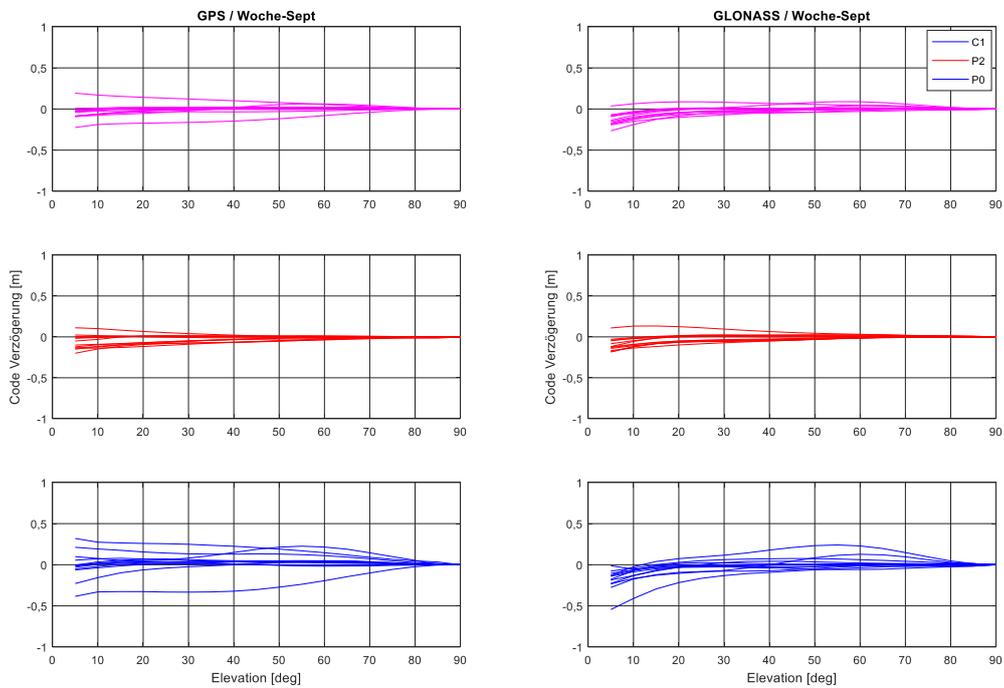


Abbildung 22: GDV der 12 Antennenmodelle für den Untersuchungszeitraum Woche-Sept 2016

Um die Ergebnisse der drei Wochen miteinander zu vergleichen, wurden die Korrekturwerte der Woche-Juni (siehe Anhang A) als Referenzwerte angesehen. Anschließend wurden die Abweichungen der Woche-März und -Sept zu diesen Referenzwerten berechnet. Die RMS-Werte der beiden Codebeobachtungen auf C1 und P2 von GPS und GLONASS sind in Abbildung 23 dargestellt.

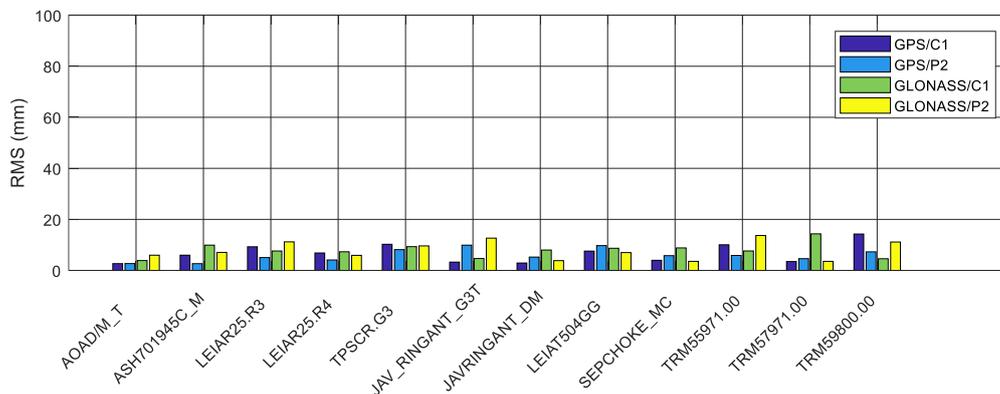


Abbildung 23: RMS-Werte der Abweichungen der Ergebnisse zwischen den drei untersuchten Wochen im Jahr 2016

Ein weiterer Vergleich ist zwischen den Referenzwerten vom Juni 2016 und den Ergebnissen von (Wanninger et al., 2017) aus dem Jahre 2015 möglich. Zum Vergleich können 10 gemeinsam verwendete Empfangsantennen verwendet werden, jedoch nur die C1- und P2-Codebeobachtungen von GPS. Die Abbildung 24 zeigt die RMS-Werte der Abweichungen der zwei Wochen.

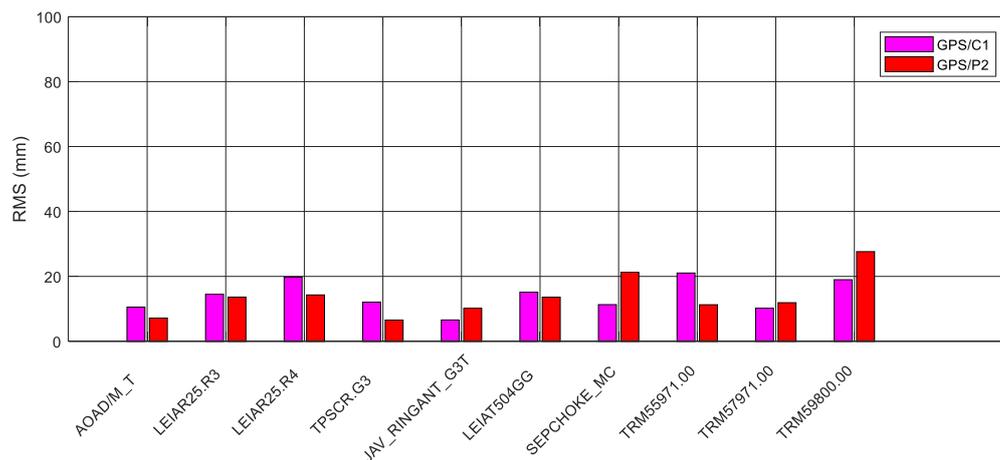


Abbildung 24: RMS-Werte der Abweichungen Woche 1843 zu den Referenzwerten der Woche-Juni

Zusammenfassend können, basierend auf den Ergebnissen aller Empfangsantennen, die in Tabelle 16 dargestellten Werte berechnet werden.

RMS der Abweichungen zur Woche-Juni (cm)	GPS		GLONASS	
	C1	P2	C1	P2
Woche-März 2016	0,8	0,7	0,6	1
Woche-Sept 2016	0,8	0,6	1	0,8
Woche-Mai 2015, (Wanninger et al., 2017)	1,4	1,1		

Tabelle 16: RMS-Werte der Abweichungen verschiedener Zeiträume zu Referenzwerte im Juni 2016 (cm)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die RMS-Werte der Bestimmung der GDV für die verschiedenen Untersuchungszeiträume im Jahr 2016 im Bereich von einem Zentimeter liegen. Diese Aussage trifft auf beide Codebeobachtungen der beiden GNSS (GPS und GLONASS) zu. Wie angenommen, bestätigen diese kleinen RMS-Werte nicht nur die Zeitstabilität der GDV für die Empfangsantennen, sondern auch für die Satellitenantennen. Die zeitliche Stabilität der GPS-GDV von einigen Zentimetern für C1- und P2-Codebeobachtungen wurde auch von Beer & Wanninger (2018) bestätigt. Folglich können die erzeugten Korrekturwerte bezüglich der GDV der Satelliten- und Empfangsantennen als unabhängig von der Zeit angesehen werden. Sie können damit ohne zeitliche Beschränkung zum Korrigieren der Codebeobachtungen eingesetzt werden.



## **5 Untersuchungen zur Verwendung hochwertiger Empfangsantennen bei der Einfrequenz-PPP-Lösung**

Die Einfrequenz-PPP-Lösung basiert auf der ionosphären-freien Linearkombination aus Code- und Phasenbeobachtungen nur einer Frequenz. Diese Linearkombination kann aus den Messgrößen auf der ersten oder zweiten Frequenz gebildet werden. Bei dieser Art der GNSS-Positionsbestimmung stellt die Code- neben der Phasenbeobachtung die primäre Messgröße dar. Dabei sind die Codebeobachtungen von größerer Bedeutung und ihre Qualität spielt eine entscheidende Rolle für die Positionsgenauigkeit. Im Rahmen dieses Kapitels wird die erreichbare Positionsgenauigkeit unter Verwendung von hochwertigen geodätischen Empfangsantennen analysiert. Weiterhin wird untersucht, ob die im vorherigen Kapitel erzeugten Korrekturmodelle der GDV der GPS- und GLONASS-Satelliten sowie der 12 Empfangsantennen eine Auswirkung auf die Positionsgenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung (GRAPHIC-Verfahren) haben. Für diese Untersuchungen werden die Beobachtungsdaten von 132 Referenzstationen daher mit und ohne Korrektur der GDV ausgewertet.

Die in dieser Arbeit benutzten Softwaremodule werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Nachfolgend sind die verwendeten Stationen und die Auswertestrategien aufgelistet. Der dritte Abschnitt beschäftigt sich mit der Genauigkeit der Sollkoordinaten, ermittelt aus einer Zweifrequenz-PPP-Lösung. Zum Schluss wird die erreichbare Positionsgenauigkeit der PPP-Lösung auf der Basis von L1- und L2-Beobachtungen von GPS- sowie kombinierter GPS/GLONASS-Auswertungen gezeigt. Des Weiteren wird gezeigt, wie das Anbringen der Korrekturmodelle die Lösung verbessert.

### **5.1 Wasoft**

Das Softwarepaket wurde von L. Wanninger entwickelt (Wanninger, 2016). Wasoft enthält verschiedene Softwaremodule zur Bearbeitung und Auswertung von Daten aus dem GNSS-Bereich. Das Modul „Warino“ wurde zur Bearbeitung der RINEX-Daten benutzt. Zur Positionsbestimmung mittels PPP mit Ein- oder Zweifrequenzdaten kam „Wapp“ zum Einsatz.

#### **5.1.1 Warino**

Warino wird zur Bearbeitung und Manipulation von GNSS-Beobachtungsdaten verwendet, die im RINEX-Datenformat gespeichert sind. Mit diesem Programm können Daten der RINEX-Version 2.X in 3.X und umgekehrt konvertiert werden. Des Weiteren lassen sich die Header-Informationen einer RINEX-Datei aktualisieren oder korrigieren. Warino wird per Kommandozeilenparameter gesteuert. In der Befehlszeile sind die gewünschten Parameter z. B. zur Auswahl der Beobachtungen C1 oder P2, der

GPS- oder GLONASS-Satelliten zu übergeben. Zusätzlich kann Warino die Antennenphasenzentrumoffset-Werte und ihre Variationen aus einer gegebenen ANTEX Datei an die Beobachtungen einer RINEX-Datei anbringen. Dabei besteht die Möglichkeit Antennenkorrekturen der Satelliten- und/oder der Empfangsantennen an eine bestimmte Messgröße von Phasen- und/oder Codebeobachtungen anzubringen (Wanninger, 2016).

Die IGS Z-Exzentrizitäten der PZO von GPS- und GLONASS-Satelliten wurden im Rahmen der Bestimmung der GDV im vorherigen Kapitel geändert (Tabelle 8, Tabelle 9). Hingegen werden keine Änderung der X- und Y- Exzentrizitäten der PZO sowie ihrer Variationen vorgenommen. Die vom IGS angebotenen Antennenkorrekturen für Empfangsantennen werden unverändert verwendet. Die Korrekturwerte der GDV (siehe Tabellen im Anhang A) werden in eine zusätzliche ANTEX-Datei geschrieben. Dann können die Code-Beobachtungen C1 und P2 mit dieser Datei durch Warino mit der Option (+C) korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt in diesem Schritt durch die Satelliten-nadir-abhängigen und elevationsabhängigen GDV. Die Struktur zur Verwendung von Warino im Rahmen des Anbringens von Korrekturwerten ist in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt.

### 5.1.2 Wapp

Wapp ist ein Softwaremodul zur Auswertung von GNSS-Beobachtungen einer Einzelstation nach dem PPP-Verfahren im Post-Processing. Wapp berechnet die Positionslösung mit Genauigkeiten, je nach vorliegenden Beobachtungsmaterialien, von Submeter, Dezimeter oder Zentimeter. Mit Wapp können verschiedene Lösungen auf der Basis unterschiedlicher Beobachtungen und Linearkombinationen berechnet werden. Zum Beispiel kann die ionosphären-freie Linearkombination nur aus Codebeobachtungen oder beiden Messgrößen (Code und Phase) auf zwei Frequenzen oder die ionosphären-freie Linearkombination aus Code- und Phasenbeobachtungen nur einer Frequenz oder eine Positionsbestimmung beruhend auf einer Messgröße unter Hinzunahme eines Ionosphärenmodells berechnet werden. Höchste Genauigkeiten sind in diesem Zusammenhang aber nur durch langzeitige kontinuierliche Zweifrequenzphasenbeobachtungen erreichbar. Die Position des Empfängers wird in dem von den Satelliten verwendeten Koordinatensystem festgelegt. Wie Warino wird auch Wapp über die Kommandozeile gesteuert und ist für die Stapelverarbeitung geeignet (Wanninger, 2016).

Die Eingabedaten sind die Beobachtungen im RINEX-Format. Zusätzlich sind folgende Daten notwendig:

- präzise Satellitenorbits (SP3-Format)
- präzise Satellitenuhrkorrekturen (CLK-Format)
- Broadcast-Ephemeriden der GLONASS-Satelliten zur Erkennung der aktuellen Frequenz-Kanalnummern.

- Antennenkorrekturen für die Satelliten und die Empfänger (Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Korrekturen schon mittels Warino angebracht).

Die Gewichtung der verschiedenen Beobachtungstypen (Code, Phase, GNSS-Satelliten) erfolgt entsprechend den Ergebnissen einer Varianzkomponentenschätzung. Die Positionsergebnisse können mit einem robusten Schätzverfahren berechnet werden. Als Ergebnis gibt die Software sowohl die Position in unterschiedlichen Darstellungen (XYZ und UTM) als auch die Qualitätsinformation. Die Ausgaben lassen sich konfigurieren, beispielsweise können ausgewählte Informationen (z. B. Stationsname, Antennentyp, Empfängertyp u.v.a.m.) oder eine ausführliche Protokolldatei aller Rechenschritte ausgegeben werden (Wanninger, 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde Wapp verwendet zur:

- Positionsbestimmung der verwendeten Stationen mittels PPP-Lösung der Zweifrequenz-Beobachtungen. Hierbei wird eine Genauigkeit im Millimeter-Bereich erwartet. Die so ermittelten Positionen werden als Soll-Koordinaten verwendet.
- Positionsbestimmung mittels PPP-Verfahren als Einfrequenzlösung. Es wird hierbei die ionosphären-freie Linearkombination aus Code- und Phasenbeobachtungen einer Frequenz (GRAPHIC-Verfahren) verwendet. Die Lösung lässt sich sowohl aus Beobachtungen auf C1 und L1 als auch auf P2 und L2 der GPS-Satelliten oder kombiniert mit den GLONASS-Satelliten berechnen.

Bei den beiden vorgenannten PPP-Lösungen handelt es sich um Tageslösungen.

## 5.2 Datensatz und Auswertekonfiguration

In diesem Kapitel wird die erreichbare Positionsgenauigkeit des Einfrequenz-PPP-Verfahrens untersucht. Weiterhin werden die Auswirkungen der Codekorrekturen auf diese Genauigkeit analysiert. Im 4. Kapitel wurden Korrekturen für die Codebeobachtungen auf C1 und P2 von GPS und GLONASS für 12 hochwertige Empfangsantennen berechnet. Um die beschriebenen Analysen vornehmen zu können, müssen die auszuwählenden Referenzstationen mit diesen korrigierbaren Empfangsantennen ausgestattet sein. Zusätzlich müssen die Stationen sowohl C1- als auch P2-Codebeobachtungen der beiden GNSS (GPS & GLONASS) aufzeichnen. Mit diesen Kriterien lassen sich 132 Referenzstationen aus unterschiedlichen Netzen finden (Tabelle 17).

<b>Antennenmodell</b>	<b>Anzahl der Stationen</b>	<b>Referenzstation (Kürzel)</b> N - NGS, A - Geoscience Australia, E - EPN <b>Ohne - IGS</b>	<b>Empfängertyp</b>
<b>AOAD M_T</b>	12	mac1 maw1 cedu coco whit jplm algo madr kir0 vis0 stjo arev	<b>LEICA GRX1200+GNSS</b> <b>LEICA GRX1200GGPRO</b> <b>TRIMBLE NETR8</b> <b>SEPT POLARXS</b> <b>TPS NET-G3A</b> <b>JPS EGGDT</b> <b>TPS NET-G3A</b> <b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b>
<b>ASH701945?_M</b>	10	twtf kerg sutv cggn ramo dgav kokv bogi chur thti	<b>SEPT POLARX4</b> <b>TRIMBLE NETR9</b> <b>JPS EGGDT</b> <b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b> <b>JAVAD TRE_G3T DELT</b> <b>TPS NET-G3A</b> <b>TRIMBLE NETR8</b>
<b>LEIAT504GG</b>	12	ptag bako hyde rcmm lpal hert bucu plna(N) aztp(N) tsea(N) yeel (A) dedo(N)	<b>LEICA GR25</b> <b>LEICA GRX1200GGPRO</b>  <b>LEICA GRX1200+GNSS</b>
<b>TRM59800.00</b>	11	syog mchl pohn stk2 jfng nklg rbay rgdg rdsd will tro1	<b>TRIMBLE NETR9</b>  <b>TRIMBLE NETR8</b>
<b>JAV_RINGANT_G3T</b>	12	rio2 ous2 lpgs sutm wind mizu kit3 tash bik0 ulab obe4 pots	<b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b>
<b>LEIAR25.R3</b>	12	alic wtzr tow2 thtg koug kat1 pbri lck3 lck4 graz naur sofi	<b>LEICA GR25</b> <b>SEPT POLARXS</b> <b>LEICA GR10</b> <b>LEICA GRX1200+GNSS</b> <b>SEPT POLARX4TR</b> <b>LEICA GRX1200GGPRO</b>
<b>LEIAR25.R4</b>	12	yel2 wroc riga ohi3 hkws krgg pado meli ohi2 mgue mas1 bzrg	<b>SEPT POLARX4TR</b> <b>LEICA GR25</b> <b>LEICA GR10</b> <b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b> <b>SEPT POLARX4</b> <b>LEICA GRX1200+GNSS</b>

<b>JAVRINGANT_DM</b>	10	badg mkea sey2 zeck bogt brmu brux cusv maju solo	<b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b> <b>JAVAD TRE_3 DELTA</b> <b>LEICA GRX1200GGPRO</b> <b>SEPT POLARX4TR</b> <b>JAVAD TRE_3 DELTA</b> <b>SEPT POLARX4TR</b> <b>TRIMBLE NETR9</b>
<b>SEPCHOKE_MC</b>	6	cebr kiru kour nnor redu vill	<b>SEPT POLARX4</b>
<b>TPSCR.G3</b>	12	bake clar cmp9 dakr frdn hlfx holp kuuj rock cord godn gope	<b>TPS NET-G3A</b>  <b>JAVAD TRE_G3TH DEL</b> <b>JAVAD TRE_3 DELTA</b> <b>TPS NETG3</b>
<b>TRM55971.00</b>	12	aspa cnmr guug savo ufpr chti trds(E) smne(E) osls(E) stas (E) scoa(E) entz(E)	<b>TRIMBLE NETR5</b> <b>TRIMBLE NETR9</b> <b>LEICA GR25</b>
<b>TRM57971.00</b>	11	auck mqzg lmmf wgtm ebre brst dund isba mars grac unbj	<b>TRIMBLE NETR9</b> <b>TRIMBLE NETR5</b> <b>LEICA GR25</b> <b>TPS LEGACY</b>

**Tabelle 17: Ausgewählte Stationen gegliedert nach verwendeter Antenne und verwendetem Empfänger zur Untersuchung der Genauigkeit der PPP-Lösung**

Der Untersuchungszeitraum beträgt 21 Tage in den GPS-Wochen 1900, 1901 und 1902 (05.-25.06.2016). Der GPS Satellit G04 ist außer Betrieb. Am 24.06.2016 ist die GLONASS-Satellitenbezeichnung „R11“ von einem physischen Satelliten zu einem anderen gewechselt. Deshalb ist R11 von der Auswertung ausgeschlossen worden. Im Untersuchungszeitraum ist die Anzahl der aktiven GPS-Satelliten 31 und die der GLONASS-Satelliten 23. In der Summe lassen sich also Beobachtungen zu insgesamt 53 Satelliten auswerten.

Die zur Auswertung benötigten präzisen Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen stammen vom Analysezentrum ESA-ESOC (*European Space Agency, European Space Operation Center*<sup>3</sup>). Die Produkte der Auswertezentren werden kostenlos im Internet zur Verfügung gestellt und können über unterschiedliche Quellen, wie z. B. CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*<sup>4</sup>) bezogen werden. Das Analysezentrum ESA-ESOC produziert die Satellitenkoordinaten der GPS- und GLONASS-Satelliten als finale Produkte in einem Intervall von 15 min, gespeichert im SP3-Datenformat. Die finalen Produkte bezüglich der Satellitenuhrkorrekturen haben ein Intervall von 30 s und werden berechnet für GPS- und GLONASS-Satelliten. Da das Intervall der Beobachtungen auch 30 s beträgt, ist eine Interpolation der Satellitenuhrkorrekturen nicht notwendig. Bei Nutzung von Wappm müssen auch die

<sup>3</sup> <http://www.esa.int/>

<sup>4</sup> <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/>

Broadcast-*Ephemeriden* für GLONASS-Satelliten im Auswertungsordner vorliegen. Diese im RINEX-Format gespeicherten Daten enthalten die aktuellen Frequenzkanalnummern. Diese Daten finden sich auch in der CDDIS-Datenbank z. B. vom IGS mit dem Stationskürzel „brdc“.

Im Hinblick auf die niedrige Genauigkeit der erzeugten Korrekturwerte für die GDV für Beobachtungen tiefstehender Satelliten wurde die Elevationsmaske bei allen weiteren Auswertungen auf  $10^\circ$  festgesetzt. Damit können die Einflüsse der Troposphäre, Mehrwegeeffekte und die ungenaue Modellierung der GDV von Satelliten mit niedriger Elevation geringgehalten werden. Zum Anbringen der Antennenkorrekturen an die Phasenbeobachtungen und der Korrekturen der GDV an die Codebeobachtungen wurde die Strategie, wie sie in Abbildung 26 dargestellt ist, benutzt.

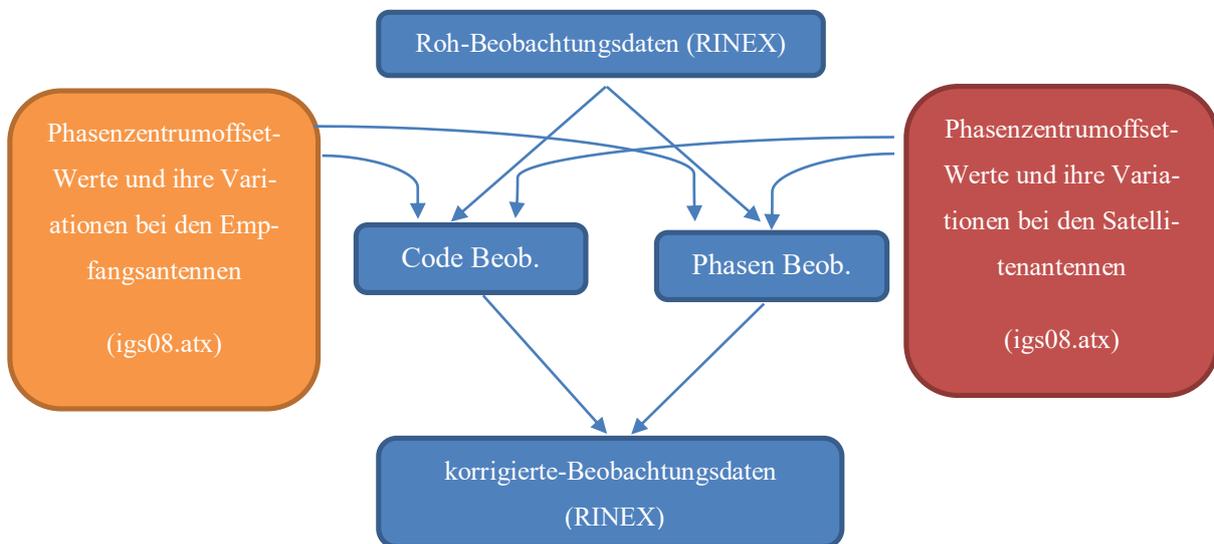


Abbildung 25: Strategie zum Anbringen der PZO und PZV an die Beobachtungen, für Zweifrequenz-PPP-Auswertung und Einfrequenz-PPP-Auswertung ohne Korrektur der GDV

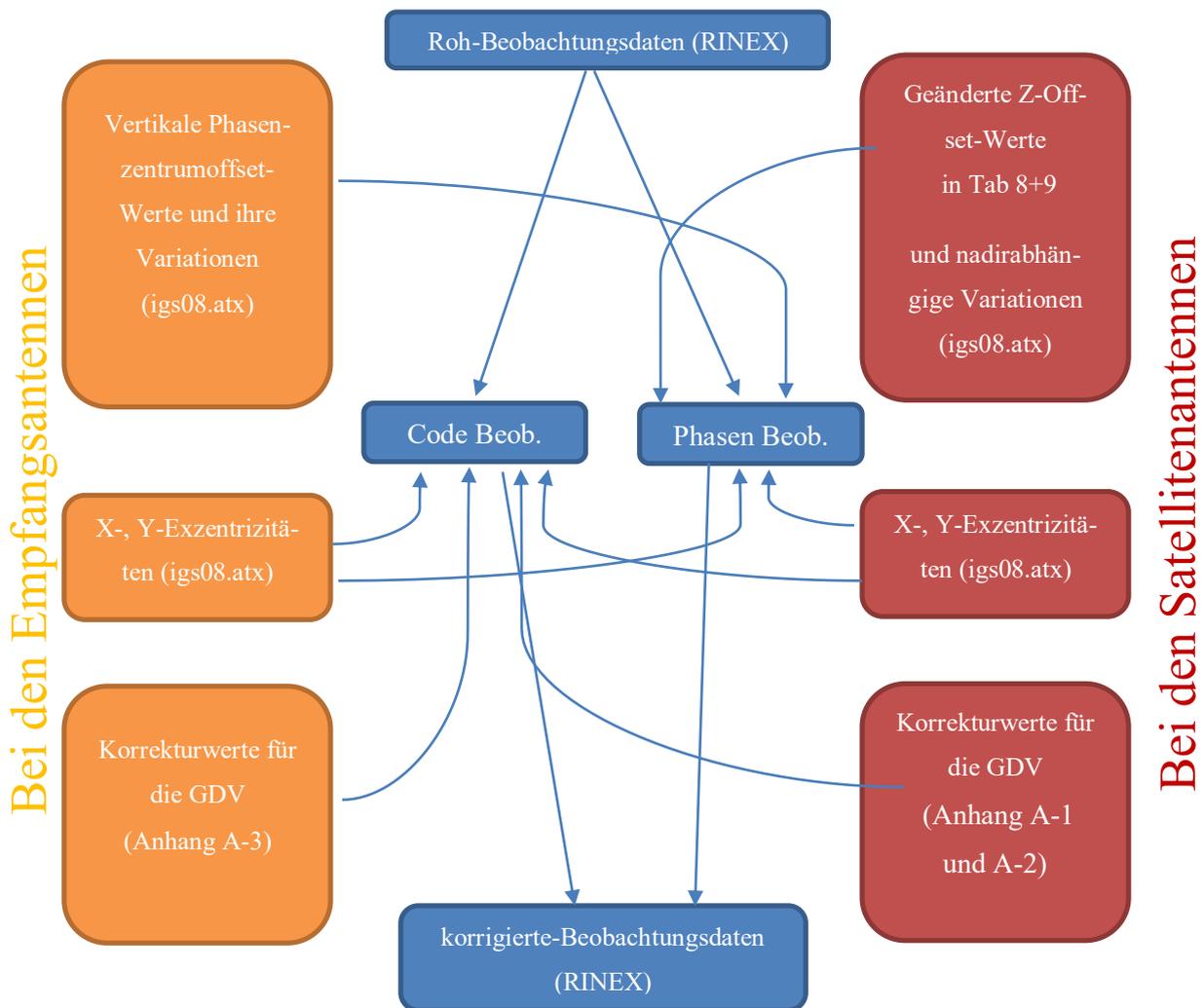


Abbildung 26: Strategie zum Anbringen der PZO und PZV und der Korrekturwerte der GDV an die Beobachtungen, für Einfrequenz-PPP-Auswertung mit Korrektur der GDV

Als Sollpositionen für die untersuchten Stationen dienen die PPP-Lösungen der ionosphären-freien Linearkombination beider Frequenzen. Wapp gibt die Koordinaten im Referenzsystem der verwendeten Satellitenorbits aus. Zum Zeitpunkt der Untersuchung ist das das Referenzsystem ITRF08. Die Qualität der PPP-Lösung als Solllösung wird im nächsten Abschnitt analysiert. Des Weiteren wird diese Lösung als Referenz für alle nachfolgenden Positionsbestimmungen mittels Einfrequenz-PPP-Lösung verwendet.

### 5.3 Untersuchung zur Genauigkeit der Solllösung

Als Sollkoordinaten für die untersuchten Stationen lassen sich die PPP-Lösungen aus Zweifrequenzbeobachtungen berechnen. Diese Lösung wurde ausführlich von Heßelbarth (2011) erläutert. Die Auswertung erfolgte mit dem Wapp-Softwaremodul zum einen ausschließlich mit GPS-Beobachtungen und zum anderen mit kombinierten GPS-/GLONASS-Beobachtungen. Es wurden Tageslösungen berechnet.

Entsprechend dem Untersuchungszeitraum liegen für die meisten Referenzstationen 21 Tageslösungen vor. Zur Ermittlung der Positionsgenauigkeit dieser Lösungen wurden die Mittelwerte und dazu gehörigen Standardabweichungen (Gl. 52 und 53) für die drei Koordinatenkomponenten Ost, Nord und die Höhe berechnet.

Die Abbildung 27 zeigt die Standardabweichungen für die drei Koordinatenkomponenten der untersuchten Referenzstationen. Die Stationen wurden nach ihrer Empfangsantenne sortiert. Die Höhenkomponente ist im Vergleich zu den beiden Lagekomponenten ungenauer. Diese Ergebnisse bezüglich der Positionsgenauigkeit der PPP-Lösung bestätigen die Resultate von Heßelbarth (2011).

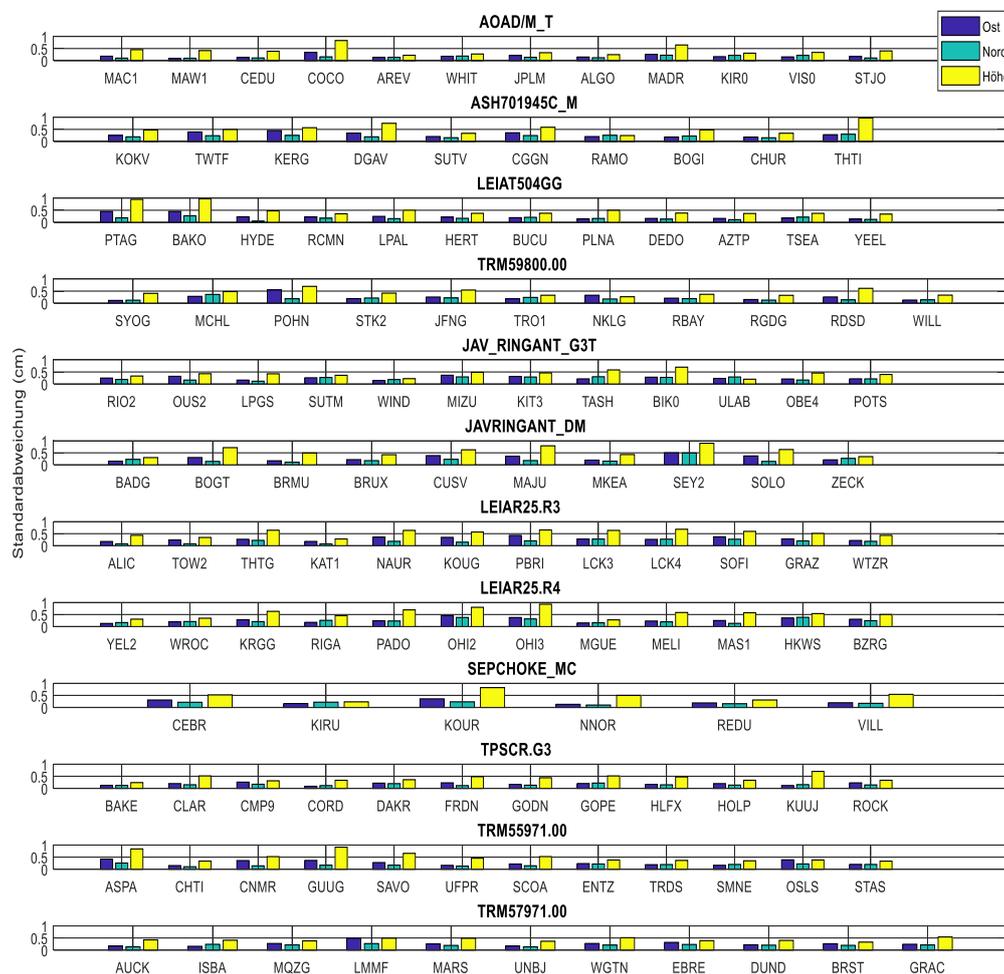


Abbildung 27: Standardabweichungen der Ost-, Nord- und Höhenkomponenten der Zweifrequenz-PPP-Lösung für die untersuchten Referenzstationen (GPS & GLONASS)

In Tabelle 18 sind die erreichten Positionsgenauigkeiten der kombinierten GPS/GLONASS Auswertung im Vergleich zur GPS-Auswertung dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Standardabweichungen aller untersuchten Stationen. Es werden hier Mittelwerte, Maxima und Minima gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen eine geringe Verbesserung der Genauigkeit bewirken.

in cm	GPS & GLONASS			GPS only		
	Ost	Nord	Höhe	Ost	Nord	Höhe
<b>Mittelwerte</b>	0,25	0,19	0,48	0,29	0,19	0,51
<b>Max</b>	0,55	0,49	0,97	0,86	0,50	0,97
<b>Min</b>	0,08	0,05	0,20	0,09	0,04	0,18

**Tabelle 18: Einfache Standardabweichungen der PPP-Lösung aller Stationen. Verglichen werden die Mittelwerte der GPS-Auswertung mit denen der GPS/GLONASS-Auswertung**

Die Zweifrequenz-PPP-Lösung bietet ein Genauigkeitsniveau von 2 bis 3 mm für die Ost- und Nord-Komponenten. Sie sind deutlich kleiner als für die Höhenkomponente. Bei allen vorliegenden Stationen ist keine Standardabweichung größer als 1 cm.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung zu hochgenauen Koordinaten führt. Diese Lösung erreicht mit einer Standardabweichung in Lage und Höhe von einigen Millimetern ein sehr hohes Genauigkeitsniveau, und wird damit als Referenz für alle weiteren Auswertungen als ausreichend angesehen.

## **5.4 Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Empfangsantenne, der Frequenz, dem GNSS und den Auswirkungen der GDV**

Die Qualität der Codebeobachtungen wird durch verschiedene Faktoren, z. B. das Messrauschen, die Codemehrwegeeffekte und die GDV, stark beeinflusst. Werden Codebeobachtungen in einer Auswertung wie z. B. einer Einfrequenz-PPP-Lösung als primäre Messgrößen verwendet, führt dies zu einer Verminderung der Positionsgenauigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Einflüsse der GDV auf die Positionsbestimmung mittels Einfrequenz-PPP-Lösung untersucht werden. Die im 4. Kapitel erzeugten Korrekturwerte bezüglich dieses Fehlers werden hier verwendet. Der Schwerpunkt dieses Abschnitts liegt folglich auf der Verwendung der Korrekturwerte zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit. Es werden die Unterschiede in der Genauigkeit mit und ohne Anbringung von Korrekturwerten gezeigt. Des Weiteren sollen die Ergebnisse auf der Basis von Beobachtungen der ersten Frequenz L1 mit denen

der zweiten Frequenz L2 verglichen werden. Um die Auswirkungen von zusätzlich verwendeten GLONASS-Beobachtungen auf die Positionsbestimmung zu untersuchen, erfolgen die Auswertungen zum einen nur mit GPS- und zum anderen mit kombinierten GPS- und GLONASS-Beobachtungen.

### **5.4.1 Erreichbare Genauigkeit ohne Korrektur der GDV**

Alle in diesem Kapitel verwendeten Referenzstationen sind mit hochwertigen Antennen und Empfängern ausgestattet, die beide Beobachtungsgrößen, Code und Phase auf mindestens zwei Frequenzen, L1 und L2 von GPS und GLONASS aufzeichnen. Einige Stationen speichern zusätzlich Beobachtungen auf der Frequenz L5, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt werden PPP-Lösungen aus Beobachtungen auf einer Frequenz untersucht. Zum einen werden die C/A-Codemessung und die Phasenmessung der ersten Frequenz von GPS und GLONASS ausgewertet. Zum anderen soll die ionosphären-freie Linearkombination aus P-Code und Phase der zweiten Frequenz behandelt werden. Aus diesem Grund wurden die aufgezeichneten RINEX-Beobachtungsdaten entsprechend den Anforderungen ausgedünnt. Dazu wurde mit Hilfe des Softwaremoduls Warino jede RINEX-Ausgangsdatei in zwei Dateien aufgeteilt. Die erste enthält die Beobachtungsgrößen C1 und L1 und die zweite beinhaltet die Beobachtungen P2 und L2.

Zur Bestimmung der Positionsgenauigkeit wurden die Abweichungen der Nord-, Ost- und Höhenkomponente zu den Soll-Lösungen der 132 Stationen im Untersuchungszeitraum von 3 Wochen ermittelt. Die Ergebnisse sind nicht entsprechend den Stationen, sondern entsprechend dem Empfangsantennentyp geordnet. Die RMS-Werte der beiden Lösungen L1 und L2 werden in den Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt. Die Lage-Abweichungen (in Magenta) wurden aus der Ost- und der Nord-Komponente berechnet.

Die Genauigkeit der Höhe ist mehr als doppelt so schlecht wie die der Lage. Das trifft sowohl für die Auswertung der Beobachtungen der ersten Frequenz (Abbildung 28) als auch der zweiten Frequenz (Abbildung 29) mit Ausnahme der JAV\_RINGANT\_G3T-Antenne zu. Zusätzliche GLONASS-Beobachtungen bringen nur geringfügige Verbesserungen der Lagegenauigkeit. Bei der kombinierten GPS/GLONASS-Auswertung verbessert sich die Höhengenaugkeit im Vergleich zur alleinigen GPS-Auswertung auf L1 von 7,5 auf bis zu 6,6 cm (als Mittelwert der RMS-Werte) und auf L2 von 7,0 auf bis zu 6,6 cm. Unterschiede zwischen den verwendeten Antennen sind erkennbar. Die JAV\_RINGANT\_G3T weist die schlechteste Genauigkeit bezüglich der Lage und der Höhe, sowohl bei der L1- als und auch der L2-Lösung, auf.

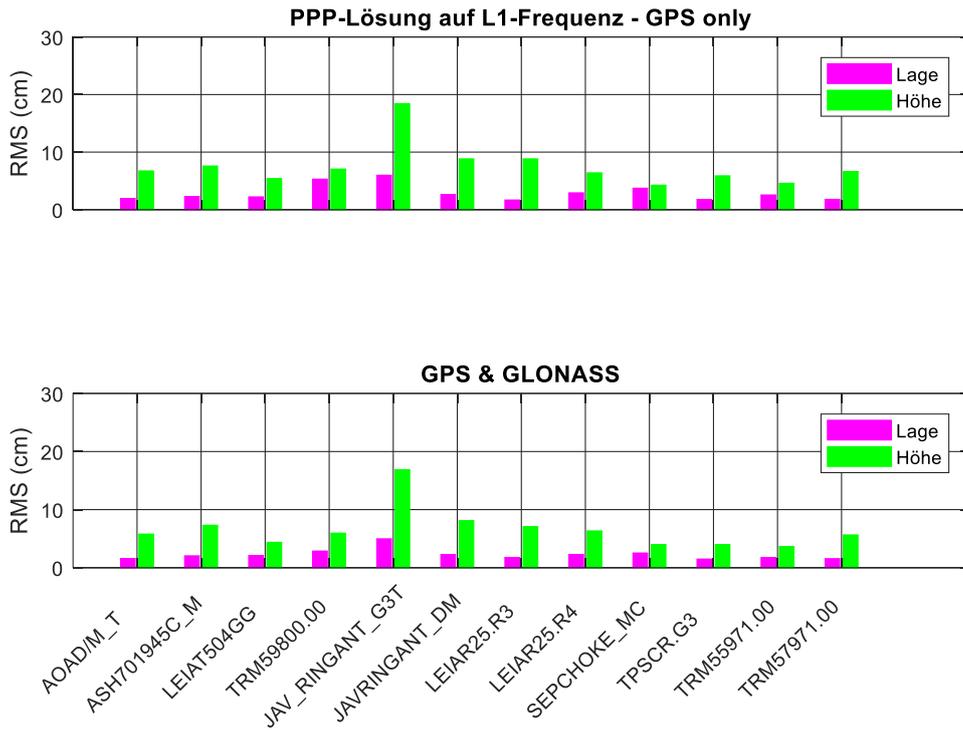


Abbildung 28: Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung von L1 auf der Basis von GPS-Beobachtungen (oben) und von GPS/GLONASS Beobachtungen (unten). RMS-Werte bzgl. der Solllösung, die für die mit derselben Antenne ausgestatteten Stationen berechnet wurden.

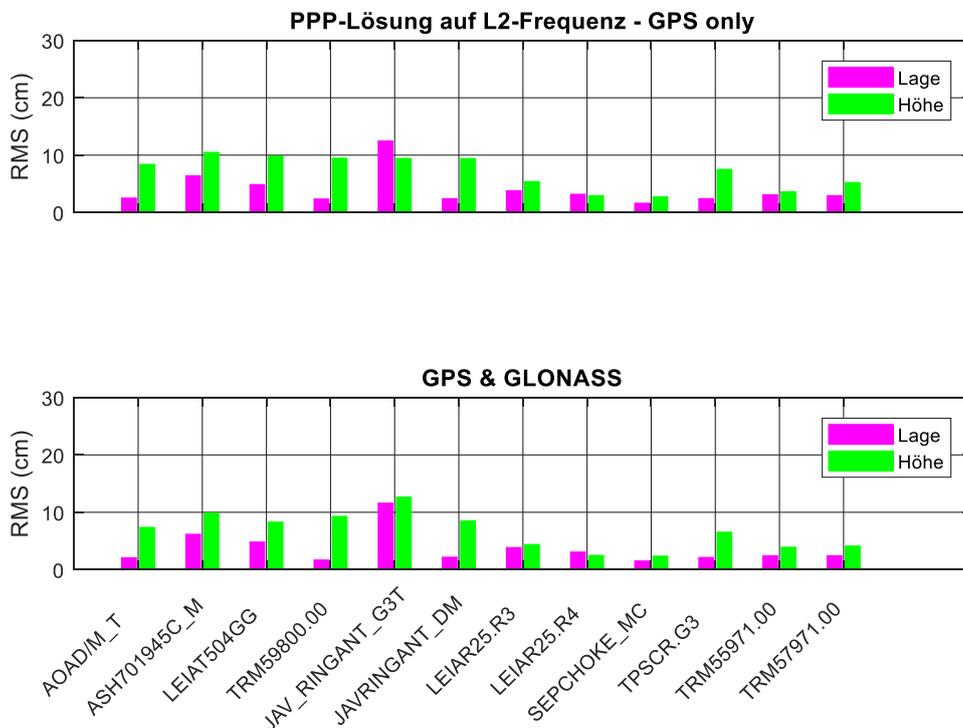
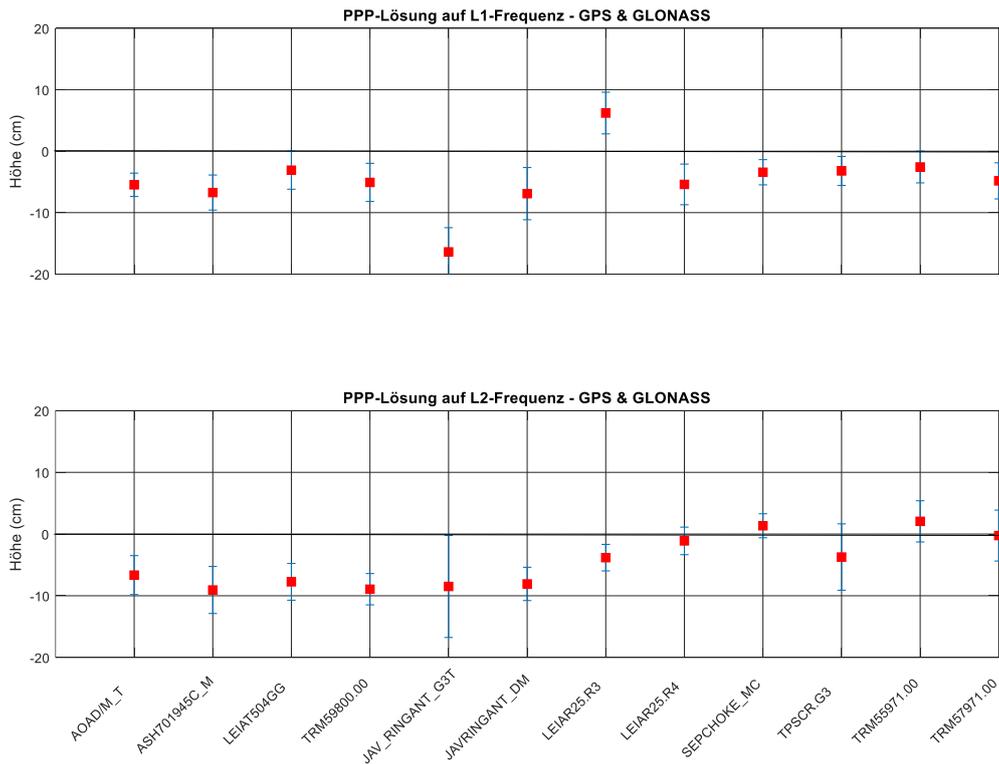


Abbildung 29: Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung L2 auf der Basis von GPS Beobachtungen (oben) und von GPS/GLONASS Beobachtungen (unten). RMS-Werte bzgl. der Solllösung, die für die mit derselben Antenne ausgestatteten Stationen berechnet wurden.

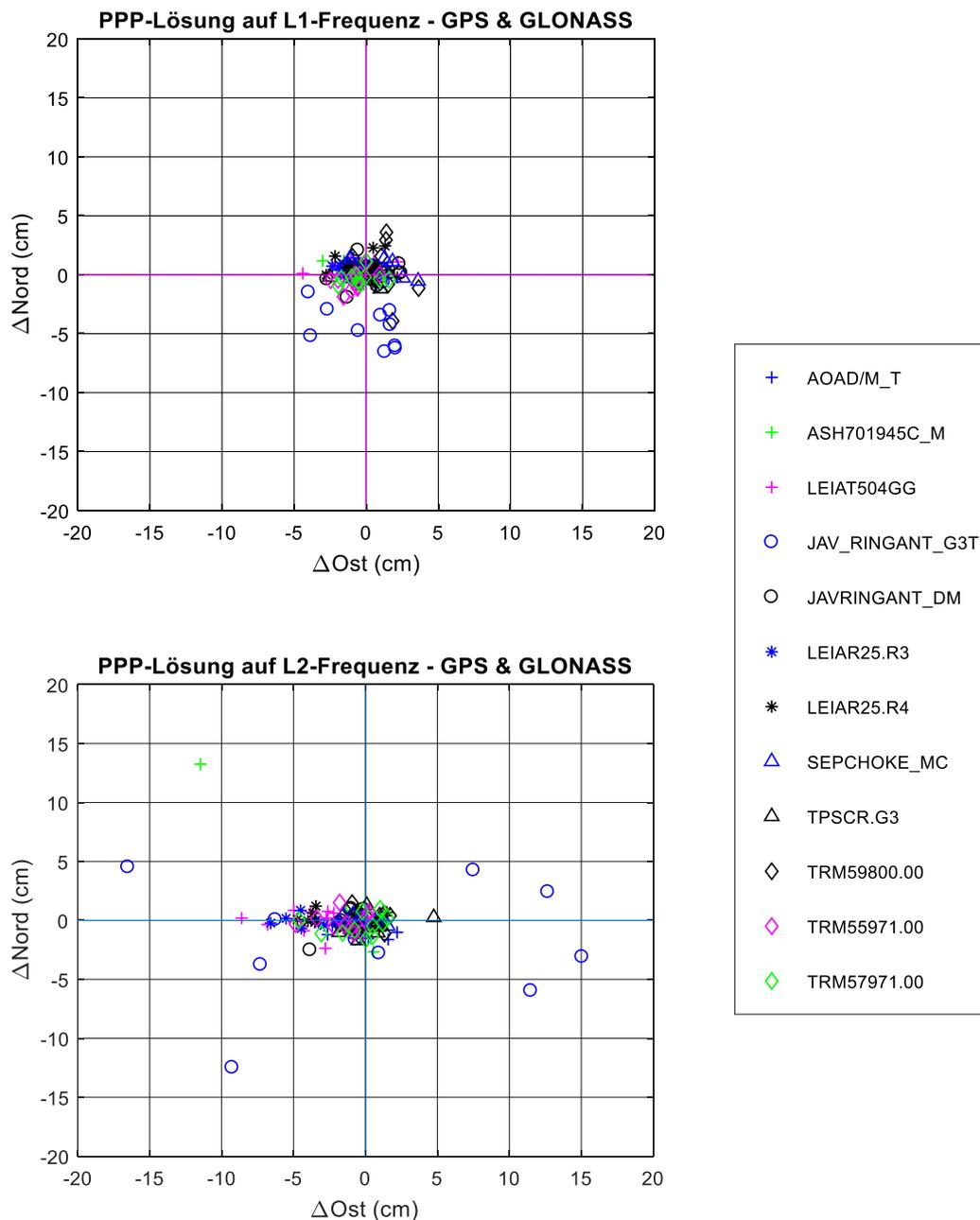
Um die Unterschiede in der Genauigkeit der Höhenkomponente zwischen den verwendeten Empfangsantennen deutlicher erkennbar zu machen, werden die Mittelwerte und dazugehörigen Standardabweichungen der beiden Lösungen auf L1 und L2 dargestellt (Abbildung 30). Bei der L1 Auswertung (Abbildung 30 oben) haben alle Antennen (außer LEIAR25.R3) negative Mittelwerte der Höhenkomponente. Das bedeutet, die Höhe wird durch die PPP-Lösung mit L1-Einfrequenz bei allen Empfangsantennen bezüglich der Soll-Lösung zu niedrig bestimmt. Umgekehrt ist es nur bei der Empfangsantenne LEIAR25.R3. Obwohl R3 und R4 nur zwei Revisionen der Antenne Leica R25 sind, haben sie unterschiedliche Abweichungen in der Höhenkomponente mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Unterschiede zwischen beiden Antennen wurden auch im Rahmen der Bestimmung der GDV auf der Code-Beobachtung C1 festgestellt. Die Ergebnisse bestätigen sich damit gegenseitig.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen führen zur Vermutung, dass die GDV die größte Fehlerquelle für die Einfrequenz-PPP-Lösung darstellen. Ebenso können Unterschiede zwischen beiden Lösungen L1 und L2 derselben Antenne nachgewiesen werden. Insgesamt kann für alle Stationen ein RMS-Wert für beide Lösungen für die Höhenkomponente von 6,6 cm angegeben werden. Obwohl der P2-Code genauer (geringeres Messrauschen) als der C1-Code ist, ist keine höhere Genauigkeit für die Höhe aus der L2-Lösung erkennbar. Dies kann begründet werden, dass es sich bei dieser Auswertung um 24-Stunden-Lösungen handelt. Das Messrauschen wird durch die Mittelbildung von 24 Stunden-Lösungen stark reduziert und hat vermutlich keinen weiteren Einfluss auf die Positionsbestimmung. Ein weiterer Grund besteht darin, dass die Nutzung von der ersten Frequenz hinsichtlich der ionosphärischen Refractionen günstiger als von der zweiten Frequenz ist. Diese führt dazu, dass die Ionosphäre höherer Ordnung die L2-PPP-Lösung mehr als die L1-PPP-Lösung beeinflusst.



**Abbildung 30: Höhenabweichungen (als Mittelwerte und deren Standardabweichungen) der L1-PPP-Lösung (oben) und der L2-PPP-Lösung (unten), jeweils aus kombinierter GPS/GLONASS Auswertung.**

Zur Betrachtung der Genauigkeit der Nord- und Ost-Komponenten wurden die Abweichungen zwischen den PPP-Lösungen mit Einfrequenz auf L1 und L2 und den Soll-Lösungen in der Abbildung 31 zusammengestellt. Die Genauigkeit der Nord-Komponente ist deutlich besser, besonders bei der PPP-Lösung mit L2. Einige Empfangsantennen wie z. B. JAV\_RINGANT\_G3T, LEIAT504GG, LEIAR25.R3 weisen eine schlechtere Genauigkeit im Vergleich zu den anderen Antennen auf. Dies trifft bei der L1- und der L2-Lösung zu.



**Abbildung 31: Abweichungen der L1- und L2-PPP-Lösungen zur Soll-Lösung in Nord- und Ost-Richtung, GPS/GLONASS Auswertung**

Als Zusammenfassung der besten Ergebnisse ohne Verwendung von Codekorrekturwerten soll die Tabelle 19 dienen. Es handelt sich hierbei um eine Lösung mit kombinierten GPS/GLONASS-Beobachtungen. Die Empfangsantenne JAV\_RINGANT\_G3T wurde als Ausreißer berücksichtigt. Deswegen beziehen sich die RMS-Werte auf die Ergebnisse der 120 verwendeten Referenzstationen.

### Auswertung GPS & GLONASS

RMS-Werte (cm) berechnet aus allen Stationen (ohne die mit JAV_RINGANT_G3T ausgestatteten Stationen)	Ost	Nord	Höhe
	PPP-Lösung auf L1	1,7	1,1
PPP-Lösung auf L2	2,6	1,3	6,1

Tabelle 19: Genauigkeit beider Lösungen auf L1 und L2 ohne Anbringung von GDV

#### 5.4.2 Auswirkung der GDV auf die Positionsgenauigkeit

Die Einfrequenz-PPP-Lösung wird von verschiedenen Fehlerquellen beeinflusst. Hierbei ist die Qualität der Codebeobachtungen von großer Bedeutung. Neben den Codemehrwegeffekten und dem Messrauschen haben die GDV besondere Auswirkungen auf die Qualität der Codemessung und demzufolge auf die Einfrequenz-PPP-Lösung. Die Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung im vorherigen Abschnitt, basierend auf der kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertung, betrug nicht mehr als 6,1 cm für die Höhenkomponente. Die Kernfrage in diesem Abschnitt ist: Inwieweit kann die Genauigkeit durch Anbringen von Korrekturen der Satelliten-Nadir- und Empfangsantennen-Elevation-abhängigen GDV erhöht werden? In diesem Zusammenhang wurden die Codebeobachtungen C1 und P2 durch die Korrekturwerte in den Tabellen des Anhangs A anhand der Strategie in der Abbildung 26 korrigiert. Weiterhin wurden die RINEX-Daten entsprechend den Frequenzen aufgeteilt. Die ionosphären-freie Linearkombination lässt sich dann zum einen aus den Beobachtungen der ersten Frequenz (C1 und L1) und zum anderen aus P2 und L2 aufbauen. Die Abweichungen der Tageslösungen zu den Soll-Lösungen wurden berechnet. Um die Einflüsse der Korrekturwerte auf die Positionsbestimmung mittels Einfrequenz-PPP-Lösung zu zeigen, wurden die Ergebnisse dieses Abschnitts mit den Vorherigen ohne Anbringen der Korrekturwerte verglichen.

Die Abbildung 32 zeigt die RMS-Werte der drei Komponenten Nord, Ost und Höhe mit und ohne angebrachten Korrekturwerten der GDV, basierend auf der Auswertung nur von GPS- oder GPS- und GLONASS-Beobachtungen auf den beiden Frequenzen.

Die kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung im Vergleich zur GPS-Auswertung hat nur einen geringen positiven Einfluss auf die Positionsgenauigkeit. Da die GDV im Rahmen dieser Arbeit als elevationsabhängige Werte und nicht als azimutabhängige Werte bestimmt wurden, kann man keine

Auswirkung auf die Genauigkeit der Lage-Komponenten durch Anbringen der Code-Korrekturwerte erwarten. Keine Änderung sieht man in der Genauigkeit der Nord- und Ost-Komponenten bei Anbringen der GDV (Abbildungen 32 und 33). Im Gegensatz dazu wurde die Höhengenaugkeit durch die Korrekturen erheblich verbessert. Die Verbesserungen treten bei der L1- sowie der L2-Lösung basierend auf der GPS-Auswertung mit und ohne GLONASS ein (Abbildungen 32 und 33). Der Betrag der Verbesserung der Höhe hängt von der verwendeten Empfangsantenne ab. Die Abhängigkeit von den Antennen ist deutlich in Abbildung 34 im Vergleich zu Abbildung 30 zu erkennen. Werden die Code-Beobachtungen C1 und P2 bezüglich der GDV nicht korrigiert, liegen systematische Effekte für die Höhen-Komponente der Einfrequenz-PPP-Lösung bei allen verwendeten Empfangsantennen vor (Abbildung 30). Diese systematischen Fehler wurden durch die Bestimmung der GDV und Anbringen an die Codebeobachtungen vollständig beseitigt (Abbildung 34). Die Mittelwerte der Höhe betragen fast Null für die Lösungen auf L1 und L2. Während diese Verbesserungen in der Höhengenaugkeit für einige Antennen z. B. TPSCR.G3, SEPCHOKE\_MC und TRM55971.00 bei einigen Zentimetern liegen, erreichen sie bei anderen wie z. B. JAV\_RINGANT\_G3T höhere Werte von 18 Zentimetern.

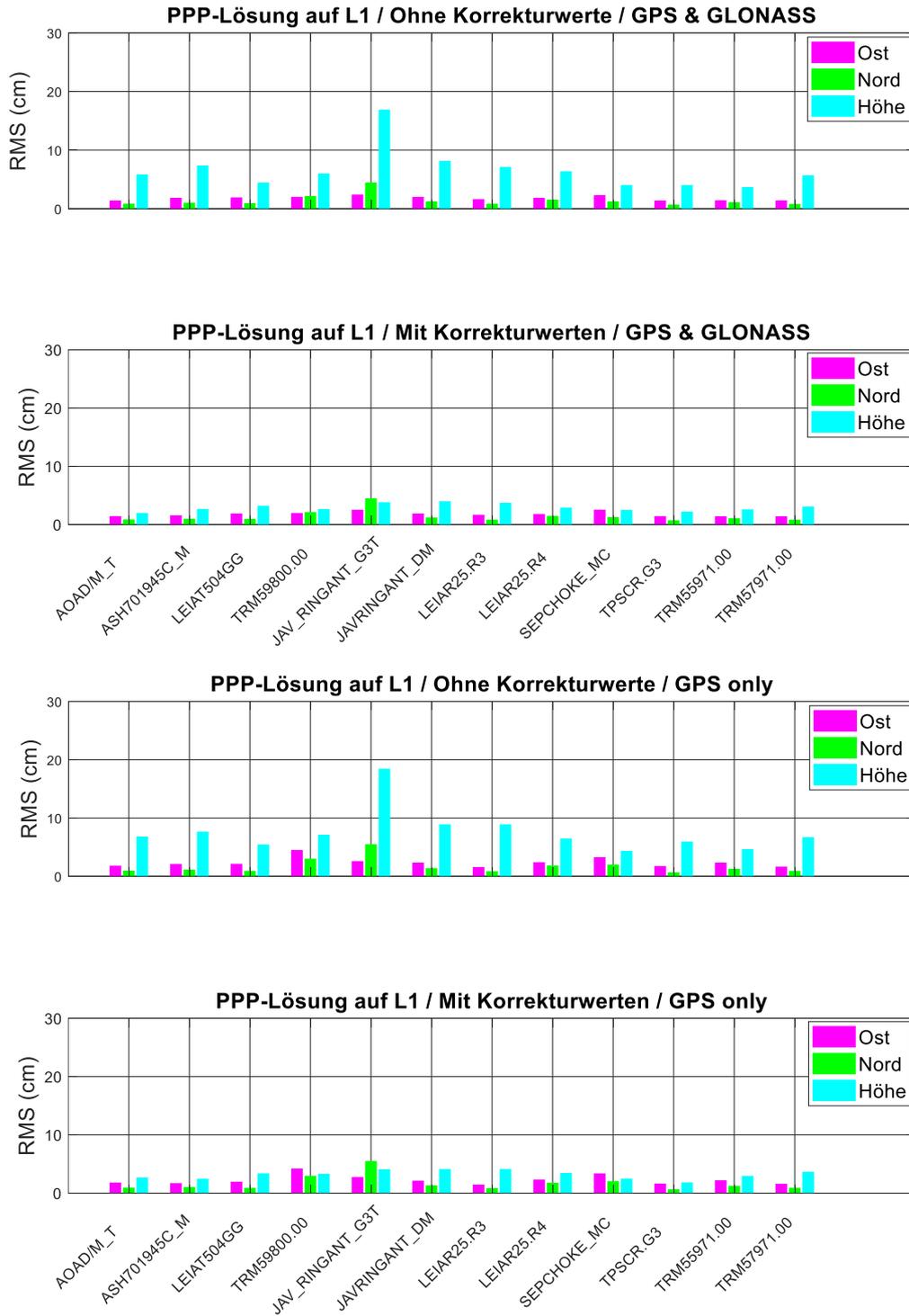


Abbildung 32: RMS-Werte der Abweichungen zwischen der Einfrequenz-PPP-Lösung und der Soll-Lösung für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe. Es handelt sich um die Auswertung mit/ohne Codekorrekturen auf L1. Zum Vergleich die Auswertung mit/ohne Hinzunahme der GLONASS Satelliten.

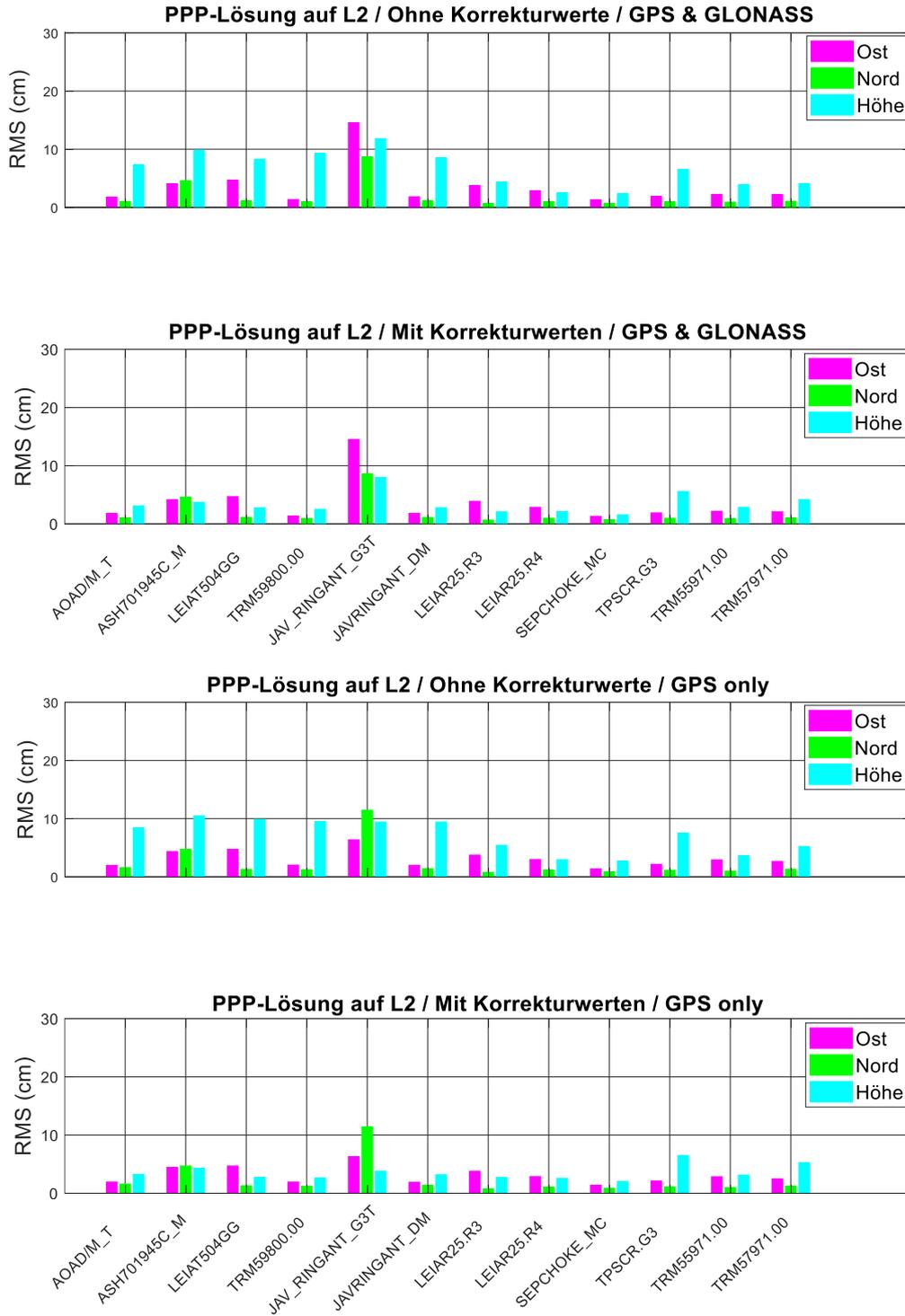
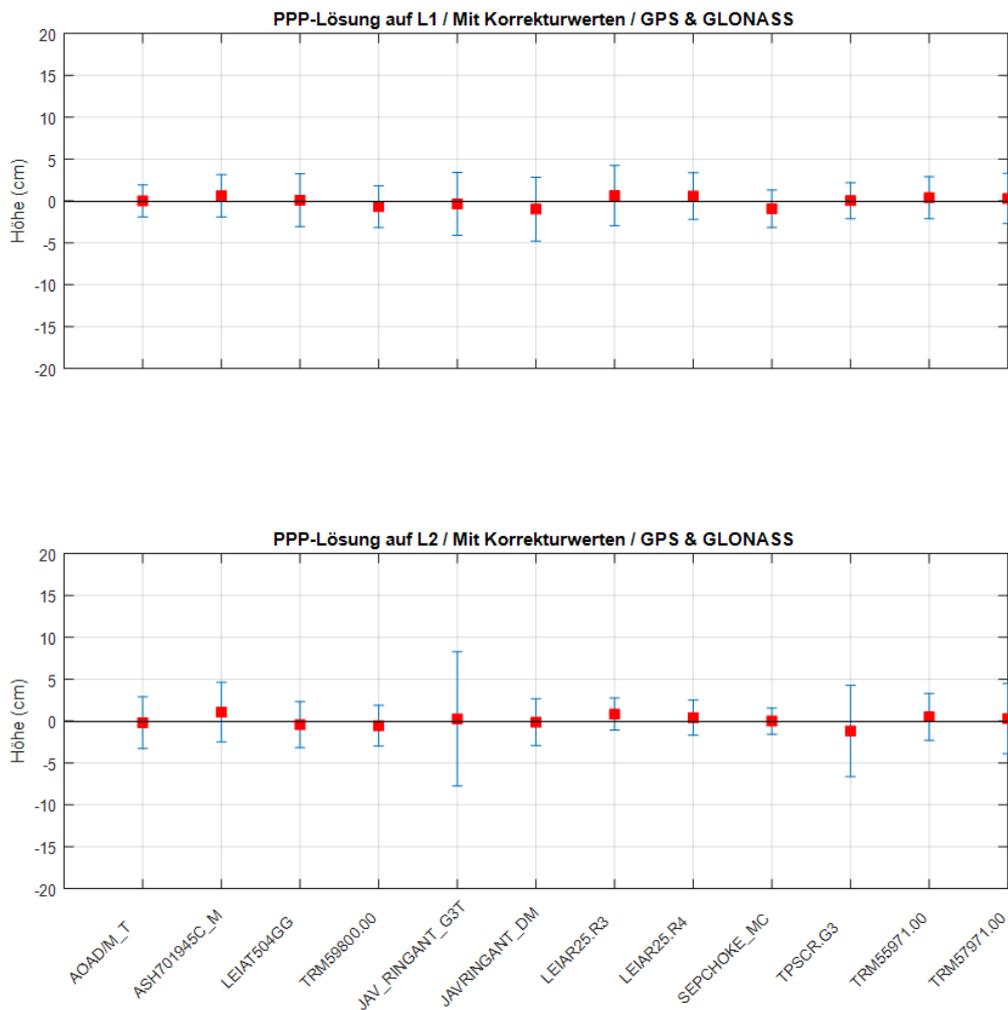


Abbildung 33: RMS-Werte der Abweichungen zwischen der Einfrequenz-PPP-Lösung und der Soll-Lösung für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe. Es handelt sich um die Auswertung mit/ohne Codekorrekturen auf L2. Zum Vergleich die Auswertung mit/ohne Hinzunahme der GLOASS-Satelliten.



**Abbildung 34: Höhenabweichungen (als Mittelwert und deren Standardabweichung) der L1-Lösung (oben) und L2-Lösung (unten). Aus kombinierter GPS/GLONASS-Auswertung, mit angebrachten GDV**

Die Tabelle 20 fasst die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zusammen. Es handelt sich um RMS-Werte der drei Positionskomponenten, der Einfrequenz-PPP-Lösung mittels Beobachtungen auf der ersten sowie der zweiten Frequenz. Die im Kapitel 4.4 bestimmten GDV wurden berücksichtigt. Im Vergleich zur Tabelle 19 wurde die Genauigkeit der Höhe durch Anbringen der Korrekturwerte um das Doppelte verbessert. Hinsichtlich der Lagekomponente konnte keine Änderung der Genauigkeit festgestellt werden.

### Auswertung GPS & GLONASS

RMS-Werte (cm) anhand aller Stationen mit Code- korrektur, (ohne die mit JAV_RINGANT_G3T ausgestatten Stationen)	Ost	Nord	Höhe
	PPP-Lösung auf L1	1,7	1,1
PPP-Lösung auf L2	2,5	1,3	3,0

Tabelle 20: Genauigkeit beider Lösungen auf L1 und L2, mit Korrektur der GDV

## **6 Untersuchungen zur Genauigkeit der PPP-Lösung in Abhängigkeit von den Beschaffungskosten**

Die hohe Positionsgenauigkeit der PPP-Lösung aus Beobachtungen auf zwei Frequenzen ist von der Verfügbarkeit der Code- und Phasenbeobachtungen auf beiden Frequenzen abhängig. Die Genauigkeit ist damit abhängig von der Wertigkeit der Empfänger und Antennen. Preisgünstige Empfänger hingegen liefern nur die Code- und Phasenmessung auf der ersten Frequenz und sind damit für die genaue Zweifrequenz-PPP-Lösung nicht geeignet. Aus ökonomischer Sicht sind die preisgünstigen GNSS-Messgeräte von großer Bedeutung. Sie kamen bereits für verschiedene präzise Anwendungen im Rahmen differenzieller Auswerteverfahren, z. B. RTK (Stempfhuber et al., 2017, Wang et al., 2009) zum Einsatz. Besteht in der Messumgebung keine Möglichkeit zur Nutzung differenzieller Auswerteverfahren (z. B. keine Referenzstation in der Umgebung), kommt die Positionsbestimmung mittels absoluter Auswerteverfahren in Frage. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der erreichbaren Genauigkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung unter Verwendung preisgünstiger GNSS-Messgeräte. Anhand der Kombination verschiedener Empfängertypen mit preislich unterschiedlichen Empfangsantennen wird die erzielbare Genauigkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung untersucht. Weiterhin wird die Auswirkung der Korrektur der GDV auf die Positionsbestimmung hinsichtlich der Koordinatengenauigkeit analysiert.

Als erstes werden die im Rahmen dieses Abschnittes verwendeten GNSS-Messgeräte, die Datensätze und die Untersuchungszeiträume beschrieben. Dann wird die Auswirkung der Auswahl eines Empfängertyps in Kombination mit einer hochwertigen Antenne auf die Positionsgenauigkeit untersucht. In diesem Zusammenhang wird die Möglichkeit des Austausches eines hochwertigen Empfängers durch einen preisgünstigen geprüft. Als letztes wird eine L1 Einfrequenz-PPP-Lösung nur durch Messungen einer preisgünstigen GNSS-Ausrüstung (Empfänger und Antenne) bestimmt.

## 6.1 Daten

Zur Untersuchung der Einflüsse der Empfänger und Antennentypen auf die Positionsgenauigkeit mittels L1-Einfrequenz-PPP-Lösung wurden zwei GNSS-Messungen in unterschiedlichen Zeiträumen und mit unterschiedlichen Messgeräten durchgeführt. Diese Messungen erfolgten auf dem Messdach des Beyer-Baus der TU Dresden.

### 6.1.1 Verwendete preisgünstige Empfänger und Empfangsantenne

#### - Der Empfänger A07-N-11

Der preisgünstige Empfänger A07-N-11 der Firma Alberding GmbH mit dem Empfangschip NV08C-CSM<sup>5</sup> wurde für die Positionierung und die Datenübertragung entwickelt<sup>6</sup> (Abbildung 35). Es ist ein kleiner und leichter Empfänger, der aus einem L1-GNSS-Empfänger (GPS und GLONASS) und anderen Zusatzsensoren besteht. Der A07-N-11 kann über den integrierten Li-Ion-Akku mit Strom versorgt werden. Der Akku wird über eine Mini-USB-Schnittstelle geladen. Die Rohdaten lassen sich auf einer Speicherkarte aufzeichnen, und können für Post-Processing-Anwendungen weiterverwendet werden. Mit der verfügbaren Konfigurationssoftware kann der Empfänger gesteuert werden. Die Rohdaten (Dateiendung: RAW) lassen sich mithilfe der Software „conbin“ von RTKLIB<sup>7</sup> in RINEX-Daten umwandeln. Ursprünglich wurde das System für RTK-Messungen mit höherer Genauigkeit entwickelt. Der A07-N-11 zeichnet die C/A-Code- und Phasenmessungen der ersten Frequenz von GPS- und GLONASS-Satelliten auf. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Empfänger zur absoluten Positionsbestimmung mittels L1-Einfrequenz-PPP-Lösung verwendet.



Abbildung 35: GNSS-Empfänger A07-N-11 der Firma Alberding GmbH

<sup>5</sup> <https://www.gpsworld.com/nvs-technologies-selected-by-alberding-for-sub-meter-gnss-receiver/>

<sup>6</sup> [https://www.alberding.eu/pdf/A07\\_manual\\_de.pdf](https://www.alberding.eu/pdf/A07_manual_de.pdf)

<sup>7</sup> <http://www.rtklib.com/>

## - Die Empfangsantenne TW3870

Die Antenne TW3870 von Tallysman ist mit einem Durchmesser von 6,6 cm und einem Gewicht von 185 g sehr klein und leicht. Sie empfängt nicht nur Signale der ersten, sondern auch der zweiten Frequenz sowohl von GPS als auch von GLONASS. Mit einem Preis von ein paar hundert Euro handelt es sich bei diesem Modell um eine preisgünstige Antenne (Abbildung 36), obwohl es eine Zweifrequenz-Antenne ist. Die Antenne ist ideal für L1/L2-RTK-Messungen<sup>8</sup>. Sie kommt im Rahmen dieser Arbeit zur Untersuchung der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung zum Einsatz. Die Antennenkalibrierung erfolgte durch das Geodätische Institut der TU Dresden. Hierbei wurde das Verfahren der relativen Feldkalibrierung zur Referenzantenne LEIAR25 eingesetzt. Das Ergebnis sind die absoluten PZO und die azimut- und elevationsabhängigen Variationen für GPS und GLONASS der TW3870. Die Bestimmung der GDV dieser Antenne wird im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.



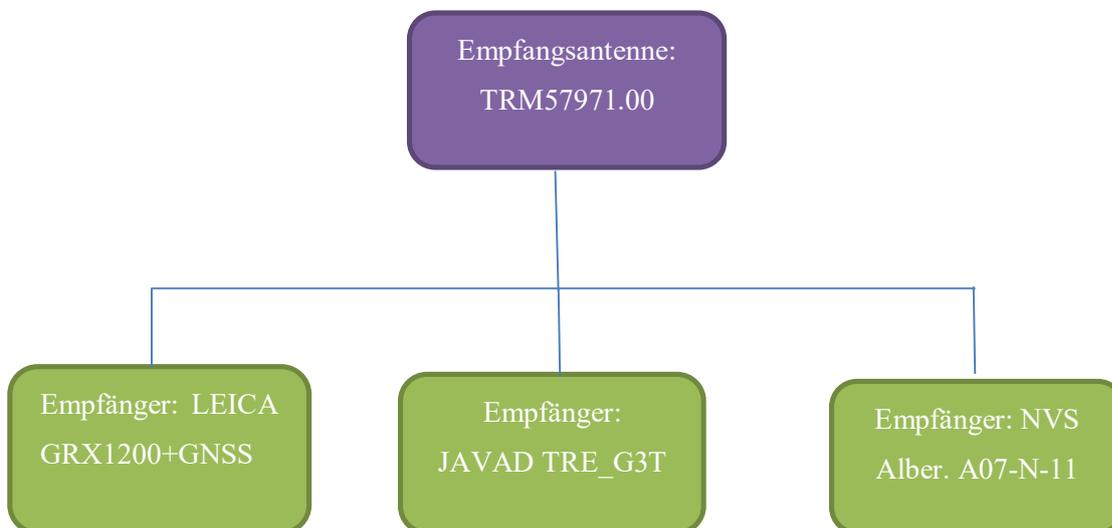
Abbildung 36: Tallysman TW3870 GNSS-Antenne, aufgebaut auf einem Pfeiler des Messdaches auf dem Beyer-Bau der TU Dresden

### 6.1.2 Datensatz 1

Das Ziel dieser Messung liegt darin, die Auswirkungen des benutzten Empfängertyps auf die Positionsgenauigkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung zu untersuchen. Aus diesem Grund kommen hier drei Empfängertypen in Kombination mit einer hochwertigen Antenne zum Einsatz (Abbildung 37). Zwei von ihnen sind hochwertige Empfänger: ein LEICA GRX1200+GNSS und ein JAVAD TRE\_G3T

<sup>8</sup> [http://www.tallysman.com/wp-content/uploads/TW3870-TW3872\\_Datasheet\\_rev4\\_3.pdf](http://www.tallysman.com/wp-content/uploads/TW3870-TW3872_Datasheet_rev4_3.pdf)

SIGMA. Der dritte ist der in Abschnitt 6.1.1 vorgestellte preisgünstige Empfänger A07-N-11. Die drei Empfänger wurden mit Hilfe eines Antennensplitters an die Empfangsantenne TRM57971.00 NONE angeschlossen. Die Beobachtungen wurden gleichzeitig von diesen drei Empfängern über den Zeitraum von einer Woche, DoY 50-57/2015 (19-26.02.2015) aufgezeichnet. Zusätzlich sind beide hochwertigen Empfänger bis zum Tag DoY 67/2015 weitergelaufen. Die aufgezeichneten und in RINEX umgewandelten Daten enthalten Code- und Phasenbeobachtungen der ersten Frequenz L1 (GPS und GLONASS) der drei Empfänger. Die beiden hochwertigen Empfänger stellen zusätzlich die Code- und Phasenbeobachtungen der zweiten Frequenz zur Verfügung und bieten damit die Möglichkeit zur Positionsbestimmung mittels PPP-Lösung mit zwei Frequenzen, die als Soll-Lösung zur Betrachtung der Positionsgenauigkeit durch die L1 Einfrequenz-PPP-Lösung angesehen werden kann.



**Abbildung 37: Konfiguration der Messung für den Datensatz 1. Die Empfänger wurden mittels Antennensplitters an die Empfangsantenne angeschlossen.**

### 6.1.3 Datensatz 2

Der Datensatz 2 soll zum einen zur Bestimmung der azimuth- und elevationsabhängigen GDV der Empfangsantenne TW3870 und zum anderen zur Untersuchung der Positionsgenauigkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung unter Verwendung einer preisgünstigen GNSS-Messausrüstung dienen. Daher wurde die Antenne TW3870 an zwei Empfänger angeschlossen (Abbildung 38 und Abbildung 39). Der Empfänger LEICA GRX1200+GNSS zeichnet Beobachtungen auf beiden Frequenzen von GPS und GLONASS auf. Die Beobachtungen dieses Empfängers wurden zur Modellierung der GDV der TW3870 für die C1- und P2-Signale und zur Berechnung der Soll-Lösung durch Zweifrequenz-PPP-

Verfahren verwendet. Der zweite Empfänger ist der A07-N-11 (Abbildung 35). Die GNSS-Messungen wurden im Jahr 2016 für 35 Tage, DoY 141-176/2016 (20.05-24.06.2016) durchgeführt.

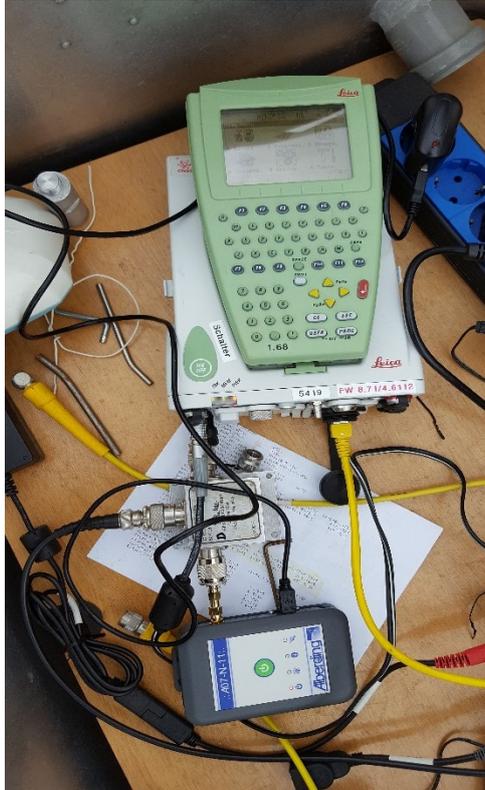


Abbildung 38: Messaufbau für den Datensatz 2

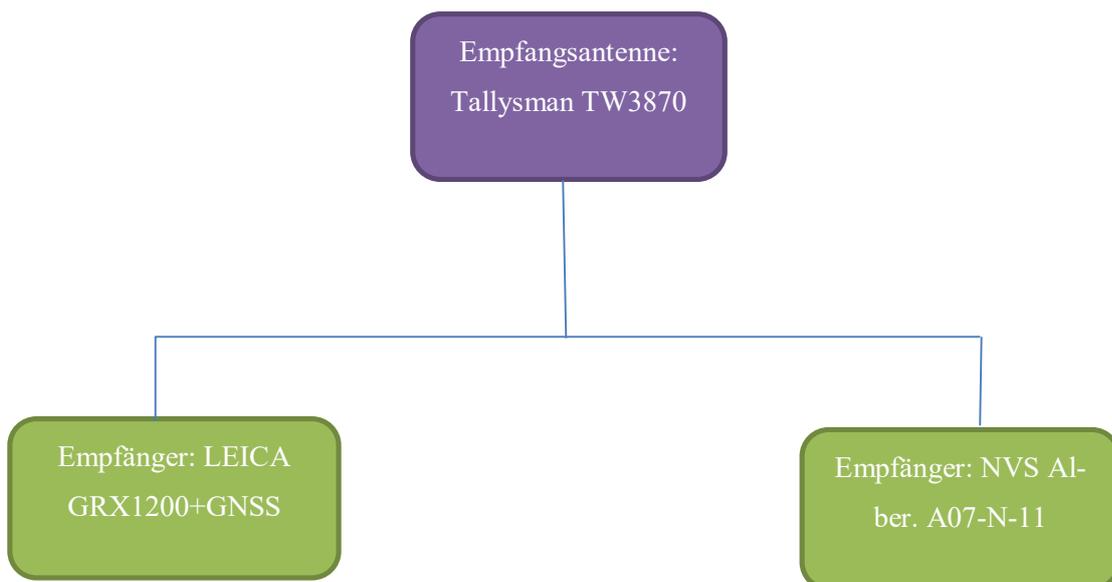


Abbildung 39: Konfiguration der Messung für den Datensatz 2. Die Empfänger wurden mittels Antennensplitter an die Empfangsantenne angeschlossen

## 6.2 Auswirkungen des verwendeten Empfängertyps auf die Positionsbestimmung

Die Untersuchungen der Effekte der Empfängerauswahl auf die Positionsbestimmung mittels L1-Einfrequenz-PPP-Lösung beziehen sich auf den Datensatz 1. Dazu wurden, wie im vorletzten Abschnitt ausgeführt, Daten von drei Empfängern gleichzeitig aufgezeichnet. Diese wurden von einer einzigen hochwertigen Antenne aufgenommen (Abbildung 37). Das Ziel dieser Untersuchungen unterteilt sich in zwei Punkte: Erstens soll die Verbesserung der Höhengenaugkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung durch Anbringen der Korrekturwerte bezüglich der GDV an die Codebeobachtungen C1 und P2, einerseits unter Verwendung des hochwertigen Empfängers, andererseits des preisgünstigen Empfängers nachgewiesen werden. Zweitens soll die Positionsgenaugkeit dieser Lösung mittels der verschiedenen Empfänger verglichen werden. Die Möglichkeit wird geprüft, ob der preisgünstige Empfänger A07-N-11 die teuren hochwertigen Empfänger hinsichtlich der Positionsgenaugkeit ersetzen kann.

Zum Erhalt der Soll-Koordinaten wurde eine Zweifrequenz-PPP-Lösung berechnet. Mit Hilfe des Softwaremoduls Wapp wurden die vom LEICA GRX1200+GNSS aufgezeichneten Code- und Phasenbeobachtungen zur Positionsbestimmung verwendet. Die Standardabweichungen der drei Komponenten Ost, Nord und Höhe lagen unter 1 cm (nachfolgend für die Ost-, Nord- und Höhenkomponente 2,1; 1,1; 5,3 mm) und somit können diese Koordinaten als Soll-Lösung zum Vergleich für die weiteren Untersuchungen verwendet werden.

Die Strategie zur Antennenkorrektur bei der L1 Einfrequenz-PPP-Lösung wurde bereits in der Abbildung 26 beschrieben. Hierbei wurde erläutert, wie die Codebeobachtungen entsprechend der Korrekturwerte der GDV und die Phasenbeobachtungen durch PZO und deren Variationen korrigiert werden. In diesem Zusammenhang wurden zur Korrektur der GPS- und GLONASS-Satellitenantennen die Tabellen im Anhang A-1 und A-2 und der Empfangsantenne TRM57971.00 im Anhang A-3 verwendet. Es muss hier beachtet werden, dass die Modellierung der nadir-abhängigen Satelliten-GDV im Rahmen des Kapitels 4 für die Satelliten in der Woche 20-26.06.16 erfolgte. Deshalb liegen für die Beobachtungen zu einigen Satelliten des Datensatzes 1 keine Korrekturwerte vor. Das betrifft zum Beispiel die Satelliten G038, G040, R736 und R723. Die Beobachtungen bezüglich diese Satelliten sind von der Auswertung ausgeschlossen worden. Weitere zur PPP-Lösung benötigte Produkte, wie die präzisen Satellitenkoordinaten und -uhrkorrekturen, lassen sich von den im Abschnitt 5.2 beschriebenen Datenquellen beziehen.

Entsprechend dem Untersuchungszeitraum können für den Empfänger A07-N-11 sieben Tageslösungen für L1 und für die hochwertigen Empfänger 17 Tageslösungen berechnet werden. Die Auswertung erfolgte einmal nur mit GPS-Satelliten und einmal mit GPS- und GLONASS-Satelliten. Zur Betrachtung der Positionsgenaugkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung lassen sich die Abweichungen der drei Komponenten zur Soll-Lösung ermitteln. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 21 und in der Abbildung 40

dargestellt. Werden die kombinierten GPS/GLONASS-Beobachtungen ausgewertet, wird die Positionsgenauigkeit bei den drei Komponenten im Vergleich zur Auswertung nur mit GPS-Satelliten erhöht. Die Verbesserung in der Genauigkeit sieht man deutlich an der Nord-Komponente. Zum Beispiel wurde der RMS-Wert der Nord-Komponente beim Empfänger A07-N-11 von 2,4 cm auf 0,9 cm durch die kombinierte Auswertung reduziert. In der Höhe wurde die Genauigkeit durch die Hinzunahme der GLONASS-Beobachtungen bei allen untersuchten Empfängern um etwa 20% gesteigert (siehe Tabelle 21). Mit dem RMS-Wert von 6,9 cm (Abbildung 40) weist der preisgünstige Empfänger A07-N-11 eine 3-mal schlechtere Ost-Genauigkeit im Vergleich zu den hochwertigen Empfängern auf. Im Gegensatz zur Genauigkeit der Ost-Komponente liegt die Genauigkeit in Nord und Höhe bei dem Empfänger A07-N-11 auf dem Niveau der Genauigkeit der hochwertigen Empfänger.

An den Ergebnissen sieht man die vielfältigen Auswirkungen der GDV auf die Positionsgenauigkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung. Mit den Codekorrekturen kann die Genauigkeit der Höhe erheblich gesteigert werden. Es muss in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass der Zeitunterschied zwischen der Bestimmung der GDV und den ausgewerteten Beobachtungen nicht mehr als ein Jahr beträgt. Dies bestätigt die Ergebnisse der zeitlichen Stabilität der modellierten GDV (siehe Abschnitt 4.5). Die Verbesserung der Höhengenaugkeit liegt beim JAVAD TRE\_G3T- und beim A07-N-11-Empfänger auf demselben Niveau. Das bedeutet, die Bestimmung der GDV hat nicht nur auf die hochwertigen Empfänger, sondern auch auf den preisgünstigen Empfänger eine positive Auswirkung hinsichtlich der Höhengenaugkeit Da die GDV im Rahmen der Modellierung nicht als azimutabhängig, sondern nur als elevationsabhängig bestimmt werden, kann keine Verbesserung der Lagegenauigkeit erwartet werden. Dies kann ein Grund für die schlechte Genauigkeit der Ostkomponente sein.

Obwohl es sich bei dieser Messung um eine Stichprobe von einer Woche handelt, kann gezeigt werden, dass der preisgünstige Empfänger A07-N-11 in Kombination mit einer hochwertigen Antenne einen hochwertigen Empfänger hinsichtlich der Genauigkeit in den Nord- und Höhenkomponenten ersetzen kann. Eine Voraussetzung dafür liegt in der Bestimmung der GDV und deren Anbringen an die Codebeobachtungen. In diesem Zusammenhang sind weitere Untersuchungen zur Abhängigkeit der GDV vom Azimut des Satelliten und deren Auswirkungen auf die Lagegenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung erforderlich.

Genauigkeit der PPP-Lösung auf L1 (cm)	Korrekturwerte der GDV	GPS & GLONASS			GPS only		
		Ost	Nord	Höhe	Ost	Nord	Höhe
LEICA GRX1200 +GNSS	ohne	-1,7±0,6	-0,7±0,3	-3,2±1,5	-2,9±0,8	-1,6±0,5	-4,2±2,4
	mit	-1,7±0,6	-0,7±0,4	2,4±1,5	-2,9±0,8	-1,4±0,5	3,0±2,2
JAVAD TRE_G3T SIGM	ohne	-1,9±0,8	-0,5±0,4	-5,3±1,3	-2,2±1,1	-0,8±0,5	-6,4±1,8
	mit	-1,6±0,8	-0,7±0,4	1,1±1,1	-1,8±1,2	-1,1±0,5	1,1±1,7
A07-N-11	ohne	-7,4±1,3	-0,9±0,3	-5,6±1,7	-6,9±2,4	-2,4±0,6	-6,7±3,2
	mit	-6,8±1,2	-1,1±0,3	0,0±1,8	-6,8±2,3	-2,5±0,6	0,4±3,2

Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der Antenne TRM57971.00 für die drei Koordinatenkomponenten.

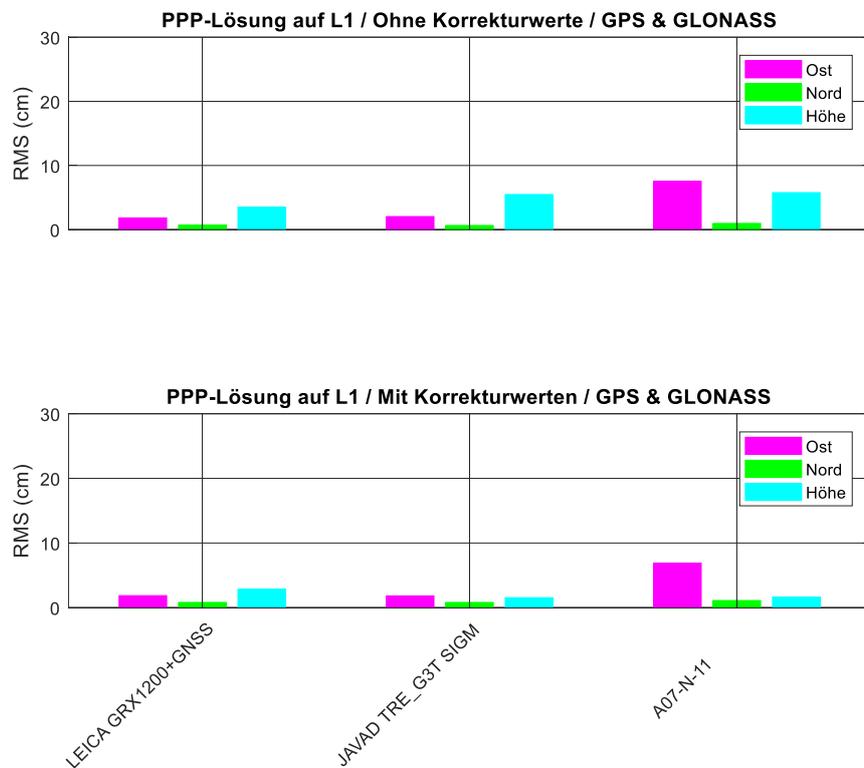


Abbildung 40: Positionsgenauigkeit (als RMS-Werte) aus der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung. Auswertung von kombinierten GPS/GLONASS Beobachtungen verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der hochwertigen Antenne TRM57971.00

## **6.3 L1-Einfrequenz-PPP-Lösung mit preisgünstigen GNSS-Empfängern**

Im Vergleich zu hochwertigen GNSS-Messgeräten bieten die Preisgünstigen verschiedene Vorteile. Neben den günstigen Kosten haben sie weniger Gewicht, einen geringeren Stromverbrauch und sind einfacher zu benutzen. Hochwertige Geräte erreichen eine bessere Positionsgenauigkeit und bieten verschiedene Möglichkeiten zur Positionsbestimmung. Jedoch sind für viele Anwendungen die Beschaffungskosten entscheidender als die Genauigkeit. Vor diesem Hintergrund liegt der Kernpunkt dieses Abschnittes in den Untersuchungen zur Genauigkeit einer absoluten Positionsbestimmung mittels preisgünstiger GNSS-Empfänger. Die meisten preisgünstigen Geräte messen nur die Beobachtungsgrößen der ersten Frequenz und bilden damit eine gute Möglichkeit zur absoluten Positionsbestimmung mittels L1-Einfrequenz-PPP.

Die Messungen im Datensatz 2 wurden mit zwei Empfängern (LEICA GRX1200+GNSS und NVS Alber. A07-N-11) gleichzeitig in Kombination mit einer preisgünstigen Antenne (TW3870) durchgeführt. Diese Kombination ermöglicht zum einen die Kalibrierung der GDV mittels der Daten des LEICA-Empfängers und zum anderen das Anbringen der Korrekturwerte an die Codebeobachtungen des A07-N-11. Die Ergebnisse der Positionsgenauigkeit werden am Ende dieses Abschnittes gezeigt.

### **6.3.1 Bestimmung der GDV der preisgünstigen Antenne TW3870**

Im Rahmen der Bestimmung der elevationsabhängigen GDV der Empfangsantennen im Abschnitt 4.4.2 wurden die Beobachtungen mehrerer Referenzstationen verwendet, die mit der gleichen Antenne ausgerüstet sind. Damit werden die Mehrwegeeffekte auf die Korrekturmodelle so gering wie möglich gehalten. Diese Möglichkeit steht bei der Untersuchung der Antenne TW3870 nicht zur Verfügung. Die Messungen wurden nur an einem bestimmten Ort durchgeführt. Trotzdem können die GDV mittels MP-Linear kombination modelliert werden. Eine vernachlässigbare Auswirkung von Mehrwegeeffekten auf die Korrekturwerte kann aber nicht garantiert werden.

Zur Bestimmung der GDV wurde hier die gleiche Strategie wie im Abschnitt 4.4.2 verwendet. Nach der Korrektur der Phasenbeobachtungen bezüglich der PZO und deren Variationen und dem Anbringen der satelliten-nadir-abhängigen GDV (siehe Anhang A) an die Codebeobachtungen wurden die GDV für die Codebeobachtungsgrößen C1 der GPS- und GLONASS-Signale nicht nur elevationsabhängig, sondern auch azimutabhängig ermittelt. Wegen der Azimutabhängigkeit der GDV-Korrekturwerte kann vermutlich die Lagegenauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung verbessert werden. Die Korrekturwerte für C1 Codebeobachtungen werden in der Abbildung 41 zusammengefasst. Die GLONASS Beobachtungen weisen größere Variationen als die GPS Beobachtungen auf. Die Azimutabhängigkeit der GDV ist deutlich in der Abbildung 41 zu sehen.

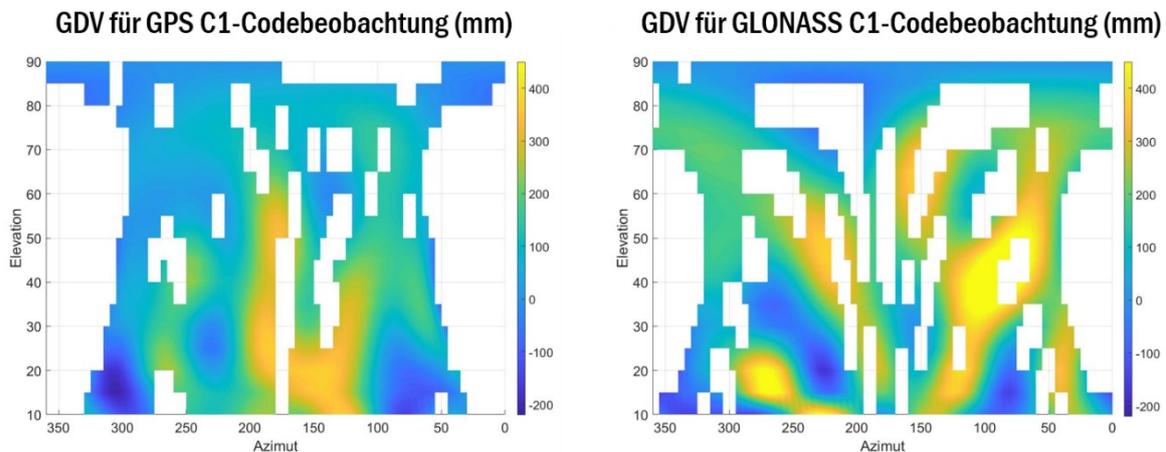


Abbildung 41: GDV Korrekturwerte für die Empfangsantenne TW3870

### 6.3.2 Erreichbare Positionsgenauigkeit

Die mit dem Empfänger LEICA GRX1200+GNSS gemessenen Daten lassen sich nicht nur für die Bestimmung der GDV, sondern auch zur Berechnung einer Soll-Lösung durch eine Zweifrequenz-PPP-Lösung verwenden. Die Standardabweichungen dieser Tageslösungen für den ganzen Untersuchungszeitraum von 35 Tagen lagen bei 2,5, 3,5 und 5,1 mm für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe. Weiterhin wurde die L1-Einfrequenz-PPP-Lösung anhand der durch die beiden Empfänger aufgezeichneten Beobachtungen berechnet. Das Auswerteschema von Abbildung 26 wurde hier eingesetzt.

Die RMS-Werte für die Abweichungen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung zur Soll-Lösung wurden für die drei Komponenten Ost, Nord und Höhe berechnet und in der Abbildung 42 dargestellt. Die Tabelle 22 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung und der Solllösung. Es handelt sich hier um die Auswertung mit und ohne GLONASS-Beobachtungen. Obwohl die Verwendung der GLONASS-Beobachtungen einen schlechten Einfluss auf die Ost-Genauigkeit bei beiden Empfängern hat, zeigt die Nord-Komponente eine geringere bessere Genauigkeit bei der kombinierten Auswertung der GPS/GLONASS-Beobachtungen (siehe Tabelle 22). Diese Aussage trifft auf alle anderen hochwertigen Antennen nicht zu, die immer eine geringfügige Verbesserung der beiden Lagekomponenten aufwiesen. Dieser Umstand kann mit der Empfindlichkeit der Antenne von Tallysman gegen azimutabhängige Fehlerquellen, z.B. die azimut- und elevationsabhängige Codemehrwegeffekte und GDV begründet werden. Die Genauigkeit der Nordkomponente der preisgünstigen Antenne ist 8 Mal schlechter als bei den hochwertigen Antennen.

Wie schon bei den hochwertigen Antennen beschrieben wurde (siehe Abschnitt 5.4.2), haben die GDV auch einen schlechten Einfluss auf die Höhengenaugkeit der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung bei der Antenne TW3870. Durch die Bestimmung dieser Fehler als azimut-elevationsabhängige Korrekturwerte und Anbringen an die Codebeobachtungen konnte die Höhengenaugkeit um 6 cm beim LEICA Empfänger und um 2,2 cm beim A07-N-11 verbessert werden (Abbildung 42). Zusätzlich zeigt die Nordkomponente eine Verbesserung in der Genauigkeit von mehr als 7 cm. Das heißt, egal ob eine hochwertige oder eine preisgünstige Antenne verwendet wird, die Korrekturwerte bezüglich der GDV sind unverzichtbar für eine hohe Genauigkeit der Einfrequenz-PPP-Lösung. Außerdem hat die Bestimmung von azimutabhängigen GDV für diese preisgünstige Antenne TW3870 von Tallysman eine besondere Bedeutung für die Verbesserung der Genauigkeit in der Nordkomponente.

Genauigkeit der PPP-Lösung auf L1 (cm)	Korrekturwerte der GDV	GPS & GLONASS			GPS only		
		Ost	Nord	Höhe	Ost	Nord	Höhe
LEICA GRX1200 +GNSS	ohne	-1,1±2,9	7,7±1,7	9,8±4,0	-0,4±1,4	9,2±0,9	10,6±2,6
	mit	-0,2±2,9	1,4±2,3	1,5±4,1	0,1±1,4	0,4±0,9	3,3±2,5
NVS Al-ber. A07-N-11	ohne	-5,3±2,6	7,4±1,8	6,7±4,8	-4,1±2,1	7,8±1,3	6,3±3,9
	mit	-4,4±2,6	1,0±2,6	-0,8±4,8	-3,6±2,1	-1,0±1,4	0,2±3,9

Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der Antenne TW3870 bezüglich der drei Koordinatenkomponenten.

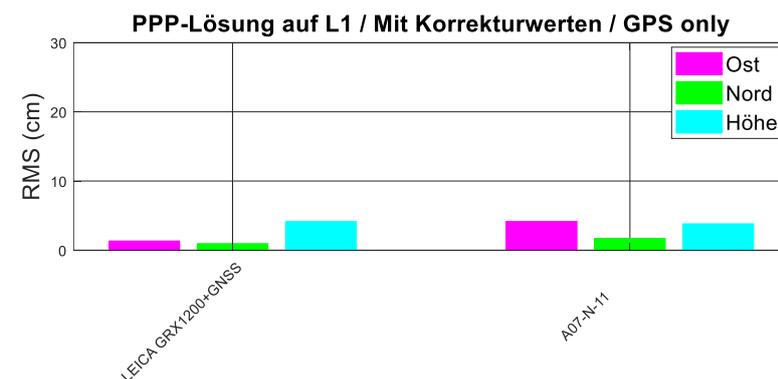
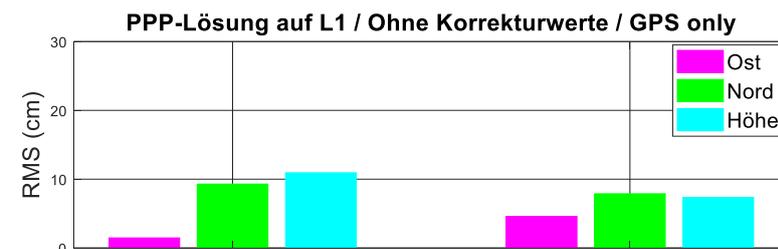
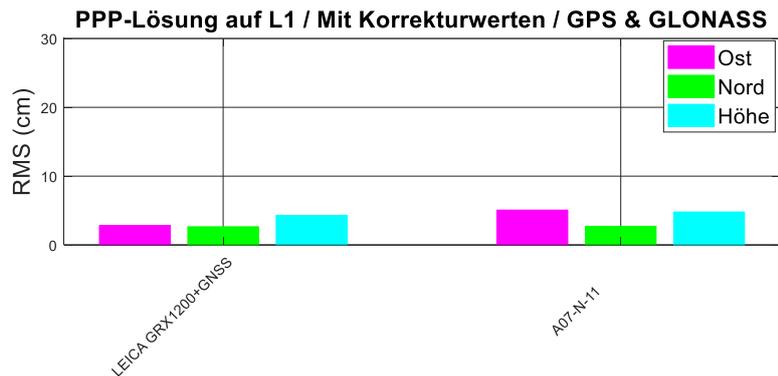
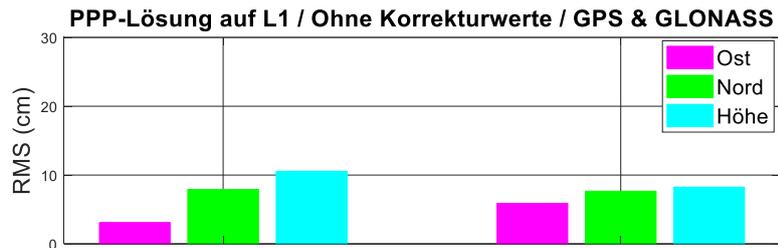


Abbildung 42: Positionsgenauigkeit (als RMS-Werte) aus der L1-Einfrequenz-PPP-Lösung. Auswertung von GPS allein und kombinierten GPS/GLONASS Beobachtungen verschiedener Empfängertypen bei Verwendung der preisgünstigen Antenne TW3870

Die absolute Positionsbestimmung mittels Einfrequenz-PPP-Lösung erzielt eine sehr gute Genauigkeit bei der Verwendung von hochwertigen GNSS-Messgeräten. Mit den RMS-Werten für Ost, Nord und Höhe von 1,7, 1,1 und 2,8 cm (siehe Tabelle 20) erreicht diese Lösung ein hohes Genauigkeitsniveau

von wenigen cm. Die Bestimmung von GDV kann als eine Voraussetzung für diese Höhengenaugkeit angesehen werden. Bei preisgünstigen GNSS-Empfängern kann in allen Koordinatenkomponenten eine Genauigkeit von einigen cm bis 1 dm erwartet werden. Nach Korrektur der GDV lagen die Genauigkeiten in Ost, Nord und Höhe bei der Kombination von preisgünstigen Empfänger und preisgünstiger Antenne bei 4,1, 1,7 und 3,8 cm (Abbildung 42). In diesem Fall hat die Lösung mit preisgünstigen Geräten ein hohes Genauigkeitsniveau und kann mit der Lösung bei Verwendung von hochwertigen Geräten innerhalb von 1-2 cm verglichen werden. Die Lagegenauigkeit kann durch die Kombination mit einem hochwertigen Empfänger bis auf 1,3 cm für die Ostkomponente und 1,0 cm für die Nordkomponente (Abbildung 42) gesteigert werden.



## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

*Precise Point Positioning* (PPP) ermöglicht eine absolute Positionsbestimmung mit Zentimetergenauigkeit. Dabei sind kontinuierliche Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen über einen längeren Zeitraum, präzise Satellitenorbits und -uhrkorrekturen sowie Korrekturmodelle für weitere Messabweichungen die Voraussetzung für höchste Genauigkeit. Die Voraussetzung für die Bereitstellung von Code- und Phasenbeobachtungen auf zwei Frequenzen sind eine hochwertige Empfangsantenne in Kombination mit einem hochwertigen Empfänger. Die Kosten dieser Ausrüstung betragen viele Tausend Euro und liegen daher für viele Anwender nicht im Bereich des Möglichen.

Aus ökonomischer Sicht gewinnt heutzutage die Verwendung kostengünstiger GNSS-Messgeräte an Bedeutung. Diese zeichnen die Code- und Phasenbeobachtungen nur auf der ersten Frequenz (L1) auf. Deswegen ist die Eliminierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen durch die ionosphären-freie Linearkombination beider Frequenzen nicht möglich. Obwohl große Fortschritte zur Steigerung der Positionsgenauigkeit bei differenziellen Auswerteverfahren von L1-Beobachtungen erzielt wurden, hat die absolute Positionsbestimmung unter Verwendung dieser Beobachtungen eine geringe Genauigkeit.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Genauigkeitsanalyse von 24-stündigen Einfrequenz-PPP-Lösungen, die Modellierung der GDV zur Verbesserung der Genauigkeit und die Umsetzung dieser Technik zur Auswertung von Beobachtungen preisgünstiger GNSS-Empfänger.

Unter Nutzung der MP-Linearkombination wurden die GDV bestimmt. Es wurden die Daten verschiedener gemischter Netze des IGS, NGS und EPN für den Zeitraum der Woche 20-26/2016 ausgewertet. Durch diese MP-Linearkombination erfolgt eine Kalibrierung der Codebeobachtungen auf einer Frequenz in Bezug auf die Zweifrequenzphasenbeobachtungen. Aus diesem Grund sind alle drei Beobachtungen an einen gemeinsamen Referenzpunkt der Sendeantenne sowie der Empfangsantenne anzubringen. Außerdem sind die GDV der jeweiligen Sende- und Empfangsantennen voneinander nicht trennbar. Um eine Trennung zwischen beiden Antennen zu erreichen, wurden drei Empfangsantennen vom Typ Dorne-Margolin zur Definition eines Referenzniveaus ausgewählt. Dies geschah unter der Annahme, dass diese drei Antennen ähnliche Eigenschaften bezüglich der GDV besitzen. Diese Annahme wurde überprüft und bestätigt. Im zweiten Schritt, nach der Kalibrierung der Satellitenantennen durch die zuvor berechneten Modelle, ließen sich die GDV für zwölf hochwertige Empfangsantennen als elevationsabhängige Werte und für eine preisgünstige Antenne als azimuth- und elevationsabhängige Werte bestimmen. Es wurden Korrekturwerte für die C1- und die P2-Codebeobachtungen berechnet. Anschließend wurde die zeitliche Stabilität dieser Modellierung über ein Jahr untersucht. Es folgt, dass die erzeugten Korrekturwerte unabhängig von der Zeit sind und ohne zeitliche Beschränkung zur Korrektur von Codebeobachtungen verwendet werden können.

Weiterhin wurde die Positionsgenauigkeit der 24-Stunden Einfrequenz-PPP-Lösung untersucht. Zum Vergleich wurde die Einfrequenz-PPP-Lösung einmal auf der ersten Frequenz (L1) und einmal auf der zweiten Frequenz (L2) nur mit GPS und kombiniert mit GPS und GLONASS berechnet. Ohne Anwendung der Code-Korrekturen weisen beide L1- und L2-Lösungen eine sehr gute Genauigkeit in der Lage auf. Dabei ist die Genauigkeit der Ostkomponente schlechter als die der Nordkomponente. Dies kann durch die ungünstigere Beeinflussung der geschätzten Mehrdeutigkeiten auf die Ost- im Vergleich zur Nordkomponente begründet werden. Die kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung bringt nur eine geringe Verbesserung in der Genauigkeit bezüglich der GPS-Auswertung. In der Höhe zeigt die Einfrequenz-PPP-Lösung eine mindestens 5-mal schlechtere Genauigkeit als die Nordkomponente. Außerdem ist die Höhengenaugkeit vom Antennentyp abhängig. Deutliche Unterschiede in der Genauigkeit lassen sich für sehr ähnliche Antennentypen, z.B. die zwei Versionen R4 und R3 der Antenne LEIAR25, feststellen. Die Ursache dafür sind die GDV und ihre Abhängigkeit von der Elevation und dem Antennentyp. Das Anbringen der GDV erhöht die Höhengenaugkeit um mehr als das Doppelte. Anschließend ist keine signifikante Abhängigkeit der Genauigkeit vom Antennentyp mehr nachweisbar.

Die Positionsgenauigkeit der PPP-Lösung mit preisgünstigen GNSS-Messgeräten wurde untersucht. Dabei kam die preisgünstige Empfangsantenne TW3870 von Tallysman und der preisgünstige Empfänger A07-N-11 der Firma Alberding GmbH zum Einsatz. Die Verwendung der beiden preiswerten Komponenten, sowie die Kombination mit anderen hochwertigen GNSS-Geräten wurde getestet. Die Auswertung der durch die preisgünstige Ausrüstung gewonnenen Beobachtungen ergab eine gute Genauigkeit. Die RMS-Werte der Abweichungen zur Solllösung lagen unter einem halben Dezimeter für alle drei Koordinatenkomponenten. Das Anbringen der Code-Korrekturen steigerte die Höhengenaugkeit um einen Faktor von 2 und mindestens 4 für die Nordkomponente und liegt damit auf fast demselben Genauigkeitsniveau wie bei Verwendung von hochwertigen GNSS-Messgeräten.

Die Einfrequenz-PPP-Lösung zeigt bei Verwendung einiger Empfangsantennen wie z.B. der LEIAT504GG oder der JAV\_RINGANT\_G3T eine schlechtere Genauigkeit in der Lage im Vergleich zu anderen Empfangsantennen. Eine eventuelle Azimutabhängigkeit der GDV wurde für die preisgünstige Antenne TW3870 bestätigt. Gelingt es zusätzlich zur Abhängigkeit der GDV von der Elevation auch eine Azimutabhängigkeit für die hochwertige Antenne zu modellieren, so wäre die Bestimmung der GDV als azimut-elevationsabhängige Werte bestimmt lohnenswert.

Im Rahmen der Modellierung der GDV wurde zur Vereinfachung der Arbeit der Empfängertyp unberücksichtigt gelassen. Die Korrekturen sind daher nur antennenspezifische Werte. Beim Vergleich zweier hochwertiger Empfängertypen in Kombination mit einer Empfangsantenne wurden bei der Einfrequenz-PPP-Lösung unterschiedliche Ergebnisse für die Höhe festgestellt, obwohl die Messungen gleichzeitig und mit derselben hochwertigen Antenne und folglich unter denselben Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde durch andere Studien die Auswirkung des Empfängertyps auf die GDV bestätigt (Wübbena et al., 2008). Zukünftige Untersuchungen zur Modellierung der

GDV sollten sich mit der Berücksichtigung des Empfängertyps beschäftigen. Somit könnten die GDV nicht nur als antennenspezifische, sondern als antennen- und empfängerspezifische Korrekturwerte modelliert werden.



# Literaturverzeichnis

- Adekunle, I. (2014). An Assessment of Ionospheric Error Mitigation Techniques for GNSS Estimation in the Low Equatorial African Region. *Positioning*, 2014, 5, 27-35. doi: 10.4236/pos.2014.51004.
- Bakker, P. & Tiberius, C. (2017). Real-time multi-GNSS single-frequency precise point positioning, *GPS Solutions* (2017) 21:1791–1803, DOI 10.1007/s10291-017-0653-2
- Banville, S., Santerre, R., Cocard, M. & Langley, R. (2008). Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution. *Proc. ION NTM 2008*, S. 711-719.
- Bar-Sever, Y., Davis, J., Dach, R., Flohrer, C., Herring, T., Ray, J., Thalle, D. (2009). Impact of SLR tracking on GPS. *ILRS Workshop on SLR Tracking of GNSS Constellations*.
- Bassiri, S. & Hajj, G. (1993). Higher-order ionospheric effects on the GPS observables and means of modeling them. *Manuscr Geod* 18(6), S. 280-289.
- Bauer, M. (2011). *Vermessung und Ortung mit Satelliten, Globale Navigationssatellitensysteme(GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme (6. Auf.)*. Wichmann Verlag, Berlin.
- Beer, S. & Wanninger, L. (2018). Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations, *Sensors* 2018, 18, 1744, doi:10.3390/s18061744.
- Beran, T. (2008). Single-frequency, single-receiver terrestrial and spaceborne point positioning, University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, NO. 257.
- Bhatta, B. (2011). *Global Navigation Satellite System Insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and others*. Netherlands: BS Publications.
- Bock, H., Jäggi, A., Dach, R., Schaer, S. & Beutler, G. (2009). GPS single-frequency orbit determination for low Earth orbiting satellites. *Advances in Space Research* 43, S. 783-791. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.12.003>.
- Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P. & Schuh, H. (2006a). Global Mapping Funktion (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Böhm, J., Werl, B. & 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*, doi:10.1029/2005JB003629.

- Böhm, J., Heinkelmann, R. & Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *J Geod* (2007) 81:679-683, doi: 10.1007/s00190-007-0135-3.
- Cai, C., Gong, Y., Gao, Y., & Kuang, C. (2017). An Approach to Speed up Single-Frequency PPP Convergence with Quad-Constellation GNSS and GIM. *Sensors* 2017, 17, 1302; doi:10.3390/s17061302.
- Campbell, J., Görres, B., Siemes, M., Wirsch, J. & Becker, M. (2004). Zur Genauigkeit der GPS-Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren. *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 111, S. 2-11, 2004.
- Chen, K. & Gao, Y. (2005). Real-time precise point positioning using single frequency data. *ION GNSS* 2005. S. 1514-1423.
- Choy, S. (2009). An investigation into the accuracy of single frequency precise point positioning (PPP). RMIT University. <https://researchbank.rmit.edu.au/view/rmit:6635>.
- Dach, R. (2017). International GNSS Service. Annual Report 2017. <https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/TechniqueCentres/IGS/igs.html>.
- Dach, R., Schaer, S., Bock, H., Lutz, S. & Beutler, G. (2010). CODE's New Combined GPS/GLONASS Clock Product. Newcastle upon Tyne, England: IGS Workshop 2010.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P. & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. University of Bern, Bern Open Publishing. doi:10.7892/boris.72297.
- Dach, R., Schaer, S. & Meindl, M. (2012). Comparison of GPS/GLONASS Clock Solutions. Bern, Switzerland: IGS-Workshop on GNSS-Biases. [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\\_1.4.4.pdf](http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.4.4.pdf).
- Dach, R., Schmid, R., Schmitz, M., Thaller, D., Schaer, S., Lutz, S., Beutler, G. (2010). Improved antenna phase center models for GLONASS. *GPS Solut* (2011) 15:49–65, doi: 10.1007/s10291-010-0169-5).
- Dow, J., Neilan, R. & Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geod*, 191–198.
- El-Arini, M., Conker, R., O'Laughlin, D. & Hegarty, C. (2010). Effect of SVN49 (PRN01) on Position and Time Accuracy for Single- and Dual-Frequency Users. *ION GNSS* 2010, S. 915-923.
- Ericson, S., Shallberg, K. & Edgar, C. (2010). Characterization and Simulation of SVN49 (PRN01) Elevation Dependent Measurement Biases. *ION ITM* 2010, S. 963 - 974.

- Georgiadou, Y. & Kleusberg, A. (1988). On carrier Signal Multipath Effects in relative GPS Positioning. *Manuscripta Geodaetica*, 13:172-179.
- Gold, K., Bertiger, W., Wu, S., Yunck, T., Muellerschoen, R. & Born, G. (1994). GPS Orbit Determination for the Extreme Ultraviolet Explorer. *ION GPS 94*, S. 1191–1199, doi:10.1002/j.2161-4296.1994.tb01884.x.
- GOV. (2019). Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Abgerufen im Juni 2019 von <http://www.gps.gov/>.
- Görres, B. (2010). Vom globalen Bezugssystem bis zur Umsetzung für die Praxis. DVW-Schriftenreihe Bd. 63, S. 39-57, Weißner-Verlag Augsburg.
- GPS.GOV. (2. June 1995). GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE SIGNAL SPECIFICATION. 2.Auf. Specification, GPS SPS Signal, <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>.
- Haines, B., Bar-Sever, Y., Bertiger, W., Desai, S. & Weiss, J. (2010). New GRACE-Based Estimates of the GPS Satellite Antenna Phase- and Group-Delay Variations. IGS Workshop 2010.
- Haines, B., Bar-Sever, Y., Bertiger, W., Desai, S., Harvey, N., Sibois, A. & Weiss, J. (2015). Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System. *JGR*, 2015, S. 5911-5939, doi:10.1002/2015JB012225.
- Haines, B., Bertiger, W., Desai, S., Harvey, N., Sibois, A. & Weiss, J. (2012). Characterizing the GPS Satellite Antenna Phase- and Group-Delay Variations Using Data from Low-Earth Orbiters: Latest Results. IGS Workshop 2012.
- Håkansson, M. (2018): Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet. *GPS Solutions* (2019) 23:21. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0818-7>.
- Hauschild, A., Montenbruck, O., Thoelert, S., Erker, S., Meurer, M. & Ashjaee, J. (2012). A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: receiver tracking and IQ constellation. *GPS Solutions*, January 2012, Volume 16, Issue 1, pp 19–28, doi:10.1007/s10291-011-0203-2.
- Herring, T. (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic. netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Number 36, S. 157-164.
- Heßelbarth, A. (2011). Statische und kinematische GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). Deutsche geodätische Kommission, C- 667. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck.

- Heßelbarth, A. & Wanninger, L. (2008). Short-term Stability of GNSS Satellite Clocks and its Effects on Precise Point Positioning. ION GNSS 2008, Savannah, GA, 1855-1863.
- Hilla, S. (2010). The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c). Abgerufen im Oktober 2017 von <https://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3c.txt>.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2008). GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more. SpringerWienNewYork.
- Hopfield, H., (1971). tropospheric range error at the zenith. Technical Memorandum, TG 1168, AD 749669. National technical information service. <https://pdfs.semanticscholar.org/494b/fa877ce2ff138ff2a76959b700fceb26d2d2.pdf>.
- IAC. (2019). Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Korolyov, Russia. Abgerufen im Juni 2019 von <https://www.glonass-iac.ru/en/>.
- IGS. (2019). IGS. Abgerufen im Juni 2019 von <http://www.igs.org/products>.
- JunPin, C., YiZe, Z., XuHua, Z., Xiao, P., JieXian, W. & Bin, W. (2013). GNSS clock corrections densification at SHAO: from 5 min to 30 s. Science China Physics, Mechaanics & Astronomy. Vol. 57, S. 166-175, doi: 10.1007/s11433-013-5181-7.
- Karutin, S. (2015). GLONASS Program Update. Proceedings of ION GNSS 2015, S. 1207 - 1221.
- Kersten , T., Schön, S. & Weinbach, U. (2012). On the Impact of Group Delay Variations on GNSS Time and Frequency Transfer. Proceedings on 26th European Frequency and Time Forum (EFTF). S. 514-521, doi:10.1109/EFTF.2012.6502435.
- Klobuchar, J. (1987). Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. (AES-23, Hrsg.) IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, S. 325 - 331, doi:10.1109/TAES.1987.310829.
- Kouba, J. (2003). A guide to using international GPS service (IGS) products. Feb. 2003. <ftp://igs-data.ign.fr/pub/igs/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>.
- Kouba, J. (2009). A guide to using international GNSS service (IGS) products. Mai 2009. <ftp://igs-data.ign.fr/pub/igs/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kouba, J. (2015). A guide to using international GNSS service (IGS) products. Sep. 2015. [ftp://igs-data.ign.fr/pub/igs/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21\\_cor.pdf](ftp://igs-data.ign.fr/pub/igs/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf).

- Kouba, J., Lahaye, F. & Tetreault, P. (2017). Precise Point Positioning, Part E | 25 of Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing AG 2017, doi:10.1007/978-3-319-42928-1.
- LAAFB. (2012a). GPS IIR/IIR-M. Los Angeles Air Force Base. Von <http://www.losangeles.af.mil/About-Us/Fact-Sheets> abgerufen im Oktober 2017.
- LAAFB. (2012b). GPS IIF. Los Angeles Air Force Base. Von <http://www.losangeles.af.mil/About-Us/Fact-Sheets> abgerufen im Oktober 2017.
- Langley, R. (1998). RTK GPS. GPS World September 1998. S. 70-76.
- Le, A. Q. & Tiberius, C. (2007). Single-frequency precise point positioning with optimal filtering. GPS Solutions, 11(1), 61-69.
- Leick, A. (2004). GPS Satellite Surveying (3. Auf.). USA: Wiley.
- Mader, G. & Czopek, F. (2002). The Block IIA Satellite: Calibrating Antenna Phase Centers. GPS World 13(5):40–46.
- Montenbruck, O. (2003). Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements. Aerospace Science and Technology 7 , 396–405.
- Montenbruck, O., Schmid, R., Mercier, F., Steigenberger, P., Noll, C., Fatkulin, R., Kogure, S. & Ganeshan, A.S. (2015). GNSS satellite geometry and attitude models. Advances in Space Research 56 (2015), S. 1015–1029, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.019>.
- Möser, M., Hoffmeister, H., Müller, G., Staiger, R., Schlemmer, H. & Wanninger, L. (2012). Handbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen, 4.Auflage. 2012 Weichmann, Berlin und Offenbach.
- Muellerschoen, R., Iijima, B., Meyer, R. & Bar-Sever, Y. (2004). Real-Time Point-Positioning Performance Evaluation of Single-Frequency Receivers Using NASA's Global Differential GPS System. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, S. 1872 - 1880.
- Murphy, T., Geren, P. & Pankaskie, T. (2007). GPS antenna group delay variation induced errors in a GNSS based precision approach and landing systems. Proc. ION GNSS 2007, S. 2974 - 2989.
- Niell, A. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. JGR. 101, b2, 3227-3246.
- Niemeier, W. (2008). Ausgleichsrechnung. Braunschweig: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Øvstedal, O. (2002). Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. GPS Solutions, 5(4), 33-44.

- Parkinson, B. & Spilker Jr., J. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications Volume 2* (Bde. DC 20024-2518). I. 3. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Hrsg. Washington.
- Petit, G. & Luzum, B. (2010). *IERS Conventions (2010)*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main 2010.
- Ray, J. & Gurtner, W. (1999). *RINEX Extensions to Handle Clock Information*. [ftp://ftp.aiub.unibe.ch/rinex/rinex\\_clock.txt](ftp://ftp.aiub.unibe.ch/rinex/rinex_clock.txt).
- Reußner, N. (2015). *Die GLONASS-Mehrdeutigkeitslösung beim Precise Point Positioning (PPP)*. Dissertation an der TU Dresden, URN Qucosa: urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-202164.
- Rocken, C., Meertens, C., Stephens, B., Braun, J., VanHove, T., Perry, S., Ruud, O., McCallum, M. & Richardson, J. (1995). *UNAVCO Academic Research Infrastructure (ARI) Receiver and Antenna Test Report*. [https://www.unavco.org/projects/project-support/development-testing/publications/ari\\_test.pdf](https://www.unavco.org/projects/project-support/development-testing/publications/ari_test.pdf).
- Rothacher, M. & Schmid, R. (2010). *ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4*, <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>.
- Russian Institute of Space Device Engineering. (2008). *GLONASS ICD Interface Control Document, 5.1 Auflage*. [http://www.spacecorp.ru/en/directions/glonass/control\\_document/](http://www.spacecorp.ru/en/directions/glonass/control_document/).
- Saastamoinen, J. (1973). *Contributions to the theory of atmospheric refraction, part II*. *Bulletin Géodésique*, 107:13–34.
- Schaer, S. (1999). *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*. Verlag: Schweizerische Geodätische Kommission, 1999, serien: Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, 59.
- Schmid, R. (2010). *How to Use IGS Antenna Phase Center Corrections*, [http://acc.igs.org/antennas/igs-pcvs\\_gpeworld10.pdf](http://acc.igs.org/antennas/igs-pcvs_gpeworld10.pdf).
- Schmid, R. & Rothacher, M. (2003). *Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites*. *Journal of Geodesy*, 77: 440–446, doi:10.1007/s00190-003-0339-0.
- Schmid, R., Dach, R., Collilieux, X., Jäggi, A., Schmitz, M. & Dilssner, F. (2015). *Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements*. *J Geod* (2016) 90:343–364, doi:10.1007/s00190-015-0876-3.

- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M. & Rothacher, M. (2007). Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *J Geod* (2007) 81:781-798.
- Schmolke, A., Wanninger, L. & Frevert, V. (2015). Erste GNSS-Antennenkalibrierungen im Feldverfahren auf neuen Signalfrequenzen. *zfv*. doi:10.12902/zfv-0083-2015.
- Schönemann, E., Becker, M. & Springer, T. (2011). A new Approach for GNSS Analysis in a Multi-GNSS and Multi-Signal Environment. *Journal of Geodetic Science*, Band 1, Heft 3, doi: <https://doi.org/10.2478/v10156-010-0023-2>.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy* (2. Ausg.). New York: Walter de Gruyter Berlin.
- Shi, C., Gu, S., Lou, Y. & Ge, M. (2012). An improved approach to model ionospheric delays for single-frequency Precise Point Positioning. *Advances in Space Research*, Vol. 49, Issue 12, S. 1698-1708.
- Smolyakov, I., & Langley, R. (2018). Adaptive Algorithm for Low-cost Single-frequency Positioning in Urban Environments: Design and Performance Analysis, *ION 2018*, S. 142-153.
- Springer, T. & Dilssner, F. (2009). SVN49 and other GPS anomalies. *Inside GNSS* 4:32–36.
- Stansell, T. & Lack, J. (2009). SVN-49 signal anomaly. 49th meeting of the Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC), Savannah, Georgia, 21-22 Sep. 2009. <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2009/>.
- Stempfhuber, W. & Alberding, J. (2017). *Leistungsfähigkeit von Einfrequenz-GNSS-Empfänger*. AVN 4/2017. Wichmann-Verlag, ISBN 978-3-87907-554-6.
- Sumaya, H. (2013). *Vergleich der Qualität der broadcast-Ephemeridendaten verschiedener GNSS*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Technische Universität Dresden.
- Takac, F. & Zelzer, O. (2008). The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRS. *Proc. ION GNSS 2008*, S. 348–355.
- Verhagen, S. & Teunissen, P. (2017). Least-Squares Estimation and Kalman Filtering, 22. Chapter of *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing AG 2017, doi:10.1007/978-3-319-42928-1.
- Wang, C., Shao, Y., Dai, L. & Eslinger, D. (2009). A Low-Cost Precise Navigation Solution using Single-Frequency GPS Receiver. *ION ITM 2009*, S. 673 - 681.

- Wanninger, L. (2000). Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. München 2000: Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 508.
- Wanninger, L. (2002). Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. 127. Jg. 1/2002 zfv, S. 51-58.
- Wanninger, L. (2006). Netz-RTK. „GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen“, 66. DVW-Seminar, 49/2006, S. 59-69.
- Wanninger, L. (2016). WaSoft User's Guide. Dresden.
- Wanninger, L. & May, M. (2000). Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. Proc. ION GPS 2000, Salt Lake City UT, 132-144.
- Wanninger, L., Rost, C., Hartlieb, G. & Köhr, M. (2006). Zur Problematik des Antennewechsels auf GNSS-Referenzstation. 131. Jg 4/2006 zfv, S. 171-175.
- Wanninger, L., Sumaya, H. & Beer, S. (2015). Nadir angle and elevation angle dependent GPS code delay variations. IGS Workshop on GNSS Biases 2015, Berne, [http://www.biasws2015.unibe.ch/pdf/bws15\\_5.3.2.pdf](http://www.biasws2015.unibe.ch/pdf/bws15_5.3.2.pdf).
- Wanninger, L., Sumaya, H. & Beer, S. (2017). Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. J Geod. doi:10.1007/s00190-017-1012-3.
- Warren, D. & Raquet, J. (2003). Broadcast VS precise GPS ephemerides: a historical perspective. GPS Solution, Vol. 7, Issue 3, S. 151-156.
- Whitney, S. (2015). Global Positioning Systems Status. Proceedings of ION GNSS 2015, S. 1193 - 1206.
- Witchayangkoon, B. (2000). Elements of GPS precise point positioning. PhD-Thesis, the University of Maine.
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, G. & Lichten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. manuscripta geodaetica, 18, S. 91-98.
- Wübbena, G., Schmitz, M. & Propp, M. (2008). Antenna Group Delay Calibration with the Geo++ Robot. IGS Analysis Workshop 2008.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G. & Schumann, C. (2006). Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. IGS Workshop 2006, Darmstadt, Germany.

- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Seeber, G. & Völksen, C. (1997). A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. *Journal of The Institute of Navigation* Vol. 44, No. 2, 247-255, doi:10.1002/j.2161-4296.1997.tb02346.x.
- Xu, G. & Xu, Y. (2016). *GPS Theory, Algorithms and Applications (Third Edition ed.)*. Springer Verlag, Berlin.
- Yunck, T. (1993). Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. *Geophysical Monograph* 73, doi: 10.1029/GM073p0001.
- Zumberge, J., Heftin, M., Jefferson, D., Watkins, M. & Webb, F. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *JGR* 1997, Vol. 102, S. 5005-5017.



## Anhang A-1: Korrekturwerte für die GDV der GPS-Satelliten (in mm)

SVN	PRN	Block	Signal	Nadir-Winkel [deg]														
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
63	1	IIF	C1	0	0	-22	-30	-28	-26	-25	-25	-29	-35	-42	-49	-59	-80	-128
			P2	0	0	21	18	25	22	23	19	16	16	11	10	6	-4	-9
61	2	IIR-B	C1	0	-9	-4	16	42	63	77	91	99	102	104	100	85	71	48
			P2	0	23	29	24	10	-8	-24	-40	-49	-49	-44	-31	-15	-21	-31
69	3	IIF	C1	0	0	12	19	15	17	15	11	7	0	-9	-16	-21	-35	-96
			P2	0	0	-2	11	10	12	13	15	11	4	2	-2	-21	-39	-61
50	5	IIR-M	C1	0	-9	-17	-9	-6	0	-2	-8	-11	-15	-21	-26	-38	-70	-125
			P2	0	-17	-11	5	8	18	20	19	18	15	18	35	54	59	69
67	6	IIF	C1	0	35	60	72	75	86	84	84	81	76	66	59	53	34	-2
			P2	0	6	7	7	11	18	26	29	27	25	29	28	19	7	-10
48	7	IIR-M	C1	0	-30	-39	-24	-20	-12	-9	-8	-12	-20	-29	-39	-48	-73	-137
			P2	0	-9	-14	-9	-15	-15	-19	-12	-4	2	7	14	23	30	15
72	8	IIF	C1	0	0	4	6	8	9	11	10	9	9	7	4	-7	-42	-67
			P2	0	0	-6	-6	-7	-8	-7	-11	-15	-19	-21	-21	-15	-17	-38
68	9	IIF	C1	0	-17	-16	-11	-11	-14	-14	-16	-22	-31	-42	-53	-63	-97	-149
			P2	0	3	6	1	-9	-20	-28	-34	-37	-42	-44	-60	-69	-68	-49
73	10	IIF	C1	0	-25	-43	-57	-62	-68	-75	-78	-79	-83	-91	-104	-118	-158	-224
			P2	0	18	33	38	43	41	36	30	23	16	9	-2	-11	-19	-17
46	11	IIR-A	C1	0	-22	10	12	13	11	8	8	6	7	7	0	-12	-37	-65
			P2	0	-8	-24	-34	-50	-60	-78	-90	-	-	-106	-94	-86	-85	-110
58	12	IIR-M	C1	0	-27	-26	-11	6	27	45	61	72	76	73	67	62	51	9
			P2	0	-8	-3	-4	-5	-8	-9	-14	-16	-14	-9	-6	8	9	1
43	13	IIR-A	C1	0	1	1	26	62	90	123	155	174	182	180	173	167	146	91
			P2	0	-17	-37	-49	-55	-52	-57	-67	-67	-61	-56	-47	-32	-36	-65
41	14	IIR-A	C1	0	14	32	59	91	115	137	155	158	155	147	141	133	114	37
			P2	0	-8	-9	-10	-16	-23	-24	-22	-18	-13	-2	9	15	12	19
55	15	IIR-M	C1	0	39	48	83	133	180	215	229	230	222	204	178	151	118	76
			P2	0	19	27	24	28	19	16	15	7	9	22	34	50	58	52
56	16	IIR-A	C1	0	12	8	19	36	59	71	77	70	62	50	34	18	3	-40
			P2	0	-7	-16	-19	-27	-31	-36	-31	-32	-36	-20	1	19	32	30
53	17	IIR-M	C1	0	-4	-15	-20	-22	-29	-45	-60	-77	-92	-106	-122	-135	-161	-206
			P2	0	-3	12	5	-8	-16	-22	-33	-43	-44	-39	-27	-8	4	-23
54	18	IIR-A	C1	0	13	-7	-21	-28	-38	-43	-51	-61	-69	-74	-85	-99	-125	-184
			P2	0	6	6	4	9	22	33	45	61	76	95	109	112	104	104
59	19	IIR-B	C1	0	30	49	62	89	117	143	166	173	175	166	148	127	106	54
			P2	0	-4	-24	-35	-28	-28	-29	-35	-36	-24	-16	-8	1	22	31
51	20	IIR-A	C1	0	7	16	17	35	42	45	47	43	40	33	29	16	-12	-89

			<b>P2</b>	0	-14	-45	-62	-63	-68	-77	-84	-81	-69	-53	-34	-19	-5	25
<b>45</b>	<b>21</b>	<b>IIR-A</b>	<b>C1</b>	0	6	14	26	23	25	25	17	6	-3	-15	-32	-52	-96	-163
			<b>P2</b>	0	-12	-35	-45	-57	-70	-80	-90	-95	-93	-86	-77	-69	-71	-99
<b>47</b>	<b>22</b>	<b>IIR-B</b>	<b>C1</b>	0	0	-5	-2	-8	-4	3	9	15	19	23	22	15	-17	-89
			<b>P2</b>	0	3	-8	-14	-22	-29	-33	-32	-26	-15	2	14	21	23	-10
<b>60</b>	<b>23</b>	<b>IIR-B</b>	<b>C1</b>	0	0	-16	7	45	82	110	138	145	143	135	121	112	95	35
			<b>P2</b>	0	0	-33	-38	-27	-23	-17	-13	-7	0	11	21	32	24	-17
<b>65</b>	<b>24</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	-2	-5	-7	-1	4	1	0	-2	-11	-17	-26	-36	-50	-97
			<b>P2</b>	0	12	16	16	18	24	26	27	27	30	34	41	42	41	68
<b>62</b>	<b>25</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	-10	-10	-10	-2	6	2	-6	-14	-18	-20	-26	-40	-70	-102
			<b>P2</b>	0	-2	-2	6	21	26	28	26	26	28	24	18	16	23	10
<b>71</b>	<b>26</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	-29	-27	-25	-22	-24	-25	-20	-20	-26	-29	-39	-49	-75	-113
			<b>P2</b>	0	-13	3	-4	-10	-14	-17	-21	-21	-23	-7	-7	-4	-1	-2
<b>66</b>	<b>27</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	30	21	13	10	7	13	13	10	9	4	-11	-29	-45	-71
			<b>P2</b>	0	7	27	37	45	50	53	58	60	59	56	56	61	63	32
<b>44</b>	<b>28</b>	<b>IIR-A</b>	<b>C1</b>	0	10	38	48	76	101	114	126	134	134	125	116	106	91	46
			<b>P2</b>	0	-2	-13	-20	-38	-53	-69	-82	-90	-89	-83	-74	-70	-66	-74
<b>57</b>	<b>29</b>	<b>IIR-M</b>	<b>C1</b>	0	13	34	48	63	64	71	76	69	57	44	32	13	-16	-34
			<b>P2</b>	0	0	-15	-10	-1	7	14	19	22	27	33	44	57	65	52
<b>64</b>	<b>30</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	0	-3	-8	-13	-20	-16	-19	-28	-38	-49	-60	-74	-107	-165
			<b>P2</b>	0	0	9	-3	-2	0	0	-3	-5	-5	-7	-10	-11	-7	-14
<b>52</b>	<b>31</b>	<b>IIR-M</b>	<b>C1</b>	0	0	-3	-13	-23	-36	-50	-61	-66	-65	-69	-71	-78	-107	-133
			<b>P2</b>	0	-6	-9	-6	0	9	5	3	8	7	9	17	25	29	33
<b>70</b>	<b>32</b>	<b>IIF</b>	<b>C1</b>	0	7	0	1	-4	-9	-7	-8	-11	-15	-18	-30	-44	-70	-139
			<b>P2</b>	0	18	27	26	21	18	18	11	18	20	24	20	11	4	6

## Anhang A-2: Korrekturwerte für die GDV der GLONASS-Satelliten (in mm)

SVN	PRN	GLO	Signal	Nadir-Winkel [deg]														
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
730	1	M	C1	6	-10	-10	-11	-13	-18	-25	-35	-46	-58	-72	-85	-103	-121	-189
			P2	0	-1	2	1	-3	-8	-14	-23	-34	-45	-56	-67	-82	-104	-153
747	2	M	C1	0	-6	-8	-11	-11	-10	-11	-17	-24	-33	-45	-57	-74	-93	-161
			P2	0	8	5	4	6	7	5	-1	-12	-27	-44	-63	-82	-102	-166
744	3	M	C1	0	6	6	8	5	2	-3	-12	-23	-36	-51	-68	-88	-106	-155
			P2	0	2	4	2	-1	-5	-11	-20	-30	-40	-48	-58	-70	-86	-138
742	4	M	C1	0	3	6	-1	-7	-17	-25	-34	-41	-52	-65	-77	-90	-107	-167
			P2	0	2	7	3	4	0	-7	-12	-19	-25	-32	-41	-55	-74	-103
734	5	M	C1	0	11	11	5	-2	-7	-14	-22	-27	-35	-44	-57	-74	-101	-168
			P2	0	0	6	2	-5	-11	-18	-26	-35	-44	-54	-64	-74	-89	-129
733	6	M	C1	0	3	1	5	4	3	-1	-8	-17	-25	-37	-49	-67	-92	-157
			P2	0	0	1	-2	-4	-5	-7	-9	-11	-13	-16	-21	-31	-46	-72
745	7	M	C1	0	2	3	1	-5	-6	-9	-15	-23	-36	-51	-69	-89	-107	-156
			P2	0	-4	2	-1	-5	-9	-13	-19	-26	-35	-44	-54	-69	-92	-136
743	8	M	C1	0	-3	3	0	-3	-7	-12	-21	-30	-40	-50	-61	-75	-95	-145
			P2	0	-2	1	-3	-7	-11	-17	-25	-35	-45	-54	-63	-72	-86	-128
802	9	K1	C1	0	0	8	13	19	24	29	28	27	24	17	8	-3	-14	-55
			P2	0	-13	-7	3	12	22	31	39	43	42	41	38	33	37	37
717	10	M	C1	0	3	-7	-8	-6	-10	-17	-24	-35	-47	-62	-80	-104	-140	-206
			P2	0	6	7	8	5	-3	-15	-26	-43	-63	-80	-97	-114	-129	-185
737	12	M	C1	0	18	14	16	22	25	25	24	21	9	-16	-16	-68	-85	-171
			P2	0	8	1	-1	0	-3	-4	-6	-14	-26	-38	-49	-74	-88	-115
721	13	M	C1	0	-17	-1	-6	-12	-16	-23	-27	-34	-43	-53	-72	-100	-132	-200
			P2	0	11	15	18	20	23	24	22	16	4	-11	-25	-36	-40	-50
715	14	M	C1	0	17	4	1	9	14	14	10	0	-11	-19	-30	-31	-42	-88
			P2	0	-7	2	5	7	8	7	0	-7	-15	-24	-32	-38	-43	-58
716	15	M	C1	0	-2	-2	-8	-15	-24	-32	-41	-51	-62	-76	-92	-111	-137	-202
			P2	0	-4	3	9	16	19	20	18	11	2	-11	-22	-34	-44	-67
736	16	M	C1	0	6	8	3	-4	-15	-18	-29	-43	-56	-72	-87	-105	-126	-188
			P2	0	-2	-2	-9	-21	-37	-46	-58	-74	-86	-93	-102	-118	-148	-152
851	17	M	C1	0	0	3	3	4	2	0	-4	-13	-25	-40	-56	-71	-91	-140
			P2	0	-19	-24	-30	-41	-50	-60	-76	-92	-107	-121	-133	-146	-156	-185
854	18	M	C1	0	-19	-18	-18	-16	-15	-15	-18	-23	-32	-45	-60	-80	-101	-149
			P2	0	5	1	-8	-23	-35	-46	-58	-71	-82	-91	-99	-111	-130	-175
720	19	M	C1	0	-9	-5	-7	-11	-15	-21	-27	-37	-51	-64	-79	-98	-122	-168
			P2	0	-9	-8	-16	-27	-38	-50	-64	-77	-89	-98	-114	-128	-152	-176
719	20	M	C1	0	16	24	22	18	13	8	2	-5	-14	-23	-36	-47	-104	

			<b>P2</b>	0	-36	-35	-39	-45	-52	-61	-74	-89	-104	-116	-124	-126	-126	-140
<b>855</b>	<b>21</b>	<b>M</b>	<b>C1</b>	0	6	9	13	11	9	4	-2	-12	-24	-37	-52	-71	-91	-133
			<b>P2</b>	0	3	4	0	-4	-9	-13	-18	-26	-31	-34	-39	-44	-52	-71
<b>731</b>	<b>22</b>	<b>M</b>	<b>C1</b>	0	-27	-25	-27	-29	-32	-35	-39	-45	-51	-59	-68	-80	-98	-142
			<b>P2</b>	0	1	-4	-11	-19	-29	-39	-51	-64	-78	-88	-96	-103	-111	-130
<b>732</b>	<b>23</b>	<b>M</b>	<b>C1</b>	0	4	0	-3	-6	-12	-14	-19	-24	-32	-41	-53	-67	-90	-136
			<b>P2</b>	0	16	17	8	-1	-15	-29	-42	-54	-65	-73	-82	-99	-125	-164
<b>735</b>	<b>24</b>	<b>M</b>	<b>C1</b>	0	7	11	7	6	3	-1	-7	-15	-25	-37	-47	-61	-85	-152
			<b>P2</b>	0	-17	-20	-25	-27	-24	-26	-31	-36	-39	-46	-61	-83	-92	-123

### Anhang A-3: Korrekturwerte für GDV der 12 Empfangsantennenmodelle (mm)

Antennen- typ	GNSS	Signal	Elevation [deg]																	
			90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
AOAD/M_T	GPS	C1	0	2	2	4	6	8	9	10	10	10	8	6	3	1	-1	0	5	10
		P2	0	1	3	4	4	4	4	4	5	6	7	6	5	1	-4	-13	-23	-29
	GL O	C1	0	-2	-3	-4	-5	-5	-4	-3	-2	-2	-5	-11	-17	-21	-19	-5	27	69
		P2	0	3	1	0	-2	-2	-3	-2	-1	-1	-2	-4	-7	-10	-12	-12	-5	7
ASH701945C _M	GPS	C1	0	-5	-8	-	-	-	-	-	-28	-28	-28	-28	-27	-27	-25	-19	-9	-1
		P2	0	-5	-5	-6	-6	-7	-8	-9	-11	-13	-15	-16	-16	-14	-9	2	17	35
	GL O	C1	0	1	-1	-4	-8	-	-	-	-10	-8	-7	-6	-7	-8	-11	-8	18	5
		P2	0	-4	-6	-	-	-	-	-	-13	-12	-13	-15	-18	-18	-11	10	38	85
LEIAR25.R3	GPS	C1	0	-2	5	17	33	51	71	91	108	123	13	143	14	15	15	16	16	187
		P2	0	1	2	4	7	10	14	18	22	27	33	41	50	61	73	86	96	97
	GL O	C1	0	0	-9	-	-	-	-	-	-21	-2	19	39	56	70	86	10	13	183
		P2	0	1	6	10	15	21	27	34	40	47	56	65	78	93	11	13	15	182
LEIAR25.R4	GPS	C1	0	-2	-13	-	-	-	-	-	-46	-31	-12	6	22	35	47	60	78	110
		P2	0	4	7	13	21	30	38	46	54	61	70	79	90	10	11	12	14	148
	GL O	C1	0	-2	-16	-	-	-	-	-	-80	-66	-50	-33	-19	-6	9	33	78	149
		P2	0	-2	-3	-5	-5	-3	1	8	16	25	33	40	45	51	61	78	10	146
TPSCR.G3	GPS	C1	0	-3	-5	-8	-	-	-	-	-16	-12	-7	-3	0	4	10	22	42	78
		P2	0	0	5	10	12	15	17	20	25	36	44	52	63	77	86	10	11	157
	GL O	C1	0	1	-1	-2	-1	5	9	18	27	35	41	43	42	43	49	65	10	154
		P2	0	4	4	5	8	12	17	23	28	32	35	37	38	41	47	57	77	94
JAVRING- ANT_DM	GPS	C1	0	-6	-7	-	-	-	-	-	-20	-20	-18	-17	-16	-15	-17	-17	-9	-36
		P2	0	-1	-3	-5	-7	-9	-	-	-11	-9	-8	-6	-5	-5	-6	-4	9	40
	GL O	C1	0	-3	-5	-9	-	-	-	-	-12	-11	-9	-9	-10	-11	-9	-2	27	72
		P2	0	-10	-13	-	-	-	-	-	-24	-22	-21	-20	-20	-19	-16	-9	10	53
JAV_RING- ANT_G3T	GPS	C1	0	-2	-7	-	-	-	-	-	-76	-88	10	-111	12	13	13	14	15	-188
		P2	0	10	11	11	10	9	7	3	-2	-9	-16	-24	-33	-44	-58	-75	-98	-106
	GL O	C1	0	-8	-11	-	-	-	-	-	-57	-64	-71	-77	-82	-84	-83	-76	-62	-40
		P2	0	-4	-5	-9	-	-	-	-	-33	-41	-51	-63	-78	-91	10	10	-93	-109

<b>LEIAT504G</b> <b>G</b>	<b>GPS</b>	<b>C1</b>	0	-6	-5	-8	-	-	-	-7	-3	1	4	4	1	-2	-5	-2	12	34
		<b>P2</b>	0	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	7	10	16
	<b>GL</b> <b>O</b>	<b>C1</b>	0	-7	-11	-	-	-	-	-8	-4	-2	-1	-4	-9	-13	-14	-5	25	78
		<b>P2</b>	0	-11	-12	-	-	-	-9	-7	-4	-2	-1	-2	-3	-2	1	11	31	62
<b>SEP- CHOKE_M</b> <b>C</b>	<b>GPS</b>	<b>C1</b>	0	3	6	11	16	21	27	33	37	41	42	41	39	39	41	48	63	92
		<b>P2</b>	0	0	1	3	6	13	22	33	45	56	64	68	69	70	73	83	109	154
	<b>GL</b> <b>O</b>	<b>C1</b>	0	9	11	12	14	18	21	25	27	28	27	23	20	19	26	44	80	133
		<b>P2</b>	0	7	6	5	6	9	15	24	34	43	49	53	54	56	62	81	118	179
<b>TRM55971.0</b> <b>0</b>	<b>GPS</b>	<b>C1</b>	0	-1	-3	-7	-	-	-	-10	-4	1	5	7	8	11	17	32	59	
		<b>P2</b>	0	1	0	3	9	17	26	37	47	56	62	66	68	73	83	103	139	194
	<b>GL</b> <b>O</b>	<b>C1</b>	0	-3	-5	-7	-9	-	-9	-7	-4	0	4	8	13	22	37	63	102	158
		<b>P2</b>	0	6	6	7	9	14	21	31	41	51	58	62	64	67	76	98	137	205
<b>TRM57971.0</b> <b>0</b>	<b>GPS</b>	<b>C1</b>	0	1	0	-1	-1	-1	-1	1	2	4	5	6	7	9	14	24	40	62
		<b>P2</b>	0	1	4	9	15	21	27	32	37	40	43	47	52	61	68	83	97	114
	<b>GL</b> <b>O</b>	<b>C1</b>	0	4	3	-1	-5	-8	-9	-9	-8	-6	-5	-5	-4	1	13	39	84	153
		<b>P2</b>	0	-2	-2	0	3	7	11	15	19	22	24	27	30	36	48	67	93	130
<b>TRM59800.0</b> <b>0</b>	<b>GPS</b>	<b>C1</b>	0	-2	-6	-	-	-	-	-23	-18	-10	0	9	21	38	63	90	99	
		<b>P2</b>	0	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-6	-8	-8	-8	-7	-5	-2	1	4	7	7
	<b>GL</b> <b>O</b>	<b>C1</b>	0	-1	-2	-2	-1	1	4	8	12	15	19	24	33	49	78	124	187	272
		<b>P2</b>	0	-3	-6	-7	-9	-	-	-	-9	-9	-9	-9	-7	-4	7	28	57	93