

Anja Heßelbarth

**Statische und kinematische GNSS-Auswertung
mittels Precise Point Positioning (PPP)**

München 2011

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



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 667

**Statische und kinematische GNSS-Auswertung
mittels Precise Point Positioning (PPP)**

An der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden
vorgelegte Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Anja Heßelbarth

München 2011

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

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

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

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

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

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Böder

Tag der Verteidigung: 20.07.2011

© 2011 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5079-2

Kurzfassung

Precise Point Positioning (PPP) ist eine GNSS-Auswertetechnik, die eine präzise Positionsbestimmung ermöglicht und im Vergleich zu den differentiellen Verfahren keine lokalen oder regionalen Referenzstationen benötigt. Neben der Verwendung von kontinuierlichen Zweifrequenz-Phasen- und Codebeobachtungen sind zahlreiche Korrekturen notwendig. Insbesondere werden für eine genaue PPP-Auswertung präzise Satellitenorbits und -uhrinformationen benötigt. Aufgrund der Instabilität der Satellitenuhren ist bei diesen Korrekturen ein Datenintervall von 30 Sekunden oder kleiner erforderlich. Bei einem größeren Stützpunktabstand verursachen die daraus resultierenden Interpolationsabweichungen, insbesondere bei kinematischen Anwendungen, deutliche Abweichungen in der Positionsbestimmung. Durch die Modernisierung von GLONASS und der damit größer werdenden Satellitenanzahl ist eine gemeinsame PPP-Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen möglich. Der Nutzen dieser zusätzlichen Messungen wird vor allem bei einer Beobachtungsdauer von weniger als einer Stunde deutlich. Die exakte Modellierung der troposphärischen Refraktionseinflüsse erfolgt durch die Berechnungen des trockenen Anteils und der anschließenden Korrektur der Beobachtungen. Der feuchte Anteil wird im Ausgleichsprozess als Unbekannte geschätzt. Unter Beachtung aller notwendigen Korrekturen sind bei einer statischen und kinematischen Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen auch bei einer Beobachtungsdauer von einer Stunde Koordinatengenauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichbar. Mit diesen Genauigkeiten ist PPP vor allem in Gebieten einsetzbar, in denen keine nahe gelegenen Referenzstationen vorliegen (z. B. Hydrographie). Der Vorteil, dass nur Beobachtungen einer Station für die Auswertung notwendig sind, ermöglicht als weitere Anwendung die Erfassung geodynamischer Stationsbewegungen.

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) is a GNSS analysis technique for precise positioning without using observations from local or regional reference stations, as conventional differential techniques do. But PPP requires continuous dual-frequency carrier phase and code observations. Furthermore, precise satellite orbits and clock information as well as numerous corrections are necessary. A clock correction interval of 30 seconds or shorter should be used for precise kinematic applications. Otherwise the instabilities of the satellite clocks cause interpolation errors which influence the kinematic positioning accuracy. After the recent re-completion of the GLONASS satellite segment, it is recommended to use a combined GPS and GLONASS processing. The additional measurements induce large improvements for short observation periods. The hydrostatic part of the tropospheric refraction effects is corrected by standard models. The wet part is estimated in the adjustment procedure. Using all necessary corrections, positioning with centimeter accuracy is possible for static and kinematic applications. For regions without reference stations (e.g. hydrographic surveys on the open sea) PPP is a suitable GNSS analysis technique. A further application is the monitoring and evaluation of geodynamic processes.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Kurzfassung | 1 |
| Abbildungsverzeichnis | 7 |
| Tabellenverzeichnis | 10 |
| Abkürzungsverzeichnis | 13 |
| 1 Einleitung | 17 |
| 1.1 Motivation | 17 |
| 1.2 Entwicklung und aktueller Stand der Forschung | 17 |
| 1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit | 18 |
| 2 Grundlagen | 21 |
| 2.1 Referenz- und Koordinatensysteme | 21 |
| 2.1.1 Internationales Zälestisches Referenzsystem | 21 |
| 2.1.2 Internationales Terrestrisches Referenzsystem | 22 |
| 2.1.3 Transformation zwischen zälestischem und terrestrischem Referenzsystem | 23 |
| 2.1.4 Umformung zwischen verschiedenen Koordinatensystemen | 24 |
| 2.2 GNSS-Systeme | 26 |
| 2.2.1 GPS und GLONASS | 26 |
| 2.2.2 Auswertung von GNSS-Beobachtungen | 29 |
| 2.2.3 Messabweichungen und deren Auswirkungen auf die Positionsbestimmung | 31 |
| 2.3 Prinzipien der Ausgleichsrechnung | 33 |
| 2.3.1 Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate | 33 |
| 2.3.2 Parametereliminierung | 36 |
| 2.3.3 Sequentielle Ausgleichung | 37 |
| 3 Precise Point Positioning | 39 |
| 3.1 Präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen | 39 |
| 3.1.1 International GNSS Service und dessen Analytical Centers | 39 |
| 3.1.2 Präzise Ephemeriden | 40 |
| 3.1.3 Präzise Satellitenuhrkorrekturen | 41 |
| 3.2 Satellitenantennenkorrekturen | 41 |
| 3.2.1 Phasenzentrumsoffset | 41 |
| 3.2.2 Phasenzentrumsvariation | 43 |
| 3.2.3 Phase-Wind-Up | 44 |
| 3.3 Stationskorrekturen | 46 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.3.1 | Erdzeiten | 46 |
| 3.3.2 | Ozeanische Auflasten | 50 |
| 3.3.3 | Erdrotationsparameter | 52 |
| 3.4 | Atmosphärische Korrekturen | 52 |
| 3.4.1 | Ionosphärische Refraktion | 53 |
| 3.4.2 | Troposphärische Refraktion | 53 |
| 3.5 | Instrumentelle Verzögerungen | 54 |
| 3.6 | Ausgleichung der Beobachtungen nach dem PPP-Verfahren | 55 |
| 3.6.1 | Funktionales und stochastisches Modell | 55 |
| 3.6.2 | Ausgleichung statischer Beobachtungen | 58 |
| 3.6.3 | Ausgleichung kinematischer Beobachtungen | 59 |
| 4 | Voruntersuchungen zur PPP-Auswertung | 61 |
| 4.1 | Gewichtung der PPP-Beobachtungen | 61 |
| 4.2 | Genauigkeitsabschätzung der Koordinaten | 63 |
| 5 | Analyse der statischen und kinematischen PPP-Auswertung | 69 |
| 5.1 | Software | 69 |
| 5.1.1 | Wapp-Modul für die Vorverarbeitung | 69 |
| 5.1.2 | TripleP-Modul für die PPP-Berechnung | 70 |
| 5.2 | Beobachtungsdaten und Auswertestrategie | 71 |
| 5.3 | Positionsgenauigkeiten in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer | 72 |
| 5.3.1 | Statische Auswertung | 72 |
| 5.3.2 | Kinematische Auswertung | 74 |
| 5.4 | Konvergenzverhalten | 76 |
| 5.5 | Residuen | 77 |
| 5.5.1 | Phasenresiduen | 77 |
| 5.5.2 | Coderesiduen | 78 |
| 5.6 | Genauigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite | 79 |
| 6 | Untersuchungen zu den GNSS-Satellitenuhren | 81 |
| 6.1 | Oszillatoren von GPS- und GLONASS-Satellitenuhren | 81 |
| 6.2 | Stabilität der GPS- und GLONASS-Satellitenuhren | 82 |
| 6.2.1 | Bestimmung der IGS-Uhrprodukte | 82 |
| 6.2.2 | Allan Varianz bzw. modifizierte Allan Varianz | 83 |
| 6.3 | Interpolation der Satellitenuhrkorrekturen | 87 |
| 6.3.1 | Interpolationsverfahren | 87 |
| 6.3.2 | Interpolationsabweichungen der Satellitenuhrkorrekturen | 90 |
| 6.3.3 | Beobachtungsgewichtung für die Interpolation der Satellitenuhren | 92 |
| 6.4 | Auswirkung der Satellitenuhrinterpolation auf die Positionsbestimmung | 93 |
| 6.4.1 | Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Satellitenuhrkorrektur | 94 |
| 6.4.2 | Konvergenzverhalten | 96 |
| 6.4.3 | Residuen | 98 |
| 7 | Untersuchungen zu verschiedenen Troposphärenmodellen | 101 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.1 | Troposphärenmodellierung bei PPP | 101 |
| 7.1.1 | Niell Mapping Funktion (NMF) | 102 |
| 7.1.2 | Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1) | 104 |
| 7.1.3 | Globale Mapping Funktion (GMF) | 105 |
| 7.1.4 | Vergleich der Mappingfunktionen anhand konkreter Stationen | 106 |
| 7.2 | Auswirkungen verschiedener Troposphärenmodelle auf die statische Positionsbestimmung | 107 |
| 7.2.1 | Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Mappingfunktion | 109 |
| 7.2.2 | Konvergenzzeiten in Abhängigkeit von der Mappingfunktion | 111 |
| 8 | Beispiele für kinematische und statische PPP-Auswertungen | 113 |
| 8.1 | PPP-Anwendungen in der Hydrographie | 113 |
| 8.1.1 | Positionsgenauigkeiten der hydrographischen Datensätze | 114 |
| 8.1.2 | Konvergenzverhalten der hydrographischen Datensätze | 115 |
| 8.2 | Geodynamische Stationsbewegungen | 116 |
| 8.2.1 | Erdbeben | 116 |
| 8.2.2 | Plattentektonik | 118 |
| 9 | Ausblick auf die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bei PPP | 121 |
| 9.1 | Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei differentiellen Verfahren | 121 |
| 9.2 | Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei PPP | 122 |
| 9.2.1 | Lösungsansätze zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung | 123 |
| 9.2.2 | Verbesserungen für PPP bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung | 124 |
| 10 | Zusammenfassung | 127 |
| | Literaturverzeichnis | 131 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Transformation zwischen dem konventionellen zälestischen und dem konventionellen terrestrischen Koordinatensystem (Bauer 2003) | 23 |
| 2.2 | Kartesisches, ellipsoidisches und topozentrisches Koordinatensystem (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008) | 25 |
| 2.3 | Durchschnittliche Anzahl an GPS-Satelliten (links) und GPS+GLONASS-Satelliten (rechts) bei einer Elevationsmaske von 10° | 29 |
| 3.1 | Satellitenkoordinatensystem im ITRS | 42 |
| 3.2 | Nadirwinkel am Satelliten (Schmid und Rothacher 2002) | 44 |
| 3.3 | Stationsbewegungen, verursacht durch zeitabhängige Erdgezeiten für die IGS-Station HERT 200/2010-225/2010 | 47 |
| 3.4 | Mittlere Pollage 1900-2000 (rot) und tägliche Polbewegung 2000-2009 (schwarz), Datenquelle: Erdorientierungsparameter des IERS | 49 |
| 3.5 | Stationsbewegungen in der Höhe, verursacht durch Polgezeiten für die IGS-Station ZIM2 2000-2009 | 49 |
| 3.6 | Amplituden der halbtäglichen Partialtide M_2 einzelner IGS-Stationen, Datenquelle: M_2 -Amplituden der IGS-Stationen | 50 |
| 3.7 | Stationsbewegungen, verursacht durch ozeanische Auflasten für die IGS-Station BRST 195/2010-225/2010 | 51 |
| 3.8 | <i>Differential Calibration Bias</i> (DCB) P1-C1, ermittelt vom CODE AC 04/2010 | 55 |
| 4.1 | GPS- und GLONASS-Phasenresiduen der Linearkombination Φ_0 in Abhängigkeit von der Elevation | 62 |
| 4.2 | GPS- und GLONASS-Coderesiduen der Linearkombination C_0 (P1-P2) in Abhängigkeit von der Elevation | 62 |
| 4.3 | Mittlere Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) einer <i>float</i> -Lösung aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite | 65 |
| 4.4 | Sichtbarkeit der Satelliten bei einer einstündigen Beobachtungsdauer (Pol, mittlere Breite, Äquator) | 66 |
| 4.5 | Variationen der Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite | 67 |
| 5.1 | Ablaufschema des Programms WAPP | 70 |
| 5.2 | Ablaufschema des Programms TripleP | 70 |
| 5.3 | Abweichungen zu den Sollkoordinaten einer statischen PPP-Lösung der Station BZRG Tag 93, Jahr 2010 | 73 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.4 | Abweichungen zu den Sollkoordinaten einer kinematischen PPP-Lösung der Station SKE0 Tag 93, Jahr 2010 | 74 |
| 5.5 | Konvergenzverhalten einer statischen PPP-Auswertung, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung | 76 |
| 5.6 | Konvergenzverhalten einer kinematischen PPP-Auswertung, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung | 77 |
| 5.7 | Phasenresiduen Φ_0 der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS- Beobachtungen | 78 |
| 5.8 | Coderesiduen C_0 (P1-P2) der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS- Beobachtungen | 78 |
| 5.9 | Coderesiduen C_0 (C1-P2) der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS- Beobachtungen | 79 |
| 5.10 | Standardabweichungen von 1-stündigen GPS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der geographischen Breite | 80 |
| 6.1 | Berechnung der 2-Punkt-Allan-Varianz | 84 |
| 6.2 | Verlauf der Allan Abweichungen der verschiedenen Rauschtypen der Frequenz | 85 |
| 6.3 | Allan Abweichungen der GNSS-Satellitenuhren (GPS-Woche 1577) in einem Zeitintervall τ von 1 bis 1000 Sekunden | 86 |
| 6.4 | <i>Highrate</i> GPS- und GLONASS IGS-Stationen | 88 |
| 6.5 | Phasenresiduen für die Satelliten G3, G6 und R18 der verschiedenen Stationen | 89 |
| 6.6 | Prinzip der Trägerphaseninterpolation | 89 |
| 6.7 | Standardabweichung der Interpolationsabweichung für die linear interpolierten Uhrkorrekturen in der Mitte zweier Stützpunkte bei Intervallen von 30 Sekunden und 5 Minuten, 04/2010 | 91 |
| 6.8 | Normierte Standardabweichung der linear interpolierten Uhrkorrektur in Abhängigkeit des Abstandes zum nächsten Stützpunkt | 92 |
| 6.9 | <i>Highrate</i> GPS- und GLONASS IGS-Stationen | 93 |
| 6.10 | Abweichungen in Nord, Ost und Höhe bei verschiedenen Intervallen der Satellitenuhrkorrekturen | 96 |
| 6.11 | Konvergenzverhalten einer statischen PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen mit und ohne Gewichtung der Interpolationsabweichung | 97 |
| 6.12 | Konvergenzverhalten einer kinematischen PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen mit und ohne Gewichtung der Interpolationsabweichung | 98 |
| 6.13 | Phasenresiduen einer PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen für drei verschiedene Satelliten, LAMA 093/2010 | 98 |
| 7.1 | Parameter der VMF1 | 105 |
| 7.2 | Funktionswerte der hydrostatischen Mappingfunktionen bei 5° und 10° Elevation an verschiedenen Stationen | 108 |
| 7.3 | Konvergenzverhalten in der Höhe bei Verwendung verschiedener Mappingfunktionen, Tage 25 bis 31, 2010 | 111 |
| 7.4 | Konvergenzverhalten in der Höhe bei Verwendung verschiedener Mappingfunktionen, Tage 207 bis 213, 2010 | 112 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 8.1 | Konvergenzverhalten der kinematischen BSH-Datensätze, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung | 115 |
| 8.2 | Bewegungen der IGS-Stationen CONZ und SANT längs und quer zur Ausbreitungsrichtung des Erdbebens, 27. Februar 2010 | 118 |
| 8.3 | Mit PPP-Auswertung berechnete Bewegung der IGS-Station MKEA, Jahr 2010 | 119 |
| 8.4 | Mit PPP-Auswertung berechnete Bewegung von IGS-Stationen durch Plattentektonik, Jahr 2010 | 120 |
| 9.1 | Mittlere Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) einer <i>fixed</i> -Lösung aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite . | 126 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Systemmerkmale von GPS und GLONASS (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Urlichich u. a. 2010) | 28 |
| 3.1 | IGS Ephemeriden und Satellitenuhrkorrektion (Stand: 29.11.2010) | 40 |
| 3.2 | Doodson-Elemente und Winkelgeschwindigkeiten der Partialtiden (Petit and Luzum 2010) | 51 |
| 3.3 | Koeffizienten für sin und cos der subtäglichen Variationen der Erdrotationsparameter und fundamentale Argumente der Nutation (Petit und Luzum 2010) | 52 |
| 5.1 | Verwendete IGS- bzw. EUREF Stationen für die PPP-Auswertung | 71 |
| 5.2 | Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer statischen GPS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer | 73 |
| 5.3 | Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer statischen GPS- und GLONASS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer | 74 |
| 5.4 | Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer kinematischen GPS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer | 75 |
| 5.5 | Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer kinematischen GPS- und GLONASS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer | 75 |
| 6.1 | Unterteilung der GNSS-Satelliten hinsichtlich Satellitensystem, Frequenzstandard und Block | 85 |
| 6.2 | Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost, Höhe einer statischen GPS- und GLONASS-Auswertung (4 Stunden) bei verschiedenen Satellitenuhrkorrektionsintervallen und Gewichtungen | 94 |
| 6.3 | Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost, Höhe einer kinematischen GPS- und GLONASS-Auswertung (4 Stunden) bei verschiedenen Satellitenuhrkorrektionsintervallen | 95 |
| 7.1 | Koeffizienten der hydrostatischen Niell Mapping Funktion (Niell 1996) | 103 |
| 7.2 | Koeffizienten der feuchten Niell Mapping Funktion (Niell 1996) | 103 |
| 7.3 | IGS-Stationen zur Untersuchung der verschiedenen Mappingfunktionen | 107 |
| 7.4 | Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 10° Elevationsmaske, Tage 15-45, 2010 | 109 |
| 7.5 | Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 5° Elevationsmaske, Tage 15-45, 2010 | 110 |
| 7.6 | Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 10° Elevationsmaske, Tage 195-225, 2010 | 110 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 7.7 | Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 5° Elevationsmaske, Tage 195-225, 2010 | 110 |
| 8.1 | Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer PPP-Auswertung von kinematischen GPS-Datensätzen und GPS+GLONASS-Datensätzen, Jahr 2009 | 114 |
| 8.2 | Koordinatenänderungen von IGS-Stationen in Südamerika am 27.02.2010 | 117 |
| 9.1 | Merkmale der wichtigsten Linearkombinationen (Wübbena 1989, Wanninger 2000) . . . | 122 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|--|
| AC | <i>Analytical Center</i> |
| ANTEX | <i>Antenna Exchange</i> |
| APPS | <i>Automatic Precise Point Positioning</i> |
| BSH | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie |
| CDMA | <i>Code Division multiple access</i> |
| CEP | <i>Celestial Ephemeris Pole</i> |
| CIO | <i>Conventional International Origin</i> |
| CIP | <i>Celestial Intermediate Pol</i> |
| CLK | <i>Clock Information File</i> |
| CODE | <i>Center of Orbit Determination in Europe</i> |
| CSRS | <i>Canadian Spatial Reference System</i> |
| DCB | <i>Differential Calibration Bias</i> |
| DGNSS | <i>Differential GNSS</i> |
| DOP | <i>Dilution of Precision</i> |
| DORIS | <i>Doppler Orbit Determination and Radio Positioning integrated on Satellite</i> |
| DOY | <i>Day of Year</i> |
| ECMWF | <i>European Centre for Medium Range Weather Forecast</i> |
| EHRI | <i>Efficient Highrate Clock Interpolation</i> |
| EPN | <i>EUREF Permanent Network</i> |
| ESOC | <i>European Space Operations Centre</i> |
| EUREF | <i>European Reference Frame</i> |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> |
| FK5 | Fundamentalkatalog 5 |

| | |
|---------|---|
| GAPS | <i>GPS Analysis and Positioning Software</i> |
| GAST | <i>Greenwich Apparent Sideral Time</i> |
| GFZ | GeoForschungsZentrum |
| GIPSY | <i>GNSS-Inferred Positioning System</i> |
| GLONASS | <i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> |
| GMF | Globale Mapping Funktion |
| GMST | <i>Greenwich Mean Sideral Time</i> |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| GSD | <i>Geodetic Survey Division</i> |
| IAC | <i>Informational Analytical Center</i> |
| IAG | <i>International Association of Geodesy</i> |
| IAU | <i>International Astronomical Union</i> |
| ICRF | <i>International Celestial Reference Frame</i> |
| ICRS | <i>International Celestial Reference System</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electronic and Electronic Engineer</i> |
| IERS | <i>International Earthrotation and Reference System Service</i> |
| IGG | <i>Institute of Geodesy and Geophysics</i> |
| IGS | <i>International GNSS Service</i> |
| IMF | Isobarische Mapping Funktion |
| IRNSS | <i>Indian Regional Navigational Satellite System</i> |
| ITRF | <i>International Terrestrial Reference Frame</i> |
| ITRS | <i>International Terrestrial Reference System</i> |
| ITU | <i>International Telecommunication Union</i> |
| JPL | <i>Jet Propulsion Laboratory</i> |
| LAMBDA | <i>Least-square ambiguity decorrelation adjustment</i> |
| LEO | <i>Low Earth Orbits</i> |
| LLR | <i>Lunar Laser Ranging</i> |
| MJD | Modifizierter julianischer Tag |

| | |
|----------|--|
| NAPEOS | <i>NAvigation Package for Earth Observation Satellites</i> |
| NAVSTAR | <i>Navigation System with Timing and Ranging</i> |
| NMF | Niell Mapping Funktion |
| NRCan | <i>Natural Resources Canada</i> |
| NWM | Numerische Wettermodelle |
| PDOP | <i>Position Dilution of Precision</i> |
| PPP | <i>Precise Point Positioning</i> |
| PRN | <i>Pseudo Random Noise</i> |
| PZ-90.02 | <i>Parametri Zemli 90</i> |
| PZO | Phasenzentrumsoffset |
| PZV | Phasenzentrumsvariationen |
| QZSS | <i>Quasi-Zenith Satellite System</i> |
| RHCP | <i>Right-hand circularly polarized</i> |
| RINEX | <i>Receiver Independent Exchange Format</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SBAS | <i>Satellite based Augmentation System</i> |
| SI | <i>Système international d'unités</i> |
| SLR | <i>Satellite Laser Ranging</i> |
| SNR | <i>Signal Noise Ratio</i> |
| SP3 | <i>Standard Product 3</i> |
| TUM | Technische Universität München |
| UT1 | <i>Universal Time</i> |
| UTC | <i>Coordinated Universal Time</i> |
| UTM | <i>Universal Transverse Mercator</i> |
| VLBI | <i>Very Long Baseline Interferometry</i> |
| VMF1 | Vienna Mapping Funktion |
| WGS84 | <i>World Geodetic System 1984</i> |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) sind ein wichtiges geodätisches Messverfahren. Durch relative Positionierung mit Trägerphasenbeobachtungen sind Genauigkeiten im Zentimeterbereich bei statischen und kinematischen Anwendungen möglich. Bei langen Beobachtungszeiten, ausgewählten Empfängerstandpunkten und kalibrierten Empfangsantennen können Genauigkeiten deutlich unter einem Zentimeter erreicht werden. Ein Großteil der modernen geodätischen Empfänger ermöglicht dabei neben der klassischen Aufzeichnung der Signale des amerikanischen *Global Positioning System* (GPS) auch die des russischen *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) und in naher Zukunft die des europäischen Navigationssystems Galileo.

Für diese präzise Positionsbestimmung werden bei einer klassischen GNSS-Auswertung neben den Beobachtungen der eigentlichen Station auch die einer Referenzstation oder eines Referenzstationsnetzes in einem Umkreis von 100 km verwendet. Allerdings ist nicht in allen Regionen der Erde ein ausgebautes Referenzstationsnetz vorhanden. Auch hydrographische Vermessungsarbeiten auf hoher See, präzise Positionsbestimmungen von Flugzeugen, z. B. für Bildflugaufnahmen, oder die präzise Orbitbestimmung von *Low Earth Orbits* (LEO) Satelliten sind kinematische GNSS-Einsatzbereiche, bei denen die relative Positionierung nur erschwert durchführbar ist. Weiterhin gibt es auch Bereiche, z. B. die Erfassung und Analyse von Stationsbewegungen über einen längeren Zeitraum, in denen nur eine Beobachtungsstation hilfreich wäre.

Für diese Bereiche kann das Auswerteverfahren des *Precise Point Positioning* (PPP) genutzt werden. Der größte Unterschied zu den klassischen Auswerteverfahren ist, dass bei PPP keine direkten Beobachtungen und Korrekturen von Referenzstationen notwendig sind. Gelingt die Messung von kontinuierlichen Phasen- und (Codebeobachtungen), sind sowohl statisch als auch kinematisch zentimetergenaue Positionsbestimmungen möglich.

1.2 Entwicklung und aktueller Stand der Forschung

Erste Entwicklungen zu PPP begannen Mitte der 90er Jahre. Die *Geodetic Survey Division* (GSD) von *Natural Resources Canada* (NRCan) prozessierten PPP-Lösungen auf Basis von geglätteten Codebeobachtungen und unter Verwendung von präzisen GPS-Orbits und Uhrkorrekturen. Mit diesem Verfahren wurden Positionsgenauigkeiten auf Meterniveau erreicht (Héroux u. a. 1993). Héroux und Kouba (1995) produzierten erstmals Satellitenuhrkorrekturen in einer Auflösung von 30 Sekunden. Dazu wurden Beobachtungsdaten, aufgezeichnet von ausgewählten Stationen des *International GNSS Service* (IGS) mit stabilen Atomuhren, in einem Intervall von 30 Sekunden verwendet.

Wenige Jahre später wurden für PPP undifferenzierte Trägerphasenmessungen verwendet. Mit diesem Auswerteverfahren, welches erstmals neben dem klassischen Verfahren in der GPS-Analyse Software *GNSS-Inferred Positioning System* (GIPSY) zur Verfügung stand, hatte der Nutzer die Möglichkeit, mit den Beobachtungen einer einzelnen Station zentimetergenaue Positionsbestimmung durchzuführen (Zumberge u. a. 1997). Zahlreiche Untersuchungen zur präzisen Positionsbestimmung mit dem Verfahren des PPP wurden von Kouba und Héroux (2001) durchgeführt. Neben der Koordinatengenauigkeit wurde auch das Konvergenzverhalten einer PPP-Auswertung analysiert.

Die Qualität von PPP-Positionsbestimmungen ist immer abhängig von den präzisen Orbits und Uhrkorrekturen des IGS. Die deutliche Verbesserung dieser Produkte durch die Unterstützung der einzelnen *Analytical Centers* (AC) des IGS führte auch zu Genauigkeitssteigerungen in den PPP-Lösungen (Kouba 2009). Seit Anfang 2007 werden vom IGS die Uhrkorrekturen in einem Intervall von 30 Sekunden jedem Nutzer angeboten. Dieser wichtige Schritt ist vor allem für das Genauigkeitspotential einer kinematischen PPP-Auswertung von großer Bedeutung (Míreault u. a. 2008, Heßelbarth und Wanninger 2008).

Die umfassende Modernisierung von GLONASS hatte auch einen positiven Einfluss auf die Entwicklung von PPP. Cai und Gao (2007) untersuchten PPP-Prozessierungen basierend auf gemeinsamen GPS- und GLONASS-Beobachtungen. Zu diesem Zeitpunkt waren nur elf GLONASS-Satelliten aktiv. Trotzdem konnten vor allem in der Konvergenzzeit durch kombinierte Messungen Verbesserungen erreicht werden. Die stetige Erhöhung der aktiven GLONASS-Satelliten führte zur weiteren Verbesserung der PPP-Auswertungen (Heßelbarth 2009, Píriz u. a. 2009, Li u. a. 2009). Um allerdings auch die GLONASS-Beobachtungen nutzen zu können, sind die präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen für diese Satelliten erforderlich. Vor allem die Anzahl der Anbieter für GLONASS-Uhrkorrekturen ist momentan noch sehr begrenzt.

In den letzten Jahren haben sich einige kostenfreie Berechnungsdienste entwickelt, die PPP-Auswertungen für die vom Anwender zur Verfügung gestellten Beobachtungen vornehmen. Diese Dienste sind u. a. die vom *Canadian Spatial Reference System* (CSRS) entwickelte PPP-Software (Míreault u. a. 2008), der Dienst *GPS Analysis and Positioning Software* (GAPS) (Leandro u. a. 2007b), der spanische Service *magicGNSS* der Firma GMV (Píriz u. a. 2008) sowie die vom *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) entwickelte Software *Automatic Precise Point Positioning* (APPS). Die Genauigkeit dieser Dienste bei statischen und kinematischen PPP-Auswertungen wurde von Giese u. a. (2010) untersucht.

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, ist PPP ein wichtiges GNSS-Auswerteverfahren. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die umfangreiche Genauigkeitsanalyse statischer und kinematischer PPP-Prozessierungen anhand eigener Softwareentwicklungen im *post processing*. Ein Schwerpunkt ist dabei die kombinierte Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen. Es soll dargelegt werden, welche Genauigkeitssteigerungen mit diesen zusätzlichen Beobachtungen bei PPP möglich sind. Um das gesamte Potential von PPP nutzen zu können, werden präzise Uhrkorrekturen in einer hohen Auflösung benötigt. Welchen Einfluss die Uhrkorrekturen bei verschiedenen Intervallen auf die präzise Positionsbestimmung, vor allem bei kinematischen Anwendungen, haben, ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt dieser

Untersuchung.

Die in der Arbeit notwendigen Referenz- und Koordinatensysteme sowie deren Transformation werden zu Beginn im Kapitel 2 dargestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Einführung in die GNSS-Systeme GPS und GLONASS und es wird deren aktueller Stand kurz dargelegt. Außerdem werden die Auswertung von GNSS-Beobachtungen sowie Messabweichungen beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bilden die Grundlagen der Ausgleichsrechnung, die für diese Arbeit erforderlich sind.

Die theoretischen Grundlagen von PPP werden in Kapitel 3 ausführlich erläutert. Die notwendigen Informationen zu präzisen Ephemeriden und Satellitenuhrkorrekturen des IGS und der verschiedenen ACs, die Beschreibungen und Berechnungen aller erforderlichen Korrekturen sowie die Auswertung und Ausgleichung der GNSS-Beobachtungen sind Bestandteil dieses Kapitels.

Das 4. Kapitel widmet sich den Genauigkeitsvoruntersuchungen. Diese werden benötigt, um die a priori Standardabweichungen für die GPS- und GLONASS-Code- und Phasenbeobachtungen in Abhängigkeit der Elevation festzulegen. Zusätzlich werden die zu erwartenden Genauigkeiten der Koordinatenkomponenten Nord, Ost und Höhe in Abhängigkeit der geographischen Breite ermittelt.

Das 5. Kapitel befasst sich mit den erreichbaren Genauigkeiten von PPP-Auswertungen anhand zahlreicher Beobachtungen verschiedener IGS-Stationen. Die Untersuchungen unterteilen sich in statische und kinematische GPS- sowie kombinierte GPS- und GLONASS-Auswertungen bei unterschiedlicher Beobachtungsdauer. Des Weiteren werden die Code- und Phasenresiduen der GPS- und GLONASS-Beobachtungen analysiert. Abschließend werden die Genauigkeiten der einzelnen Koordinaten von Stationen verschiedener geographischer Breiten ermittelt und mit denen aus der Voruntersuchung verglichen.

Schwerpunkt des 6. Kapitels sind die Untersuchungen zu den GNSS-Satellitenuhren. Nach einer kurzen Beschreibung der Oszillatoren der verwendeten Atomuhren wird deren Stabilität untersucht. Das Maß für die Stabilität, die Allan Varianz, wird ebenso wie die Interpolationsverfahren von Satellitenuhren ausführlich beschrieben. Abschließend wird gezeigt, welche Auswirkungen die Interpolationsabweichungen der Satellitenuhrkorrekturen in Abhängigkeit des Intervalls auf die Positionsbestimmung haben.

Für die hohe Genauigkeit einer PPP-Auswertung ist eine möglichst exakte Troposphärenmodellierung erforderlich. Dieses Thema wird in Kapitel 7 behandelt. Nach der Beschreibung und dem Vergleich verschiedener Mappingfunktionen und Möglichkeiten der Troposphärenmodellierung werden wiederum die Auswirkungen auf die Positionsbestimmung untersucht. Schwerpunkt ist die Genauigkeit der Höhenkoordinate.

Beispiele für kinematische und statische PPP-Auswertungen präsentiert das Kapitel 8. Anwendungen aus der Hydrographie sowie die Untersuchung von geodynamischen Stationsbewegungen zeigen klassische Einsatzgebiete von PPP.

Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit PPP-Auswertungen, bei denen die Mehrdeutigkeiten geschätzt werden (*float*-Lösungen). Möglichkeiten, Schwierigkeiten und Grenzen in der Festsetzung von Mehrdeutigkeiten (*fixed*-Lösung) beschreibt kurz das Kapitel 9.

Im Kapitel 10 werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die weiteren Betrachtungen erforderlichen Referenzsysteme sowie deren Transformation dargestellt. Anschließend erfolgt die Beschreibung und Gegenüberstellung der GNSS-Systeme GPS und GLONASS sowie der Auswertung von GNSS-Beobachtungen. Weiterhin werden die Messabweichungen kurz charakterisiert. Die für die spätere Ausgleichung notwendigen Algorithmen schließen dieses Kapitel ab.

2.1 Referenz- und Koordinatensysteme

Für die Beschreibung von Positionen und Bewegungen von Himmelskörpern bzw. Satelliten oder auch Stationen auf der Erdoberfläche werden Referenzsysteme benötigt. Diese Referenzsysteme können durch ein dreidimensionales Koordinatensystem, in dem der Koordinatenursprung, die Orientierung der Koordinatenachsen und ein Maßstab festgelegt sind, beschrieben werden. Die Realisierung eines Referenzsystems erfolgt durch konkrete Punkte, deren Koordinaten und Geschwindigkeiten exakt bestimmt sind, und wird als Referenzrahmen (engl.: *frame*) bezeichnet (Seeber 2003).

In der Satellitengeodäsie spielen zwei Referenzsysteme eine wichtige Rolle. Das raumfeste Bezugssystem befindet sich in Ruhe, d. h. es unterliegt keinen Beschleunigungen oder Drehbewegungen. Im Gegensatz dazu nimmt das erdfeste Bezugssystem an der Erdrotation teil. Die beiden für die vorliegende Arbeit relevanten Referenzsysteme und deren Transformation werden durch den *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) definiert und realisiert und sollen in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

2.1.1 Internationales Zälestisches Referenzsystem

Zur Beschreibung der Bewegung der Erde, anderer Himmelskörper sowie der Erdsatelliten wird ein Inertialsystem benötigt. Nur in einem solchen System treten keine Beschleunigungen oder Drehbewegungen auf und es gelten die Newtonschen Bewegungsgesetze. Das zälestische (raumfeste) Koordinatensystem ist eine Annäherung an ein Inertialsystem (Torge 2002).

Das von der *International Astronomical Union* (IAU) 1997 empfohlene zälestische Bezugssystem ist das *International Celestial Reference System* (ICRS). Nach deren Definition befindet sich der Koordinatenursprung im Baryzentrum des Sonnensystems. Die drei Koordinatenachsen sind zu extragalaktischen Quellen orientiert, die wegen ihrer großen Entfernungen keine messbaren Eigenbewegungen aufweisen. Das ICRS ersetzt das vorangegangene stellare System, dessen Orientierung zu Sternen des Fundamentalkatalogs 5 (FK5) erfolgte. Beide zälestische Referenzsysteme stimmen zur Epoche J2000,0 überein (Arias u. a. 1995).

Die Realisierung des ICRS, der Bezugsrahmen *International Celestial Reference Frame* (ICRF), besteht aus über 600 extragalaktischen Radioquellen. Deren Koordinaten wurden aus über 1,6 Millionen *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI)-Beobachtungen eines weltweiten Netzes abgeleitet. Die Genauigkeit der Realisierung der ICRS-Achsen wird auf 0,02 Bogensekunden geschätzt (Feissel und Mignard 1998).

Bei einem geozentrischen zälestischen Referenzsystem wird der Koordinatenursprung unter Beachtung von relativistischen Effekten in das Geozentrum (Massenzentrum der Erde) verlagert. Aufgrund der Bewegung der Erde um die Sonne treten geringfügige Beschleunigungen auf und es ist demnach kein Inertialsystem mehr. Für einen Großteil der Anwendungen, so auch für die nachfolgenden Untersuchungen, ist dieses Quasiinertialsystem dennoch ausreichend genau (Seitz 2009).

2.1.2 Internationales Terrestrisches Referenzsystem

Für die Positionsbestimmung und Navigation auf und nahe der Erdoberfläche wird ein erdfestes Referenzsystem benötigt. Bei diesem System ändert sich die Orientierung mit der Zeit sowohl in Bezug auf den festen Erdkörper als auch in Bezug auf das raumfeste Bezugssystem (Torge 2002). Gemäß den IERS Conventions (Petit und Luzum 2010) befindet sich der Koordinatenursprung des *International Terrestrial Reference System* (ITRS) im Massenzentrum der Erde, einschließlich Atmosphäre und Ozeanen. Die Längeneinheit ist die *Système international d'unités* (SI)-Basiseinheit Meter. Die horizontalen Geschwindigkeiten der Stationen dürfen keine Rotationen aufweisen, um die zeitliche Entwicklung der Orientierung zu gewährleisten. Die Z-Achse ist die Rotationsachse der Erde. Die Ausrichtung ist gegeben durch den mittleren terrestrischen Nordpol zur Epoche 1900,0 bis 1906,0, den sogenannten *Conventional International Origin* (CIO). Die X-Achse geht durch den mittleren Meridian von Greenwich. Die Y-Achse ergänzt das rechtwinklige Koordinatensystem (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008)

Der *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) ist die Realisierung des ITRS. Dieser Bezugsrahmen wird durch die geozentrischen kartesischen Koordinaten und Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen gebildet. Die Berechnung der Positionen und Bewegungen erfolgt durch mehrere geodätische Raumberechnungsverfahren, wie VLBI, *Lunar Laser Ranging* (LLR), *Satellite Laser Ranging* (SLR), GNSS und *Doppler Orbit determination and Radio positioning Integrated on Satellite* (DORIS) (Petit und Luzum 2010).

Die verschiedenen Realisierungen sind durch unterschiedliche Jahreszahlen gekennzeichnet. Bei der Berechnung des ITRF2005 wurden erstmals Tages- bzw. Wochenlösungen miteinander kombiniert, wodurch er sich von den vorherigen Realisierungen des ITRS unterscheidet, die auf Mehrjahreslösungen beruhen (Altamini u. a. 2007).

Der aktuelle und gegenüber dem ITRF2005 verbesserte Bezugsrahmen ist der ITRF2008. Verglichen mit dem ITRF2005 wurden zusätzliche Stationen und verfeinerte Berechnungsmodelle eingeführt (Altamini u. a. 2011).

Angeknüpft an die ITRF2005- bzw. ITRF2008-Realisierungen sind die Bezugsrahmen IGS05 bzw. IGS08. Zur Bestimmung dieser Realisierungen werden nur die GNSS-Beobachtungsdaten von Stationen des ITRF-Referenznetzes verwendet. Der IGS plant einen Wechsel vom IGS05 zum IGS08 im April 2011 (Rebischung 2011).

2.1.3 Transformation zwischen zälestischem und terrestrischem Referenzsystem

Die Beziehung zwischen dem (geozentrischen) zälestischen und terrestrischen Bezugsrahmen ist durch folgende Transformationsgleichung gegeben (Torge 2002):

$$\underline{X}_{ITRS} = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3\Theta(t)N(t)P(t)\underline{X}_{ICRS}. \quad (2.1)$$

| | |
|------------------------|---|
| \underline{X}_{ITRS} | Koordinatenvektor im ITRS |
| \underline{X}_{ICRS} | Koordinatenvektor im ICRS |
| R_i | Rotationsmatrix um die Achse i , $i = X, Y, Z$ |
| x_p, y_p | rechtwinklige Polkoordinaten |
| $P(t)$ | Präzessionsmatrix zur Beobachtungsepoche t |
| $N(t)$ | Nutationsmatrix zur Beobachtungsepoche t |
| $\Theta(t)$ | Scheinbare Sternzeit Greenwich zur Beobachtungsepoche t |

Die einzelnen Parameter, die notwendig sind, um von dem konventionellen raumfesten Koordinatensystem zu dem konventionellen terrestrischen Koordinatensystem zu gelangen (Abb. 2.1), werden im Folgenden beschrieben. Auf die Darstellung von Formeln wird verzichtet und stattdessen auf IERS Conventions von Petit und Luzum (2010) verwiesen.

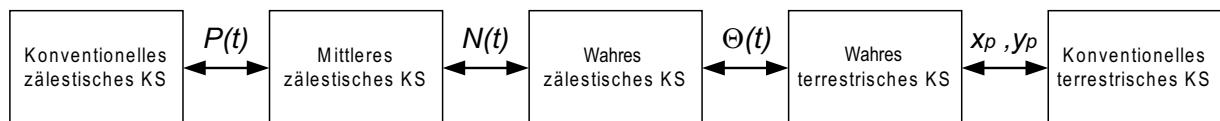


Abb. 2.1: Transformation zwischen dem konventionellen zälestischen und dem konventionellen terrestrischen Koordinatensystem (Bauer 2003)

Präzession

Die Massenanziehungen von Sonne und Mond auf den gewölbten Äquator erzeugen ein Drehmoment mit dem Bestreben, die Äquatorebene in die Ebene der Ekliptik zu verlagern und somit die Erdachse (Z-Achse) aufzurichten. Infolgedessen entsteht eine Kreiselbewegung der Erdachse auf einem Kegelmantel um den Nordpol der Ekliptik. Der Öffnungswinkel dieses Kegels entspricht mit $23,5^\circ$ der Neigung der Ekliptik gegenüber dem Äquator. Ein Umlauf entspricht einer Periode von etwa 25800 Jahren. Die Anziehungskräfte der Planeten führen zu einer zusätzlichen langsamen Verlagerung der Erdbahn und somit zu einer Bewegung des Frühlingspunktes auf dem Äquator (Torge 2002). Der Koordinatenvektor \underline{X}_{ICRS} des konventionellen zälestischen Koordinatensystems zur Epoche J2000,0 wird mit der Präzessionsmatrix $P(t)$ in das mittlere zälestische System zur Epoche t transformiert. Die dafür erforderlichen Präzessionsparameter sind z. B. in den IERS Conventions von Petit und Luzum (2010) veröffentlicht.

Nutation

Die zeitlichen Veränderungen der Mondbahnneigung gegenüber der Ekliptik verursachen die Nutation. Diese kurzperiodischen Effekte überlagern die Präzession. Die Perioden der Nutation liegen zwischen 5 Tagen und 18,6 Jahren (Torge 2002). Mit der Nutationsmatrix $N(t)$ wird der mittlere zälestische Koordinatenvektor in das wahre zälestische System transformiert. Die Nutationsmatrix berechnet sich aus der Neigung der Ekliptik sowie den Nutationswinkeln, die sich aus den Differenzen zwischen mittlerem und wahren Äquator ergeben (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

Scheinbare Sternzeit Greenwich

Der Übergang eines wahren zälestischen in ein wahres terrestrisches und somit erdfestes Koordinatensystem erfolgt über die Drehung der Rotationsachse. Der Winkel $\Theta(t)$, um den die Z-Achse gedreht wird, ist die *Greenwich Apparent Sidereal Time* (GAST). GAST entspricht dem Stundenwinkel zwischen dem wahren Frühlingspunkt und dem Nullmeridian durch Greenwich. Zur Berechnung der scheinbaren Sternzeit GAST muss die *Greenwich Mean Sidereal Time* (GMST) um den Einfluss der Nutation reduziert werden. Der Zusammenhang zwischen mittlerer Sternzeit GMST und Weltzeit *Universal Time* (UT1) wurde 1984 von der IAU definiert. Diese universelle Zeitskala in der geodätischen Astronomie und Satellitengeodäsie enthält alle Variationen der Erdrotation (Seeber 2003).

Polbewegung

Im letzten Schritt wird mit den Polkoordinaten x_p und y_p , das wahre terrestrische in das konventionelle terrestrische Koordinatensystem transformiert. Die Polbewegung ist definiert als die Verlagerung der Erdachse relativ zur Erdkruste. Die Polbewegung setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen und bewirkt eine spiralförmige Wanderung des momentanen Pols mit langsamer fortschreitender Mittellage (Torge 2002). Die rechtwinkligen Polkoordinaten im ebenen Koordinatensystem geben die tägliche Pollage des *Celestial Ephemeris Pole* (CEP) gegenüber dem *Celestial Intermediate Pole* (CIP) an und werden täglich vom IERS bereitgestellt (Xu 2003).

2.1.4 Umformung zwischen verschiedenen Koordinatensystemen

Für die Transformation von Punkten eines Referenzsystems in ein anderes Referenzsystem sind kartesische Koordinaten sehr gut geeignet. Allerdings ist mit der Angabe des Punktes in X , Y und Z die räumliche Vorstellung über die Lage eines Punktes auf der Erdoberfläche schwierig. Für die bessere Veranschaulichung werden die ellipsoidischen Koordinaten Länge λ , Breite φ und Höhe h verwendet. Ebenso ist es sinnvoll (z. B. für Punktverschiebungen), ein lokales topozenrisches Koordinatensystem einzuführen. Diese drei Koordinatensysteme sind in Abb. 2.2 dargestellt.

Die beiden folgenden Unterpunkte fassen kurz die Transformation von kartesischen in ellipsoidische und anschließend in topozenrische Koordinaten zusammen.

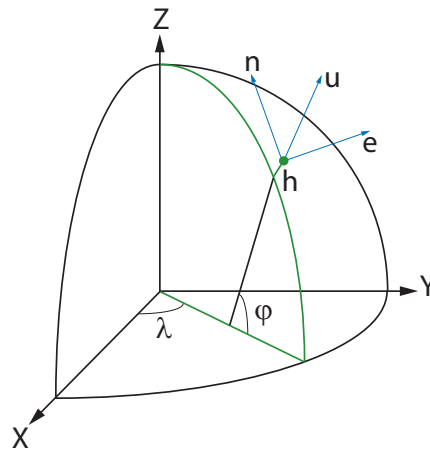


Abb. 2.2: Kartesisches, ellipsoidisches und topozentrisches Koordinatensystem (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008)

Transformation von kartesischen in ellipsoidische Koordinaten

Für die Transformation der kartesischen Koordinaten X , Y und Z in ellipsoidische Koordinaten λ , φ und h sind zusätzlich Informationen über die große und kleine Halbachse (a und b) des Ellipsoides notwendig. Die Formeln lauten wie folgt (Seeber 2003):

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2.2)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N + h}\right)^{-1}\right) \quad (2.3)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos(\varphi)} - N \quad (2.4)$$

mit dem Querkrümmungsradius N

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin(\varphi)^2}} \quad (2.5)$$

und der ersten numerischen Exzentrizität e

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (2.6)$$

Da φ und h in Gl. 2.3 und Gl. 2.4 vorkommen, können die Gleichungen nur durch Iteration gelöst werden. Als Startwert für h wird meist 0 gewählt.

Transformation in das topozentrische Koordinatensystem

Bei dem lokalen topozentrischen Koordinatensystem wird eine Tangentialebene an den Punkt P gelegt. Punkt P liegt im Ursprung des Koordinatensystems und ist der Standpunkt des Beobachters. Die Koordinaten in Nord n , Ost e und Höhe u werden aus dem Vektor der kartesischen Koordinaten \underline{X} und der

Transformationsmatrix T berechnet (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$\begin{bmatrix} n \\ e \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \cdot T \quad (2.7)$$

mit

$$T = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \cdot \cos(\lambda) & -\sin(\varphi) \cdot \sin(\lambda) & \cos(\varphi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda) & \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda) & \sin(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

2.2 GNSS-Systeme

Die Bezeichnung GNSS steht als Oberbegriff für das amerikanische Navigationssystem GPS, das russische Pendant GLONASS, das sich derzeit im Aufbau befindende europäische Satellitensystem Galileo sowie weitere satellitengestützte Systeme. Alle Systeme arbeiten unabhängig voneinander, können oder sollen aber in der Zukunft gemeinsam als ein integriertes GNSS-System genutzt werden. Die GNSS-Systeme GPS und GLONASS sind derzeit in einer Modernisierungsphase, aber voll funktionsfähig. Ein Überblick wird in Kap. 2.2.1 gegeben. Das europäische Satellitennavigationssystem Galileo befindet sich noch in der Entwicklungsphase, eine volle Betriebsbereitschaft soll 2013 erreicht werden (Schüler 2009).

Neben diesen drei Satellitennavigationssystemen gibt es unter anderem noch das globale chinesische System COMPASS sowie die regionalen Navigationssysteme *Quasi-Zenit Satellite System* (QZSS) aus Japan und das *Indian Regional Navigational Satellite System* (IRNSS) aus Indien. Die Beschreibungen dieser Systeme finden sich u. a. in Becker (2009) und Maeda (2010).

Zusätzlich sind noch sogenannte Ergänzungssysteme, die *Satellite Based Augmentation Systems* (SBAS) zu GPS und zukünftig auch GLONASS, vorhanden. Durch diese Systeme werden die Zuverlässigkeit der Beobachtungskorrekturen und die Genauigkeit der Positionsbestimmung gesteigert. Die dafür notwendigen Informationen werden von geostationären Satelliten ausgesendet (Wanninger 2009).

Die folgenden Abschnitte beschreiben die für die Arbeit relevanten Systeme GPS und GLONASS und den Vorteil der gemeinsamen Nutzung sowie die verschiedenen Möglichkeiten der Auswertung von GNSS-Beobachtungen. Ebenso werden kurz die Messabweichungen der Beobachtungsgrößen und deren Auswirkungen auf die Positionsbestimmung behandelt.

2.2.1 GPS und GLONASS

GPS ist ein von den USA ursprünglich für militärische Zwecke entwickeltes Ortungssystem. Im Gründungsjahr 1973 war die korrekte Bezeichnung *Navigation Satellite Timing and Ranging* (NAVSTAR)-GPS. Mitte 1995 erreichte das System mit 24 Satelliten seine volle Leistungsfähigkeit. Bis zum Jahr 2002 hatte sich die Anzahl der aktiven Satelliten auf 27 erhöht (Bauer 2003). Im Jahre 1999 wurde eine Modernisierung des GPS-Systems beschlossen. Betroffen von den Verbesserungen sind das Kontrollseg-

ment sowie die Satelliten und deren Signale. Die Erneuerung des GPS-Systems begann mit dem Start der ersten Satelliten des Blocks IIR-M (M: modernisiert). Nachfolger sind die Satelliten des Blocks IIF (F: folgend). Das Besondere an dieser neuen Satellitengeneration ist das Signal auf einer dritten Frequenz L5 (L5-Band). Weiterhin wird erwartet, dass die Satelliten des Blocks IIF eine höhere Lebensdauer haben (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

Zum jetzigen Zeitpunkt (Ende 2010) sind 31 GPS-Satelliten im Betrieb. Davon gehören 11 dem Block IIA (A: erweitert (*advanced*)), 12 dem Block IIR (R: ausgetauscht (*replacement*)) und 7 dem Block IIR-M an. Seit August 2010 ist der erste GPS-Satellit des Blocks IIF im Betrieb. Dies ist der erste Satellit, der das L5 Signal aussendet (Gruber 2010).

Das Gegenstück zum von den Amerikanern aufgebauten GPS ist das von den russischen Streitkräften entwickelte GLONASS. Erste Entwicklungen begannen im Jahr 1972 und somit relativ zeitgleich zum GPS. Die erste vollständige GLONASS-Konstellation mit 24 aktiven Satelliten wurde Anfang 1996 erreicht. Die relativ kurze Lebenszeit der GLONASS-Satelliten und ökonomische Schwierigkeiten in der russischen Föderation führten dazu, dass die Anzahl der verfügbaren GLONASS-Satelliten rapide abnahm. So waren im Jahre 2002 nur noch sieben Satelliten aktiv (Bauer 2003). Im Jahre 2002 erfolgte dann allerdings der Beschluss zur Modernisierung des Raumsegments des russischen Satellitennavigationssystems. Diese Modernisierung ist in drei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase sollte die Konstellation so verbessert werden, dass eine Mindestanzahl der erforderlichen GLONASS-Satelliten in Betrieb sind. Die zweite Phase beinhaltet die Entwicklung der GLONASS-M Satelliten. Die Satellitenkonstellation sollte mit den schon vorhandenen Satelliten 18 betragen. In der letzten Phase wird das System durch zusätzliche GLONASS-K Satelliten ausgedehnt und ist mit 24 Satelliten vollständig wiederhergestellt (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

Im September 2010 wurden drei neue GLONASS-M Satelliten gestartet und seit Oktober sind diese in Betrieb. Die GLONASS-Konstellation wird aktuell mit 26 Satelliten, von denen 20 aktiv sind, angegeben. Anfang 2011 ist der Start von drei weiteren GLONASS-M (M: modifiziert) Satelliten geplant. Ebenso sollen die ersten GLONASS-K Satelliten getestet werden. Bei diesen Satelliten der neueren Generation wird erwartet, dass sie mit 10 Jahren eine längere Lebenszeit erreichen, die Uhren der Satelliten über eine höhere Stabilität verfügen und ein zusätzliches Signal bei G3 liegen soll (Revnivykh 2010).

In Tab. 2.1 sind einige Systemmerkmale von GPS und GLONASS aufgeführt. Ausführliche Systembeschreibungen sind in einschlägiger Literatur wie zum Beispiel Hofmann-Wellenhof u. a. (2008) und Bauer (2003) zu finden. GPS hat deutlich mehr Satelliten auf mehr Bahnebenen. Aufgrund der Bahnhöhe der GPS-Satelliten beträgt deren Umlaufzeit 12 Stunden Sternzeit, also ca. 11 Stunden und 58 Minuten nach *Coordinated Universal Time* (UTC)-Zeit. Somit wiederholt sich die Satellitenkonstellation jeden Tag 4 Minuten früher. Die Umlaufzeit der GLONASS-Satelliten beträgt 11 Stunden 15 Minuten und 44 Sekunden. Eine gleiche Satellitenkonstellation wird erst wieder nach 8 Tagen erreicht.

Beide Systeme haben ein unterschiedliches Geodätisches Datum. Aus diesem Grund müssen die Satellitenkoordinaten in ein einheitliches System transformiert werden. Das nationale geozentrische Koordinatensystem "Earth Parameters 1990" (PZ-90.02) von GLONASS ist am ITRF2000 orientiert. Dadurch ist nur noch eine Translation zwischen beiden Systemen notwendig (Becker 2009). Der Unterschied zwischen beiden Zeitsystemen ist bekannt und wird durch die Navigationsnachricht übermittelt. Ebenso kann dieser Offset als unbekannter Parameter in der Auswertung geschätzt werden.

Tab. 2.1: Systemmerkmale von GPS und GLONASS (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Urlichich u. a. 2010)

| Parameter | GPS | GLONASS |
|-------------------------------|--|--|
| Erster Start | Februar 1978 | Oktober 1982 |
| Komplett | Juli 1995 | Januar 1996 |
| Max. Anzahl an Satelliten | 32 | 24 |
| Orbitebenen | 6 | 3 |
| Orbit Inklination | 55° | 64,8° |
| Große Halbachse | 26560 km | 25510 km |
| Wiederholung Bodenspur | ein siderischer Tag | 8 siderische Tage |
| Geodätisches Datum | WGS 84 | PZ-90.02 |
| Zeit System | GPS-Systemzeit, UTC | GLONASS-Systemzeit, UTC(SU) |
| Signaltrennung und Frequenzen | Code division multiple access (CDMA) L1 (L1-Band): 1575,420 MHz L2 (L2-Band): 1227,600 MHz L5 (L5-Band): 1176,450 MHz | Frequency division multiple access (FDMA) G1: 1598,000 bis 1606,000 MHz G2: 1243,000 bis 1249,000 MHz CDMA für GLONASS-K Satelliten G3: 1202,025 MHz |

Bei beiden Systemen ist die Signaltrennung unterschiedlich. Bei GPS ist die Übertragungsfrequenz identisch, der *Pseudo Range Noise* (PRN)-Code ist für jeden Satelliten individuell (CDMA-Signaltrennung). Bei GLONASS ist dieser Code zwar für alle Satelliten gleich, aber jeder Satellit sendet diesen auf seiner eigenen Frequenz (FDMA-Signaltrennung). Die Trägerfrequenzen der GLONASS-Signale lassen sich durch folgende Formeln beschreiben (Bauer 2003):

$$f_{G1} = 1602,000 + k \cdot 0,5625 \text{ MHz} \quad (2.9)$$

$$f_{G2} = 1246,000 + k \cdot 0,4375 \text{ MHz}. \quad (2.10)$$

Der Faktor k steht für die Kanalnummer und ist in der GLONASS-Navigationsnachricht enthalten. Eine Umstellung von FDMA auf CDMA für die neuen GLONASS-K Satelliten ist für die nächsten Jahre geplant (Revnivykh 2010, Urlichich u. a. 2010).

GPS und GLONASS sind zwei voneinander unabhängige selbstständige Navigationssysteme. Werden beide Systeme miteinander kombiniert, führt dies zu einer Verbesserung in der Integrität, Verfügbarkeit und der Genauigkeit. Ist bei beiden Systemen die Satellitenanzahl vollständig, stehen einem Beobachter an jedem Ort mindestens acht, meist jedoch sogar mehr als zwölf Satelliten zur Verfügung. Dies erleichtert die Identifikation und den Ausschluss eines fehlerhaften Satelliten. Durch die hohe Satellitenanzahl ist auch eine Positionsbestimmung in Gebieten mit starken Abschattungen immer noch möglich. Abb. 2.3 zeigt die Verbesserung der Satellitenabdeckung durch die Hinzunahme der GLONASS-Satelliten. Während bei einer GPS-Auswertung in Abhängigkeit des Messgebietes nur ca. 7 bis 10 Satelliten durchschnittlich sichtbar waren, sind es durch die zusätzlichen GLONASS-Satelliten ca. 12 bis 16.

Die höhere Inklination der GLONASS-Satelliten führt dazu, dass sich in den nördlichen bzw. südlichen Breiten das sogenannte Nordloch bzw. Südloch verkleinert. Dies verbessert den *Position Dilution of Precision* (PDOP), welcher ein Maß für die Empfänger-Satelliten-Geometrie ist. Je kleiner dieser Wert ist, desto besser ist die Positionslösung (Bauer 2003). Springer und Dach (2010) zeigten eine Verkleinerung

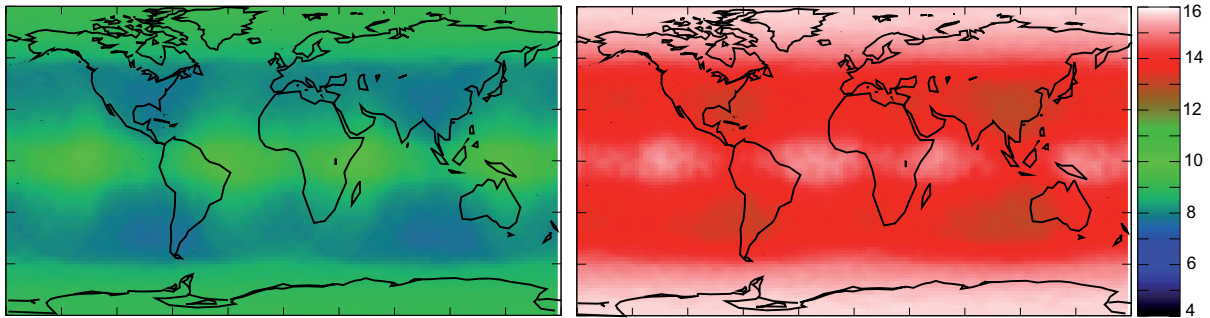


Abb. 2.3: Durchschnittliche Anzahl an GPS-Satelliten (links) und GPS+GLONASS-Satelliten (rechts) bei einer Elevationsmaske von 10°

des PDOP um bis zu 30% in den nördlichen bzw. südlichen Regionen.

2.2.2 Auswertung von GNSS-Beobachtungen

Das Prinzip der Satellitennavigation beruht auf den Messungen von sogenannten Pseudostrecken zwischen Nutzer und mindestens vier Satelliten. Durch die bekannten Positionen der Satelliten und die Satellitenuhrkorrekturen kann die Nutzerposition bestimmt werden. Die Messgrößen zur Bestimmung der Pseudostrecken sind primär die Code- und die Phasenmessungen. Der hauptsächliche Unterschied zwischen beiden Größen ist die Eindeutigkeit des Codes und die Mehrdeutigkeit der Phase. Der Vorteil der Phasenmessung ist die deutlich höhere Genauigkeit gegenüber der Codemessung (Seeber 2003). Je nach Anwendung wird zwischen einer absoluten und einer relativen Positionsbestimmung unterschieden.

Absolute GNSS-Positionsbestimmung

Ursprünglich erfolgte eine absolute Positionsbestimmung auf der Grundlage von Codemessungen. Die vereinfachte Beobachtungsgleichung für eine einzelne gemessene Code-Pseudostrecke C zwischen Empfänger und Satellit lautet (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$C = \rho + c_0(dt + dT) + \varepsilon(C) \quad (2.11)$$

mit

$$\rho = \sqrt{(X_E - X_{SV})^2 + (Y_E - Y_{SV})^2 + (Z_E - Z_{SV})^2}. \quad (2.12)$$

Die geometrische Distanz ρ ergibt sich aus den bekannten Satellitenkoordinaten X_{SV} , Y_{SV} , Z_{SV} und den Empfängerkoordinaten X_E , Y_E , Z_E . Die Parameter dt und dT sind die Empfängeruhrabweichung sowie die Satellitenuhrkorrektur. Die Lichtgeschwindigkeit ist mit c_0 gekennzeichnet. Der Parameter ε stellt das Messrauschen dar. Die vier Unbekannten dieser Gleichung sind die Empfängerkoordinaten sowie die Empfängeruhrabweichung. Aufgrund dieser vier Unbekannten sind simultane Messungen zu mindestens vier Satelliten erforderlich. Bei der zivilen Nutzung von GNSS werden hauptsächlich Einfrequenz-Codebeobachtungen verwendet. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen bei dieser Anwen-

dung bei ca. 10 m. Mit Zweifrequenz-Codebeobachtungen kann die Genauigkeit deutlich gesteigert werden.

Eine absolute GNSS-Auswertung kann aber auch auf der Basis von Phasenbeobachtungen Φ durchgeführt werden. Es ergibt sich folgende Beobachtungsgleichung:

$$\Phi = \rho + c_0(dt + dT) + \lambda \cdot N + \varepsilon(\Phi). \quad (2.13)$$

Das heißt bei einer Phasenmessung sind zusätzlich noch die Mehrdeutigkeiten N als Unbekannte zu bestimmen. Diese sind mit der jeweiligen Wellenlänge λ zu multiplizieren. Dieses Auswerteprinzip wird auch als *Precise Point Positioning* bezeichnet. Um bei diesem Messverfahren Genauigkeiten im Zentimeterbereich zu erhalten, sind präzise Satellitenorbits und Uhrinformationen sowie weitere Korrekturen erforderlich. Ausführliche Erläuterungen zu diesem Thema erfolgen in den nächsten Kapiteln.

Relative GNSS-Positionsbestimmung

Bei einer relativen GNSS-Auswertung werden von mindestens zwei Stationen simultane Messungen zu mindestens vier Satelliten durchgeführt. Auf diese Weise werden durch Differenzbildung zahlreiche Messabweichungen minimiert oder sogar eliminiert. Von den simultan messenden Stationen muss eine die Referenzstation sein, d. h. die Koordinaten dieser Station bzw. Stationen sind bekannt. Das Ergebnis der relativen Positionsbestimmung ist nunmehr der Basislinienvektor zwischen Referenz- und unbekannter Empfängerstation. Wird dieser Vektor zu den bekannten Koordinaten der Referenzstation addiert, ergeben sich die gesuchten Koordinaten.

Werden Codedaten als Messgröße verwendet, lautet das Verfahren differentiell GNSS (DGNSS). Die Beobachtungsgleichung für die Codedifferenz $\Delta C_{a,b}$ zweier Empfänger a und b definiert sich als:

$$\Delta C_{a,b} = \Delta \rho_{a,b} + c_0 \cdot \Delta dt_{a,b} + \varepsilon_{a,b}(\Delta C). \quad (2.14)$$

Das Symbol Δ bezeichnet die Differenzen zwischen den jeweiligen Größen der Empfänger. Durch diese Messanordnung und Auswertung lässt sich die Satellitenuhrabweichung eliminieren. Weiterhin werden Orbit- und ionosphärische sowie troposphärische Laufzeitabweichungen in Abhängigkeit der Basislinienlänge minimiert. Im Gegensatz zur absoluten Positionsbestimmung mit dem Code wird hierbei die Genauigkeit der Nutzerposition auf einen Meter verbessert (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Bauer 2003).

Für eine weitere Genauigkeitssteigerung werden stattdessen oder zusätzlich zu den Codebeobachtungen die Phasendaten verwendet. Bei der relativen Positionierung mit Phasendaten kann zwischen einfachen Differenzen und doppelten Differenzen unterschieden werden. Einfache Phasendifferenzen $\Delta \Phi_{a,b}$ bilden sich, wie schon bei den Codebeobachtungen, aus den von zwei Empfängern simultan beobachteten Signalen eines Satelliten.

$$\Delta \Phi_{a,b} = \Delta \rho_{a,b} + c_0 \cdot \Delta dt_{a,b} + \lambda \cdot \Delta N_{a,b} + \varepsilon_{a,b}(\Delta \Phi) \quad (2.15)$$

Bei den doppelten Phasendifferenzen $\nabla \Delta \Phi_{a,b}$ werden aus den einfachen Empfängerdifferenzen die Dif-

ferenzen zu zwei Satelliten gebildet.

$$\nabla\Delta\Phi_{a,b} = \nabla\Delta\rho_{a,b} + \lambda \cdot \nabla\Delta N_{a,b} + \varepsilon_{a,b}(\nabla\Delta\Phi) \quad (2.16)$$

Durch diese doppelte Differenzbildung wird zusätzlich die Empfängeruhrabweichung eliminiert. Dadurch gelingt es, dass die Mehrdeutigkeiten auf ganze Zahlen festgesetzt werden (*fixed*-Lösung). Bei der relativen Positionierung mit Trägerphasenbeobachtungen können schon nach wenigen Minuten zentimetergenaue Ergebnisse erreicht werden (Seeber 2003, Hofmann-Wellenhof u. a. 2008).

2.2.3 Messabweichungen und deren Auswirkungen auf die Positionsbestimmung

Auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger beeinflussen mehrere Faktoren die Code- und Phasenbeobachtungen, die zu Messabweichungen führen und somit Auswirkungen auf die Positionsbestimmung haben.

Satellitenbahn und -uhrkorrekturen

Abweichungen in der Satellitenbahn sind zwar keine Messabweichung im eigentlichen Sinne, haben aber dennoch einen direkten Einfluss auf die Pseudostreckenmessung. Die am häufigsten verwendeten *broadcast*-Ephemeriden werden mit einer Genauigkeit von derzeit einem Meter angegeben. Die präzisen Orbits des IGS haben eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern (IGS 2010). Bei der absoluten Positionsbestimmung wirkt diese Abweichung ähnlich der *Dilution of Precision* (DOP)-Faktoren. Eine deutliche Verringerung des Positionsfehlers erreicht man mit einer relativen Positionsbestimmung. Eine Orbitabweichung von einem Meter verursacht bei einer Basislinienlänge von 100 km eine Basislinienabweichung von ca. 4 cm. Bei der Verwendung von präzisen Ephemeriden wird diese Abweichung fast bedeutungslos gering (Seeber 2003).

Auch die Abweichung der Satellitenuhrkorrektur ist keine Messabweichung. Durch eine relative Positionsbestimmung wird der Einfluss der Satellitenuhrabweichung vollständig eliminiert. Bei der absoluten Positionsbestimmung wirkt diese, wie die Satellitenbahnabweichung, entsprechend der DOP-Faktoren (Bauer 2003). Die *broadcast*-Uhrkorrekturen haben eine Genauigkeit von ca. 2,50 ns (0,75 m). Die präzisen Uhrkorrekturen des IGS liefern eine Genauigkeit von weniger als 0,03 ns (0,01 m) (IGS 2010).

Abweichungen in der Signalausbreitung

Die verschiedenen Bedingungen in der Atmosphäre führen dazu, dass sich das Signal mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Richtungen ausbreitet. Die obere Atmosphäre setzt sich aus der Ionosphäre und der Protonosphäre zusammen. Ein Merkmal der Ionosphäre sind die in hohem Maße ionisierten Teilchen (negative geladene Elektronen und positive Ionen), die durch die Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne verursacht werden. Die Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung der Signale in dieser Schicht ist die ionosphärische Refraktion, wobei die Strahlkrümmung nur einen geringen Einfluss hat. Die Ionosphäre ist für Mikrowellen dispersiv, d. h. die Ausbreitungseigenschaften sind für diese

Signale frequenzabhängig und wirken somit auf Code und Phase unterschiedlich. Mittels Zweifrequenz-Messungen kann daher die ionosphärische Laufzeitverzögerung berechnet und somit die Abweichung beseitigt werden. Stehen nur Einfrequenz-Messungen zur Verfügung, verringert sich die Abweichung durch eine relative Positionsbestimmung deutlich. Außerdem können geophysikalische Korrekturmodelle verwendet werden (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Seeber 2003, Bauer 2003).

Die untere Schicht der Atmosphäre bildet die Troposphäre. Im Gegensatz zur Ionosphäre sind keine freien Elektronen oder Ionen in dieser Schicht vorhanden. Ursache für die troposphärische Refraktion sind Gasmoleküle, die mit abnehmender Höhe stetig zunehmen. Die Troposphäre ist für Mikrowellen nicht dispersiv, d. h. die Ausbreitungseigenschaften der Signale sind frequenzunabhängig. Die troposphärische Refraktion kann daher nur durch Standardmodelle entsprechend erfasst und beseitigt werden. Verbleibende Restabweichungen werden durch relative Positionierung, insbesondere bei geringen Höhenunterschieden, minimiert. Bei langen Beobachtungszeiten kann diese Abweichung auch als Unbekannte in der Ausgleichung geschätzt werden (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Seeber 2003, Bauer 2003). Ausführliche Erläuterungen zur troposphärischen Refraktion und Modellierung erfolgen in weiteren Kapiteln der Arbeit.

Eine weitere Abweichung in der Signalausbreitung sind die Mehrwegeeffekte. Aufgrund der Umgebung der Empfangsantenne erreicht diese ein Mischsignal aus direktem und reflektiertem Signal. Diese Reflexionen können durch Straßen, Gebäude, Autos oder Ähnliches hervorgerufen werden. Mehrwege beeinflussen die Codebeobachtungen ca. 100-mal mehr als die Phasenbeobachtungen. Durch Überlagerung von direktem und reflektiertem Signal beträgt die theoretische Messabweichung bei Phasendaten maximal ein Viertel der Signalweglänge. Durch eine Linearkombination kann sich diese Abweichung allerdings erhöhen. Da die Mehrwegeeffekte nicht durch eine relative Messanordnung beseitigt oder eliminiert werden können, sollte bei einer präzisen Positionierung der Empfängerstandpunkt sorgfältig ausgewählt werden. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Mehrwegeausbreitung ist eine Detektierung in geometrie-freier Linearkombination möglich. Weitere Möglichkeiten zur Minimierung von Mehrwegeeffekten sind lange Beobachtungszeiten (Seeber 2003, Wanninger u. a. 2000, Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Leick 2004).

Signalbeugung tritt dann auf, wenn Sichthindernisse den Empfang des direkten Signals verhindern und so ein indirektes Signal mit einer längeren Laufzeit die Antenne erreicht. Im Gegensatz zur Mehrwegeausbreitung tritt keine Signalüberlagerung auf und der zusätzliche Signalweg des gebeugten Signals ist die tatsächliche Messabweichung, die einige Zentimeter bis Dezimeter betragen kann und nicht frequenzabhängig ist. Eine Möglichkeit zur Detektierung des gebeugten Signals ist das Signal-Rausch-Verhältnis *Signal-Noise-Ration* (SNR). Bei der Datenauswertung können dann die betroffenen Phasendaten mit verringertem Gewicht in die Auswertung eingehen (Bauer 2003, Wanninger u. a. 2000, Seeber 2003).

Abweichungen im Empfangssystem

Der Signalweg wird auch an der Empfangsantenne und vom Empfänger selbst beeinflusst. Der Phasenzentrumsoffset (PZO) an der Empfangsantenne ist definiert als der Offset zwischen dem elektrischen Phasenzentrum und dem mechanischen Zentrum (Antennenreferenzpunkt). Dieser Offset kann einige Zentimeter betragen und ist als dreidimensionaler Vektor für jede Frequenz gegeben. Die Abweichungen

zwischen dem mittleren Phasenzentrum und den individuellen Messungen der ankommenden Signale sind die Phasenzentrumsvariationen (PZV). Diese sind vom Azimut und von der Elevation der einfallenden Signale und, wie schon die PZO, von der Frequenz abhängig (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Wanninger 2002).

Sowohl die PZO als auch die PZVs müssen für die Empfangsantenne bekannt sein, um die Beobachtungen korrigieren zu können. Möglichkeiten zur Bestimmung dieser Abweichungen sind die Laborkalibrierung sowie die individuelle relative und absolute Feldkalibrierung. Für eine große Anzahl von Antennentypen sind diese Typmittel in der sogenannten *Antenna Exchange* (ANTEX)-Datei dokumentiert. Liegen keine individuell ermittelten Antennenkalibrierwerte vor, kann auf diese Werte zurückgegriffen werden. Da Antennen gleicher Bauart die ähnlichen Phasenzentrumsvariationen und -offsets zeigen, können diese bei der relativen Positionsbestimmung durch gleiche Ausrichtung der Antennen deutlich verringert werden (Bauer 2003, Wanninger 2002, Schmid u. a. 2007).

Die eigentlichen Phasen- und Codebeobachtungen können vom Empfänger nur mit einer begrenzten Genauigkeit gemessen werden. Diese Messauflösung beträgt ca. 1% der Messgrößen und wird als Messrauschen bezeichnet. Durch spezielle Signalverarbeitung können moderne Empfänger dieses Code- und Phasenrauschen nochmals verringern. Ein niedrigeres Messrauschen kann zum Beispiel für die Echtzeit-Mehrdeutigkeitslösung wichtig werden (Seeber 2003).

2.3 Prinzipien der Ausgleichsrechnung

Die Grundlage der Ausgleichung in dieser Arbeit ist die von Gauß entwickelte Methode der kleinsten Quadrate. Nachfolgend werden die Prinzipien dieses Ausgleichungsansatzes beschrieben. Außerdem werden die für die vorliegende Arbeit verwendeten Verfahren der Eliminierung von Parametern sowie der sequentiellen Ausgleichung dargestellt.

2.3.1 Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate

Zur Schätzung unbekannter Parameter nach dem Prinzip der Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen wird das GAUSS-MARKOV-Modell eingesetzt. Dieses lineare mathematische Modell unterteilt sich in einen funktionalen und einen stochastischen Teil. Das funktionale Modell beschreibt die mathematisch-physikalischen Beziehungen zwischen den Messgrößen und den unbekannt Parametern. Die wahrscheinlichkeitstheoretischen Eigenschaften der Beobachtungen werden im stochastischen Modell beschrieben (Welsch u. a. 2000). Die folgenden Ausführungen sowie Herleitungen und Formeln beruhen, wenn nicht anders angegeben, auf Niemeier (2008).

Die wahren bzw. theoretischen Beobachtungen \tilde{L}_i sind eine Funktion f_i aller eingehenden (wahren) Parameter \tilde{X}_u der Anzahl u .

$$\tilde{L}_i = f_i(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3, \dots, \tilde{X}_u) \quad (2.17)$$

Da die tatsächlichen Messgrößen L_i immer mit einer Messunsicherheit versehen sind, müssen Verbesserungen v_i eingeführt werden. Die wahren Parameter \hat{X}_u sind ebenso nicht bekannt, sondern werden

geschätzt. Aus Gl. 2.17 ergibt sich folgende Beziehung:

$$L_i + v_i = f_i(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \dots, \hat{X}_u). \quad (2.18)$$

Voraussetzung für die Parameterschätzung ist eine lineare Beziehung zwischen Messgröße und Parametern. Wenn diese nicht vorhanden ist, wird eine Linearisierung durch eine Reihenentwicklung 1. Ordnung nach Taylor erforderlich. Die Glieder höherer Ordnung können vernachlässigt werden. Die allgemeine Darstellung dieser Linearisierung für n Beobachtungen und dementsprechend auch n Funktionen lautet:

$$L_i + v_i = f_i(X_1^0, X_2^0, X_3^0, \dots, X_u^0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_1} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_2} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_u} \right)_{X^0} \cdot \hat{x}_u. \quad (2.19)$$

Die partiellen Ableitungen, abgekürzt durch

$$a_{i,j} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j} \right)_{X^0}, \quad (2.20)$$

bilden die Koeffizientenmatrix $A_{n,u}$. Die ausgeglichenen Parameter \hat{X} setzen sich aus den fixen, nicht stochastischen Näherungswerten X^0 und den stochastischen Parameterzuschlägen \hat{x} zusammen.

$$\hat{X} = X^0 + \hat{x} \quad (2.21)$$

Ebenso kann der Beobachtungsvektor L in

$$L = L^0 + l \quad (2.22)$$

zerlegt werden. Die Näherungswerte L^0 werden an den Näherungsstellen X^0 bestimmt. Die gekürzten Beobachtungen l bilden den eigentlichen Beobachtungsvektor, welcher für die weiteren Berechnungen genutzt wird. Für das endgültige lineare funktionale Modell gilt:

$$l + v = A \cdot \hat{x}. \quad (2.23)$$

Die Forderung der Methode der kleinsten Quadrate ist das Minimumsprinzip. Dieses besagt, dass die Summe der Quadrate der Verbesserungen Ω minimal werden muss:

$$\Omega = v^T v \rightarrow \min. \quad (2.24)$$

Aus dieser Minimumsbedingung folgt, dass die 1. Ableitung der Funktion zu null gesetzt wird. Es ergibt sich folgende Berechnungsformel für den Lösungsvektor:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l. \quad (2.25)$$

Die genaue Herleitung dieser Gleichung ist in Niemeier (2008) dokumentiert.

Der bisherige Ansatz gilt für gleichgenaue Beobachtungen, welche für geodätische Aufgaben meist nicht angenommen werden können. Um das bisherige funktionale Modell mit einem stochastischen Modell zu erweitern, wird eine Kovarianzmatrix Σ_{ll} eingeführt, welche stochastische Informationen über die Beobachtungen enthält. Wird auf Korrelationen der einzelnen Beobachtungen verzichtet, ergibt sich die

Kovarianzmatrix als Diagonalmatrix.

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Über die Varianzen σ_n^2 der Beobachtungen liegen oftmals keine a priori Kenntnisse vor, so dass mit Abschätzungen oder Näherungen gearbeitet werden muss. Die Kovarianzmatrix lässt sich in

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} \quad (2.27)$$

zerlegen. Die Gewichtsmatrix P definiert sich als Inverse der Kofaktormatrix der Beobachtungen Q_{ll} .

$$P = Q_{ll}^{-1} \quad (2.28)$$

Aus der Kovarianzmatrix Gl. 2.26 ergeben sich folgende einzelne Elemente für die Gewichtsmatrix:

$$P = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & & 0 \\ & \frac{1}{\sigma_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & & & 0 \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_n \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Es wird deutlich, dass eine Beobachtung mit einer hohen Standardabweichung σ_i bzw. Varianz σ_i^2 nur ein geringes Gewicht p_i besitzt.

Der Lösungsvektor \hat{x} nach Gl. 2.25 und unter Einbeziehung des stochastischen Modells lautet:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l. \quad (2.30)$$

Im ersten Term ist die Normalgleichungsmatrix N , Inverse der Kofaktormatrix der Unbekannten Q_{xx} , enthalten.

$$N = A^T P A = Q_{xx}^{-1} \quad (2.31)$$

Der zweite Term definiert mit

$$n = A^T P l \quad (2.32)$$

das Absolutglied des Normalgleichungssystems. Die Verbesserungen werden anschließend mit

$$v = A \hat{x} - l \quad (2.33)$$

berechnet. Die Verbesserungsquadratsumme Ω dient als Genauigkeitsmaß der Ausgleichung und ergibt sich nach Niemeier (2008) aus folgender Beziehung:

$$\Omega = v^T P v = l^T P l - n^T x. \quad (2.34)$$

Die empirische Varianz der Gewichtseinheit s_0^2 ist definiert mit:

$$s_0^2 = \frac{\Omega}{n - u}. \quad (2.35)$$

Die Parameter n und u geben die Anzahl der Beobachtungen bzw. der Unbekannten an. Die Differenz kennzeichnet die Anzahl der Freiheitsgrade.

2.3.2 Parametereliminierung

Die Anzahl der Unbekannten kann erheblich reduziert werden, wenn ein Großteil der Parameter vorher eliminiert wird (Niemeier 2008). Der allgemeingültige Ansatz dafür ist die blockweise Reduktion des funktionalen Modells. Dabei erfolgt eine Zerlegung des Ausgangsmodells in Subvektoren bzw. Submatrizen.

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Der Vektor \hat{x}_1 enthält die interessierenden und Vektor \hat{x}_2 die zu eliminierenden Parameter. Diese Aufteilung muss auch für die A-Matrix gelten und das funktionale Modell aus Gl. 2.23 ergibt sich zu (Niemeier 2008):

$$l + v = [A_1 \ A_2] \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Das stochastische Modell und somit die Gewichtsmatrix P bleiben unverändert. Für die Normalgleichungen Gl. 2.31 und das Absolutglied Gl. 2.32 des Normalgleichungssystems gelten nun folgende Beziehungen:

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix} P [A_1 \ A_2] = \begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$n = A^T P l = \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix} P l = \begin{bmatrix} A_1^T P l \\ A_2^T P l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Das Gesamtsystem der Normalgleichungen in Blockstruktur lautet wie folgt:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Aus diesem Gesamtsystem der Normalgleichungen lassen sich folgende Gleichungen bilden:

$$n_1 = N_{11} \hat{x}_1 + N_{12} \hat{x}_2 \quad (2.41)$$

$$n_2 = N_{21} \hat{x}_1 + N_{22} \hat{x}_2 \quad (2.42)$$

$$\hat{x}_2 = N_{22}^{-1} n_2 - N_{22}^{-1} N_{21} \hat{x}_1. \quad (2.43)$$

Gl. 2.43 wird in Gl. 2.41 eingesetzt und nach Umformung ergibt sich folgende Beziehung:

$$(N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21}) \hat{x}_1 = n_1 - N_{12} N_{22}^{-1} n_2 . \quad (2.44)$$

Nach Niemeier (2008) kann diese Gleichung mit

$$\bar{N}_{11} \hat{x}_1 = \bar{n}_1 \quad (2.45)$$

sachlogisch abgekürzt werden. Die gekürzte Normalgleichungsmatrix \bar{N}_{11} ist definiert als Inverse der Kofaktormatrix \bar{Q}_{11}

$$\bar{Q}_{11} = (N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21})^{-1} . \quad (2.46)$$

Der Lösungsvektor \hat{x}_1 des reduzierten Modells Gl. 2.45 lautet demnach:

$$\hat{x}_1 = \bar{Q}_{11} \bar{n}_1 . \quad (2.47)$$

Sollen die eliminierten Unbekannten \hat{x}_2 nachträglich bestimmt werden, kann \hat{x}_1 in Gl. 2.43 eingesetzt werden.

Wie die Normalgleichungsmatrix können auch die A-Matrix sowie der Beobachtungsvektor in einer reduzierten Form dargestellt

$$\bar{A} = A_1 - A_2 N_{22}^{-1} N_{21} \quad (2.48)$$

$$\bar{l} = l - A_2 N_{22}^{-1} n_2 , \quad (2.49)$$

und zur Berechnung der Verbesserungen im reduzierten Modell weiter verwendet werden:

$$v = \bar{A} \hat{x}_1 - \bar{l} . \quad (2.50)$$

Die empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit definiert sich wiederum mit:

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - u}} . \quad (2.51)$$

2.3.3 Sequentielle Ausgleichung

Um weitere Beobachtungen einer Auswertung nutzen zu können, wird eine sequentielle Ausgleichung durchgeführt. Ein typisches Beispiel dafür sind GNSS-Auswertungen, bei denen die kontinuierlichen Daten von mehreren Epochen genutzt werden. Nach jeder neuen Beobachtung wird demnach eine Ausgleichung durchgeführt, in der die vorherigen Messungen mit berücksichtigt werden (Niemeier 2008).

Ausgangsgleichungen sind das funktionale und stochastische Modell, siehe Gl. 2.23 und Gl. 2.26. Dieses Modell wird um einen zusätzlichen Beobachtungsvektor l_z mit n_z Elementen und einer zusätzlichen A_z -Matrix erweitert. Die Anzahl der Parameter im Vektor \hat{x}_i bleibt unverändert. Das Modell definiert sich

zu (Niemeier 2008):

$$\begin{bmatrix} l \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_z \end{bmatrix} \hat{x}_i \quad (2.52)$$

$$\Sigma_{ll,i} = \sigma_0^2 Q_{ll,z} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} Q_{ll} & 0 \\ 0 & Q_{zz} \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & P_{zz}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

Die Normalgleichungsmatrix und das Absolutglied bestimmen sich nach Gl. 2.31 und Gl. 2.32:

$$N_{zz} = \begin{bmatrix} A^T & A_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ A_{zz} \end{bmatrix} = A^T P A + A_z^T P_{zz} A_z = N + N_{zz} = Q_{xx,z}^{-1} \quad (2.54)$$

$$n_z = \begin{bmatrix} A^T & A_z^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ l_{zz} \end{bmatrix} = A^T P l + A_z^T P_{zz} l_z = n + n_z. \quad (2.55)$$

Für den Parametervektor ergibt sich demnach:

$$\hat{x}_i = N_{zz}^{-1} n_z. \quad (2.56)$$

3 Precise Point Positioning

Precise Point Positioning (PPP) ist eine GNSS-Auswertetechnik zur präzisen Positionsbestimmung unter Verwendung von kontinuierlichen Zweifrequenz-Phasen- und Codebeobachtungen. Im Gegensatz zu den differentiellen Verfahren werden keine lokalen oder regionalen Referenzstationen benötigt (Zumberge u. a. 1997, Kouba 2009, Bisnath und Gao 2009). Die erforderlichen Ausgangsdaten, Korrekturen und Modelle sowie das Ausgleichungsverfahren, die für eine zentimetergenaue Positionsbestimmung notwendig sind, werden in diesem Kapitel ausführlich behandelt. Zusätzliche Abweichungen wie Mehrwegeeffekte, Signalbeugung oder Offsets in der Empfangsantenne müssen wie auch bei einer relativen GNSS-Auswertung vermieden oder korrigiert werden und sind kein Bestandteil dieses Kapitels. Informationen dazu wurden in Kap. 2.2.3 gegeben.

3.1 Präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen

Abweichungen der Satellitenbahnen und Satellitenuhren wirken bei einer PPP-Auswertung im Vergleich zu einer relativen Auswertung im vollen Umfang. Aus diesem Grund sind präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen unabdingbar. Der IGS und die verschiedenen ACs stellen diese Produkte zur Verfügung.

3.1.1 International GNSS Service und dessen Analytical Centers

Der IGS, gegründet 1994, ist ein freiwilliger unkommerzieller Zusammenschluss von weltweit mehr als 200 Institutionen. Er ist ein Service der *International Association of Geodesy* (IAG) und hat primär die Aufgabe, wissenschaftliche Forschungen im Bereich von GNSS-Beobachtungen zu unterstützen. Der IGS sammelt, archiviert und verteilt ausreichend genaue GPS- und GLONASS-Beobachtungen. Diese Daten werden analysiert und kombiniert, um folgende IGS-Produkte zu erzeugen (Dow u. a. 2009):

- GPS- und GLONASS-Ephemeriden,
- GPS-Satelliten- und Stationsuhrinformationen,
- geozentrische Koordinaten von IGS-Stationen,
- Erdrotationsparameter und
- atmosphärische Parameter.

Diese Vielzahl an Produkten in entsprechender Qualität und Aktualität ist nur durch die Unterstützung der verschiedenen ACs möglich. Aufbauend auf den weltweiten IGS-Stationen bieten die ACs die aufge-

listeten Produkte an. Um einen hohen Standard zu erreichen, müssen die Festlegungen in den IERS Conventions genau eingehalten werden. Derzeit existieren zehn ACs (IGS 2008). Die präzisen Bahndaten und Satellitenuhrkorrekturen werden von mehreren ACs angeboten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Verfügbarkeit, Genauigkeit und Datenintervall der IGS-Produkte.

Tab. 3.1: IGS Ephemeriden und Satellitenuhrkorrektion (Stand: 29.11.2010)

| | | GNSS System | Genauigkeit | Verfügbarkeit | Datenintervall |
|---------------------------------|------------|-------------|--------------------|---------------|----------------|
| Ultra-Rapid (predicted half) | Orbits | GPS | ≈ 5 cm | Echtzeit | 15 min |
| | Sat. Uhren | GPS | $\approx 1,5$ ns | | |
| Ultra-Rapid (observed half) | Orbits | GPS | ≈ 3 cm | 3-9 h | 15 min |
| | Sat. Uhren | GPS | $\approx 0,050$ ns | | |
| Rapid | Orbits | GPS | $\approx 2,5$ cm | 17-21 h | 15 min |
| | Sat. Uhren | GPS | $\approx 0,025$ ns | | |
| Final | Orbits | GPS/GLONASS | $\approx 2,5$ cm | 12-18 d | 15 min |
| | Sat. Uhren | GPS | $\approx 0,020$ ns | | |

3.1.2 Präzise Ephemeriden

Die bekannten und die für die relative Positionierung ausreichend genauen *broadcast*-Ephemeriden werden für die GPS-Satelliten in der Form der Keplerschen Bahnelemente und für GLONASS als Koordinaten angegeben. Die Ephemeriden sind Teil der Satellitennachricht und stehen dem Nutzer sofort zur Verfügung. Im Gegensatz dazu bestehen die präzisen Bahndaten aus einem Datensatz, der für jeden Satelliten die Koordinaten im jeweiligen IGS05 enthält (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Zusätzlich sind noch Uhrkorrekturen und deren Genauigkeiten aufgeführt. Das entsprechende ASCII Format wird als *Standard Produkt 3* (SP3) bezeichnet. Eine ausführliche Formatbeschreibung ist in Spofford und Remondi (2006) gegeben.

Die aufgeführten Ephemeriden unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Verfügbarkeit und Aktualität. Das Datenintervall beträgt bei allen Produkten 15 Minuten. Die Genauigkeiten der *Ultra-Rapid* Ephemeriden sind mit ca. 5 cm schon recht hoch. Im Vergleich dazu werden die Genauigkeiten der *broadcast*-Ephemeriden mit ca. 100 cm angegeben. Die GLONASS-Orbits sind nur als *Final* Produkte nach 12 bis 18 Tagen verfügbar.

Um die Satellitenkoordinaten und Geschwindigkeiten zu jeder Beobachtungsepoche zu erhalten, ist eine Interpolation zwischen den Stützpunkten notwendig. Wegen des geringen Rechenaufwandes und der leichten Programmierbarkeit bietet sich die Lagrange-Interpolation, basierend auf Polynomen, an (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008). Dabei ist zu beachten, dass die Interpolationsabweichung nicht größer sein darf als die angegebene Genauigkeit der Orbits. Feng und Zhang (2005) verglichen die Lagrange-, die Chebyshev- und die trigonometrische Polynominterpolation zur Orbitverdichtung. Die besten Ergebnisse, gemessen an Standardabweichungen und maximalen Abweichungen zwischen interpoliertem und Referenzdatensatz, liefert die trigonometrische Interpolation mit neun Stützpunkten. Aber auch die erreichten Genauigkeiten von Lagrange- oder Chebyshev-Interpolation mit elf Stützpunkten sind, hinsichtlich der Standardabweichungen der *Final* Orbits, ausreichend. Problematisch sind allerdings die Ergebnisse am Anfang und Ende eines Datensatzes.

3.1.3 Präzise Satellitenuhrkorrekturen

Aufgrund der Abweichung der Satellitenuhr von der GPS-Systemzeit ist eine satellitenabhängige Uhrkorrektur erforderlich. Diese Uhrkorrektur wird mit einer Genauigkeitsangabe (Standardabweichung) im entsprechenden Intervall für jeden Satelliten in der Uhrinformationsdatei *clock information file* (clk) angegeben (Ray und Gurtner 2006). Für die Bestimmung der Uhrkorrekturen sind Zweifrequenzbeobachtungen (Phase und Code) von IGS-Stationen erforderlich. Der Wert der Uhrabweichung wird aus einem globalen Netz von GNSS-Daten relativ zu einer Referenzuhr geschätzt (Senior u. a. 2003). Ausführlichere Informationen folgen im Kap. 6.2.1.

Aus Tab. 3.1 wird deutlich, dass sich die Genauigkeit der Satellitenuhr mit zunehmender Verzögerung in der Verfügbarkeit erhöht. Die *Final* Produkte erreichen eine Genauigkeit von 0,020 ns. Der entscheidende Unterschied zwischen diesen Produkten ist das Datenintervall. Ab November 2000 wurden die Uhrkorrekturen verbessert und auf 5 Minuten verdichtet. Seit Beginn 2007 beträgt das Intervall nur noch 30 Sekunden (Senior u. a. 2008). Die Satellitenuhrstabilität und deren Auswirkung auf die PPP-Lösung sowie die Phaseninterpolation als Verdichtungsmöglichkeit werden ausführlich im Kapitel 6 behandelt.

Ein großer Nachteil der IGS-Produkte ist, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt keine GLONASS-Uhrkorrekturen angeboten werden. Für die Auswertung der GLONASS-Beobachtungen ist der Nutzer auf die verfügbaren GLONASS-Uhrkorrekturen einzelner ACs angewiesen. Ein Anbieter dieser Uhrkorrekturen ist das *European Space Operations Centre* (ESOC) in Darmstadt. Seit Februar 2010 sind diese Korrekturen sogar in einem Intervall von 30 Sekunden erhältlich. Auch das *AC Center of Orbit Determination in Europe* (CODE) plant in naher Zukunft, die GLONASS-Uhrkorrekturen anzubieten (Springer und Dach 2010).

3.2 Satellitenantennenkorrekturen

Bei einer genauen PPP-Auswertung sind, wie an der Empfangsantenne, Korrekturen an der Satellitenantenne erforderlich. Ursache dafür ist, dass das Phasenzentrum nicht mit dem Massenzentrum des Satelliten zusammenfällt. Weiterhin treten satellitenblockspezifische Phasenzentrumsvariationen in Abhängigkeit des Nadirwinkels auf. Durch die Satellitenbewegungen sind außerdem noch Phase-Wind-Up Effekte zu beachten.

3.2.1 Phasenzentrumsoffset

Der Phasenzentrumsoffset kennzeichnet die Differenz zwischen Massen- und Phasenzentrum des Satelliten. Während sich die Messungen auf das Phasenzentrum beziehen, sind die Satellitenkoordinaten bei den präzisen Ephemeriden für das Massenzentrum angegeben und müssen entsprechend korrigiert werden (Kouba 2009).

Das Satellitenkoordinatensystem ist nach Rothacher und Schmid (2010) wie folgt definiert:

- der Ursprung ist das Massenzentrum des Satelliten,

- die Z-Achse zeigt in Richtung des Geozentrums (Nadirrichtung),
- die Y-Achse (Rotationsachse der Solarflügel) steht rechtwinklig zum Vektor der Sonne und somit rechtwinklig auf der Ebene Sonne-Satellit-Erde,
- die X-Achse ergänzt dieses Rechte-Hand-System.

Die gegebenen Offsetwerte im Satellitenkoordinatensystem müssen zunächst in das ITRS transformiert werden. Abb. 3.1 zeigt die Beziehung zwischen den beiden Systemen.

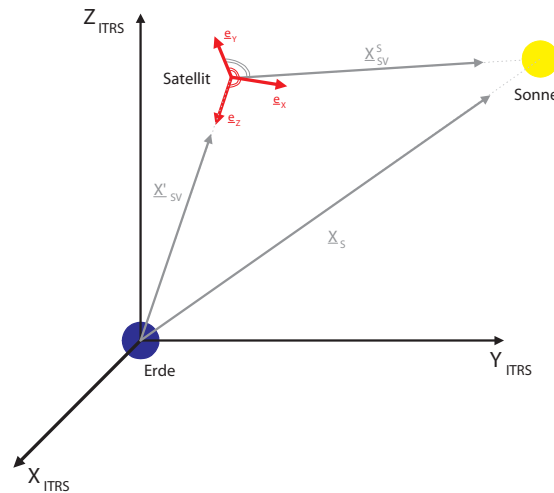


Abb. 3.1: Satellitenkoordinatensystem im ITRS

Der Berechnungsablauf gliedert sich in mehrere Berechnungsschritte (Xu 2003). Der Vektor \underline{X}'_{SV} vom Geozentrum zum Satelliten bestimmt sich aus den (noch unkorrigierten) Koordinaten des jeweiligen Satelliten

$$\underline{X}'_{SV} = \begin{pmatrix} X'_{SV} \\ Y'_{SV} \\ Z'_{SV} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Vektor \underline{X}_S (Geozentrum-Sonne) ergibt sich aus den Koordinaten der Sonne im ITRS

$$\underline{X}_S = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Nach Abb. 3.1 berechnet sich der Vektor \underline{X}^S_{SV} aus der Differenz der beiden vorherigen Vektoren

$$\underline{X}^S_{SV} = \underline{X}_S - \underline{X}'_{SV}. \quad (3.3)$$

Im nächsten Schritt werden die Einheitsvektoren des Satellitenkoordinatensystems im ITRS-Koordinatensystem berechnet. Der Einheitsvektor \underline{e}_z zeigt Richtung Geozentrum und ist wie folgt definiert:

$$\underline{e}_z = -\frac{\underline{X}'_{SV}}{|\underline{X}'_{SV}|}. \quad (3.4)$$

Der Vektor \underline{e}_y steht senkrecht auf der Ebene Erde-Satellit-Sonne und demzufolge auch vertikal auf den Vektoren \underline{e}_z und \underline{X}_{SV}^S und kann somit durch das Kreuzprodukt beider Vektoren sowie dessen Betrag berechnet werden

$$\underline{e}_y = \frac{\underline{e}_z \times \underline{X}_{SV}^S}{|\underline{e}_z \times \underline{X}_{SV}^S|}. \quad (3.5)$$

Wie schon beschrieben, ergänzt die X-Achse des Satellitenkoordinatensystems das Rechte-Hand-System. Der Vektor \underline{e}_x steht somit rechtwinklig zu den Vektoren \underline{e}_y und \underline{e}_z

$$\underline{e}_x = \underline{e}_y \times \underline{e}_z. \quad (3.6)$$

Die berechneten Einheitsvektoren werden im letzten Schritt mit den Exzentrizitäten Δx_{ex} , Δy_{ex} und Δz_{ex} skaliert. Der Phasenzentrumsoffsetvektor \underline{x}_{PZO} ergibt sich zu:

$$\underline{x}_{PZO} = \begin{pmatrix} x_{PZO} \\ y_{PZO} \\ z_{PZO} \end{pmatrix} = \Delta x_{ex} \cdot \underline{e}_x + \Delta y_{ex} \cdot \underline{e}_y + \Delta z_{ex} \cdot \underline{e}_z. \quad (3.7)$$

Die korrigierten Satellitenkoordinaten \underline{X}_{SV} , bezogen auf das Phasenzentrum, lauten:

$$\underline{X}_{SV} = \underline{X}'_{SV} + \underline{x}_{PZO}. \quad (3.8)$$

Mit den korrigierten Satellitenkoordinaten muss ebenfalls die geometrische Distanz verbessert werden.

Die Exzentrizitäten sind in der ANTEX-Datei für jeden Satelliten im Satellitenkoordinatensystem dokumentiert (Rothacher und Schmid 2010). Aus den Beobachtungen in einem globalen Netz von über 100 Stationen wurden die PZO für die GPS-Satelliten geschätzt. Forschungseinrichtungen, die diese Offsetwerte bestimmen, sind z. B. das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam oder die Technische Universität München (TUM) (Schmid u. a. 2007). Seit dem Jahr 2005, als die Umstellung von relativen auf absolute Antennenkorrekturen erfolgte, sind die Werte für Δz_{ex} für die GPS-Satelliten nicht mehr blocksondern satellitenspezifisch. Die Exzentrizität Δx_{ex} ist dagegen noch blockspezifisch und nur für die Satelliten des Blocks IIA vorhanden. Der Wert Δy_{ex} ist für alle Satelliten null.

Auch für die alten und neuen GLONASS-Satelliten müssen die PZO geschätzt werden. Die Berechnung dieser Exzentrizitäten erfolgte über das CODE AC in einer Reprozessierung. Die Offsetwerte sind für nahezu alle GLONASS-Satelliten identisch (Dach u. a. 2010).

3.2.2 Phasenzentrumsvariation

Die Phasenzentrumsvariation kennzeichnet die Abweichung zwischen der tatsächlichen und der idealen Phasenfront. Bei den Satellitenantennen wird ein vereinfachtes Modell angenommen, welches nur vom Nadirwinkel abhängig ist. Abb. 3.2 stellt die Beziehung zwischen Zenitwinkel z und Nadirwinkel z' dar. R_E ist der Erdradius und $|\underline{X}_{SV}|$ kennzeichnet den Abstand zwischen Satellit und Geozentrum.

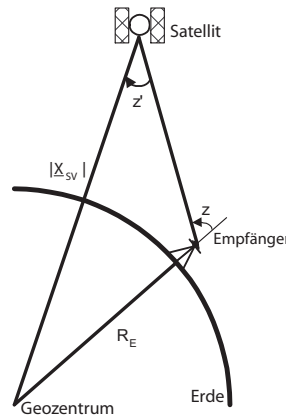


Abb. 3.2: Nadirwinkel am Satelliten (Schmid und Rothacher 2002)

Mathematisch kann die Beziehung wie folgt definiert werden (Schmid und Rothacher 2002):

$$z' = \arcsin \left(\frac{R_E}{|X_{SV}|} \cdot \sin(z) \right). \quad (3.9)$$

Bei einem maximalen Zenitwinkel von $z_{max} = 90^\circ$, einem Erdradius von $R = 6387 \text{ km}$ und einer Entfernung des Satelliten zum Geozentrum von ca. $|X_{SV}| = 26000 \text{ km}$ beträgt der Nadirwinkel $z'_{max} = 14,2^\circ$. Demzufolge sind die Korrekturen der Phasenzentrumsvariationen K_{PZV} in Abhängigkeit des Nadirwinkels nur in einem Bereich von 0° bis 14° angegeben. Die entsprechenden Werte für die Phasenbeobachtungen auf L1 und L2 für die GPS-Satelliten und G1 und G2 für die GLONASS-Satelliten sind der ANTEX-Datei zu entnehmen. Das Intervall beträgt 1° (Rothacher und Schmid 2010). Die Satelliten eines Blocks haben die gleichen Phasenzentrumsvariationen. Für die jeweiligen Beobachtungen werden die PZV durch Interpolation bestimmt und an die Phasenbeobachtungen angebracht.

3.2.3 Phase-Wind-Up

Die ausgesendeten Signale der GNSS-Satelliten sind rechtsdrehend zirkular polarisiert (*right-hand circularly polarized*, RHCP). Somit ist die Trägerphasenmessung abhängig von der gegenseitigen Orientierung der Sende- und Empfangsantenne. Eine 360° -Drehung der Antenne um die vertikale Achse ändert die Trägerphase um einen Zyklus. Während sich die Orientierung der Empfangsantenne bei vielen Anwendungen nicht ändert, kommt es aufgrund der Ausrichtung des Sonnenflügels in Richtung Sonne und der Bewegung des Satelliten um die Erde zu einer ständigen Rotation der Satellitenantenne und somit zur Verdrehung der Trägerphase (Kouba 2009, Wu u. a. 1993).

Zur Berechnung der Verdrehungen müssen die Dipole der Sende- und Empfangsantenne gegeben sein. Diese sind Kreuzdipolantennen, d. h. die Dipole beider Antennen sind rechtwinklig zueinander angeordnet (Beyerle 2009). Die topozentrischen Einheitsvektoren $e_{E_x}^T$ und $e_{E_y}^T$ beschreiben die Orientierung der Dipolelemente der Empfangsantenne in Nord- und Westrichtung (Schüler 2001)

$$e_{E_x}^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad e_{E_y}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Diese Vektoren werden mit der transponierten Transformationsmatrix T (Gl. 2.8) vom topozentrischen in das kartesische Koordinatensystem übertragen

$$\underline{e}_{E_x} = T^T \cdot \underline{e}_{E_x}^T \quad \underline{e}_{E_y} = T^T \cdot \underline{e}_{E_y}^T \quad (3.11)$$

Der Einheitsvektor von Empfangs- zu Sendeantenne \underline{e}_A ergibt sich aus den Näherungskoodinaten der Station und den Koordinaten des Satelliten zur jeweiligen Epoche

$$\underline{e}_A = \frac{\underline{X}_E - \underline{X}_{SV}}{|\underline{X}_E - \underline{X}_{SV}|} \quad (3.12)$$

Die effektiven Dipolvektoren der Empfangsantenne \underline{d}_E und der Sendeantenne \underline{d}_A ergeben sich nach (Wu u. a. 1993):

$$\underline{d}_E = \underline{e}_{E_x} - \underline{e}_A \cdot (\underline{e}_A \cdot \underline{e}_{E_x}) + \underline{e}_A \times \underline{e}_{E_y} \quad (3.13)$$

$$\underline{d}_A = \underline{e}_x - \underline{e}_A \cdot (\underline{e}_A \cdot \underline{e}_x) - \underline{e}_A \times \underline{e}_y \quad (3.14)$$

Die Vektoren \underline{e}_x und \underline{e}_y sind die schon berechneten Einheitsvektoren (Gl. 3.6 und Gl. 3.5) des Satelliten im ITRS. Es folgt die Berechnung der Verdrehung der Trägerphase $\delta\phi$ in Zyklen aufgrund der Rotationsbewegung des Satelliten:

$$\delta\phi = \arccos\left(\frac{\underline{d}_A \cdot \underline{d}_E}{|\underline{d}_A| \cdot |\underline{d}_E|}\right) \cdot \frac{s}{2 \cdot \pi} \quad (3.15)$$

mit

$$s = \text{sgn}[\underline{e}_A \cdot (\underline{d}_A \times \underline{d}_E)] \quad (3.16)$$

Beim Anbringen der Korrektur an die Trägerphase ist zu beachten, dass aufgrund der Beziehung in Gl. 3.15 ein Vorzeichenwechsel von Epoche $i - 1$ zu Epoche i stattfinden kann. Um dies zu berücksichtigen, ergibt sich folgende Gleichung:

$$\phi_i = M + \delta\phi_i \quad (3.17)$$

mit

$$\begin{aligned} M &= 1 & \text{wenn } \phi_{i-1} - \delta\phi_i &\approx 1 \\ M &= -1 & \text{wenn } \phi_{i-1} - \delta\phi_i &\approx -1 \\ M &= 0 & \text{wenn } \phi_{i-1} - \delta\phi_i &\approx 0. \end{aligned}$$

Mit den Wellenlängen der GPS-Trägerphasen λ_{L1} und λ_{L2} sowie der GLONASS-Trägerphasen λ_{G1} und λ_{G2} werden die Zyklen in metrische Einheiten umgerechnet und es ergeben sich für die Phasenbeobachtungen ($n = L1, L2, G1, G2$) folgende Korrekturen K_{PWU_n} :

$$K_{PWU_n} = \phi \cdot \lambda_n \quad (3.18)$$

Die Korrekturen für die ionosphärenfreien Linearkombinationen der GPS- und GLONASS-Phasendaten

$K_{PWU_{L0}}$ und $K_{PWU_{G0}}$ lauten:

$$K_{PWU_{L0}} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot K_{PWU_{L1}} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot K_{PWU_{L2}} \quad (3.19)$$

$$K_{PWU_{G0}} = \frac{f_{G1}^2}{f_{G1}^2 - f_{G2}^2} \cdot K_{PWU_{G1}} - \frac{f_{G2}^2}{f_{G1}^2 - f_{G2}^2} \cdot K_{PWU_{G2}}. \quad (3.20)$$

Bei einer sich bewegenden Empfangsantenne, z. B. bei kinematischen Anwendungen und einer damit verbundenen Rotation werden auftretende Phase-Wind-Up Effekte vollständig von der Empfängeruhrabweichung absorbiert (Kouba 2009).

3.3 Stationskorrekturen

Zahlreiche geodynamische Prozesse verursachen ständige Verformungen des Erdkörpers und somit zeitliche Veränderungen von Positionen auf der Erdoberfläche. Diese Prozesse sind unter anderem die Erdbeben und die ozeanischen Auflasten. Im Gegensatz zu einer relativen Positionsbestimmung mit einer Basislinienlänge kleiner als 100 km müssen diese Positionsverschiebungen bei einer PPP-Auswertung mittels Modellen erfasst und als Korrektur an die Beobachtungen angebracht werden. Seitliche Verschiebungseffekte, z. B. verursacht durch atmosphärische Auflasten, die deutlich kleiner als einen Zentimeter sind, können vernachlässigt werden (Kouba 2009).

3.3.1 Erdbeben

Den größten Einfluss auf die zeitliche Veränderung des Erdkörpers haben die Erdbeben. Die feste Erde reagiert auf die Anziehungskräfte von Sonne und Mond (sowie anderen Planeten) wie ein elastischer Körper (Torge 2002). Die Erdbeben differenzieren sich in einen zeitabhängigen sowie zeitunabhängigen Teil (Permanentbeben). Die Reduktion der Beobachtungen um den periodischen Anteil der Beben führt zu der konventionellen bebenfreien Kruste (*conventional tide free crust*). Werden die Beobachtungen zusätzlich noch um den permanenten Anteil reduziert, beziehen sich die Koordinaten auf die mittlere Kruste (*mean crust*) (Petit und Luzum 2010). Durch die ständige Verlagerung der Erdrotationsachse treten außerdem noch sogenannte Polbeben auf.

Zeitabhängige Erdbeben

Die periodisch vertikalen und horizontalen Verschiebungen der Erdkruste infolge der zeitabhängigen Erdbeben lassen sich mit Kugelflächenfunktionen vom Grad n und der Ordnung m berechnen. Ein umfassendes Modell für die Berechnung der Erdbeben ist in Petit und Luzum (2010) dokumentiert. Für PPP-Anwendungen ist die Berechnung der Verschiebung 2. Grades \underline{x}_{Td} , verursacht durch Sonne und Mond, ausreichend.

$$\underline{x}_{Td} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j \cdot R_E^4}{GM_E \cdot |e_j|^3} \left(h_2 \cdot e_P \cdot \left(\frac{3}{2} (e_j \cdot e_P)^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (e_j \cdot e_P) \cdot (e_j - (e_j \cdot e_P) \cdot e_P) \right) \quad (3.21)$$

| | |
|---|---|
| $\underline{x}_{Td} = (x_{Td}, y_{Td}, z_{Td})^T$ | Verschiebungsvektor in x, y, z |
| GM_j, GM_E | Gravitationskonstanten für Sonne ($j = 2$), Mond ($j = 3$) und Erde |
| $\underline{e}_j, \underline{e}_P$ | Einheitsvektoren Geozentrum - Sonne, Mond, Standpunkt (p) |
| R_E | Erdradius |

Die Lovezahl h_2 und Shidazahl l_2 berechnen sich in Abhängigkeit der geographischen Breite φ nach:

$$h_2 = 0,6078 - 0,0006 \cdot \left(\frac{3\sin^2(\varphi) - 1}{2} \right) \quad (3.22)$$

und

$$l_2 = 0,0847 + 0,0002 \cdot \left(\frac{3\sin^2(\varphi) - 1}{2} \right). \quad (3.23)$$

Für eine bessere Darstellung empfiehlt es sich, die kartesischen Verschiebungen mit der Transformationsmatrix T (Gl. 2.8) in das topozenrische Koordinatensystem zu transformieren:

$$\begin{bmatrix} n_{Td} \\ e_{Td} \\ u_{Td} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Td} \\ y_{Td} \\ z_{Td} \end{bmatrix} \cdot T. \quad (3.24)$$

Abb. 3.3 zeigt die Verschiebungen 2. Grades der IGS-Station HERT für die Tage 200 bis 225 des Jahres 2010 für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente. Es sind deutlich die halbtäglichen, täglichen und auch monatlichen Schwankungen in allen Komponenten sichtbar. Die Verschiebungen können in radialer Richtung mehrere Dezimeter und in horizontaler Richtung mehrere Zentimeter betragen. Eine genaue Modellierung und Berücksichtigung dieser zeitlichen Veränderung der Erdoberfläche ist daher unabdingbar. Die Verschiebungen der periodischen Gezeiten im lokalen topozenrischen Koordinatensystem

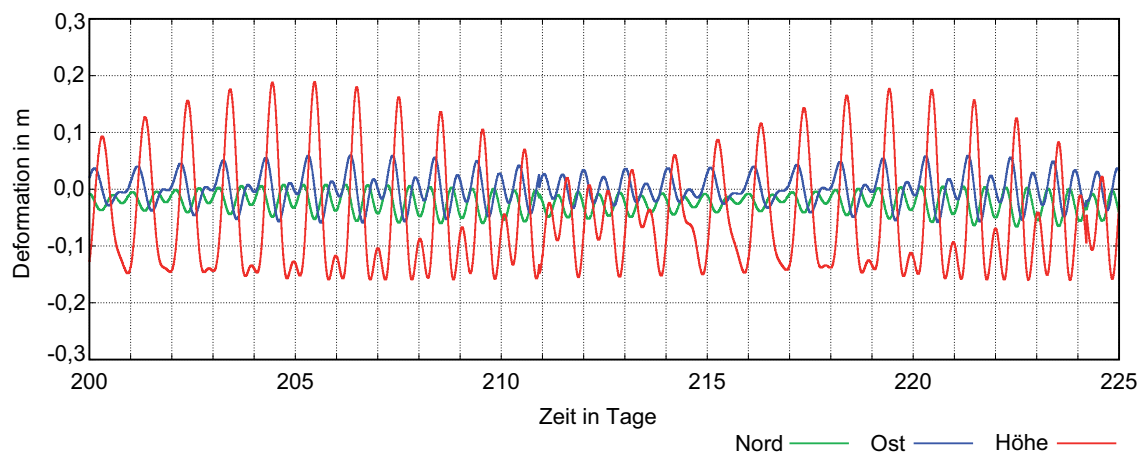


Abb. 3.3: Stationsbewegungen, verursacht durch zeitabhängige Erdgezeiten für die IGS-Station HERT 200/2010-225/2010

werden anschließend als räumliche Distanz berechnet und an die Beobachtungen angebracht (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$K_{Td} = \cos(Az) \cdot \sin(E) \cdot n_{Td} + \sin(Az) \cdot \cos(E) \cdot e_{Td} + \sin(E) \cdot u_{Td}. \quad (3.25)$$

Die Parameter Az und E kennzeichnen das Azimut und die Elevation der Beobachtung.

Permanentgezeiten

Die Reduktion der Stationskoordinaten um den zeitabhängigen Anteil der Erdgezeiten ergibt die mittlere Erdkruste. Eine weitere Reduktion um den permanenten Anteil führt zu einer Erdoberfläche, welche frei von dem Einfluss der Erdgezeiten ist (Petit und Luzum 2010). Die Permanentgezeiten werden durch die Rotation und Abplattung der Erde verursacht (Torge 2002). Sie können nach den IERS Conventions (2010) für die Komponenten radial r_{PerTd} und transversal t_{PerTd} getrennt berechnet werden.

$$r_{PerTd} = \left(-0,1206 + 0,0001 \cdot \frac{3\sin^2(\varphi)}{2} \right) \cdot \frac{3\sin^2(\varphi)}{2} \quad (3.26)$$

$$t_{PerTd} = \left(-0,0252 - 0,0001 \cdot \frac{3\sin^2(\varphi)}{2} \right) \cdot \sin(2\varphi) \quad (3.27)$$

Aus den obigen Gleichungen ist erkennbar, dass die Permanentgezeiten nur von der geographischen Breite φ des Beobachtungsstandortes abhängig sind. An den Polen beträgt die daraus resultierende radiale Verschiebung der Erdoberfläche -12 cm und am Äquator +6 cm. Dieser permanente Anteil ist in den Koordinaten der ITRF-Stationen nicht mit enthalten, sodass diese sich nur auf die konventionelle gezeitenfreie Erdkruste beziehen (Petit und Luzum 2010).

Polgezeiten

Die Polbewegung kann als Verlagerung der Erdachse relativ zur Erdkruste in Bezug auf ein erdfestes Koordinatensystem beschrieben werden. Diese Verschiebung der Erdachse führt zu einer Änderung der Zentrifugalkräfte und zu einer damit verbundenen periodischen Deformation (Kouba 2009).

Zur Berechnung der Polgezeiten müssen zum einen Informationen über die mittlere Pollage sowie den aktuellen Pol vorliegen. In Abb. 3.4 sind die mittleren Pollagen (rot) für die Jahre 1900 bis 2000 und die Polbewegung 2000-2009 (schwarz) um den mittleren Pol des Jahres 2000 dargestellt. Diese Daten werden vom IERS zur Verfügung gestellt¹.

Es ist deutlich eine langsame säkulare Bewegung der mittleren Pollage zu erkennen. Werden kurzperiodische Polbewegungen betrachtet, ist eine kreisförmige Rotation um den mittleren Pol zu sehen (vgl. Kap. 2.1.2). Diese kreisförmige Bewegung hat eine Periode von etwa 435 Tagen und wird als Chandler-Periode bezeichnet (Torge 2002).

Die Stationsverschiebungen x_{PTd} in Nord, Ost und Höhe aufgrund der Polgezeiten berechnen sich wie folgt (Petit und Luzum 2010, Kouba 2009):

$$\underline{x}_{PTd} = \begin{pmatrix} -0,009 \cdot \cos(2\theta) \cdot [(x_p - \bar{x}_p) \cdot \cos(\lambda) - (y_p - \bar{y}_p) \cdot \sin(\lambda)] \\ +0,009 \cdot \cos(\theta) \cdot [(x_p - \bar{x}_p) \cdot \sin(\lambda) + (y_p - \bar{y}_p) \cdot \cos(\lambda)] \\ -0,032 \cdot \sin(2\theta) \cdot [(x_p - \bar{x}_p) \cdot \cos(\lambda) - (y_p - \bar{y}_p) \cdot \sin(\lambda)] \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

¹ <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

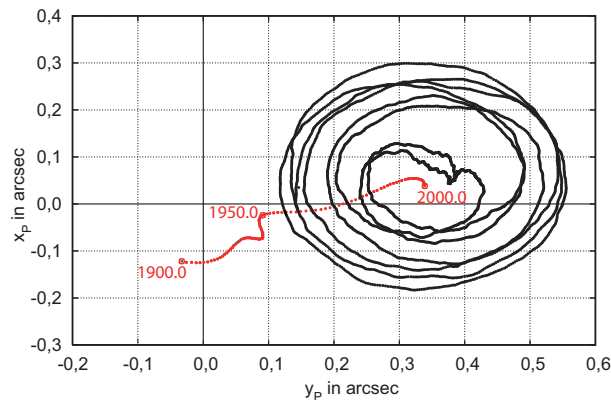


Abb. 3.4: Mittlere Pollage 1900-2000 (rot) und tägliche Polbewegung 2000-2009 (schwarz), Datenquelle: Erdorientierungsparameter des IERS

| | |
|---|--|
| $\underline{x}_{PTd} = (n_{PTd}, e_{PTd}, u_{PTd})^T$ | Verschiebungsvektor in Nord, Ost und Höhe |
| λ | Länge der Station |
| θ | Poldistanz $\theta = \frac{1}{2} \cdot \pi - \varphi$, φ Breite der Station |
| x_P, y_P | Aktueller Pol |
| \bar{x}_P, \bar{y}_P | Mittlerer Pol. |

Der aktuelle Pol wird täglich sowie einige Jahre im Voraus vom IGS berechnet und wie die präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Aktuelle sowie vergangene und zukünftige Polinformationen sind auf der Internetseite www.iers.org zu finden. Der derzeitige mittlere Pol bezieht sich auf das Jahr 2000,0 (Petit und Luzum 2010).

Wie schon bei dem zeitabhängigen Teil der Erdzeiten ist der größte Verschiebungsbetrag in der radialen Komponente zu finden. Abb. 3.5 zeigt die radiale Verschiebung der IGS-Station Zimmerwald (ZIM2) aufgrund der Polgezeiten für den Zeitraum 2000 bis 2009. Die Größenordnung der radialen Verschiebung

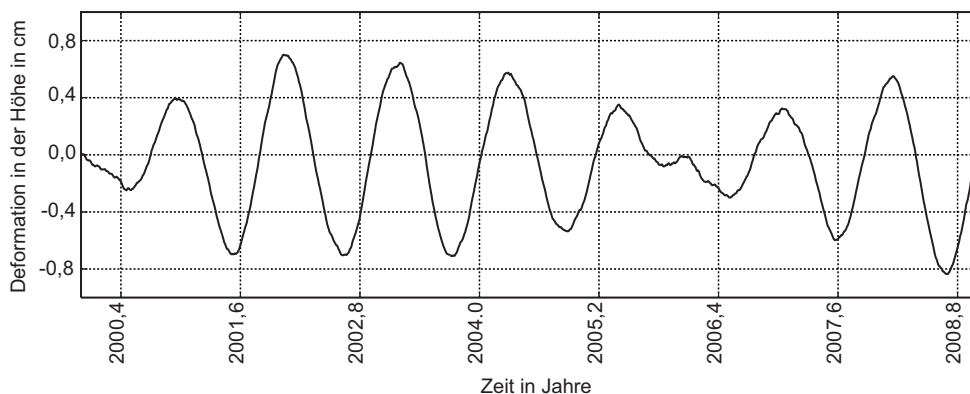


Abb. 3.5: Stationsbewegungen in der Höhe, verursacht durch Polgezeiten für die IGS-Station ZIM2 2000-2009

liegt im sub-Zentimeterbereich. Im Gegensatz zu den zeitabhängigen Verformungen der Erdzeiten haben die Polgezeiten keine täglichen oder halbtäglichen Perioden. Die periodischen Schwankungen spiegeln die Chandler-Periode von 1,2 Jahren wider. Eine Nichtberücksichtigung der Polgezeiten führt somit insbesondere zu einer Höhenabweichung.

Auch die Polzeiten werden, wie schon die Erdzeiten, in eine Raumstrecke umgerechnet und als Korrektur an die Phasen- und Codebeobachtungen angebracht (vgl. Gl. 3.25).

3.3.2 Ozeanische Auflasten

Ozeanische Auflasten verursachen ebenso wie die Erdzeiten eine Verformung der Erdkruste. Die Wassermassen drücken bei Flut auf die Kontinentalplatten und erzeugen größtenteils radiale Verschiebungen, welche gerade an der Küste bis zu 5 cm betragen können. Aber auch im Inland sind Deformationen von mehr als einem Zentimeter möglich. Insbesondere bei kinematischen Messungen oder statischen Messungen mit Beobachtungszeiten kleiner als 3 Stunden ist es notwendig, die ozeanischen Auflasten zu berechnen und die Beobachtungen zu korrigieren (Kouba 2009).

Die Ausgangsgleichung für die Berechnung der ozeanischen Auflasten \underline{x}_{ozA_c} (Höhe, Nord, Ost für $c = 1, 2, 3$) lautet (Petit und Luzum 2010, Kouba 2009):

$$\underline{x}_{ozA_c} = \sum_{i=1}^{11} Amp_{c,i} \cdot \cos(\omega_i \cdot t_i + \chi_i - Pha_{c,i}). \quad (3.29)$$

Um die Deformationen für die jeweilige Station berechnen zu können, sind Informationen zu den elf Partialtiden notwendig. Diese unterteilen sich in die halbtäglichen Tiden M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , die täglichen Tiden K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 und die langperiodischen Tiden M_f , M_m und S_{sa} . Die Amplituden $Amp_{c,i}$ und die Phasen $Pha_{c,i}$ sind für diese elf Tiden für nahezu alle IGS-Stationen abrufbar² (Scherneck 1991).

Die halbtägliche Amplitude M_2 kann maximal 5 cm in radialer und 2 cm in horizontaler Richtung betragen (Leick 2004). Abb. 3.6 zeigt Stationen, bei denen Informationen zu der Amplitude und Phase vorliegen. Die Größe der Signatur spiegelt die Größenordnung der M_2 -Amplitude in radialer Richtung wider.

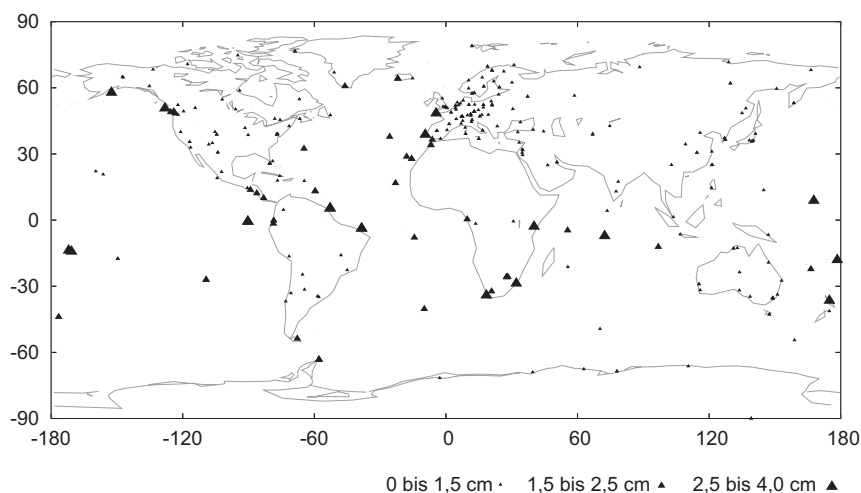


Abb. 3.6: Amplituden der halbtäglichen Partialtide M_2 einzelner IGS-Stationen, Datenquelle: M_2 -Amplituden der IGS-Stationen

Das astronomische Argument χ_i für die jeweilige Partialtide ergibt sich als Summe der astronomi-

² <http://froste.oso.chalmers.se/loading/>

schen Fundamentalarumente mittlere Mondzeit τ , mittlere Länge der Sonne h , mittlere Länge des Mondes s sowie mittlere Länge des Mondperigäums p multipliziert mit den jeweiligen Faktoren der Doodson-Elemente (Tab. 3.2). Die Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$ ist durch ω_{T_d} gekennzeichnet.

Tab. 3.2: Doodson-Elemente und Winkelgeschwindigkeiten der Partialtiden (Petit and Luzum 2010)

| Name | Periode | Winkelgeschwindigkeit ω_{T_d} [rad/sec] | Doodson-Elemente | | | |
|-------|---------------------|---|------------------|-----|-----|-----|
| | | | τ | s | h | p |
| M_2 | halb- täglich | $1,40519 \cdot 10^{-4}$ | 2 | 0 | 0 | 0 |
| S_2 | | $1,45444 \cdot 10^{-4}$ | 2 | 2 | -2 | 0 |
| N_2 | | $1,37880 \cdot 10^{-4}$ | 2 | -1 | 0 | 1 |
| K_2 | | $1,45842 \cdot 10^{-4}$ | 2 | 2 | 0 | 0 |
| K_1 | täglich | $0,72921 \cdot 10^{-4}$ | 1 | 1 | 0 | 0 |
| O_1 | | $0,67598 \cdot 10^{-4}$ | 1 | -1 | 0 | 0 |
| P_1 | | $0,72523 \cdot 10^{-4}$ | 1 | 1 | -2 | 0 |
| Q_1 | | $0,64959 \cdot 10^{-4}$ | 1 | -2 | 0 | 1 |
| M_f | lang- periodisch | $0,053234 \cdot 10^{-4}$ | 0 | 2 | 0 | 0 |
| M_m | | $0,026392 \cdot 10^{-4}$ | 0 | 1 | 0 | -1 |
| S_a | | $0,003982 \cdot 10^{-4}$ | 0 | 0 | 2 | 0 |

Für die Tage 195 bis 225 des Jahres 2010 sind die Deformationen in den Komponenten Höhe, Nord und Ost für die IGS-Station Brest (BRST) in Frankreich dargestellt (Abb. 3.7). Brest liegt direkt am

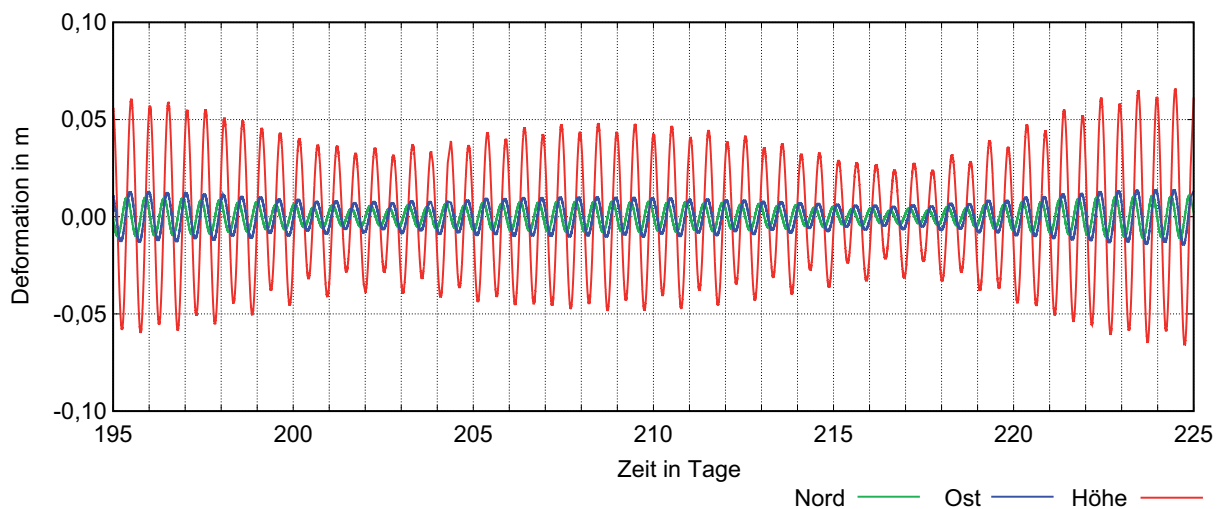


Abb. 3.7: Stationsbewegungen, verursacht durch ozeanische Auflasten für die IGS-Station BRST 195/2010-225/2010

Atlantischen Ozean und die Amplitude der M_2 -Tide ist mit 4 cm sehr deutlich. Demzufolge sind die täglichen und halbtäglichen Schwankungen, verursacht durch die scheinbare Bewegung von Sonne und Mond, mit teilweise mehr als 5 cm sehr stark ausgeprägt. Auch in der Nord- und Ostkomponente können die Stationsverschiebungen mehr als einen Zentimeter betragen.

Um die Phasen- und Codebeobachtungen um den Betrag der ozeanischen Auflasten korrigieren zu können, werden auch diese Verschiebungen wieder in eine Raumstrecke transformiert (Gl. 3.25).

3.3.3 Erdrotationsparameter

Die ITRF-Ephemeriden enthalten die täglichen Erdrotationsparameter x_p , y_p und $UT1 - UTC$, weshalb diese nicht weiter beachtet werden müssen. Die subtäglichen Variationen der Erdrotationsparameter werden durch die ozeanischen Gezeiten und die damit verbundenen Massenverlagerungen verursacht. Für die Berechnung der kurzperiodischen Variationen der Polbewegung δX_p , δY_p und der Erdrotation $\delta UT1$ gelten folgende Rechenvorschriften (Kouba 2009):

$$\delta X_p = \sum_{i=1}^8 F_i \cdot \sin(\xi_i) + G_i \cdot \cos(\xi_i) \quad (3.30)$$

$$\delta Y_p = \sum_{i=1}^8 H_i \cdot \sin(\xi_i) + K_i \cdot \cos(\xi_i) \quad (3.31)$$

$$\delta UT1 = \sum_{i=1}^8 D_i \cdot \sin(\xi_i) + E_i \cdot \cos(\xi_i) \quad (3.32)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^6 c_{i,j} \cdot \gamma_j + \phi_i. \quad (3.33)$$

Die Koeffizienten F_i , G_i , H_i , K_i , D_i und E_i von sin und cos der jeweiligen Variation, der ganzzahlige Multiplikator $c_{i,j}$ der fundamentalen Argumente der Nutation γ_j (l , l' , F , D und Ω) und die Phase ϕ_i für die Partialtiden sind in folgender Tabelle gegeben.

Tab. 3.3: Koeffizienten für sin und cos der subtäglichen Variationen der Erdrotationsparameter und fundamentale Argumente der Nutation (Petit und Luzum 2010)

| Tide | l | l' | F | D | Ω | ϕ | $\delta UT1_p$ | | δX_p | | δY_p | |
|-------|-----|------|-----|-----|----------|--------|----------------|-------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | | | | | | Sin | Cos | Sin | Cos | Sin | Cos |
| Q_1 | -1 | 0 | -2 | 0 | -2 | 1 | 0,02 | 0,05 | -0,026 | 0,006 | -0,006 | -0,026 |
| O_1 | 0 | 0 | -2 | 0 | -2 | 1 | 0,12 | 0,16 | -0,133 | 0,049 | -0,049 | -0,133 |
| P_1 | 0 | 0 | -2 | 2 | -2 | 1 | 0,03 | 0,05 | -0,050 | 0,025 | -0,025 | -0,050 |
| K_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,09 | 0,18 | -0,152 | 0,078 | -0,078 | -0,152 |
| N_2 | -1 | 0 | -2 | 0 | -2 | 2 | -0,04 | -0,02 | -0,057 | -0,013 | 0,011 | 0,033 |
| M_2 | 0 | 0 | -2 | 0 | -2 | 2 | -0,16 | -0,07 | -0,330 | -0,028 | 0,037 | 0,196 |
| S_2 | 0 | 0 | -2 | 2 | -2 | 2 | -0,08 | 0,00 | -0,145 | 0,064 | 0,059 | 0,087 |
| K_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | -0,02 | 0,00 | -0,036 | 0,017 | 0,018 | 0,022 |

Werden allerdings die subtäglichen Variationen der Polbewegung und der Erdrotation bei den ITRF-Orbits mit generiert, wie es beim IGS und dessen ACs der Fall ist, müssen diese in der PPP-Auswertung nicht mit berücksichtigt werden (Kouba 2009).

3.4 Atmosphärische Korrekturen

Auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger durchlaufen die GNSS-Signale die Erdatmosphäre und erfahren so Änderungen in der Geschwindigkeit und der Strahlkrümmung. Aufgrund der unterschiedlichen Signalbeeinflussungen werden die ionosphärische und troposphärische Refraktion getrennt behandelt (vgl. Kap. 2.2.3).

3.4.1 Ionosphärische Refraktion

Die Erfassung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die einfachste Methode ist die Zweifrequenzkorrektion, mit der die ionosphärischen Effekte 1. Ordnung erfasst und so eliminiert werden können. Liegen GPS- und GLONASS-Zweifrequenzbeobachtungen f_1, f_2 vor, ergeben sich aus den Codebeobachtungen C_1 und C_2 bzw. den Phasenbeobachtungen Φ_1 und Φ_2 folgende Linearkombinationen für Code C_0 und Phase Φ_0 (Xu 2003):

$$C_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot C_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot C_2 \quad (3.34)$$

$$\Phi_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_2. \quad (3.35)$$

Diese Linearkombinationen werden sowohl für GPS- als auch für GLONASS-Daten verwendet.

Diese Methode eignet sich, wenn die Mehrdeutigkeiten, wie in der vorliegenden Arbeit, im Ausgleichungsprozess geschätzt werden (*float*-Lösung). Eine direkte Mehrdeutigkeitsfestsetzung (*fixed*-Lösung) ist mit dieser Linearkombination aufgrund der daraus resultierenden kurzen Wellenlänge und des verstärkten Messrauschens allerdings nicht möglich.

3.4.2 Troposphärische Refraktion

Die Modelle zur Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung werden in einen trockenen und einen feuchten Anteil aufgeteilt. Bei diesen Modellen wird zwischen einer Standardmodellierung im Zenit und einer Mappingfunktion (Projektionsfunktion), welche die Zenitverzögerung auf eine Verzögerung für die jeweilige Elevation umrechnet, differenziert. Die gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung $T(E)$ in Abhängigkeit der Elevation E kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$T(E) = Z_h \cdot m_h(E) + Z_w \cdot m_w(E) \quad (3.36)$$

| | |
|----------|--|
| Z_h | Laufzeitverzögerung im Zenit für trockenen Anteil |
| $m_h(E)$ | Mappingfunktion für trockenen Anteil in Abhängigkeit der Elevation |
| Z_w | Laufzeitverzögerung im Zenit für feuchten Anteil |
| $m_w(E)$ | Mappingfunktion für feuchten Anteil in Abhängigkeit der Elevation. |

Die Laufzeitverzögerung im Zenit wird durch die Standardatmosphärenparameter atmosphärischer Druck, Partialdampfdruck des Wassers und Temperatur bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wurde das Modell von Saastamoinen (1973) verwendet. Für nähere Erläuterungen und Formeln wird auf das Kap. 7.1 verwiesen.

Für die Mappingfunktion wird folgende Bruchgleichung verwendet (Herring 1992):

$$m_{h/f}(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \cdot \frac{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}. \quad (3.37)$$

Die Niell Mapping Funktion (NMF), die Globale Mapping Funktion (GMF) und die Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1) nutzen diese Bruchformel und unterscheiden sich nur in der Bestimmung der Parameter a , b und c . Die genannten Projektionsfunktionen werden in Kap. 7 ausführlich beschrieben.

Bei der PPP-Auswertung wird anfangs ein Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung berechnet (meist nur der trockene Anteil) und die Beobachtung korrigiert. In der späteren Ausgleichung wird der restliche Teil mit einer Mappingfunktion als Unbekannte mit geschätzt.

3.5 Instrumentelle Verzögerungen

Im Satelliten sowie bei der Signalgenerierung, aber auch bei der Signalverarbeitung in den Empfängern, treten instrumentelle Verzögerungen zwischen den Code- und Phasenbeobachtungen der verschiedenen Frequenzen auf. Da für die Auswertung beide Beobachtungsgrößen genutzt werden, sind diese Verzögerungen etwas näher zu behandeln.

Der satellitenspezifische Phasenbias ist für jede Frequenz unterschiedlich. Bei der Verwendung einer ionosphärenfreien Linearkombination wird diese Abweichung in den geschätzten Mehrdeutigkeiten absorbiert. Voraussetzung ist allerdings, dass der Phasenbias einen konstanten Betrag hat. Werden die Mehrdeutigkeiten festgesetzt, bekommt diese Abweichung eine besondere Bedeutung (Banville u. a. 2008).

Der Phasenbias des Empfängers ist abhängig von der Frequenz. Er wird hauptsächlich in die Empfängeruhr und die Mehrdeutigkeiten übertragen (Banville u. a. 2008).

Die P- und C-Codes sind auf den GPS-Frequenzen L1 und L2 sowie auf den GLONASS-Frequenzen G1 und G2 moduliert. Die entsprechenden Beobachtungsgrößen werden daher als P1 und P2 bzw. C1 und C2 bezeichnet. Der P1-P2 Codebias einer Zweifrequenzmessung kann bei der Verwendung der IGS- oder deren AC-Uhrkorrekturen ignoriert werden. Grund dafür ist, dass zur Bestimmung der IGS-Produkte diese P1-P2 Codebeobachtungen verwendet werden. Dies gilt seit April 2000 (Kouba 2009, Ray 2000).

Sind die Codedaten Bestandteil einer PPP-Auswertung, so sind nach Möglichkeit nur die P1-P2 Codebeobachtungen zu nutzen. Wenn der P1-Code nicht vom Empfänger aufgezeichnet wird, muss der C1-Code bzw. die Linearkombination z. B. aus C1-P2 korrigiert werden (Schaer und Dach 2010). Die notwendigen Empfängerinformationen hinsichtlich deren Codeaufzeichnungen werden vom CODE AC veröffentlicht³.

Die *Differential Calibration Bias* (DCB) P1-C1 der GPS-Satelliten werden von dem CODE AC als Nebenprodukt der Satellitenuhrinformationen monatlich geschätzt und dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Seit Mitte des Jahres 2010 werden auch die DCBs für die GLONASS-Satelliten bestimmt und veröffentlicht. Abb. 3.8 zeigt die DCBs für die GPS- und GLONASS-Satelliten vom April 2010.

³ <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/bcwg/cc2noncc/receiverbernese.lis>

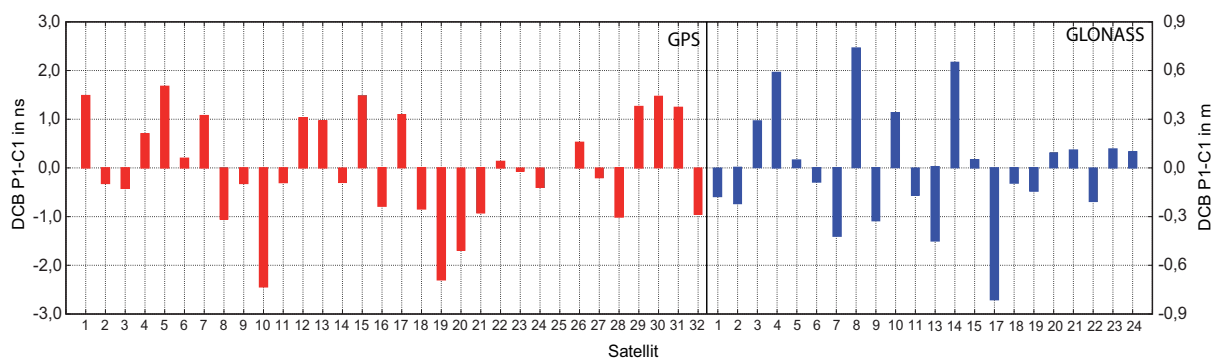


Abb. 3.8: Differential Calibration Bias (DCB) P1-C1, ermittelt vom CODE AC 04/2010

Diese Korrekturen $K_{DCB_{C1-P1}}$ aus Abb. 3.8 werden mit der Lichtgeschwindigkeit c_0 in eine metrische Größe umgerechnet und an die ionosphärenfreie Linearkombination der Codebeobachtungen \tilde{C}_0 angebracht:

$$C_0 = \tilde{C}_0 + 2,5457 \cdot K_{DCB_{C1-P1}} \cdot c_0 \cdot 10^{-9}. \quad (3.38)$$

Alternativ können die Codebias aus den Residuen einer PPP-Auswertung geschätzt werden. So spiegeln die Residuen der nicht korrigierten C1-P2 Linearkombination den Codebias wider. Allerdings ist zu beachten, dass auch Mehrwege, Rauschen und systematische Effekte die Residuen beeinflussen. Leandro u. a. (2007a) bestimmten über einen Monat von mehreren Stationen den P1-C1 Bias für die GPS-Satelliten. Diese stimmten bis auf einige Zentimeter mit den von CODE bestimmten Bias überein.

3.6 Ausgleichung der Beobachtungen nach dem PPP-Verfahren

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen (Kap. 2.3) werden in den folgenden Ausführungen das funktionale und stochastische Modell, die sequentielle Ausgleichung sowie die Parametereliminierung einer statischen und kinematischen PPP-Auswertung beschrieben.

3.6.1 Funktionales und stochastisches Modell

Basis für die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Kap. 2.3.1) sind die korrigierten Code- und Phasenbeobachtungen der ionosphärenfreien Linearkombination C_0 und Φ_0 des GPS- und GLONASS-Systems (Kouba 2009):

$$C_0 = \rho + c_0(dt + dT) + m(E) \cdot Z + \varepsilon_p \quad (3.39)$$

$$\Phi_0 = \rho + c_0(dt + dT) + m(E) \cdot Z + N\lambda_0 + \varepsilon_\Phi \quad (3.40)$$

mit

$$\rho = \sqrt{(X_E - X_{SV})^2 + (Y_E - Y_{SV})^2 + (Z_E - Z_{SV})^2} \quad (3.41)$$

| | |
|-----------------------------------|--|
| ρ | geometrische Distanz |
| X_E, Y_E, Z_E | Koordinaten der Beobachtungsstation |
| X_{SV}, Y_{SV}, Z_{SV} | Satellitenkoordinaten |
| Z | Zenitverzögerung |
| $m(E)$ | Mappingfunktion in Abhängigkeit der Elevation E |
| c_0 | Lichtgeschwindigkeit |
| dt, dT | Empfänger- bzw. Satellitenuhrabweichung von der GPS-Systemzeit |
| N | Mehrdeutigkeiten |
| λ_0 | Wellenlänge der ionosphärenfreien Linearkombination |
| $\varepsilon_p, \varepsilon_\Phi$ | Beobachtungsrauschen. |

Die troposphärische Laufzeitverzögerung in Gl. 3.39 und Gl. 3.40 gliedert sich in eine Zenitverzögerung sowie in eine Mappingfunktion. Meist wird der trockene Anteil der Zenitverzögerung und Mappingfunktion verwendet, um diese Laufzeitverzögerung zu bestimmen. Liegen aber konkrete Informationen über den feuchten Anteil vor, z. B. VMF1, kann die gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung modelliert werden (vgl. Kap. 3.4.2). In diesem Falle wird keine Restabweichung bei der gesamten Troposphärenmodellierung geschätzt und es entfällt dieser Term.

Gl. 3.39 und Gl. 3.40 werden linearisiert (vgl. Gl. 2.19) und bilden zusammen die Koeffizientenmatrix A für die GPS- und GLONASS-Phasen- und Codebeobachtungen (Kouba 2009, Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & 1 & m(E)^{(1)} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & 1 & m(E)^{(2)} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & 1 & m(E)^{(n)} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & 1 & m(E)^{(1)} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & 1 & m(E)^{(2)} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & 1 & m(E)^{(n)} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

In jeder Zeile sind die Koeffizienten einer Beobachtungsgleichung enthalten. Die ersten drei Spalten setzen sich aus den Koordinatenkoeffizienten zusammen. Für die Beobachtungsstation werden dabei Näherungskoordinaten $(\tilde{X}_E, \tilde{Y}_E, \tilde{Z}_E)$ eingeführt, mit denen auch die geometrische Distanz (Gl. 3.41) berechnet wird. Anschließend folgen die Koeffizienten für die Empfängeruhrabweichung und die Mappingfunktion zur Troposphärenschätzung. Bei den verbleibenden Spalten der Koeffizientenmatrix werden die zu bestimmenden Mehrdeutigkeiten der jeweiligen Phasenbeobachtungen auf eins gesetzt. Dies bedeutet, dass bei jedem neuen oder wieder sichtbaren Satellit die Mehrdeutigkeit bestimmt werden muss und sich so die A-Matrix um eine Spalte vergrößert. Beobachtungen, die viele Cycle Slips und Signalunterbrechungen aufweisen, sind für PPP-Auswertungen mit hohen Genauigkeitsforderungen daher un-

geeignet. Die Codebeobachtungen enthalten keinen Mehrdeutigkeitsterm. Die Koeffizienten sind daher null.

Es wird deutlich, dass die A-Matrix nur die Empfänger-Satelliten-Geometrie und die jeweilige von der Elevation und Empfängerposition abhängige Mappingfunktion enthält und somit unabhängig von den Messwerten bzw. Beobachtungen ist.

Die korrigierten und um die geometrische Distanz gekürzten Code- und Phasenbeobachtungen der ionosphärenfreien Linearkombination bilden den Beobachtungsvektor l :

$$l = \left[\Phi_0^{(1)} \quad \Phi_0^{(2)} \quad \dots \quad \Phi_0^{(n)} \quad C_0^{(1)} \quad C_0^{(2)} \quad \dots \quad C_0^{(n)} \right]^T. \quad (3.43)$$

Aus dem funktionalen Modell und der Minimumsbedingung lässt sich der Parametervektor \hat{x} berechnen. Dieser enthält die Koordinatenzuschläge dx , dy , dz zu den Näherungskoodinaten, die geschätzte Resttroposphärenabweichung im Zenit dZ , den Empfängeruhrfehler dt sowie die gelösten Mehrdeutigkeiten N^n der Phasenbeobachtungen der einzelnen Satelliten (Kouba 2009, Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$\hat{x} = \left[dx \quad dy \quad dz \quad dt \quad dZ \quad N^1 \quad N^2 \quad \dots \quad N^n \right]^T. \quad (3.44)$$

Neben dem funktionalen Modell sind Genauigkeitsrelationen zwischen den Messgrößen notwendig. Allein durch die gemeinsame Auswertung von Code- und Phasenbeobachtungen sind verschiedene Gewichtungen erforderlich. Auch die unterschiedlichen Elevationen und eventuelle Interpolationsabweichungen der Satellitenuhrkorrekturen müssen berücksichtigt werden. Die Gewichtsmatrix P ist wie folgt definiert:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2/\sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0^2/\sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2/\sigma_n^2 \end{bmatrix}. \quad (3.45)$$

Der Varianzfaktor σ_0^2 wird z. B. auf 1 m^2 gesetzt. Damit ist das einzelne Gewicht p_i nur noch von der Standardabweichung σ_i der jeweiligen Beobachtung abhängig. Die Voruntersuchungen zur Bestimmung dieser einzelnen Standardabweichungen erfolgen ausführlich in Kap 4.1.

In Abhängigkeit von der Messdauer und dem Beobachtungsintervall werden nicht nur eine, sondern mehrere Epochen ausgewertet. Die Koeffizientenmatrix A , der Beobachtungsvektor l und die Gewichtsmatrix P werden in jeder Epoche mit den aktuellen Satellitenkoordinaten, Code- und Phasenbeobachtungen, Troposphärenparametern und Gewichten neu gebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in den Gleichungen 3.42, 3.43 und 3.45 allerdings auf weitere Indizes verzichtet. Die einzelnen Beobachtungen werden entsprechend einer sequentiellen Ausgleichung Epoche für Epoche aufsummiert (vgl. Kap. 2.3.3).

Die Unterschiede hinsichtlich der Parametereliminierung einer statischen und kinematischen PPP-Auswertung werden in den nächsten beiden Abschnitten erläutert.

3.6.2 Ausgleichung statischer Beobachtungen

Bei einer statischen Auswertung sind die gesuchten Koordinatenzuschläge während der ganzen Messdauer unveränderlich. Weitere Unbekannte sind die troposphärischen Zenitparameter sowie die Mehrdeutigkeiten. Der zu eliminierende Parameter ist die Empfängeruhrabweichung. Die beiden Subvektoren \hat{x}_1 und \hat{x}_2 des Parametersvektors \hat{x} sind daher

$$\hat{x}_1 = \begin{bmatrix} dx & dy & dz & Z & N^1 & N^2 & \dots & N^n \end{bmatrix}^T \quad \hat{x}_2 = \begin{bmatrix} dt \end{bmatrix}^T. \quad (3.46)$$

Entsprechend lautet die Aufteilung der Koeffizientenmatrizen A_1 und A_2 für jede Epoche:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & m(E)^{(1)} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & m(E)^{(2)} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & m(E)^{(n)} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho^{(1)}} & m(E)^{(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho^{(2)}} & m(E)^{(2)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho^{(n)}} & m(E)^{(n)} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.47)$$

Der Beobachtungsvektor l und die Gewichtsmatrix P bleiben weiterhin unverändert. Mit

$$N = \begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

und

$$\bar{N}_{11} = (N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21}) \quad (3.49)$$

wird die gekürzte Normalgleichungsmatrix \bar{N}_{11} berechnet. Der Vektor n_1 wird über die Beziehung:

$$n = \begin{bmatrix} A_1^T P l \\ A_2^T P l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

bestimmt. Die gekürzte Normalgleichungsmatrix und das Absolutglied werden in jeder Epoche i neu berechnet und aufsummiert. Anschließend kann der Parametervektor, welcher die interessierenden Parameter enthält, für die jeweilige Epoche berechnet werden (vgl. 2.3.3).

$$\bar{N}_{11_i} = \bar{N}_{11_i} + \bar{N}_{11_{i-1}} \quad (3.51)$$

$$\bar{n}_{1_i} = \bar{n}_{1_i} + \bar{n}_{1_{i-1}} \quad (3.52)$$

$$\hat{x}_{1_i} = \bar{N}_{11_i}^{-1} \bar{n}_{1_i} \quad (3.53)$$

Die Kofaktormatrix Q_{xx} des Parametervektors \hat{x}_1 enthält als Inverse der reduzierten Normalgleichungsmatrix \bar{N}_{11_i} die Varianzen und Kovarianzen bzw. Korrelationen, z. B. die der Koordinatenkomponente dx ,

dy und dz :

$$Q_{xx} = \bar{N}_{11}^{-1} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} \end{bmatrix}. \quad (3.54)$$

Oftmals ist es zur Beurteilung der Genauigkeiten von Vorteil, die Varianzen bzw. Standardabweichungen im lokalen Horizontsystem Nord, Ost und Höhe anzugeben. Dafür wird die Matrix Q_{xx} (Gl. 3.54) mittels der Transformationsmatrix T (Gl. 2.8) in dieses topozentrische Koordinatensystem transformiert (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008):

$$Q_{tt} = T \cdot Q_{xx} \cdot T^T = \begin{bmatrix} q_{nn} & q_{ne} & q_{nh} \\ q_{en} & q_{ee} & q_{eh} \\ q_{hn} & q_{he} & q_{hh} \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

Ebenso können die Koordinatenunterschiede dx , dy und dz in das topozentrische Koordinatensystem transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} dn \\ de \\ du \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \cdot T. \quad (3.56)$$

3.6.3 Ausgleichung kinematischer Beobachtungen

Im Gegensatz zu einer statischen Messung befindet sich der Empfänger während einer kinematischen Messung in Bewegung. Das heißt, die Empfängerposition muss zu jeder Epoche neu bestimmt werden. Die Anzahl der Unbekannten erhöht sich dadurch um ein Vielfaches.

Die kinematische PPP-Auswertung gliedert sich in zwei Berechnungsschritte. Im Schritt eins werden die Troposphärenparameter sowie die Mehrdeutigkeiten bestimmt. Mit diesen gelösten Unbekannten werden im Schritt zwei die Zuschläge für die Näherungskordinaten berechnet.

Wie bei der Ausgleichung statischer Beobachtungen wird im ersten Rechengang das Prinzip der Parametereliminierung angewandt. Die zu eliminierenden Parameter sind die Koordinatenunbekannten und die Empfängeruhrabweichung. Es ergibt sich folgende Aufteilung für \hat{x} :

$$\hat{x}_1 = \begin{bmatrix} Z & N^1 & N^2 & \dots & N^n \end{bmatrix}^T \quad \hat{x}_2 = \begin{bmatrix} dx & dy & dz & dt \end{bmatrix}^T.$$

Die Matrizen A_1 und A_2 ergeben sich entsprechend und der Vektor l sowie die Gewichtsmatrix P bleiben unverändert.

Mit Hilfe der berechneten Mehrdeutigkeiten werden in jeder Epoche die jeweiligen Phasenbeobachtungen korrigiert. Die erhaltenen Resttroposphärenparameter im Zenit verbessern in Verbindung mit der Mappingfunktion sowohl die Phasen- als auch die Codebeobachtungen jeder Epoche i .

$$\Phi_{0i} = \tilde{\Phi}_{0i} - N_i \lambda_0 - Z_i \cdot m_i \quad (3.57)$$

$$C_{0i} = \tilde{C}_{0i} - Z_i \cdot m_i \quad (3.58)$$

Die korrigierten Phasen- und Codebeobachtungen bilden den Beobachtungsvektor l des zweiten Ausgleichsvorganges der kinematischen Auswertung. Dieser wird nach dem klassischen GAUSS-MARKOV-Modell durchgeführt. Die A-Matrix enthält nur noch die Koordinatenzuschläge und die Empfängeruhrabweichung:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho} & 1 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho} & 1 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(1)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(1)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(1)}}{\rho} & 1 \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(2)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(2)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(2)}}{\rho} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\tilde{X}_E - X_s^{(n)}}{\rho} & \frac{\tilde{Y}_E - Y_s^{(n)}}{\rho} & \frac{\tilde{Z}_E - X_s^{(n)}}{\rho} & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.59)$$

Bei der Gewichtsmatrix P werden neben der Elevation bei den Phasenbeobachtungen auch die Standardabweichungen der Mehrdeutigkeiten aus Rechengang eins berücksichtigt. Je größer diese sind, desto geringer wird das Gewicht der jeweiligen Beobachtung. Ohne Parametereliminierung und Aufsummierung ergibt sich der Parametervektor \hat{x} für jede Epoche nach Gl. 2.30. Die Verbesserungen bzw. Resiuden v sind nach Gl. 2.33 definiert.

4 Voruntersuchungen zur PPP-Auswertung

Das Thema dieses Kapitels ist die Bestimmung der Beobachtungsgewichtungen sowie der zu erwartenden Genauigkeiten bzw. Genauigkeitsrelationen der einzelnen Koordinatenkomponenten. Um die einzelnen Auswertungen und Untersuchungen durchführen zu können, wurden PPP-Berechnungen mit verschiedenen Testdatensätze realisiert.

4.1 Gewichtung der PPP-Beobachtungen

Die vom Empfänger aufgezeichneten GNSS-Beobachtungen werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Genauigkeiten der einzelnen Signale unterscheiden sich zum einen durch die eigentliche Art der Beobachtung (Code oder Phase bzw. GPS oder GLONASS) und zum anderen durch die Elevation des Satelliten. Je geringer die Elevation eines Satelliten ist, desto größer werden die Messabweichungen. So wirken troposphärische Restabweichungen und Mehrwegeeffekte besonders in niedrigen Elevationsbereichen (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Bauer 2003). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit verschiedenartigen Beobachtungen für den Ausgleichungsprozess unterschiedlich zu gewichten. Im Folgenden werden die a priori Standardabweichungen für die verschiedenen Beobachtungen als Funktionen der Elevation bestimmt. Aus deren Varianzen lassen sich anschließend die Gewichte berechnen.

Zur Ableitung der Standardabweichungen wurden die Residuen von kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertungen bestimmt. Da als Beobachtungsgrößen die ionosphärenfreien Linearkombinationen für die Code- und Phasendaten verwendet werden (Gl. 3.34 und Gl. 3.35), beziehen sich die Residuen auf diese kombinierten Beobachtungen. Für die GPS- und GLONASS-Satelliten wurden die Residuen der Code- und Phasenlinearkombinationen mehrerer Beobachtungstage und Stationen, und damit unterschiedlicher Empfänger, sortiert nach der Elevation visualisiert.

In Abb. 4.1 sind die GPS- und GLONASS-Phasenresiduen dargestellt. Die Größenordnung der Phasenresiduen beider Systeme ist nahezu identisch. Sie betragen wenige Zentimeter in Elevationsbereichen kleiner 30° . Bei einer Elevation von 10° haben sich die Beträge der Residuen nahezu verdoppelt, sind aber immer noch deutlich kleiner als einen Dezimeter. Diese Elevationsabhängigkeit muss bei den Beobachtungen durch verschiedene Gewichtungen berücksichtigt werden.

Aus den einzelnen Residuen eines Elevationsblockes von z. B. 5° lassen sich die empirischen Standardabweichungen berechnen. Für diese Standardabweichungen wurde mittels Regression eine Funktion (rote Kurve) berechnet (Abb. 4.1), die die a priori Standardabweichung der Beobachtungen in Abhängigkeit der Elevation beschreibt. Es gilt sowohl für GPS als auch für GLONASS:

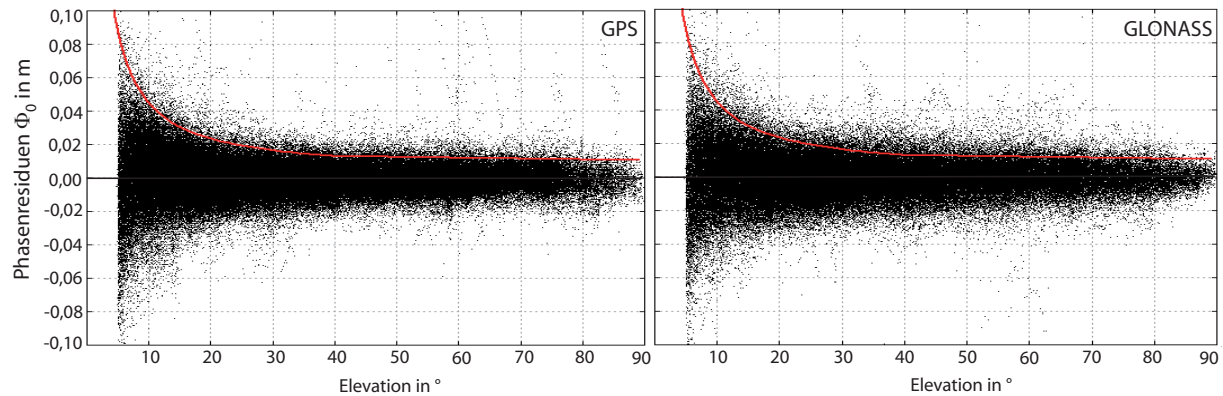


Abb. 4.1: GPS- und GLONASS-Phasenresiduen der Linearkombination Φ_0 in Abhängigkeit von der Elevation

Elevation kleiner oder gleich 40°

Elevation größer 40°

$$s_{\Phi_0}(E) = \left(\frac{0,7}{\sin(E^\circ)} + 0,3 \right) \cdot 0,01 \text{ m} \quad s_{\Phi_0}(E) = \left(-\frac{E^\circ}{200} + 1,5 \right) \cdot 0,01 \text{ m}. \quad (4.1)$$

Neben den Phasenresiduen wurde auch die Abhängigkeit zwischen den Coderesiduen und der Elevation untersucht. Für die Bestimmung der Coderesiduen der ionosphärenfreien Linearkombination wurden nur die P1-P2 Codebeobachtungen verwendet (vgl. Kap. 3.5).

Wie zu erwarten, sind die Coderesiduen (Abb. 4.2) mit Beträgen von teilweise mehreren Metern, besonders ab einer Elevation von kleiner 40° , sichtlich größer als die Phasenresiduen. Die Elevationsabhängigkeit ist bei den Coderesiduen in beiden Systemen stärker ausgeprägt. Außerdem zeigen sich deutliche

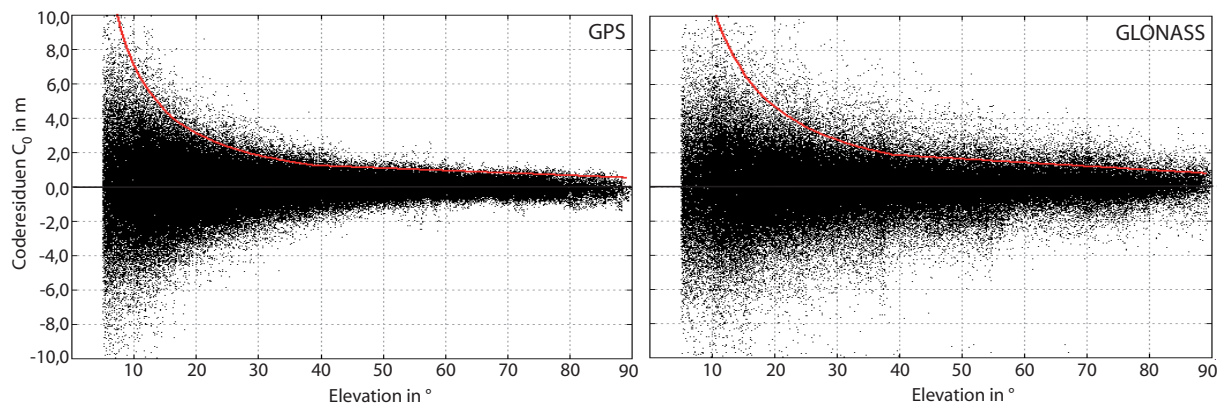


Abb. 4.2: GPS- und GLONASS-Coderesiduen der Linearkombination C_0 (P1-P2) in Abhängigkeit von der Elevation

Unterschiede in der Qualität zwischen den Coderesiduen der GPS- und GLONASS-Beobachtungen. Eine Ursache dafür ist das verstärkte Rauschen der GLONASS-Codemessung, welches von Empfänger zu Empfänger verschieden ist. Gerade ältere GNSS-Empfänger zeigten größeres Rauschen in den GLONASS P1-P2 Coderesiduen.

Deshalb müssen die Funktionen für die geschätzten Standardabweichungen der Codebeobachtungen für

GPS und GLONASS getrennt aufgestellt werden. Für GPS-Beobachtungen gelten folgende Gleichungen:

$$\begin{array}{ll} \text{Elevation kleiner oder gleich } 40^\circ & \text{Elevation größer } 40^\circ \\ s_{C_0(GPS)}(E) = \left(\frac{2}{\sin(E^\circ)} - 1,5 \right) \cdot 1,0 \text{ m} & s_{C_0(GPS)}(E) = \left(-\frac{E^\circ}{50} + 2,4 \right) \cdot 1,0 \text{ m}. \end{array} \quad (4.2)$$

Ein Vergleich der Gl. 4.1 und Gl. 4.2 belegt, dass die GPS-Codebeobachtungen eine ca. 100- bis 150-mal so große a priori Standardabweichung aufweisen. Für die GLONASS-Codebeobachtungen wird diese nochmals um den Faktor 1,5 erhöht:

$$\begin{array}{ll} \text{Elevation kleiner oder gleich } 40^\circ & \text{Elevation größer } 40^\circ \\ s_{C_0(GLO)}(E) = \left(\frac{2}{\sin(E^\circ)} - 1,5 \right) \cdot 1,5 \text{ m} & s_{C_0(GLO)}(E) = \left(-\frac{E^\circ}{50} + 2,4 \right) \cdot 1,5 \text{ m}. \end{array} \quad (4.3)$$

Aus diesen Standardabweichungen werden anschließend die einzelnen Gewichte p für die Beobachtungen berechnet und wird die Diagonale der Gewichtsmatrix P gebildet (vgl. Gl. 2.29). Die Phasenbeobachtungen, die deutlich genauer als die Codebeobachtungen sind, werden auch dementsprechend höher gewichtet. Signale von niedrig stehenden Satelliten müssen in der Ausgleichung mit einem kleineren Gewicht behandelt werden.

Ein weiterer Einflussfaktor für die Gewichtung der Beobachtung ist die Interpolationsabweichung zwischen den Stützpunkten der Satellitenuhrkorrekturen. Sind die Intervalle der Beobachtung kleiner als die der Satellitenuhrkorrektur, muss zwischen den einzelnen Uhrkorrekturen interpoliert werden. Aufgrund der Instabilität der Satellitenuhr führt eine mathematische Interpolation zu deutlichen Ungenauigkeiten, welche durch entsprechende Gewichtungen zu berücksichtigen sind. Dieser Problematik widmet sich ausführlich das Kap. 6. Da in den nachfolgenden Auswertungen und Untersuchungen (Kap. 5) die Intervalle der Beobachtungen denen der Satellitenuhrkorrekturen entsprechen, sind die angegebenen Gewichtungen, die sich aus den Standardabweichungen von Gl. 4.1, Gl. 4.2 und 4.3 ergeben, ausreichend.

4.2 Genauigkeitsabschätzung der Koordinaten

Im zweiten Teil der Voruntersuchungen werden bei einer PPP-Lösung die zu erwartenden Genauigkeiten sowie deren Streuung in Nord, Ost und Höhe, basierend auf geschätzten Mehrdeutigkeiten (*float*-Lösung), untersucht. Ziel dabei ist es, die Genauigkeitsrelationen der drei Komponenten in Abhängigkeit der geographischen Breite, der verwendeten Satelliten und der Beobachtungsdauer abzuschätzen, ohne Beobachtungen einzuführen. Die Satellitenbögen werden aus den präzisen Satellitenorbits des IGS bzw. der ESOC berechnet. Sie können als ideal angenommen werden, d. h. es treten keine Signalabrisse während eines Satellitendurchganges auf.

Wie in Kap. 3.6.2 erläutert, wird zur Berechnung der Kofaktormatrix der Unbekannten Q_{xx} eine Ausgleichung durchgeführt. Die Gewichtsmatrix P entspricht den Gewichtungen, welche in Kap. 4.1 beschrieben werden. Die Elevationsmaske wird auf 10° gesetzt. Für den Troposphärenparameter wird eine vereinfachte Mappingfunktion $1/\sin(E)$ angenommen. Multipliziert mit dem Varianzfaktor $\sigma_0^2 = 1 \text{ m}^2$ ergibt

sich die Kovarianzmatrix Σ_{xx} . Die in dieser Matrix enthaltenen Varianzen und Kovarianzen gelten für die kartesischen Komponenten X, Y und Z und werden daher in das topozentrische Koordinatensystem transformiert (Gl. 3.55). Für den Fall einer statischen Messung wurden die Standardabweichungen aus den Varianzen der Kovarianzmatrix in Nord, Ost und Höhe berechnet und dabei folgende Abhängigkeiten bzw. Varianten untersucht:

- Breitenabhängigkeit (geographische Breiten $90^\circ, 85^\circ, 80^\circ, \dots, -90^\circ$),
- Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer
- GPS- und kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung.

Die zahlreichen Standardabweichungen bzw. Varianzen der einzelnen Berechnungen sind am Ende zu einem aussagekräftigen Wert zu vereinen, die sogenannte mittlere Standardabweichung \bar{s}_0 . Diese berechnet sich aus n Varianzen $s_{0_i}^2$.

$$\bar{s}_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot s_{0_i}^2}{\sum_{i=1}^n f_i}} \quad (4.4)$$

Die Freiheitsgrade f_n sind in diesem Fall die Anzahl der Werte, aus denen die jeweiligen empirischen Standardabweichungen ermittelt wurden.

In Abb. 4.3 sind diese mittleren Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe in Abhängigkeit der Breite dargestellt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Satelliten und der Beobachtungsdauer.

Wie zu erwarten, werden mit zunehmender Beobachtungsdauer die mittleren Standardabweichungen deutlich geringer. Auch verbessern die zusätzlichen GLONASS-Satelliten die Genauigkeit. Dies wird besonders bei einer kurzen Beobachtungsdauer von einer Stunde deutlich.

Interessant sind die Breitenabhängigkeiten der Standardabweichungen in den Koordinaten, vor allem bei einer Beobachtungsdauer von einer Stunde und der alleinigen Verwendung von GPS-Satelliten. Die Nord- und Ostkomponente sind in den Polregionen auf gleichem Genauigkeitsniveau. Die Höhe ist deutlich schlechter. Die Oststandardabweichung wird in Richtung Äquator deutlich größer und erreicht das Niveau der Höhenstandardabweichung, während das Niveau der Nordkomponente nahezu konstant bleibt. Die maximalen Standardabweichungen in Ost und Höhe werden bei einer nördlichen und südlichen Breite von 30° erreicht. Am Äquator werden alle Standardabweichungen der Koordinaten wieder etwas besser. Zusätzliche GLONASS-Satelliten führen nahezu zu einer Elimination der Maxima in den mittleren Breiten bei der Ost- und Höhenkomponente, aber die Breitenabhängigkeit bleibt sichtbar. Auch eine Beobachtungsdauer von 4 bzw. 24 Stunden lässt diese Breitenabhängigkeit noch erkennen. Bei einer Beobachtungszeit von 24 Stunden haben die Nord- und Ostkomponente ein ähnliches Genauigkeitsniveau. Die deutlich schlechtere Höhengenaugkeit (auch bei 24 Stunden Beobachtungsdauer) lässt sich durch die Korrelation mit dem geschätzten Troposphärenparameter sowie mit der Empfängeruhrabweichung erklären.

Um diese Unterschiede in der Breitenabhängigkeit der Standardabweichungen, vor allem in den Lagekomponenten, erklären zu können, ist es hilfreich, die Satellitengeometrie zu betrachten. Dazu wurden der Azimut- und Elevationswinkel der GPS- und GLONASS-Satelliten der Beobachtungsstandpunkte Pol (90°), mittlere Breite (45°) und Äquator (0°) für eine Beobachtungsdauer von einer Stunde in einem

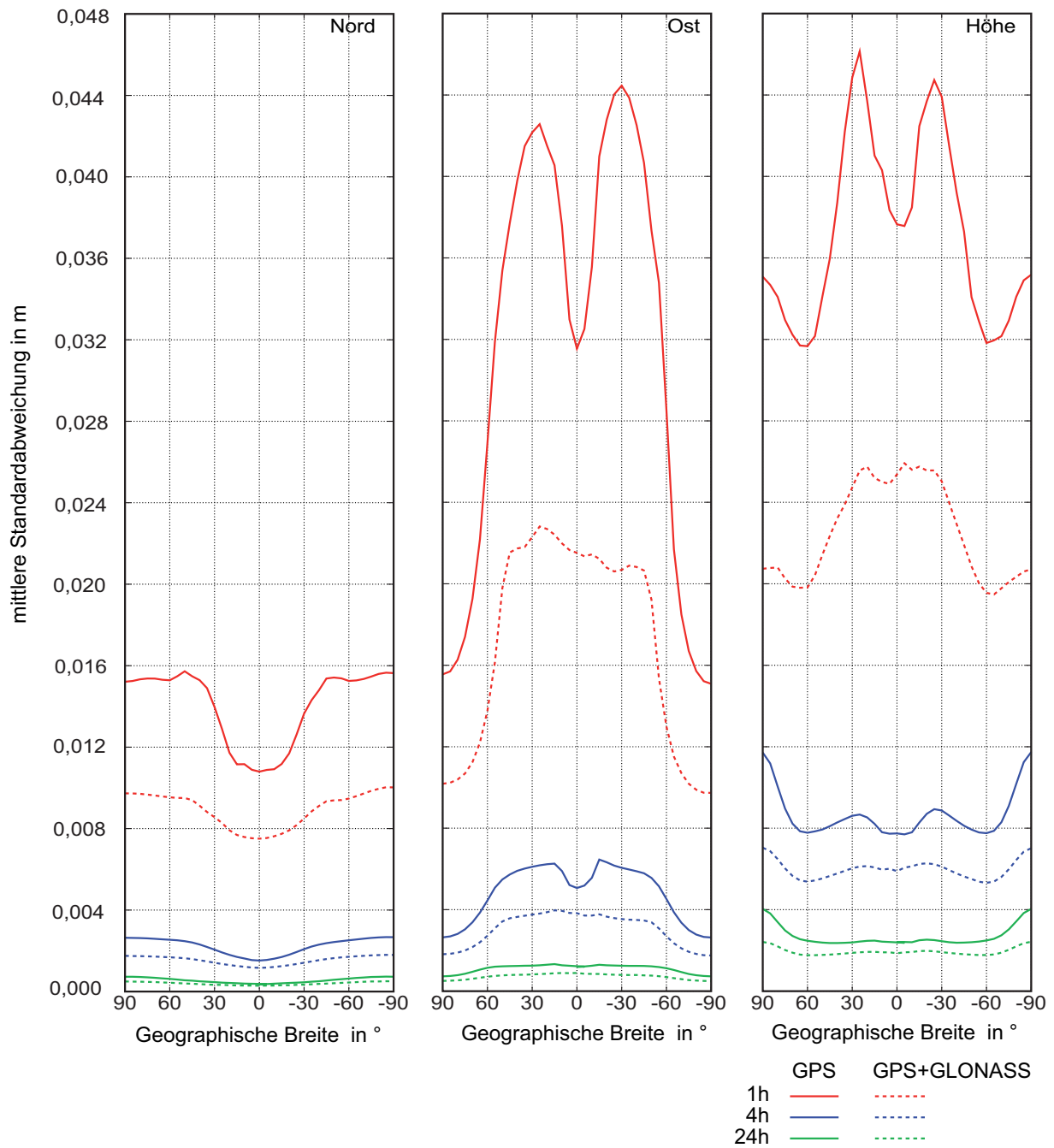


Abb. 4.3: Mittlere Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) einer *float*-Lösung aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite

Skyplot graphisch dargestellt (Abb. 4.4). Dieser zeigt zum einen die Verteilung als auch die Flugbahnen der Satelliten. Die hellblauen Bereiche kennzeichnen Abschattungsbereiche der jeweiligen Region bei einer Elevationsmaske von 10° .

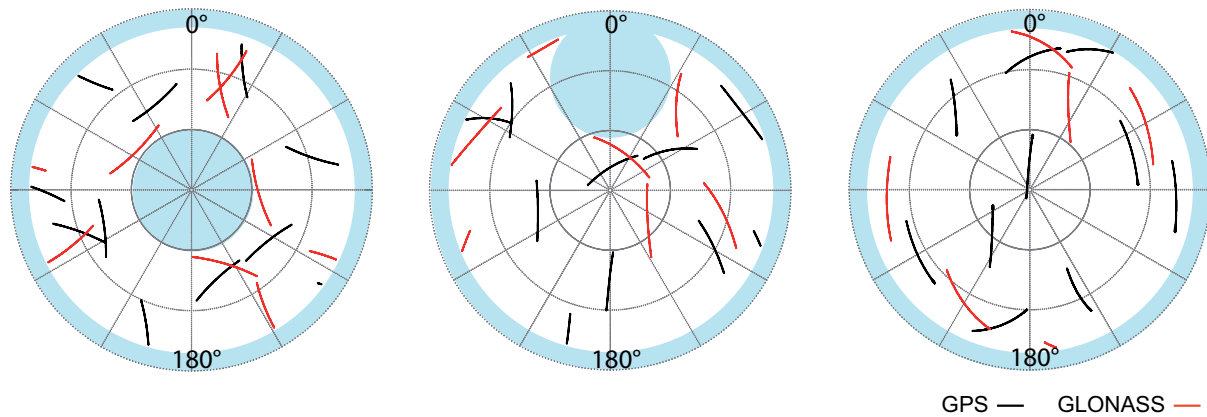


Abb. 4.4: Sichtbarkeit der Satelliten bei einer einstündigen Beobachtungsdauer (Pol, mittlere Breite, Äquator)

An den Polen sind, neben den durch die Elevationsmaske gewählten Abschattungsbereich, zwischen 60° und 90° Elevation keine Satelliten sichtbar. Um diesen Schattenbereich sind die Satelliten gleichmäßig verteilt. Auch die Satellitenspuren verlaufen in unterschiedlichen Richtungen. Aufgrund dieser gleichmäßigen geometrischen Verhältnisse sind die Nord- und Ostkomponente auf einem Genauigkeitsniveau. Bei einer Breite von 45° sind keine Satelliten im Norden (Nordloch) sichtbar, besonders deutlich wird dies, wenn nur die GPS-Beobachtungen betrachtet werden. Außerdem verlaufen die Satellitenspuren, vor allem in einem Azimutbereich von 90° bis 270° , meist nur in Nord-Süd-Richtung (oder umgekehrt). Diese, für die Ostkomponente geometrisch ungünstigen Verhältnisse führen dazu, dass diese Standardabweichungen gegenüber denen der Nordkomponente deutlich größer sind. Am Äquator sind nur aufgrund der gewählten Elevationsmaske von 10° in niedrigen Elevationen keine Beobachtungen möglich und die Satelliten sind gleichmäßiger verteilt. Allerdings verlaufen die Satellitenspuren noch deutlicher von Nord nach Süd. Die Flugrichtung der Satelliten ist die Hauptursache für Differenzen in den Standardabweichungen in Nord und Ost am Äquator.

Die Abhängigkeiten der Genauigkeiten von der geographischen Breite einer GPS-Auswertung mit geschätzten Mehrdeutigkeiten wurden schon von Santerre und Lavoie (1991) untersucht. Ebenso wie in dieser Untersuchung ist gerade im Bereich der mittleren Breiten die Ostkomponente auf einem Niveau mit der Höhenkomponente und deutlich schlechter als die Nordkomponente.

Neben den mittleren Standardabweichungen der Auswertungen ist auch die Streuung der einzelnen Standardabweichungen von Bedeutung. Um diese zu bestimmen, wurde für die einzelnen Berechnungsvarianten und Koordinatenkomponenten die Differenz zwischen der minimalen und der maximalen Standardabweichung bestimmt. Je größer diese Differenz ist, desto unpräziser ist das Ergebnis.

In Abb. 4.5 sind diese Differenzen für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente dargestellt. Auf eine Darstellung der Differenzen von 24 Stundenlösungen wurde verzichtet, da diese Streuung nur sehr gering ist.

Die Nordkomponente, die auch schon bei der mittleren Standardabweichung die besten Ergebnisse vorweisen konnte, zeigt auch in dieser Darstellung die kleinsten Variationen zwischen den Standardabwei-

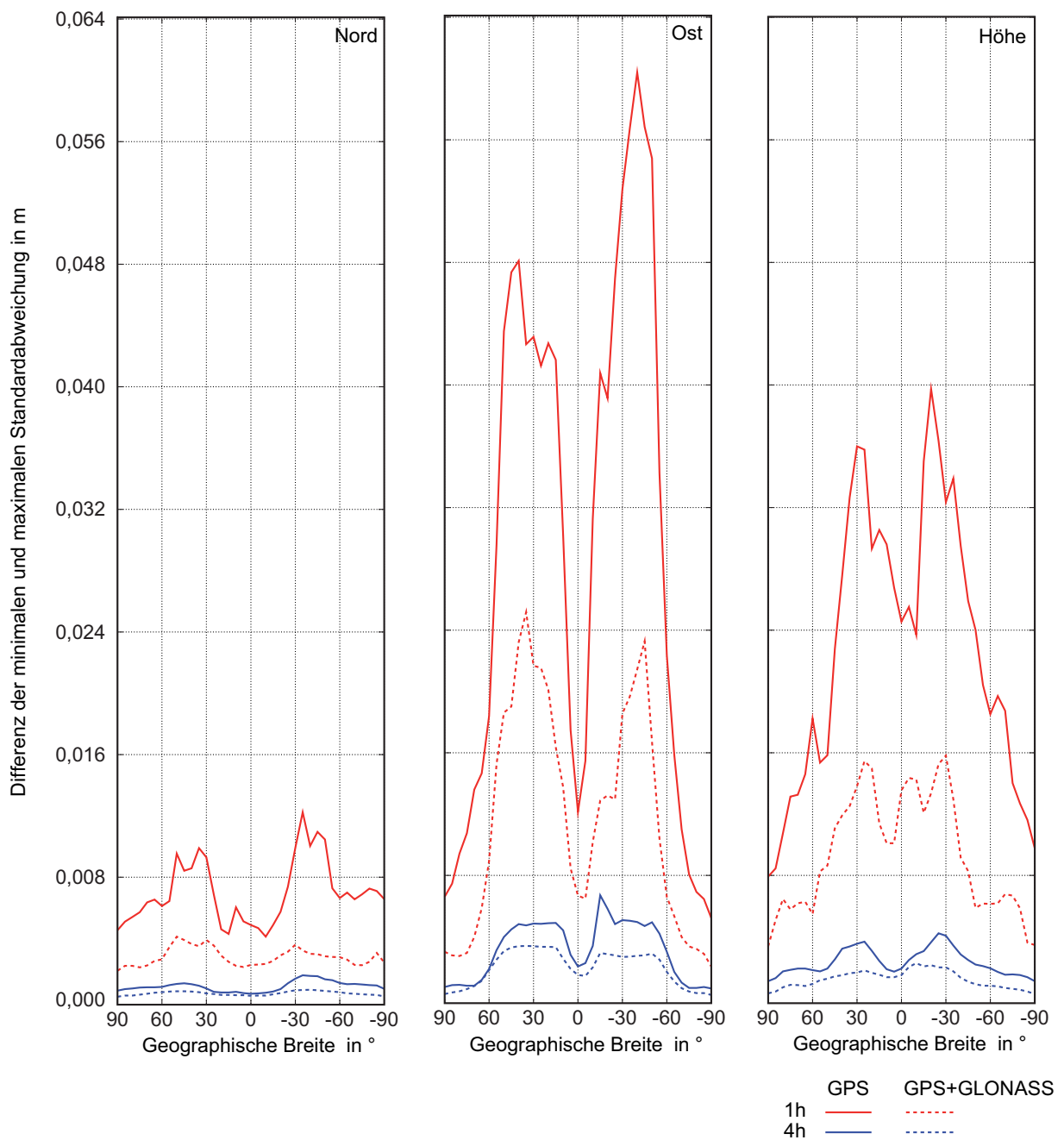


Abb. 4.5: Variationen der Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite

chungen. Bei der Ost- und Höhenkomponente sind deutliche Differenzen der Standardabweichungen zu erkennen, besonders in den mittleren Breiten. Die geringsten Variationen liegen im Bereich der Pole. Wie schon bei den mittleren Standardabweichungen ist die gleichmäßige Verteilung der Satelliten Ursache für die größere Konstanz in den Standardabweichungen. Sobald sich der Beobachterstandpunkt von den Polbereichen entfernt, werden die Variationen in der Ostkomponente deutlich größer. Die für die Ostkomponente ungünstige Satellitengeometrie führt neben den größeren mittleren Standardabweichungen auch zu größeren Variationen. Die Höhe ist zwar in der Genauigkeit eindeutig schlechter, allerdings sind die einzelnen Standardabweichungen weniger gestreut und die Lösungen so in sich stabiler.

5 Analyse der statischen und kinematischen PPP-Auswertung

Dieses Kapitel zeigt die Positionsgenauigkeiten, die bei einer statischen und kinematischen GPS bzw. kombinierten GPS und GLONASS-Auswertung in Abhängigkeit der Beobachtungszeit erreichbar sind. Weiterhin wird analysiert, ob die im vorherigen Kapitel demonstrierte Breitenabhängigkeit auch bei Auswertungen mit realen Beobachtungen auftritt. Im ersten Abschnitt werden die in der Arbeit genutzten Softwaremodule beschrieben, bevor nachfolgend die verwendeten Stationen, die Auswerteprozedur und die erreichten Ergebnisse präsentiert werden.

5.1 Software

Die benötigten Softwaremodule für die Auswertung wurden am Geodätischen Institut der TU Dresden entwickelt. Eine Vorverarbeitung und Kombination der verschiedenen Daten erfolgt mit dem Modul *Wapp*. Darauf aufbauend wird die eigentliche PPP-Berechnung mit dem Modul *TripleP* durchgeführt.

5.1.1 Wapp-Modul für die Vorverarbeitung

Das Programm *Wapp* (Abb. 5.1) wurde in FORTRAN als Konsolenanwendung geschrieben und arbeitet befehlenszeilenorientiert. In diesen Befehlszeilen können gewünschte Parameter wie z. B. Elevationsmaske, Ausschluss verschiedener Satelliten oder Angabe einer Näherungsposition an das Programm übergeben werden.

Dem Einlesen der präzisen Satellitenkoordinaten und Uhrkorrekturen folgt deren mathematische Interpolation und Zuordnung zu den Beobachtungszeitpunkten. Die Code- und Phasenbeobachtungen im *Receiver independent exchange* (RINEX)-Format werden um die geometrische Distanz gekürzt und die Satellitenuhr- sowie Empfangsantennenkorrekturen berücksichtigt.

Ein Cycle-Slip-Detektierungsalgorithmus setzt die Mehrdeutigkeitsflags fest. Anschließend wird eine absolute Positionsbestimmung mit den Codebeobachtungen durchgeführt. Die ausgegebene Binärdatei enthält am Ende zu jeder Epoche die Näherungskordinaten des Empfängers und die Koordinaten aller sichtbaren Satelliten. Weitere Informationen sind die gekürzten und korrigierten Phasen- und Codedaten der ionosphärenfreien Linearkombinationen und die Mehrdeutigkeitsflags.

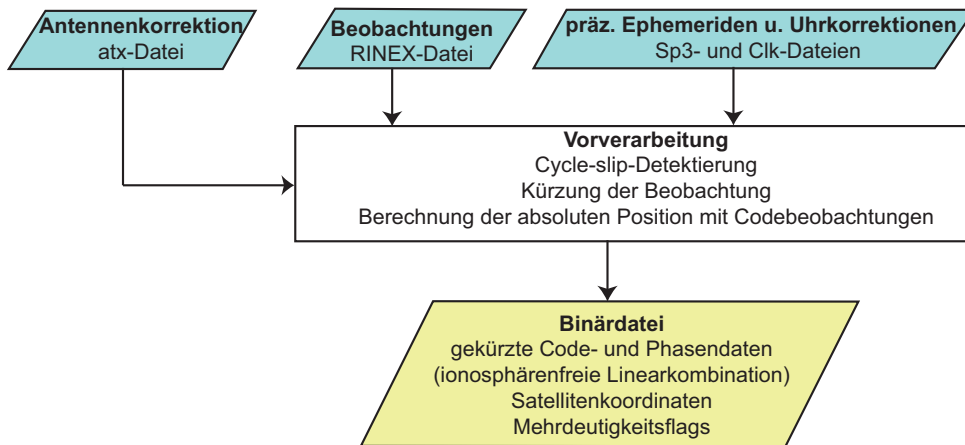


Abb. 5.1: Ablaufschema des Programms WAPP

5.1.2 TripleP-Modul für die PPP-Berechnung

Der Verarbeitung der präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen sowie der RINEX-Beobachtungen zu einer Binärdatei schließt sich die PPP-Berechnung mit dem Programm TripleP an. Die Programmierung erfolgte in C++ als Konsolenanwendung. Die Steuerung des Programms wird wiederum über eine Befehlszeile realisiert, in der mit Hilfe von Parametern verschiedene Einstellungs- und Ausgabemöglichkeiten vorgenommen werden können.

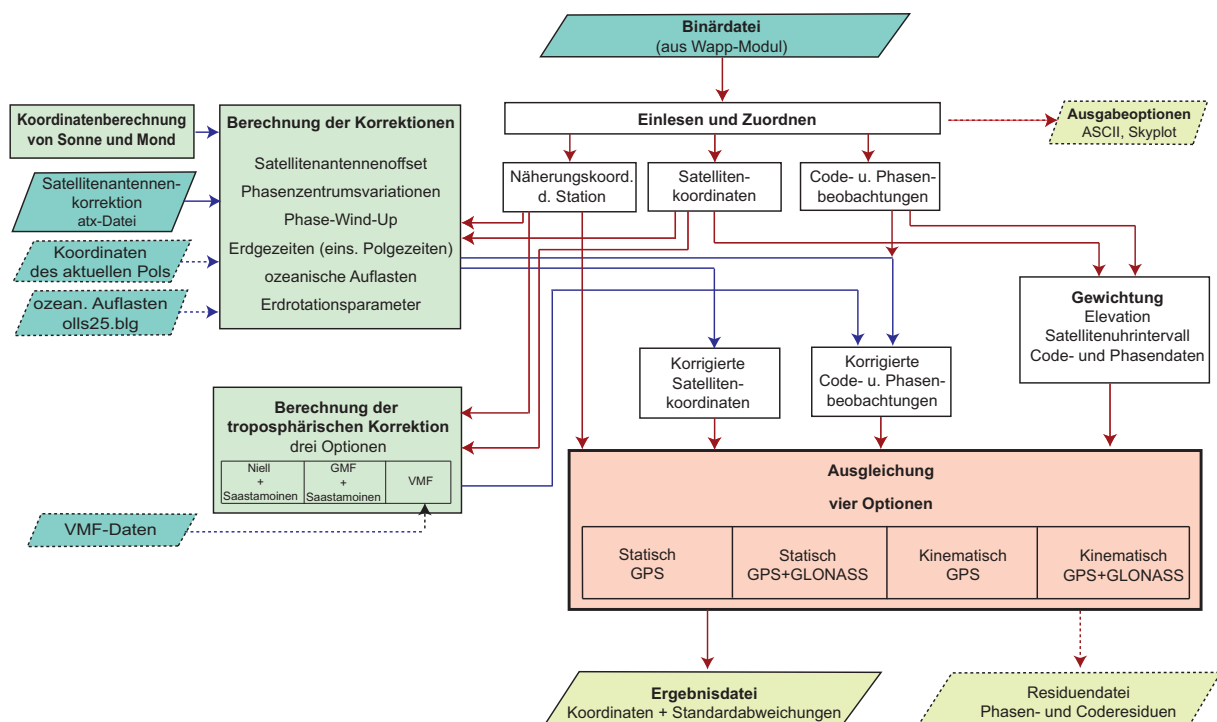


Abb. 5.2: Ablaufschema des Programms TripleP

In Abb. 5.2 ist das Ablaufschema der PPP-Auswertung dargestellt. Nach dem Einlesen der Binärdatei und der entsprechenden Zuordnung der Daten in Strukturen bzw. Klassen besteht die Möglichkeit, die Binär-

datei im ASCII-Format oder die Satellitenkoordinaten in einem Skyplot darzustellen.

Die Näherungskordinaten der Beobachtungsstation sowie die Koordinaten der Satelliten sind Voraussetzung, um zahlreiche Korrekturen (vgl. Kap. 3.2 und 3.3) zu berechnen. Zusätzlich werden noch Informationen zu den kartesischen Koordinaten von Sonne und Mond im ITRF, die Satellitenantennenkorrekturen sowie optional die Koordinaten des aktuellen Pols und die Phasen und Amplituden der ozeanischen Auflasten benötigt. Die Berechnung der kartesischen Koordinaten von Sonne und Mond im ICRS, ausgehend von ekliptischen Koordinaten im raumfesten System, ist in Montenbruck (2001) dokumentiert. Die anschließende Transformation in das ITRS (vgl. 2.1.3) erfolgte nach IERS Conventions von Petit und Luzum (2010).

Für die Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung gibt es drei Möglichkeiten. Wird die VMF1 verwendet, müssen die Informationen zu deren Parametern sowie die Zenitverzögerung des hydrostatischen und feuchten Anteils ebenfalls aus einer externen Datei zugeführt werden.

Mit den korrigierten Satellitenkoordinaten und den Code- und Phasendaten sowie den Näherungskordinaten der Beobachtungsstation wird die Ausgleichung durchgeführt. Diese kann statisch oder kinematisch erfolgen. Weiterhin kann entschieden werden, ob nur GPS-Beobachtungen oder auch zusätzliche GLONASS-Beobachtungen verwendet werden sollen.

Am Ende wird die Ergebnisdatei ausgegeben. Diese enthält die kartesischen und ellipsoidischen Koordinatenlösungen, die Koordinatenzuschläge zu den Näherungskordinaten sowie die dem Ausgleichungsprozess entnommenen epochenweisen Standardabweichungen der Nord-, Ost- und Höhenkomponente. Optional können auch die Code- und Phasenresiduen für jeden Satelliten und zu jeder Beobachtungsepoche ausgegeben werden.

5.2 Beobachtungsdaten und Auswertestrategie

Für die statischen und kinematischen Auswertungen wurden die GPS- und GLONASS-Beobachtungen im RINEX-Format von zehn IGS-Stationen, die zugleich Bestandteil des *European Reference Frame* (EUREF) sind (Tab. 5.1), ausgewählt. Der Beobachtungszeitraum umfasste sieben Tage der GPS-Woche 1577 (28.03.-03.04.10). Einschließlich der am 19. und 20. März 2010 gestarteten drei GLONASS-M

Tab. 5.1: Verwendete IGS- bzw. EUREF Stationen für die PPP-Auswertung

| Station | Stationsname | Land | Empfänger |
|---------|--------------|-------------|--------------------|
| BZRG | Bolzano | Italien | LEICA GRX1200GGPRO |
| ZIM2 | Zimmerwald | Schweiz | Trimble NETRS |
| WTZR | Wetzlar | Deutschland | LEICA GRX1200GGPRO |
| WROC | Wroclaw | Polen | LEICA GRX1200GGPRO |
| PENC | Penc | Ungarn | LEICA GRX1200GGPRO |
| SKE0 | Skellefteå | Schweden | JPS E GGD |
| VIL0 | Vilhelmina | Schweden | JPS EGGDT |
| HERT | Hailsham | UK | LEICA GRX1200GGPRO |
| ORID | Ohrid | Mazedonien | LEICA GRX1200GGPRO |
| WARN | Warnemünde | Deutschland | JPS Legacy |

Satelliten waren somit 20 GLONASS-Satelliten aktiv. Der GLONASS-Satellit 9 sendete zu dieser Zeit nur auf einer Frequenz (G1), sodass Beobachtungen zu 19 Satelliten ausgewertet wurden. Die Anzahl der GPS-Satelliten betrug zu diesem Zeitpunkt 29. Nur die Satelliten PRN01, PRN09 und PRN25 waren nicht in Betrieb. Insgesamt konnten daher Beobachtungen zu 48 Satelliten verwendet werden.

Als Sollkoordinaten dieser Stationen wurden die des *EUREF Permanent Network (EPN)*¹ zur Epoche 01.04.2010 verwendet. Die kartesischen Koordinaten sind wie die Orbits im IGS05 gegeben und werden als Referenz für die nachfolgenden Positionslösungen verwendet. Die Genauigkeiten dieser Sollkoordinaten werden mit wenigen Millimetern angegeben. Die präzisen GPS- und GLONASS-Ephemeriden und Uhrkorrekturen sind die des ESOC AC und stehen auf deren FTP Server² zur freien Verfügung. Das Intervall der Uhrkorrekturen beträgt 30 Sekunden. Da auch das Beobachtungsintervall 30 Sekunden ist, entfällt die Interpolation der Satellitenuhrkorrektur. Um den Einfluss der Troposphäre sowie Mehrwegeeffekte tiefstehender Satelliten gering zu halten, wurde die Elevationsmaske für alle Auswertungen auf 10° gesetzt. Nähere Analysen zum Einfluss des Intervalls der Uhrkorrektur und troposphärischer Verzögerung folgen in den Kapiteln 6 und 7.

5.3 Positionsgenauigkeiten in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer

Für die Berechnung der Positionsgenauigkeiten wurden Beobachtungszeiten von 1, 4 und 24 Stunden gewählt. Unterschieden werden im Folgenden statische und kinematische sowie GPS- und kombinierte GPS- und GLONASS-Auswertungen. Auch wenn die verwendeten IGS-Stationen unbeweglich sind und so die Aufzeichnung der Signale im statischen Modus erfolgt, können mit der kinematischen Prozessierung die erreichbaren Genauigkeiten von bewegten Stationen in abschattungsfreien Gebieten simuliert werden. Hierbei besteht der Vorteil, dass sehr genaue Sollkoordinaten als Referenz verwendet werden können.

5.3.1 Statische Auswertung

Abb. 5.3 zeigt als Beispiel die Abweichungen in Nord, Ost und Höhe zu den Sollkoordinaten für die italienische IGS-Station BZRG (Tag 93, Jahr 2010). Der Kurvenverlauf zeigt ein typisches Verhalten einer statischen PPP-Auswertung, bei der die Mehrdeutigkeiten und die Koordinaten in einem Ausgleichsprozess geschätzt werden. Je länger die Beobachtungszeit ist, desto genauer werden die Mehrdeutigkeiten bestimmt. Aus diesem Grunde sind die Abweichungen in den ersten Stunden in allen Komponenten mehrere Zentimeter groß. Nach dieser sogenannten Einlaufzeit sind die Mehrdeutigkeiten genau genug bestimmt und die Differenzen zur Referenzposition betragen nicht mehr als 1 cm bis 2 cm bzw. nach 12 Stunden weniger als 1 cm.

Zur Bestimmung der Positionsgenauigkeit einer statischen Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer wurden die Koordinaten am Ende der jeweiligen Beobachtungszeit mit den Sollkoordinaten verglichen. Aus den Abweichungen ε_i der n Berechnungen wurden die empirischen Standardabweichungen

¹ <http://www.epncb.oma.be/trackingnetwork/coordinates/index.php>

² <ftp://dgn6.esoc.esa.int/products>

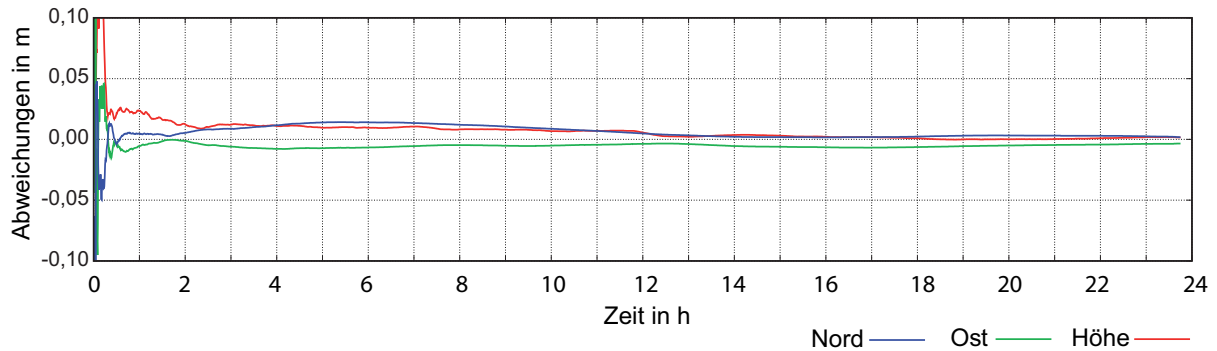


Abb. 5.3: Abweichungen zu den Sollkoordinaten einer statischen PPP-Lösung der Station BZRG Tag 93, Jahr 2010

chungen s_0 (Niemeier 2008) für die jeweilige Koordinatenkomponente berechnet

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}. \quad (5.1)$$

Bei der GPS-Prozessierung ist die durchschnittliche Anzahl der sichtbaren Satelliten ca. sieben bis acht. Abhängig ist dies vom Standpunkt des Beobachters und der Elevationsmaske. Tab. 5.2 zeigt die berechneten Standardabweichungen in Nord s_{0N} , Ost s_{0E} und Höhe s_{0H} für die jeweilige Beobachtungsdauer.

Tab. 5.2: Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer statischen GPS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer

| Beobachtungsdauer in h | s_{0N} in cm | s_{0E} in cm | s_{0H} in cm |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 24 | 0,4 | 0,7 | 0,8 |
| 4 | 0,8 | 1,7 | 2,2 |
| 1 | 1,5 | 3,6 | 3,6 |

Nach 24 Stunden wird mit Standardabweichungen in der Lage und Höhe von kleiner als 1 cm ein hohes Genauigkeitsniveau erreicht. Beträgt die Beobachtungsdauer nur eine Stunde, werden die Standardabweichungen um den Faktor vier bis fünf größer. Die Standardabweichungen der Komponenten Ost und Höhe liegen auf einem Niveau und sind deutlich größer als die der Nordkomponente. Da die verwendeten europäischen Beobachtungsstationen vorwiegend in dem Bereich der mittleren nördlichen Breiten liegen, bestätigen sich die Ergebnisse der Voruntersuchung (Kap. 4.2) sowie von Santerre und Lavoie (1991).

Die zusätzlichen GLONASS-Satelliten erhöhen die Anzahl der Beobachtungen auf ca. 13 bis 14. In Tab. 5.3 sind die erreichbaren Standardabweichungen der kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertungen in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer dargestellt.

Bei langen Beobachtungszeiten von 24 oder 4 Stunden bewirken die zusätzlichen Messungen keine oder nur eine geringe Verbesserung. Deutliche Genauigkeitssteigerungen vor allem in der Ost- und Höhenkomponente sind bei einer Beobachtungszeit von einer Stunde sichtbar. Der Genauigkeitsunterschied zwischen der Nord- und Ostkomponente wird etwas verringert.

Tab. 5.3: Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer statischen GPS- und GLONASS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer

| Beobachtungsdauer in h | s_{0_N} in cm | s_{0_E} in cm | s_{0_H} in cm |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 24 | 0,3 | 0,5 | 0,8 |
| 4 | 0,7 | 1,3 | 1,9 |
| 1 | 1,2 | 2,2 | 2,9 |

Die Genauigkeiten der PPP-Ergebnisse, basierend auf der Auswertung von 24-stündigen GPS-Beobachtungen, entsprechen denen, die von Mirault u. a. (2008), Bisnath und Gao (2009) und Li u. a. (2009) erreicht worden sind. Die *Root Mean Square* (RMS)-Werte dieser PPP-Auswertungen (Beobachtungsdauer 24 Stunden, Intervall 30 Sekunden) betragen in der Lage und Höhe 1 cm bis 2 cm oder weniger. GLONASS-Beobachtungen wurden bei den Prozessierungen von Mirault u. a. (2008) und Bisnath und Gao (2009) nicht verwendet.

Die kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung von Li u. a. (2009) führte zu kaum merklichen Verbesserungen gegenüber der alleinigen, schon hochgenauen GPS-Lösung.

Die Ergebnisse der statischen Auswertung zeigen, dass bei einer langen Beobachtungsdauer Genauigkeiten auf dem Niveau einer relativen GNSS-Positionsbestimmung bei langen Basislinien erreicht werden. Die PPP-Prozessierung ist daher eine sinnvolle Alternative zu diesem klassischen Verfahren, vor allem in Regionen, in denen kein ausgebautes Referenzstationsnetz vorhanden ist.

5.3.2 Kinematische Auswertung

Der Algorithmus einer kinematischen Lösung schätzt zuerst die Mehrdeutigkeiten und Restabweichungen der troposphärischen Laufzeitverzögerung und verbessert anschließend die Beobachtungen. In der nachfolgenden Ausgleichung werden in jeder Epoche die neuen Koordinaten, und im Vergleich zu einer statischen Auswertung, ohne Aufaddierung ermittelt. Typisch ist daher das stärkere Rauschen in den einzelnen Koordinatenkomponenten (Abb. 5.4). Das größte Rauschen ist in der Höhe zu erkennen. Un-

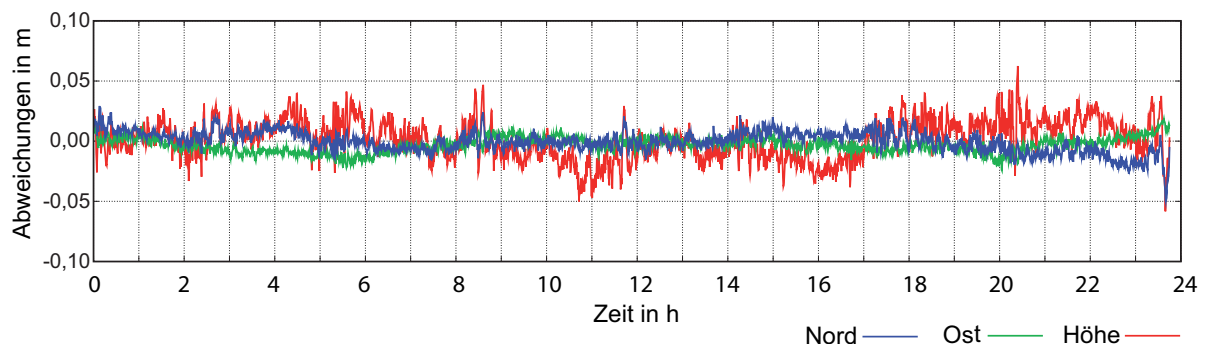


Abb. 5.4: Abweichungen zu den Sollkoordinaten einer kinematischen PPP-Lösung der Station SKE0 Tag 93, Jahr 2010

genauigkeiten in der Troposphärenmodellierung oder Abweichungen in der Satellitenuhr beeinflussen hauptsächlich die Höhenkoordinate.

Um auch für die kinematische Auswertung eine Genauigkeit der einzelnen Komponenten angeben zu können, wurden aus den Abweichungen zu den Solllösungen der einzelnen Epochen (vgl. Abb. 5.4) die empirischen Standardabweichungen für jeden Beobachtungsdatensatz berechnet. Damit für die Beobachtungszeiten 1, 4 und 24 Stunden jeweils einheitliche Genauigkeitsmaße vorliegen, sind diese einzelnen empirischen Standardabweichungen s_0 zu einer mittleren Standardabweichung \bar{s}_0 zusammengefasst worden (vgl. Gl. 4.4). In Tab. 5.4 bzw. 5.5 sind diese für die GPS-Auswertungen bzw. kombinierte GPS- und GLONASS-Auswertungen in Nord, Ost und Höhe in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer aufgelistet.

Tab. 5.4: Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer kinematischen GPS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer

| Beobachtungszeit in h | \bar{s}_{0_N} in cm | \bar{s}_{0_E} in cm | \bar{s}_{0_H} in cm |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 24 | 1,2 | 1,2 | 3,3 |
| 4 | 1,3 | 1,4 | 3,0 |
| 1 | 2,6 | 5,5 | 5,6 |

Tab. 5.5: Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer kinematischen GPS- und GLONASS-Auswertung in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer

| Beobachtungszeit in h | \bar{s}_{0_N} in cm | \bar{s}_{0_E} in cm | \bar{s}_{0_H} in cm |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 24 | 1,1 | 1,1 | 3,0 |
| 4 | 1,0 | 1,1 | 2,6 |
| 1 | 1,4 | 2,4 | 3,0 |

Im Vergleich zu einer statischen Auswertung sind die Ergebnisse, wie zu erwarten, etwas schlechter. Dies ist besonders in der Höhenkoordinate erkennbar. Aber auch bei kinematischen Auswertungen können bei langen Beobachtungszeiten (4 Stunden) vor allem in der Lage zentimetergenau und somit sehr präzise Positionen ermittelt werden. Der Nutzen der zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen wird vor allem bei einer kinematischen Auswertung und kurzen Messzeiten deutlich. Die Standardabweichungen verringern sich teilweise um mehr als die Hälfte. Aber auch bei längeren Beobachtungszeiten werden mit GLONASS Verbesserungen, vor allem in der Höhe, erreicht. Der Genauigkeitsunterschied zwischen einer statischen und kinematischen GPS/GLONASS-Auswertung bei einer Beobachtungszeit von einer Stunde ist mit wenigen Millimetern sehr gering.

Ein Vergleich der kinematischen Prozessierungen von 24-stündigen GPS-Beobachtungen mit Mirault u. a. (2008) zeigt ein etwa gleiches Genauigkeitsniveau mit RMS-Werten von ca. 2 cm in der Lage und ca. 4 cm in der Höhe. Die geringen Unterschiede können durch die Verwendung anderer IGS-Stationen und den damit verbundenen unterschiedlichen Empfängerqualitäten entstehen.

Die erreichten Standardabweichungen der kinematischen Auswertung von Bisnath und Gao (2009) sind mit Werten von 2,8 cm, 6,7 cm und 4,6 cm in Breite, Länge und Höhe etwas schlechter. Mögliche Ursache ist, dass als Uhr- und Orbitprodukte die Echtzeitdaten vom JPL verwendet wurden.

5.4 Konvergenzverhalten

Im letzten Abschnitt wurden die Positionsgenauigkeiten nach 1, 4 und 24 Stunden untersucht. Bestimmte Anwendungen erfordern allerdings Beobachtungszeiten, die kleiner als eine Stunde sind. Nachfolgend wurden daher die Genauigkeiten in den Komponenten Nord, Ost und Höhe für statische und kinematische PPP-Auswertungen für Beobachtungszeiträume zwischen 5 Minuten und 1 Stunde untersucht. Die Stationen und Beobachtungstage entsprechen denen von Kap. 5.3.

Für die Auswertung wurden die RINEX-Beobachtungsdateien in Blöcke von 5, 10, 15 Minuten usw. zerlegt, mit dem PPP-Algorithmus ausgewertet und Abweichungen zu den Sollkoordinaten berechnet. Aus diesen Abweichungen ließen sich die empirischen Standardabweichungen (statisch) und die mittleren empirischen Standardabweichungen (kinematisch) der einzelnen Beobachtungsblöcke berechnen.

In Abb. 5.5 sind diese Standardabweichungen in Abhängigkeit der Beobachtungszeit für eine statische Auswertung graphisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die zusätzlichen Beobachtungen zu den GLONASS-

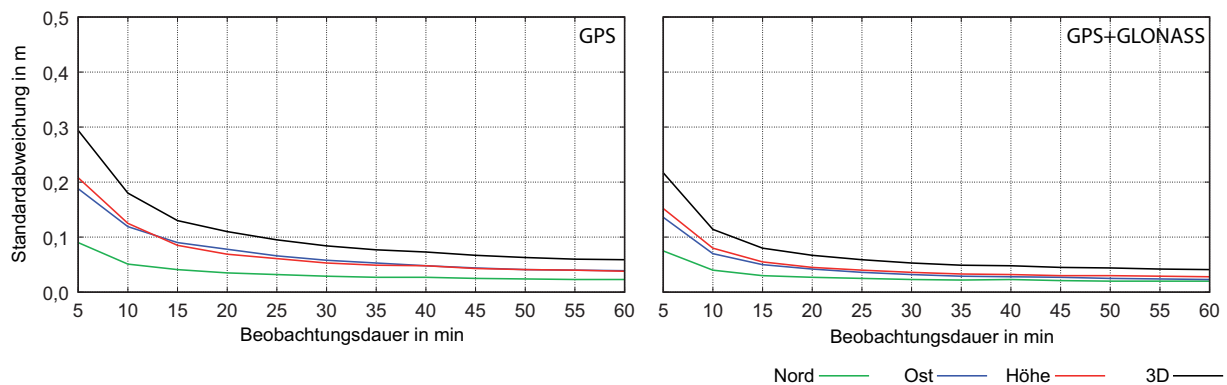


Abb. 5.5: Konvergenzverhalten einer statischen PPP-Auswertung, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung

Satelliten die Einlaufzeit verbessern. Schon nach 15 Minuten können in allen Komponenten Standardabweichungen von deutlich unter einem Dezimeter erreicht werden. Die Nordkomponente ist schon von Beginn an deutlich besser bestimmbar als die Ost- und Höhenkomponente.

Im Vergleich zu der vorherigen Graphik präsentiert Abb. 5.6 die Beziehung zwischen den mittleren Standardabweichungen und den Beobachtungszeiten für eine kinematische PPP-Auswertung. Die zusätzlichen Beobachtungen helfen gerade bei kurzen Beobachtungszeiten, die Vielzahl der Unbekannten einer kinematischen Auswertung zu lösen. Dies wirkt sich besonders auf die Höhenkomponente aus, deren Genauigkeit sich um mehr als die Hälfte verbessert. Mit einer kombinierten GPS- und GLONASS-Prozessierung ist auch bei einer kinematischen Anwendung nach 30 Minuten eine dreidimensionale Standardabweichung von kleiner als einem Dezimeter realisierbar.

Cai (2009) demonstrierte anhand eines realen kinematischen Datensatzes (Beobachtungsintervall 1 Sekunde, Elevation 5°), dass bei einer Beobachtungszeit von 30 bis 40 Minuten die zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen die Ergebnisse in Nord und Ost um ca. 60% und in der Höhe um ca. 40% verbessern. Als Orbit- und Uhrinformationen für die GPS/GLONASS-Messungen wurden die des russischen ACs *Informational Analytical Center* (IAC) verwendet. Deren Uhrkorrekturen haben nur ein Intervall von 5

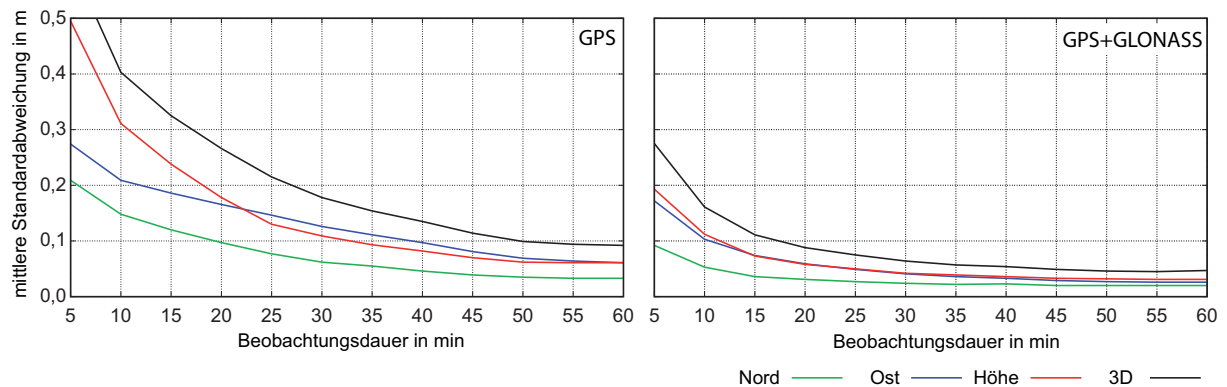


Abb. 5.6: Konvergenzverhalten einer kinematischen PPP-Auswertung, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung

Minuten. Mögliche Interpolationsabweichungen der Uhrkorrekturen verhindern eine größere Verbesserung in der Höhenkomponente.

5.5 Residuen

Neben den Koordinatenzuschlägen sind auch die Residuen bzw. Verbesserungen der Code- und Phasenbeobachtungen der ionosphärenfreien Linearkombination Ergebnisse des Ausgleichsprozesses. Diese Residuen können für weitere Analysen genutzt werden.

5.5.1 Phasenresiduen

In Abb. 5.7 sind die Phasenresiduen für alle GPS- und GLONASS-Beobachtungen der IGS-Station BZRG (Bolzano, Italien) für den Tag 093 des Jahres 2010 als Beispiel dargestellt. Ein Vergleich der Residuen veranschaulicht, dass es, wie schon in Kap 4.1 demonstriert, keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Beträgen der Phasenresiduen der GPS- und GLONASS-Beobachtungen gibt. Die einzelnen Residuen sind meist deutlich unter 5 cm. Größere Abweichungen sind hauptsächlich auf die Signale von niedrigstehenden Satelliten zurückzuführen (vgl. Abb. 4.1). Der Mittelwert der GPS- und GLONASS-Phasenresiduen liegt etwa bei null.

Bei den Doppeldifferenz-Phasenresiduen einer relativen GNSS-Auswertung liegt die Schwierigkeit darin, die Mehrwegeeffekte einer Station und einem Satelliten zuzuordnen zu können. Diese Problematik spielt bei den PPP-Residuen keine Rolle. Das heißt, die erhaltenen PPP-Phasenresiduen der ionosphärenfreien Linearkombination können unter anderem genutzt werden, um Mehrwegeeffekte zu detektieren. Nachteilig wirkt sich aus, dass andere Fehlereinflüsse, vor allem die Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung, die Mehrwegeeffekte überlagern und nicht ausreichend gefiltert werden können (Reußner 2009).

Im schwedischen GNSS-Netz *SWEPOS* wurden die täglichen PPP-Phasenresiduen von über 20 Beobachtungsstationen im Zeitraum 1999 bis 2004 analysiert. Mittels einer umfangreichen Zeitreihenanalyse und verschiedenen Filtern, die eingesetzt wurden, um alle zusätzlichen nicht modellierten Messabweichun-

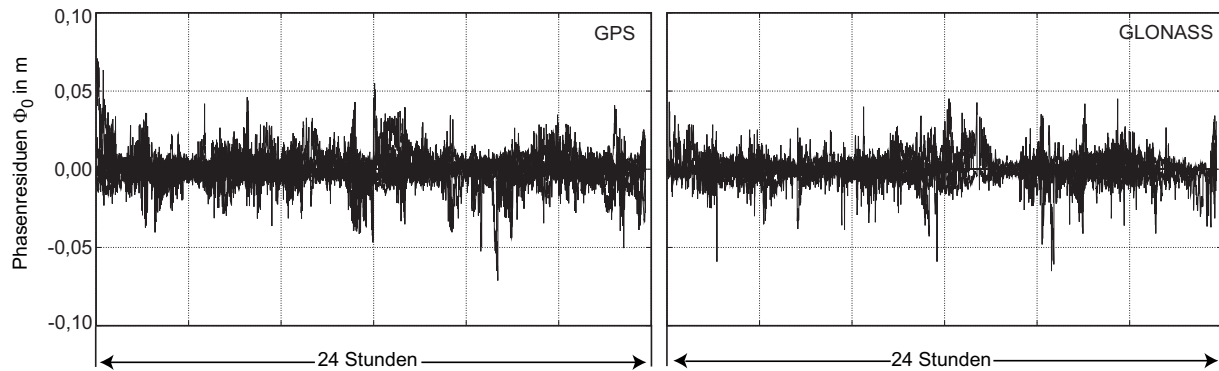


Abb. 5.7: Phasenresiduen Φ_0 der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS- Beobachtungen

gen zu minimieren, konnten die stationsabhängigen Effekte, wie z. B. Mehrwege, durch diese Residuen lokalisiert werden (Granström und Johansson 2007).

Darüber hinaus können die berechneten Residuen zur Verdichtung von Satellitenuhrkorrekturen genutzt werden. Ausführliche Details zu dieser Trägerphaseninterpolation folgen im Kap. 6.3.

5.5.2 Coderesiduen

Die Beträge der einzelnen Coderesiduen der ionosphärenfreien Linearkombination, basierend auf den P1-P2 Codes in Abb. 5.8, erreichen zwar Beträge von teilweise mehreren Metern, sind aber im Mittel null. Dies belegt, dass die Uhrkorrekturen auf der Basis dieser Codebeobachtungen geschätzt werden (vgl. 3.5). Wie schon in Abb. 4.2 ist bei den GLONASS-Residuen ein etwas größeres Rauschen erkennbar.

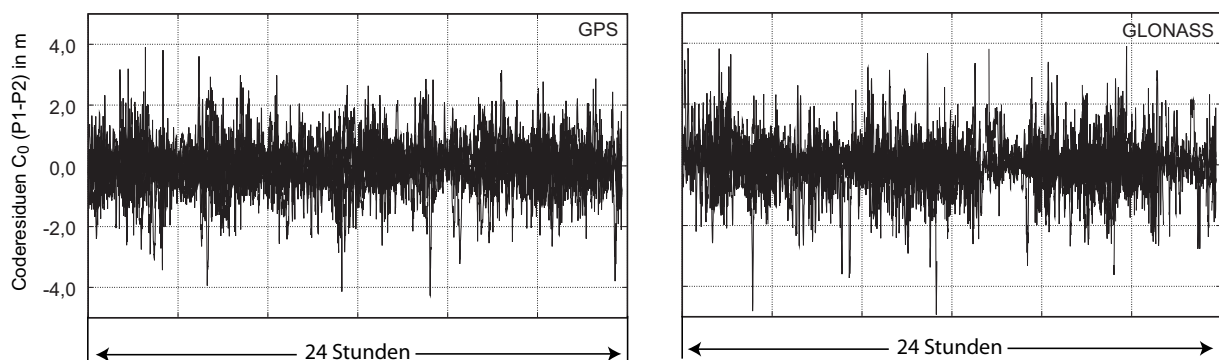


Abb. 5.8: Coderesiduen C_0 (P1-P2) der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS-Beobachtungen

Im Gegensatz dazu sind in Abb. 5.9 die Coderesiduen aller Beobachtungen, die sich aus der Linearkombination C1-P2 und ohne Anbringen einer Korrektur (vgl. Gl. 3.38) ergeben, dargestellt. Die einzelnen Offsets haben Beträge von mehreren Metern. Unter Berücksichtigung, dass die berechneten Residuen noch den Faktor 2,5457 aus der ionosphärenfreien Linearkombination enthalten, spiegeln diese die instrumentellen Verzögerungen des P1-C1 Codes wider.

Mit einer umfangreichen Weiterverarbeitung und Analyse von mehreren Stationen und Beobachtungsta-

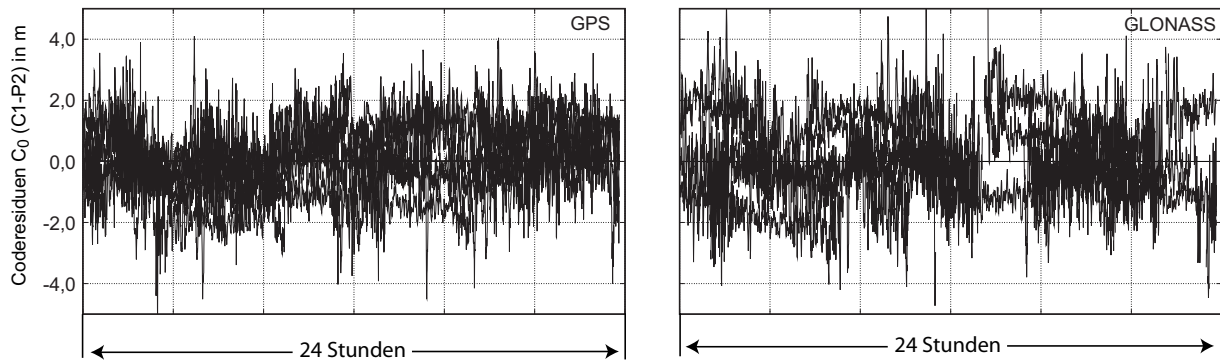


Abb. 5.9: Coderesiduen C_0 (C1-P2) der IGS-Station BZRG 093/2010 für GPS- und GLONASS-Beobachtungen

gen können anhand dieser Residuen die DCBs für die individuellen Satelliten geschätzt werden. Nähere Untersuchungen zur Bestimmung des Codebias P1-C1 sowie P2-C2 der einzelnen Satelliten wurden umfangreich von Leandro u. a. (2007a) und Leandro (2009) durchgeführt.

5.6 Genauigkeiten in Abhängigkeit von der geographischen Breite

Der letzte Teil dieses Kapitels beinhaltet die Untersuchung der Genauigkeiten der Koordinaten in Abhängigkeit von der geographischen Breite der Beobachtungsstationen. Die Genauigkeitsvorbetrachtung (Kap. 4.2) demonstrierte bereits, dass besonders zwischen den Komponenten Ost bzw. Höhe und der geographischen Breite starke Korrelationen vorliegen. Um diesen Zusammenhang anhand realer Beobachtungsdaten zu untersuchen, wurden PPP-Lösungen mit einer Beobachtungsdauer von einer Stunde von über 80 weltweit verteilten IGS-Stationen berechnet. Der Untersuchungszeitraum betrug sieben Tage (Woche 1577). Die Sollkoordinaten sind, sofern vorhanden, die IGS05-Lösungen des EPN zur Epoche 01.04.2010 oder wurden durch PPP-Berechnungen anhand 24-stündiger Datensätze selbst erzeugt. Da nicht alle Empfänger der Stationen GLONASS-Signale aufzeichnen, beschränkt sich die Auswertung auf GPS-Beobachtungsdaten. Aus den einzelnen Abweichungen zu den Sollkoordinaten ergeben sich die Standardabweichungen für Nord, Ost und Höhe (Abb. 5.10).

Auch die empirischen Standardabweichungen, die sich aus dem Vergleich mit Sollkoordinaten ergeben, weisen in der Ost- und Höhenkomponente eine deutliche Breitenabhängigkeit auf. Die Nordkomponente ist nahezu konstant und liegt bei ca. 2 cm. Die Ostkomponente erreicht in den Polregionen mit ca. 2 cm eine ähnlich hohe Genauigkeit. Ab einer geographischen Breite von 60° (Nord und Süd) verdoppeln bzw. verdreifachen sich diese Standardabweichungen. In einem Bereich von $+45^\circ$ bis -45° liegen die Standardabweichungen relativ konstant bei 4 cm bis 5 cm. Die Standardabweichungen in der Lage aus Kap. 4.2 werden, abgesehen vom Äquatorbereich in der Ostkomponente, gut wiedergegeben.

Auch die Standardabweichungen in der Höhe sind in den Polregionen mit 2 cm bis 3 cm deutlich kleiner als mit mehr als 8 cm in Äquatornähe. Diese Standardabweichungen aus den Differenzen zu den Sollkoordinaten sind in der Höhe deutlich größer als die, die in der Genauigkeitsvorbetrachtung ermittelt wurden. Ursache könnten Restabweichungen in der Modellierung der Troposphäre in diesen Regionen sein.

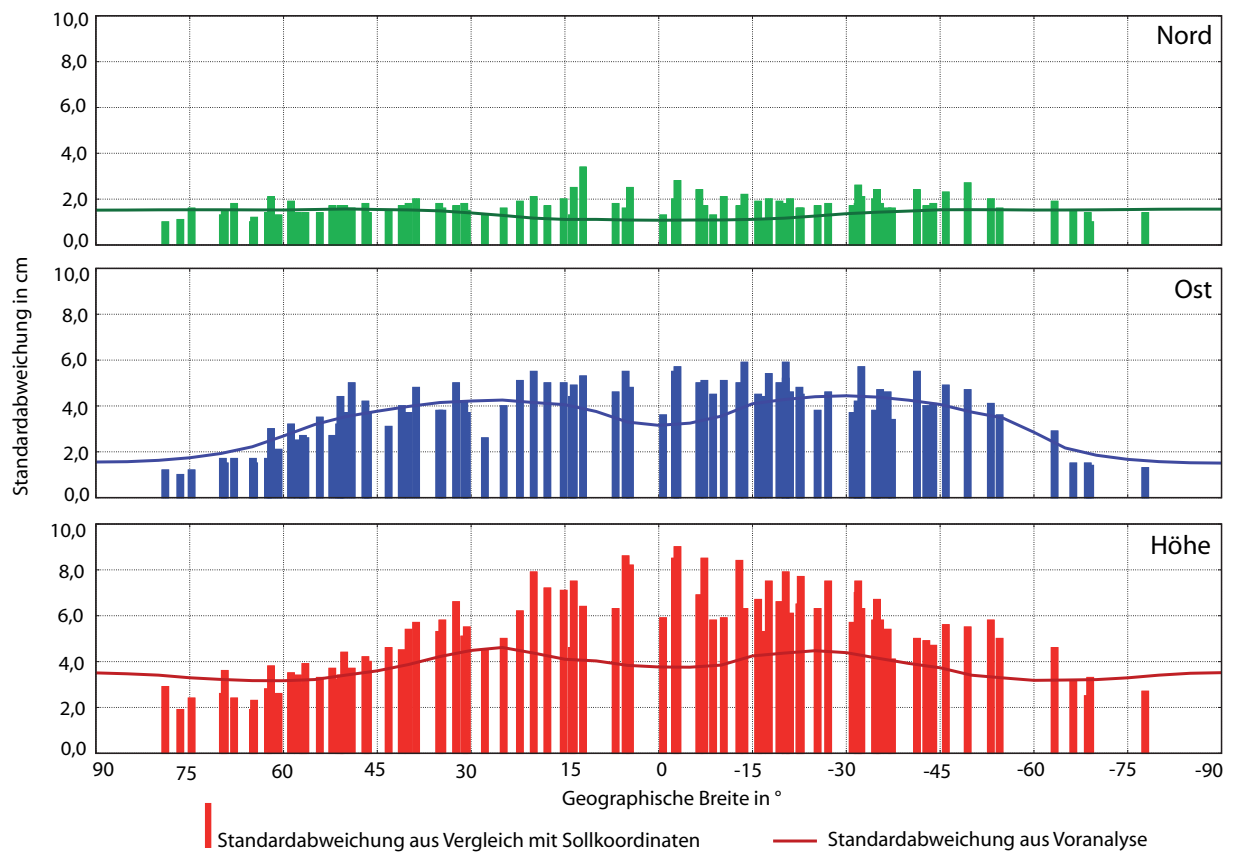


Abb. 5.10: Standardabweichungen von 1-stündigen GPS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der geographischen Breite

6 Untersuchungen zu den GNSS-Satellitenuhren

Abweichungen in den Satellitenuhrkorrekturen wirken in vollem Umfang auf die absolute Positionsbestimmung. Aus diesem Grund sind für eine GNSS-Auswertung nach dem Prinzip des PPP präzise Uhrkorrekturen unabdingbar. Diese Uhrkorrekturen werden vom IGS und dessen ACs zur Verfügung gestellt. Die üblichen Intervalle betragen 5 Minuten bzw. 30 Sekunden. Zwischen diesen Intervallen ist eine Interpolation erforderlich, wenn das Beobachtungsintervall kleiner ist als das der Uhrkorrektur (vgl. Kap. 3.1.3).

Dieses Kapitel beschreibt kurz die Atomuhren, die von den GPS- bzw. GLONASS-Satelliten verwendet werden. Ein Schwerpunkt ist dabei die Stabilität dieser Uhren und die Interpolation der Uhrkorrekturen. Im zweiten Teil wird dargelegt, warum die Satellitenuhrstabilität entscheidend für die Qualität einer kinematischen PPP-Prozessierung ist.

6.1 Oszillatoren von GPS- und GLONASS-Satellitenuhren

Der Taktgeber als wesentlicher und auch wichtigster Bestandteil aller Uhren ist das schwingungsfähige System, der sogenannte Oszillator oder auch Uhrfrequenzstandard. Um die jeweiligen Zeitintervalle auch über einen längeren Zeitraum genau bestimmen zu können, ist eine konstante und präzise Schwingung des Oszillators erforderlich. Historisch wurde z. B. die isochrone Bewegung des Pendels genutzt, um die Länge eines Zeitintervalls zu messen (Allan u. a. 1991).

In den meisten Uhren (Armbanduhren, Funkuhren, GNSS-Empfänger) wird heutzutage als Taktgeber ein Quarzoszillator verwendet. Dieser nutzt den sogenannten piezoelektrischen Effekt, der entsteht, wenn von außen an das Kristall eine elektrische oder mechanische Spannung angelegt wird. An einem Quarzkristall wird demzufolge eine auf dessen Eigenfrequenz abgestimmte Wechsellspannung angebracht und das System schwingt im Takt der Eigenfrequenz des Quarzkristalls. Diese Wechsellspannung wird abgenommen, verstärkt und zur Steuerung der Uhr verwendet (Schödlbauer 2000).

Eine viel genauere Frequenz wird mit Hilfe von Atomuhren generiert. Der Taktgeber dieser Uhren ist eine elektromagnetische Schwingung, die die Atome bei entsprechender Energiezufuhr erzeugen. Die um den Atomkern verteilten Elektronen werden in außen liegende Elektronenschalen transportiert, wodurch der Spin des Atoms verändert wird. Die Cäsiumuhr, der Wasserstoff-Maser und die Rubidiumuhr sind die derzeit wichtigsten Atomuhren (Schödlbauer 2000, Seeber 2003).

Die Rubidiumuhr ist gekennzeichnet durch eine sehr hohe Langzeitstabilität. Unter guten Bedingungen ist eine Stabilität von $1 \cdot 10^{-13}$ s pro Tag erreichbar. Die Cäsiumuhr hat neben einer ebenso ausgezeichneten Langzeit- auch eine sehr gute Kurzzeitstabilität. Unter Laborbedingungen haben diese Uhren Genauigkeiten in der Sekunde von $1,5 \cdot 10^{-14}$ s erzielt. Die höchsten Genauigkeiten werden von den

Wasserstoff-Masern erzielt. Eine Frequenzstabilität von $1 \cdot 10^{-15}$ s über Perioden von mehreren Stunden ist mit diesen Atomuhren möglich (Seeber 2003).

Die Satellitenuhren sind ein wesentlicher Bestandteil eines Satellitennavigationssystems. Aufgrund der hohen Stabilität der Frequenzstandards werden bei den GPS- und GLONASS-Satelliten Rubidium- und Cäsiumuhren verwendet. Jeder Satellit hat mindestens drei Atomuhren an Bord, wobei nur immer eine Uhr aktiv ist. Fällt diese Uhr aus oder wird sie zunehmend instabil, kann das Kontrollzentrum eine andere Uhr aktivieren. Die GPS-Satelliten des Blocks IIA sind mit jeweils zwei Rubidium- und zwei Cäsiumfrequenzstandards ausgestattet. Die neueren GPS-Satelliten des Blocks IIR bzw. IIR-M nutzen drei Rubidiumuhren, welche sich durch eine hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer auszeichnen. Die GLONASS-Satelliten der neuen Generation arbeiten mit drei Cäsiumuhren (Malette und White 2007).

Für die Satelliten des europäischen Navigationssystems Galileo sind vier Atomuhren geplant. Die Kurzzeitstabilität soll durch die Rubidiumfrequenzstandards realisiert werden. Zusätzlich werden auch erstmals passive Wasserstoff-Maser in GNSS-Satelliten eingesetzt. Diese sollen neben der Kurzzeit- auch die Langzeitstabilität garantieren (Hofmann-Wellenhof u. a. 2008, Seeber 2003).

6.2 Stabilität der GPS- und GLONASS-Satellitenuhren

Eine perfekt eingestellte Uhr mit einer stabilen Frequenz würde über einen unendlichen Zeitraum immer die korrekte Zeit liefern. Die Atomuhren werden diesem Anspruch, wie auch alle anderen Uhren, nicht gerecht. Die Frequenz ist nicht streng stabil, sondern wird von einem konstanten Offset, einer Drift und zufälligen Frequenzabweichungen überlagert (Seeber 2003).

Die folgende Bewertung der Qualität der Satellitenuhren bezieht sich ausschließlich auf die Untersuchung der Frequenzstandards der Atomuhren. Um diese miteinander vergleichen und deren Stabilität beurteilen zu können, ist ein statistisches Maß erforderlich. Die statistischen Maße, welche die Korrelation in der Uhrabweichung berücksichtigen und mit denen außerdem die verschiedenen Rauschtypen der Uhren unterschieden werden können, sind die Allan Varianz bzw. die modifizierte Allan Varianz (Allan u. a. 1991).

Zuvor wird kurz beschrieben, wie die Korrekturen der GPS- und GLONASS-Satellitenuhren ermittelt werden.

6.2.1 Bestimmung der IGS-Uhrprodukte

Die präzisen Uhrkorrekturen werden durch die verschiedenen ACs aus den Zweifrequenz-Code- und -Phasenbeobachtungen eines weltweiten Netzes von IGS-Stationen geschätzt. Bei der Berechnung werden Stationen mit einem externen Frequenzstandard, idealerweise Wasserstoff-Maser, bevorzugt. Diese Stationen mit hochstabilen Uhren erhalten in der Ausgleichung ein hohes Gewicht (Ray und Senior 2003). Weitere Anforderungen an die Stationen sind abhängig vom Produkt des jeweiligen AC. Das CODE AC verwendet sogenannte *highrate*-Beobachtungen (Beobachtungsintervall 1 Sekunde), um die Uhrkorrekturen in einem Intervall von 5 Sekunden zu produzieren (Bock u. a. 2009). Das ESOC

AC bietet Uhrkorrekturen für GPS und GLONASS seit der GPS-Woche 1568 im 30-sekündigen Intervall an. Zwingend notwendig sind dafür IGS-Stationen mit Empfängern, die neben den GPS- auch GLONASS-Beobachtungen aufzeichnen. Deren Strategie und Auswertesoftware *NAvigation Package for Earth Observation Satellites* (NAPEOS) ist in ESA (2009) beschrieben. Die geschätzten Uhrkorrekturen der Satelliten beziehen sich immer auf eine Referenzuhr. Als Referenzuhr wird diejenige ausgewählt, die den kleinsten mittleren RMS-Wert hat und gleichzeitig einen kompletten Datensatz von Uhrkorrekturen aufweist. Die Referenzuhren sind sowohl von Tag zu Tag als auch von AC zu AC verschieden.

Die einzelnen ACs stellen ihre Produkte dem IGS zur Verfügung. Diese einzelnen Lösungen werden unterschiedlich gewichtet und zu einem einheitlichen IGS-Produkt kombiniert. Zusätzlich wird eine Referenzzeit, die IGS-Zeitskala, eingeführt. Diese wird aus den gewichteten Uhren der Satelliten und Stationen gebildet und hat eine Stabilität von $1 \cdot 10^{-15}$ s pro Tag. Vor dieser IGS-Zeitskala wurde eine einfache lineare Angleichung der beobachteten Satellitenuhren zur *broadcast*-GPS-Zeit verwendet. Allerdings verursachte die Instabilität der *broadcast*-GPS-Zeit zu große Diskontinuitäten in der Zeit und der Frequenz (Ray und Senior 2003, Senior u. a. 2003).

Die berechneten Werte sind für den Nutzer in der Form der *clk*-Datei erhältlich. Jeder Satellit enthält in Abhängigkeit vom Anbieter und der zeitlichen Verfügbarkeit der Produkte die Uhroffsets zur GPS-Systemzeit im Intervall von 5 Minuten, 30 oder 5 Sekunden. Optional kann noch die Standardabweichung dieses Offsets mit angegeben sein. Der IGS stellt zusammenfassend zusätzliche Informationen der einzelnen ACs, wie zum Beispiel Anzahl der verwendeten Epochen, Anzahl der Uhrkorrektionslösungen sowie Offset und Drift bezogen auf die kombinierte Lösung zur Verfügung. Außerdem sind für jedes AC detaillierte Genauigkeitsangaben zu den einzelnen Stations- und Satellitenuhren enthalten (Kouba und Springer 2001).

6.2.2 Allan Varianz bzw. modifizierte Allan Varianz

Die Allan Varianz, benannt nach dem Physiker David W. Allan, ist das vom *Institute of Electronic and Electronic Engineers* (IEEE) und *International Telecommunication Union* (ITU) empfohlene statistische Werkzeug, um die Instabilität von Uhren, bzw. deren Frequenzen, zu charakterisieren. Im Folgenden wird die Allan Varianz und die daraus weiter entwickelte modifizierte Allan Varianz beschrieben. Sofern keine anderen Quellen angegeben werden, orientiert sich die Herleitung an Allan u. a. (1997) sowie Allan und Barnes (1981).

Gegeben sind drei aufeinanderfolgende Uhrzeitabweichungen u_n , u_{n+1} und u_{n+2} in einem Zeitintervall τ . Die Frequenzdifferenz f_{u_n} aus zwei aufeinanderfolgenden Abweichungen ist definiert als:

$$f_{u_n} = \frac{u_{n+1} - u_n}{\tau} = \frac{\Delta u_n}{\tau}. \quad (6.1)$$

Die Frequenzdifferenz $f_{u_{n+1}}$ für die nachfolgenden Abweichungen lautet demzufolge:

$$f_{u_{n+1}} = \frac{u_{n+2} - u_{n+1}}{\tau} = \frac{\Delta u_{n+1}}{\tau}. \quad (6.2)$$

Die Frequenzinstabilität Δf_{u_n} ist definiert als Änderung der Frequenzdrift von einer Zeitepoche zur nächs-

ten:

$$\Delta f_{u_n} = f_{u_{n+1}} - f_{u_n}. \quad (6.3)$$

Aus diesen Gleichungen ergibt sich folgende Formel für die Berechnung der Frequenzänderung:

$$\Delta f_{u_n} = \frac{\Delta^2 u_n}{\tau} = \frac{u_{n+2} - 2u_{n+1} + u_n}{\tau}. \quad (6.4)$$

Die einzelnen Komponenten der Gleichung sind in Abb. 6.1 dargestellt. Die Differenz der Differenz Δ^2

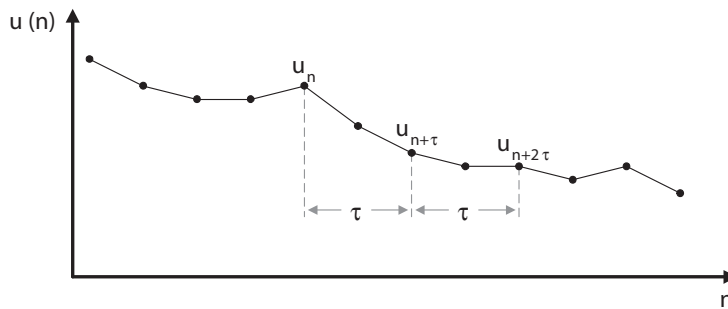


Abb. 6.1: Berechnung der 2-Punkt-Allan-Varianz

wird auch als zweite Differenz bezeichnet. Um die Frequenzunterschiede eines kompletten Datensatzes mit N aufeinanderfolgenden Uhrzeitabweichungen zu berechnen, werden diese über $n = 1$ bis $N - 2$ aufsummiert und durch den Term $2(N - 2)$ dividiert. Das Ergebnis ist die 2-Punkt-Allan-Varianz $\sigma_A^2(\tau)$ für das Zeitintervall τ :

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)} \sum_{n=1}^{N-2} \left(\frac{u_{n+2} - 2u_{n+1} + u_n}{\tau} \right)^2. \quad (6.5)$$

Werden die Allan Abweichungen $\sigma_A(\tau)$ für einen ausreichend großen Datensatz über ein inkrementierendes Zeitintervall τ berechnet und in einem Diagramm mit logarithmischer Achseinteilung graphisch dargestellt, kann das Rauschverhalten der Uhr und deren Stabilität für jeden beliebigen Zeitraum abgeleitet werden.

Mit der Allan Abweichung können verschiedene Rauscharten der Frequenz und der Phase differenziert werden. Weißes Rauschen, Funkelrauschen und zufälliger Gang der Frequenz sind in Abb. 6.2 dargestellt. Typisch für Atomuhren ist das weiße Rauschen. Dieses Rauschen verursacht die Instabilität dieser Uhren. Benachbarte Uhrabweichungen sind unkorreliert und zufällig (Allan 1987).

Die Rauschtypen der Phase von Uhren und Oszillatoren sind das weiße Rauschen und Funkelrauschen. Diese Rauschtypen können aufgrund ähnlicher Abhängigkeiten vom Zeitintervall τ mit der Allan Varianz nicht unterschieden werden. Um diese Mehrdeutigkeiten zu beseitigen, wurde 1981 die modifizierte Allan Varianz entwickelt und eingeführt (Allan u. a. 1991).

In Gl. 6.5 werden zur Berechnung der zweiten Differenz drei aufeinanderfolgende Uhrabweichungen verwendet. Diese drei einzelnen Werte werden durch Mittelwerte in Abhängigkeit des Zeitintervalls τ ersetzt. Das heißt, beträgt das Zeitintervall 30 Sekunden, wird nicht jede 30. Uhrabweichung, sondern

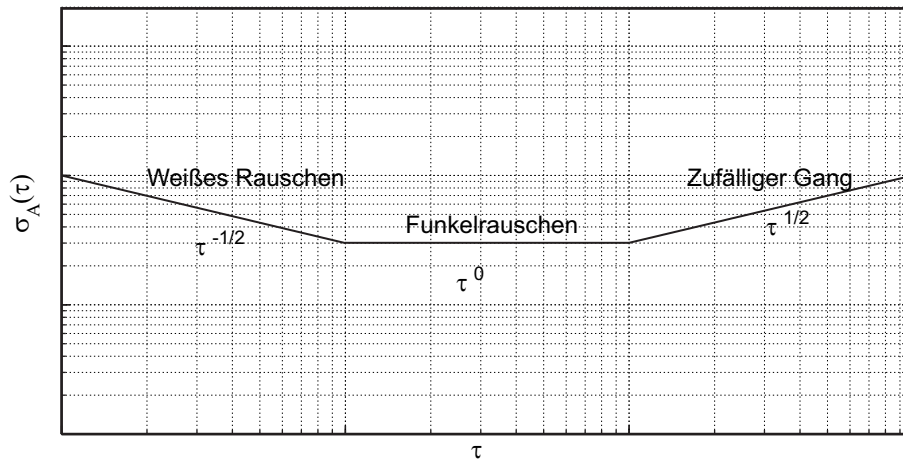


Abb. 6.2: Verlauf der Allan Abweichungen der verschiedenen Rauschtypen der Frequenz

der Durchschnittswert von diesen 30 Abweichungen verwendet.

$$\text{Mod } \sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)} \sum_{n=1}^{N-2} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_{i+2n} - 2u_{i+n} + u_i}{\tau} \right) \right)^2 \quad (6.6)$$

Da im folgenden Abschnitt nur die Stabilitäten der Rubidium- und Cäsiumuhren Teil der Untersuchung sind, und somit nur die Rauschtypen der Frequenz auftreten können (Allan 1987), wird weiterhin die 2-Punkt-Allan-Varianz bzw. deren Abweichung verwendet.

Allan Varianzen für die GNSS-Satellitenuhren

Die Frequenzstandards der zum Zeitpunkt der Untersuchung aktiven Satellitenuhren lassen sich in vier Bereiche unterteilen. Die GPS-Satelliten gehören entweder zum Block IIA oder Block IIR/IIRM. Während die Satelliten des Block IIR/IIRM Rubidiumfrequenzstandards verwenden, werden im Blocks IIA entweder Rubidium- oder Cäsiumuhren genutzt. Die Cäsiumuhren der GLONASS-Satelliten bilden die letzte Gruppe. Tab. 6.1 gibt einen Überblick über die Merkmale dieser vier Gruppen und ihre dazugehörigen Satelliten zum Zeitpunkt März/April 2010.

Tab. 6.1: Unterteilung der GNSS-Satelliten hinsichtlich Satellitensystem, Frequenzstandard und Block

| | I | II | III | IV |
|------------------|-------------------------|-------------|---|---|
| GNSS-System | GPS | GPS | GPS | GLONASS |
| Block | IIA | IIA | IIR/IIRM | – |
| Frequenzstandard | Cäsium | Rubidium | Rubidium | Cäsium |
| Satelliten | 03 08 09 10 24 27 30 | 04 06 26 32 | 01 02 05 07 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 25 28 29 31 | 01 02 03 04 05 07 08 09 10 11 13 14 15 17 18 19 20 21 22 23 24 |

Für die Berechnung der Allan Varianzen bzw. Abweichungen in einem Intervall von 1 bis 1000 Sekunden wurden die präzisen Uhrkorrekturen im Intervall von 30 Sekunden vom ESOC AC der Woche

1577 verwendet. Die verschiedenen Referenzuhren an den einzelnen Tagen können unberücksichtigt bleiben, da nur die Differenzen der Uhrkorrekturen in die Berechnung der Allan Varianzen einfließen und das Intervall deutlich unter einem Tag ist. Um auch die Stabilität der Uhren für die Zeitintervalle 1 bis 30 Sekunden untersuchen zu können, wurde eine Phaseninterpolation durchgeführt. Die einzelnen Satellitenuhren konnten dadurch auf ein Intervall von einer Sekunde verdichtet werden. Das verwendete Interpolationsverfahren wird im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

Abb. 6.3 stellt die aus den Varianzen berechneten Abweichungen entsprechend Tab. 6.1 graphisch dar. Einzelne Satelliten der vier verschiedenen Diagramme sind farbig hervorgehoben. Ebenso sind die typischen Intervalle der Uhrkorrekturen von 30 Sekunden und 5 Minuten gekennzeichnet.

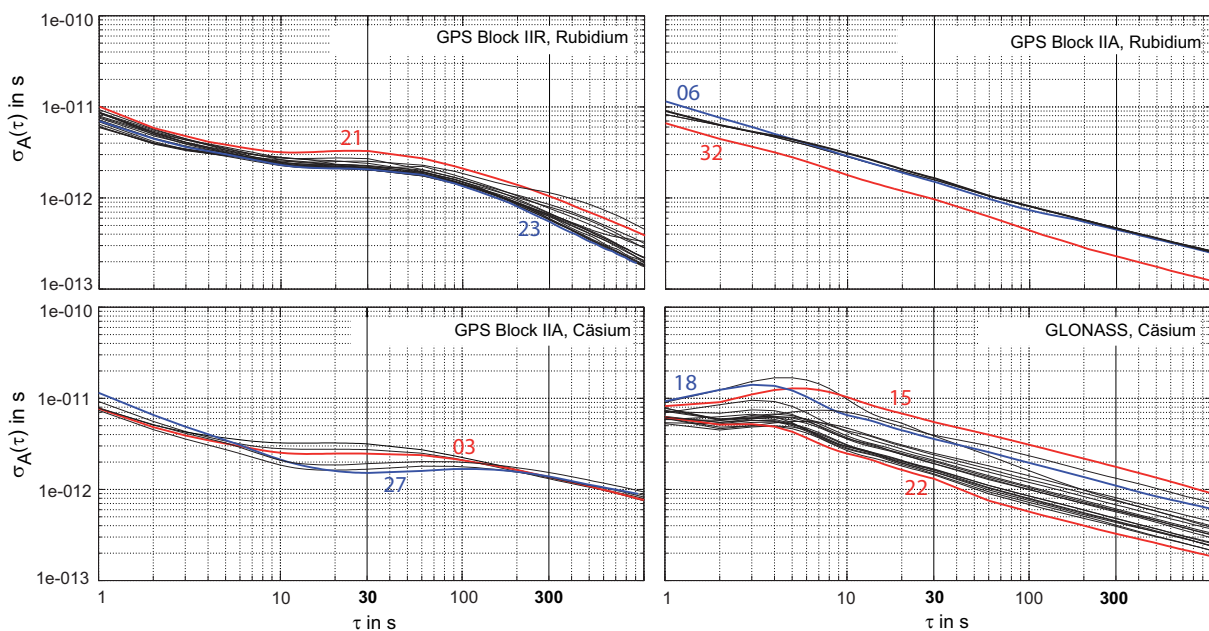


Abb. 6.3: Allan Abweichungen der GNSS-Satellitenuhren (GPS-Woche 1577) in einem Zeitintervall τ von 1 bis 1000 Sekunden

Der Verlauf der Allan Abweichung ist für fast alle Frequenzstandards der Satellitenuhren abfallend, d. h. mit einem größer werdenden Zeitintervall werden die Uhren stabiler. Verglichen mit Abb. 6.2 lässt sich den Uhren überwiegend weißes Rauschen der Frequenz zuordnen und das Rauschverhalten von Atomuhren wird bestätigt. Dennoch zeigen die vier Diagramme Unterschiede im Verlauf der Allan Abweichungen. Die Allan Abweichungen der Rubidiumuhren des Blocks IIA haben einen nahezu stetig abfallenden Verlauf. Im Gegensatz dazu sind die Allan Abweichungen der Cäsiumuhren und der Rubidiumuhren des Blocks IIR nach 10 Sekunden konstant oder nur noch leicht abfallend. Laut Abb. 6.2 ist dies ein typisches Merkmal für Funkelrauschen der Frequenz. Erst nach ca. 60 Sekunden wird die Allan Abweichung wieder abfallend. Um zu verifizieren, ob in diesem Bereich ein Funkelrauschen vorliegt, wären umfangreichere Untersuchungen bei einer größeren Stichprobe erforderlich. Die Atomuhren der GLONASS-Satelliten zeigen in den ersten 5 Sekunden einen konstanten bzw. sogar leicht ansteigenden Verlauf in der Allan Abweichung. Danach wird diese mit zunehmender Zeit stetig kleiner.

Da die Uhrkorrekturen des IGS oder der ACs hauptsächlich in einem Intervall von 30 Sekunden bzw. 5 Minuten vorliegen, sollten diese Zeitbereiche nochmals näher betrachtet werden. Die Rubidiumuhren des Blocks IIR und die Cäsiumuhren des Blocks IIA zeigen bei einem Zeitintervall von 30 Sekunden

eine ähnliche Stabilität. Die Rubidiumuhren des Blocks IIA, insbesondere des Satelliten 32, haben eine deutlich geringere Allan Abweichung bei diesem Zeitintervall. Bei einem Intervall von 5 Minuten sind die Allan Abweichungen der Rubidiumuhren, insbesondere die des Blocks IIA, am geringsten. Bei den Uhren des Blocks IIR ist allerdings eine relative große Streuung zu erkennen. Die Cäsiumfrequenzstandards haben bei diesem Intervall die schlechtesten Stabilitäten der GPS-Uhren. Die Stabilitäten der Atomuhren des GLONASS-Systems zeigen über den gesamten Zeitbereich eine sehr große Streuung. Ursache dafür könnte das Alter dieser Satelliten sein. Die neueren, z. B. Satellit 22, haben eine deutlich geringere Allan Abweichung als die älteren, z. B. Satellit 15.

Hauschild (2010) bestimmte die modifizierte Allan Abweichung der Frequenzstandards der GPS-Satelliten für ein Zeitintervall von 5 bis 9000 Sekunden. Für diese Untersuchung wurden die Uhrinformationen des CODE AC vom Mai 2009 verwendet. Die Rubidiumuhren des Blocks IIA zeigten ebenso in einem Bereich von einigen 10 bis einigen 100 Sekunden die besten Stabilitäten, insbesondere die der Satelliten 25 und 32. Die Cäsiumuhren dieses Blocks haben, ähnlich den Untersuchungen dieser Arbeit, ab einem Zeitintervall von ca. 100 Sekunden im Vergleich zu allen anderen die geringsten Stabilitäten. Bis zu einem Zeitintervall von etwa 100 Sekunden haben die Rubidiumuhren des neueren Blocks IIR die gleiche Stabilität wie die Cäsiumuhren. Nach diesem Intervall werden diese zunehmend stabiler und haben ab einem Bereich von 2000 Sekunden die geringsten Allan Abweichungen. Die Ergebnisse von Hauschild (2010) bestätigen daher das in dieser Arbeit ermittelte Uhrverhalten der GPS-Satelliten in dem verwendeten Kurzzeitbereich von 1 bis 1000 Sekunden. Zusätzlich wurde demonstriert, dass die Rubidiumuhren im Bereich eines Tages nahezu um eine Größenordnung stabiler sind. Dies wurde auch von Senior u. a. (2008) verifiziert.

Welchen Einfluss die verschiedenen Allan Abweichungen bei den erwähnten Zeitintervallen auf die Interpolation der Satellitenuhr haben, soll der nächste Abschnitt zeigen.

6.3 Interpolation der Satellitenuhrkorrekturen

Besonders bei kinematischen Datensätzen ist das Beobachtungsintervall mit oftmals einer Sekunde deutlich kleiner als das übliche Intervall der Satellitenuhrkorrekturen von 30 Sekunden oder teilweise sogar 5 Minuten. Auch die 30-sekündigen Satellitenuhrkorrekturen des IGS bzw. der ACs sind erst nach einer Verzögerung von ca. 14 Tagen erhältlich. Eine Interpolation zwischen den 30-sekündigen bzw. 5-minütigen Stützpunkten ist daher oftmals unumgänglich.

6.3.1 Interpolationsverfahren

Mathematische Interpolation

Eine Möglichkeit der mathematischen Verdichtung von Datensätzen ist die lineare Interpolation. Sie ist sehr schnell durchführbar und wird in der Regel zur Ermittlung der Uhrkorrektur für einen entsprechenden Beobachtungszeitpunkt eingesetzt. Die einzelnen Stützpunkte der Uhrkorrektur u_n zum Zeitpunkt t_n werden miteinander verbunden und zum Zeitpunkt t kann die jeweilige Uhrkorrektur $u_I(t)$ berechnet

werden. Es gilt folgende Formel (Bartsch 2001):

$$u_l(t) = u_n + \frac{u_{n+1} - u_n}{t_{n+1} - t_n} (t - t_n). \quad (6.7)$$

Ebenso kann als mathematische Verdichtung die quadratische oder kubische Interpolation angewandt werden. Allerdings berücksichtigt keiner dieser Interpolationsansätze die vorhandenen Instabilitäten der Satellitenuhren.

Trägerphaseninterpolation

Ein weiterer Verdichtungsansatz ist die Trägerphaseninterpolation. Dafür werden die Beobachtungsdaten von zusätzlichen koordinatenmäßig bekannten Stationen im Intervall von 30 Sekunden oder höher genutzt. Liegen keine Uhrinformationen im erforderlichen Intervall vor, wird diese Verdichtungsmethode am Geodätischen Institut der TU Dresden verwendet (Heßelbarth und Wanninger 2008).

Für die Trägerphaseninterpolation müssen zunächst die Phasenresiduen der bekannten Stationen berechnet werden. Im Gegensatz zu der im Kap. 3.6.2 beschriebenen Ausgleichung werden die Koordinaten nicht als Unbekannte behandelt. Geschätzt werden nur die Mehrdeutigkeiten und die Troposphärenrestabweichungen.

Für diese Trägerphaseninterpolation wurden zunächst die Phasenresiduen der europäischen IGS-Stationen WARN (Warnemünde, Deutschland), HERT (Hailsham, England), VIS0 (Visby, Schweden), ORID (Ohrid, Mazedonien) und MARS (Marseille, Frankreich) berechnet (Abb. 6.4). Die IGS05-Sollkoordinaten sind



Abb. 6.4: Highrate GPS- und GLONASS IGS-Stationen

dem EPN-Referenznetz entnommen. Alle Stationen zeichnen GPS- und GLONASS-Beobachtungen mit einer Taktrate von einer Sekunde auf. Das Intervall der Satellitenuhr dagegen beträgt 5 Minuten, d. h. die Satellitenuhrkorrektur für den jeweiligen Beobachtungszeitpunkt wurde durch die mathematische Interpolation bestimmt.

In Abb. 6.5 sind für die fünf IGS-Stationen die Phasenresiduen der GPS-Satelliten G3 (Cäsiumuhr, Block

IIA) und G6 (Rubidiumuhr, Block IIA) sowie des GLONASS-Satelliten R18 (Cäsiumuhr) für einen Zeitraum von 30 Minuten dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Residuen dieser Satelliten einen

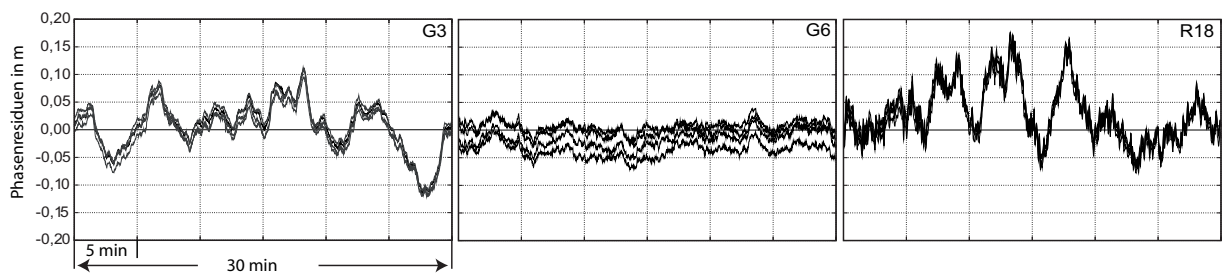


Abb. 6.5: Phasenresiduen für die Satelliten G3, G6 und R18 der verschiedenen Stationen

sehr ähnlichen Verlauf haben. Es ist nicht anzunehmen, dass Troposphären- oder Mehrwegeinflüsse bei diesen Stationen nahezu identisch wirken, sondern vielmehr gehen die Schwankungen zwischen den Stützpunkten auf die Interpolationsabweichungen der Satellitenuhrkorrekturen zurück. Eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Allan Abweichung und dem Rauschverhalten der Residuen ist erkennbar. Der Rubidiumfrequenzstandard des GPS-Satelliten G6 hat bei einem Zeitintervall von 5 Minuten eine deutlich höhere Stabilität als die beiden anderen (vgl. Abb. 6.3) und demzufolge ein deutlich geringeres Rauschen. Dagegen sind die Phasenresiduen an den 5-minütigen Stützpunkten selbst bei allen Satelliten deutlich kleiner.

Aus den jeweiligen Residuen eines Beobachtungszeitpunktes und eines Satelliten wurden aufgrund dieser Ähnlichkeiten die Mittelwerte aller Stationen gebildet. Am Ende lagen so die Beobachtungsresiduen der Phasenmessungen eines Tages für alle Satelliten in einem Intervall von einer Sekunde vor, so dass im nächsten Schritt die eigentliche Phaseninterpolation durchgeführt wurde (Abb. 6.6).

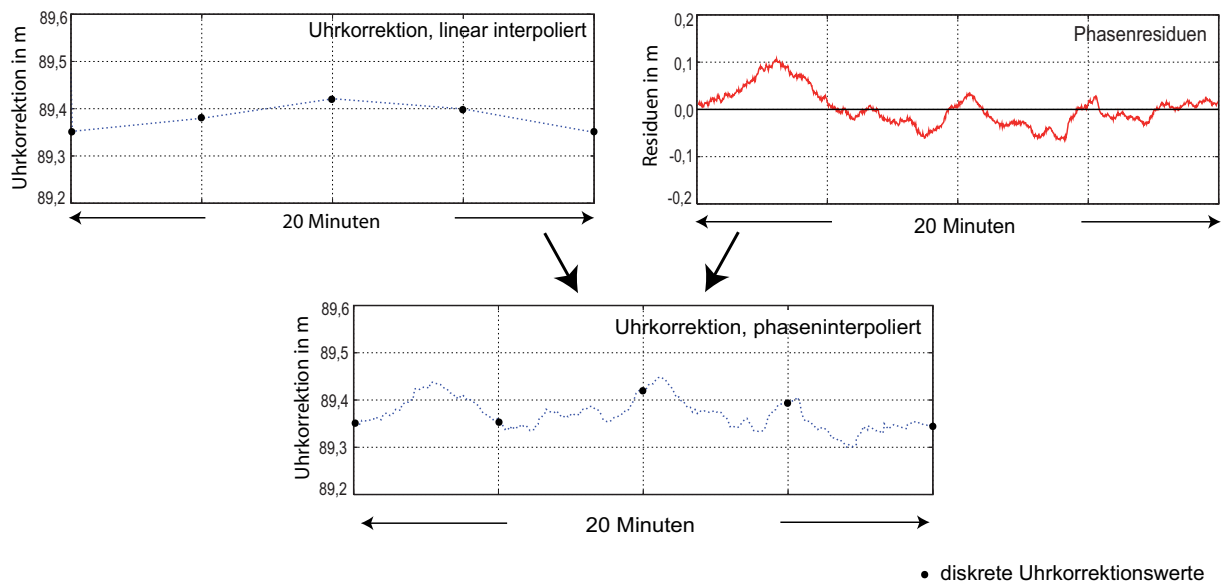


Abb. 6.6: Prinzip der Trägerphaseninterpolation

Die Uhrkorrekturen mit einem Ausgangsintervall von z. B. 5 Minuten werden durch eine lineare Interpolation auf das jeweilige Intervall verdichtet. Im zweiten Schritt werden diese mit den vorab berechneten

Phasenresiduen verbessert, ohne dabei die Stützpunkte zu verändern. Formelmäßig lässt sich die Phaseninterpolation wie folgt beschreiben:

$$u_p(t) = u_l(t) + v(t). \quad (6.8)$$

Die Uhrkorrektur $u_l(t)$ der linearen Interpolation bestimmt sich aus Gl. 6.7. Die Addition der Residuen $v(t)$ ergibt die Uhrkorrektur resultierend aus der Phaseninterpolation $u_p(t)$ zur Zeit t .

Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass immer nur die Uhren der Satelliten phaseninterpoliert werden, die von den jeweiligen Stationen sichtbar sind. Je größer dieses Gebiet ist, desto vollständiger sind die verdichteten Satellitenuhren. Die Station oder Stationen, die später diese interpolierten Uhrdaten verwenden, sollten nach Möglichkeit innerhalb dieses Netzes liegen.

Efficient highrate clock interpolation (EHRI)

Das CODE AC stellt derzeit als einziges AC sogenannte *highrate*-GPS-Uhrkorrekturen in einem Intervall von 5 Sekunden zur Verfügung. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Verfahren werden hierbei weltweite 120 IGS 1-Hz Stationen verwendet. Auch hier ist entscheidend, dass das Intervall der Beobachtung kleiner oder gleich dem späteren Intervall der Uhrkorrektur ist.

Bei dem EHRI-Algorithmus werden die vorhandenen 5-minütigen Uhrkorrekturen auf ein Intervall von 30 bzw. 5 Sekunden verdichtet. Dafür werden Informationen zu Satellitenorbits, Erdrotationsparameter, Stationskoordinaten sowie Troposphärenparameter benötigt. Diese werden durch relative GNSS-Auswertungen des IGS-Stationsnetzes, basierend auf Phasendifferenzen, ermittelt. Die Parameterschätzung für die Uhrkorrekturen erfolgt über die Methode der kleinsten Quadrate.

Die Verdichtung der Uhrkorrekturen unterteilt sich in mehrere Schritte. Mit Codemessungen werden die Satellitenuhren synchronisiert. Die Korrekturen für Empfänger und Satelliten werden anschließend epochenweise durch Codebeobachtungen geschätzt. Die Hauptmessgrößen zur Bestimmung dieser präzisen Produkte sind die Phasendaten. Aus den Uhrkorrekturen, resultierend aus der Analyse der Codebeobachtungen, werden Differenzen von Epoche zu Epoche gebildet. Diese Uhrdifferenzen werden als a priori Werte für die Prozessierung mit Phasendaten eingesetzt. Dadurch werden auch nur die Korrekturen zu diesen Differenzen berechnet. Im letzten Schritt müssen diese Uhrdifferenzen in absolute Uhrkorrekturen umgewandelt werden. Dafür sind konkrete Uhrinformationen, also z. B. die der 5-minütigen Lösung, notwendig. Um das Endergebnis, die *highrate*-Satellitenuhrkorrekturen, zu erhalten, werden die 5-minütigen Uhrinformationen mit den ermittelten Differenzen interpoliert (Bock u. a. 2009).

6.3.2 Interpolationsabweichungen der Satellitenuhrkorrekturen

Um die Interpolationsabweichung der Satellitenuhrendaten zu bestimmen, wurden zwei Korrekturendatensätze miteinander verglichen. Der Referenzdatensatz beinhaltet die Uhrkorrekturen, die durch Phaseninterpolation verdichtet wurden. Die zu vergleichenden Uhrkorrekturen sind durch die lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten ermittelt worden. Mit der Annahme, dass die Interpolationsabweichung in der Mitte zweier Stützpunkte im Intervall von 30 Sekunden oder 5 Minuten am größten

ist, wurde jeweils für diesen Zeitpunkt t_M die Abweichung zwischen der Referenzuhrkorrektur $u_p(t_M)_i$ und der linear interpolierten Uhrkorrektur $u_l(t_M)_i$ berechnet. Aus den einzelnen n Differenzen wurde anschließend für jeden Satelliten die empirische Standardabweichung der mittleren Interpolationsabweichung s_{IP_M} berechnet:

$$s_{IP_M} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_p(t_M)_i - u_l(t_M)_i)^2}{n}}. \quad (6.9)$$

Abb. 6.7 zeigt diese Standardabweichung der linear interpolierten Uhrkorrekturen für die GPS- und GLONASS-Satelliten bei den Intervallen von 30 Sekunden und 5 Minuten.

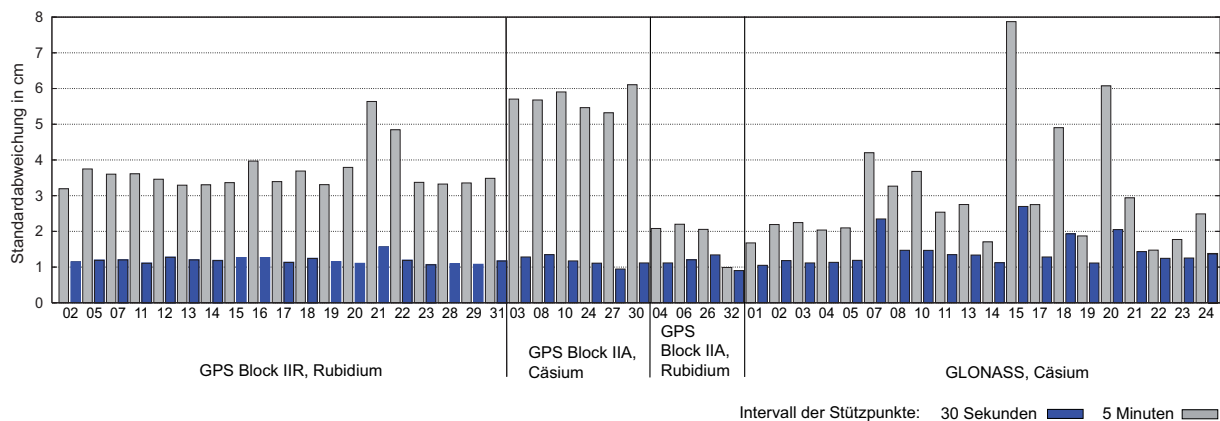


Abb. 6.7: Standardabweichung der Interpolationsabweichung für die linear interpolierten Uhrkorrekturen in der Mitte zweier Stützpunkte bei Intervallen von 30 Sekunden und 5 Minuten, 04/2010

Bei allen Satelliten ist erkennbar, dass die Interpolationsabweichung hauptsächlich vom Intervall der Stützpunkte abhängt. Die 5-minütigen Uhrkorrekturen verursachen bei linearer Interpolation deutlich größere Standardabweichungen als die 30-sekündigen Uhrkorrekturen. Ein anderer Zusammenhang besteht zwischen der Interpolationsabweichung und der Stabilität des verwendeten Frequenzstandards der Satellitenuhr. Die Rubidiumuhren des GPS-Blocks IIA sowie der neueren GLONASS-Satelliten (1, 2, 3, 4, 5, 22, 23 und 24) haben bei einem Intervall von 5 Minuten eine deutlich geringere Standardabweichung. Die Uhren dieser Satelliten zeigen bei diesem Zeitintervall in Abb. 6.3 auch deutlich geringere Allan Abweichungen. Im Gegensatz dazu haben die Cäsiumuhren der GPS-Satelliten sowie die Uhren der älteren GLONASS-Satelliten deutlich höhere Abweichungen. Die Interpolationsabweichung dieser Satelliten ist dementsprechend größer.

Die Abhängigkeit zwischen den verwendeten Frequenzstandards des Satelliten und der Interpolationsabweichung wird bei der Verwendung von Uhrkorrekturen in einem Intervall von 30 Sekunden deutlich geringer. Lediglich bei GLONASS zeigen sich größere Differenzen zwischen den berechneten Standardabweichungen.

Neben der beschriebenen linearen Interpolation wurden weitere mathematische Verdichtungsansätze für GNSS-Satellitenuhrkorrekturen untersucht. Es zeigte sich, dass auch die Polynom- oder kubische Interpolation keine besseren Ergebnisse als die lineare Interpolation liefern. Die Interpolationsabweichungen blieben gleich oder wurden teilweise sogar größer (Kreikenbohm 2008).

6.3.3 Beobachtungsgewichtung für die Interpolation der Satellitenuhren

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, kann in Abhängigkeit der Stabilität der Satellitenuhr und des Intervalls der Stützpunkte die Interpolationsabweichung mehrere Zentimeter betragen. Es ist daher sinnvoll, neben den schon vorhandenen Gewichtungen in Abhängigkeit der Genauigkeit der Beobachtungsgröße und der Elevation (Kap. 4.1) auch eine Gewichtung in Abhängigkeit der Interpolationsabweichung der Satellitenuhr einzuführen. Diese wird dann verwendet, wenn eine mathematische Interpolation der Satellitenuhrkorrektur notwendig wird.

Neben der schon ermittelten Interpolationsabweichung in der Mitte zweier Stützpunkte sind dafür zusätzliche Informationen über den Verlauf dieser Abweichungen in Abhängigkeit eines Zeitabstandes zum nächsten Stützpunkt notwendig.

Zur Bestimmung dieses Verlaufes wurden die Differenzen für die jeweiligen zeitlichen Abstände zum nächsten Stützpunkt Δt zwischen den linear interpolierten $u_l(\Delta t)_i$ und der als Referenz dienenden phaseninterpolierten Uhrkorrekturen $u_p(\Delta t)_i$ innerhalb eines Intervalls (30 Sekunden oder 5 Minuten) berechnet. Aus diesen n Differenzen wurden anschließend die empirischen Standardabweichungen ermittelt.

$$s_{IP_{\Delta t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_p(\Delta t)_i - u_l(\Delta t)_i)^2}{n}} \quad (6.10)$$

Für eine bessere Darstellung wurden die einzelnen Standardabweichungen $s_{IP_{\Delta t}}$ mit dem Wert der mittleren Interpolationsabweichung der jeweiligen Satellitenuhr s_{IP_M} (Gl. 6.9, Abb. 6.7) normiert. Die erhaltenen Funktionswerte $f_{IP_{\Delta t}}$ (schwarze Linien) der Interpolationsabweichung in Abhängigkeit des Zeitintervalls zum nächsten Stützpunkt sind in Abb. 6.8 für alle Satellitenuhren graphisch dargestellt. Aus den einzelnen Standardabweichungen konnte so für gleiche Zeitabstände zum nächsten Stützpunkt ein Mittelwert gebildet werden. Für diese Mittelwerte wurde eine angepasste Funktion (rote Linie) gefunden, die die Interpolationsabweichung zwischen zwei Stützpunkten für 30-Sekunden und 5-Minuten Intervalle beschreibt.

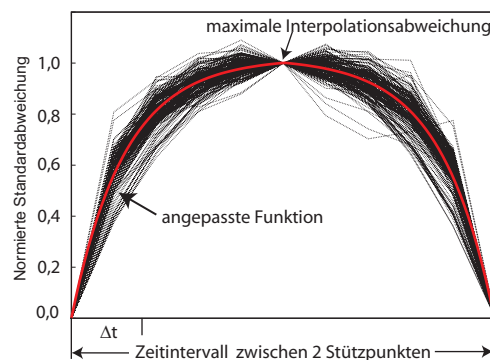


Abb. 6.8: Normierte Standardabweichung der linear interpolierten Uhrkorrektur in Abhängigkeit des Abstandes zum nächsten Stützpunkt

Mathematisch kann diese Funktion wie folgt wiedergegeben werden:

$$\tilde{f}_{IP_{\Delta t}} = 1 - e^{-8 \cdot \frac{\Delta t}{\tau}}. \quad (6.11)$$

Die Funktion $\tilde{f}_{IP_{\Delta t}}$ berechnet sich aus dem zeitlichen Abstand in Sekunden zum nächsten Stützpunkt Δt

und dem Intervall der Satellitenuhrkorrektion τ . Die Funktionswerte werden mit den Standardabweichungen der mittleren Interpolationsabweichung s_{IP_M} der jeweiligen Satellitenuhr (Abb. 6.7) multipliziert. Daraus folgt die jeweilige Varianz $s_{IP}(t)^2$ zum Zeitpunkt t :

$$s_{IP}(t)^2 = (\tilde{f}_{IP_M} \cdot s_{IP_M})^2. \quad (6.12)$$

Die entsprechende Gewichtung, als Kehrwert der Varianz, wird verwendet, wenn das Beobachtungsintervall kleiner ist als das der Uhrkorrektion. Je weiter der Zeitpunkt der Beobachtung sich vom Stützpunkt der Uhrkorrektion entfernt, desto geringer wird die Gewichtung in der Ausgleichung.

6.4 Auswirkung der Satellitenuhrinterpolation auf die Positionsbestimmung

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass die Interpolationsabweichung in Abhängigkeit von der Satellitenuhr mit größer werdendem Stützpunktstand deutlich zunimmt und daher die Beobachtungsgrößen auch in Abhängigkeit von der Satellitenuhrkorrektion gewichtet werden müssen.

Im Folgenden werden die Genauigkeit der Positionsbestimmung sowie das Konvergenzverhalten von statischen und kinematischen GPS- und GLONASS-PPP-Auswertungen bei der Verwendung von Satellitenuhrkorrekturen mit einem Intervall von 1, 30 und 300 Sekunden analysiert. Dabei wird bei den Uhrkorrekturen, die eine Interpolation erfordern, zwischen der bisher genutzten Gewichtung (Kap. 4.1) und der zusätzlichen Gewichtung aus Kap. 6.3.3 differenziert.

Für die Auswertung wurden verschiedene IGS- bzw. EUREF-Referenzstationen der GPS-Woche 1577 verwendet. Im Einzelnen sind dies SASS (Sassnitz, Deutschland), WTZR (Wetzlar, Deutschland), HELG (Helgoland, Deutschland), JOZ2 (Jozefoslaw, Polen), LAMA (Olsztyn, Polen), WROC (Wroclaw, Polen), IENG (Turin, Italien), MATE (Matera, Italien) und DUBR (Dubrovnik, Kroatien) (Abb 6.9).

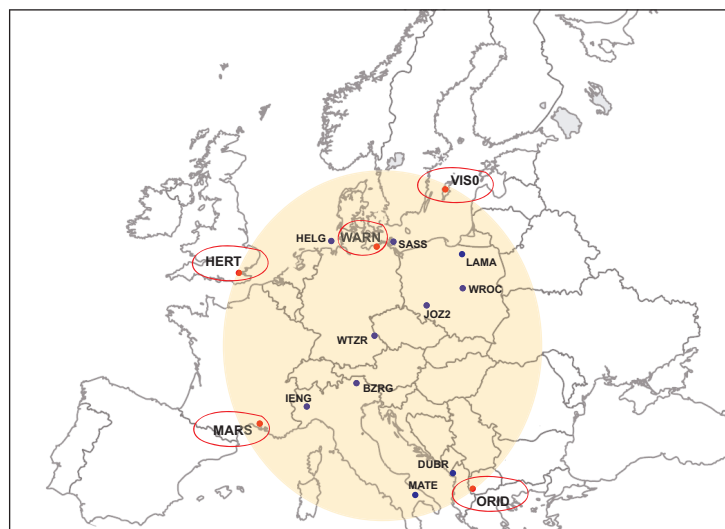


Abb. 6.9: Highrate GPS- und GLONASS IGS-Stationen

Ausschlaggebend für die Auswahl dieser Stationen war, dass diese eine Aufzeichnungsrate von einer Sekunde haben, GPS- und GLONASS-Signale empfangen und innerhalb des Netzes der Stationen liegen, deren Phasenresiduen zur Verdichtung der Uhrkorrekturen genutzt wurden. Da keine Satellitenuhrkorrekturen im Intervall von einer Sekunde zur Verfügung standen, mussten die selbst produzierten Korrekturen (Kap. 6.3.1) verwendet werden. Die Elevationsmaske wurde auf 10° gesetzt.

6.4.1 Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Satellitenuhrkorrektion

Die Beobachtungsepochen der IGS-Referenzstationen von 24 Stunden wurden in mehrere 4 Stundenblöcke unterteilt, nach dem Prinzip der PPP-Prozessierung unter Verwendung verschiedener Uhrkorrektionsdateien ausgewertet und anschließend mit den gegebenen IGS05-Sollkoordinaten des EPN-Netzes verglichen.

Statische Auswertung

Bei der statischen Auswertung wurden die jeweiligen Ergebnisse der 4-stündigen Beobachtungsblöcke den Sollkoordinaten gegenübergestellt. Aus den einzelnen Abweichungen der verschiedenen Stationen und Beobachtungszeiträume sind anschließend die empirischen Standardabweichungen (Gl. 5.1) in den Komponenten Nord s_{0N} , Ost s_{0E} und Höhe s_{0H} berechnet worden. In Tab 6.2 sind diese Werte für die verschiedenen Uhrintervalle und Einflussfaktoren für die Gewichtungen dargestellt.

Tab. 6.2: Empirische Standardabweichungen in Nord, Ost, Höhe einer statischen GPS- und GLONASS-Auswertung (4 Stunden) bei verschiedenen Satellitenuhrkorrektionsintervallen und Gewichtungen

| Uhrintervall in s | Faktoren für Gewichtungen | s_{0N} in cm | s_{0E} in cm | s_{0H} in cm |
|-------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | Elevation, Beobachtung | 0,4 | 0,9 | 1,2 |
| 30 | Elevation, Beobachtung, Interpolation | 0,4 | 1,0 | 1,2 |
| 30 | Elevation, Beobachtung | 0,4 | 1,0 | 1,3 |
| 300 | Elevation, Beobachtung, Interpolation | 0,5 | 1,3 | 1,6 |
| 300 | Elevation, Beobachtung | 0,6 | 1,2 | 2,3 |

Bei einem Intervall der Uhrinformationen von 1 oder 30 Sekunden wird ein hohes Genauigkeitsniveau in der Lage und Höhe erreicht. Die typischen Merkmale einer *float*-Lösung werden abermals bestätigt. Die Unterschiede in der Genauigkeit zwischen den Prozessierungen, die auf einem Uhrintervall von 1 oder 30 Sekunden basieren, sind mit nur einem Millimeter kaum erwähnenswert. Demzufolge ist bei einer statischen Auswertung von *highrate*-Beobachtungen bei langen Beobachtungsepochen ein 30-sekündiges Intervall der Satellitenuhrdaten ausreichend. Eine Gewichtung, die die Instabilität der Satellitenuhr berücksichtigt, ist nicht zwingend erforderlich.

Bei der Verwendung von 5-minütigen Uhrkorrekturen werden die Standardabweichungen in der Lage und Höhe um einige Millimeter größer. Wird die Gewichtung aufgrund der Interpolationsabweichung der Uhrkorrekturen nicht berücksichtigt, erhöht sich deutlich die Standardabweichung in der Höhenkomponente. Stehen nur 5-minütige Uhrdaten zur Verfügung, sollte daher eine entsprechende Gewichtung verwendet werden.

Kinematische Auswertung

Aus den empirischen Standardabweichungen, die sich aus den Berechnungen der jeweiligen 4-stündigen Beobachtungsböcke ergeben, wurden die mittleren Standardabweichungen (Gl. 4.4) für die verschiedenen Uhrkorrekturen und Gewichtungen der kinematischen Auswertungen berechnet. Die jeweiligen Werte sind in Tab. 6.3 aufgelistet.

Tab. 6.3: Mittlere empirische Standardabweichungen in Nord, Ost, Höhe einer kinematischen GPS- und GLONASS-Auswertung (4 Stunden) bei verschiedenen Satellitenuhrkorrektionsintervallen

| Uhrintervall in s | Faktoren für Gewichtungen | $\bar{\sigma}_N$ in cm | $\bar{\sigma}_E$ in cm | $\bar{\sigma}_H$ in cm |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | Elevation, Beobachtung, | 1,2 | 1,6 | 2,8 |
| 30 | Elevation, Beobachtung, Interpolation | 1,3 | 1,6 | 2,8 |
| 30 | Elevation, Beobachtung | 1,3 | 1,6 | 3,0 |
| 300 | Elevation, Beobachtung, Interpolation | 3,4 | 3,2 | 6,5 |
| 300 | Elevation, Beobachtung | 4,0 | 3,9 | 7,7 |

Auch bei der kinematischen Auswertung werden bei einem Intervall der Uhrkorrektur von 1 oder 30 Sekunden mit Standardabweichungen von wenigen Zentimetern hohe Genauigkeiten erzielt. Die Unterschiede zwischen diesen einzelnen Lösungen sind sehr gering.

Im Gegensatz zur statischen Auswertung zeigen die Ergebnisse, die eine Korrektur in einem Intervall von 300 Sekunden verwenden, mehr als eine doppelt so große Standardabweichung wie die bisher betrachteten Auswertungen. Die vollständige Gewichtungsfunktion bringt zwar einen Genauigkeitsgewinn, trotzdem sollten besonders bei einer kinematischen Auswertung von *highrate*-Beobachtungsdaten die Uhrkorrekturen mindestens ein Intervall von 30 Sekunden vorweisen.

Die Standardabweichungen der kinematischen PPP-Auswertung (Tab. 6.3) beweisen, dass sich die Interpolationsabweichungen negativ auf die Qualität der Positionsbestimmungen auswirken. Ursache dafür ist, dass die Koordinatenunbekannten bei der kinematischen Auswertung zu jeder Epoche neu berechnet und nicht wie bei der statischen Ausgleichung aufaddiert werden. Die Interpolationsabweichungen beeinflussen so zu jeder Epoche die unbekannte Koordinatenkomponente und dies besonders in der Höhe. In Abb. 6.10 sind zur Verdeutlichung dieser Problematik die Abweichungen zu den Sollkoordinaten in Nord, Ost und Höhe bei den verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen graphisch dargestellt.

Bei einem Stützpunktstand der Uhrkorrekturen von 5 Minuten können besonders in der Höhe Differenzen von bis zu einem Dezimeter auftreten. Im Vergleich dazu betragen die Abweichungen, die auf Uhrkorrekturen im Intervall von 1 und 30 Sekunden beruhen, nur wenige Zentimeter. An den 5-Minuten Stützpunkten selbst ist keine Interpolation der Satellitenuhrkorrektur notwendig und die Lösungen haben ein ähnliches Genauigkeitsniveau. Vor allem in der Höhenkomponente zeigt sich die Verbesserung in den Abweichungen zu den Sollkoordinaten, wenn *highrate*-Uhrkorrekturen (1 Sekunde) genutzt werden.

Auch Mirault u. a. (2008) produzierten unter Verwendung verschiedener Uhr- und Orbitprodukte PPP-Lösungen im statischen und kinematischen Modus. Dafür wurden die 24-stündigen GPS-Beobachtungen von zwölf global verteilten IGS-Stationen verwendet. Die Beobachtungstage waren über den Zeitraum von Dezember 2007 bis Mai 2008 verteilt. Bei dieser Untersuchung hatte das Intervall der Uhrkorrektio-

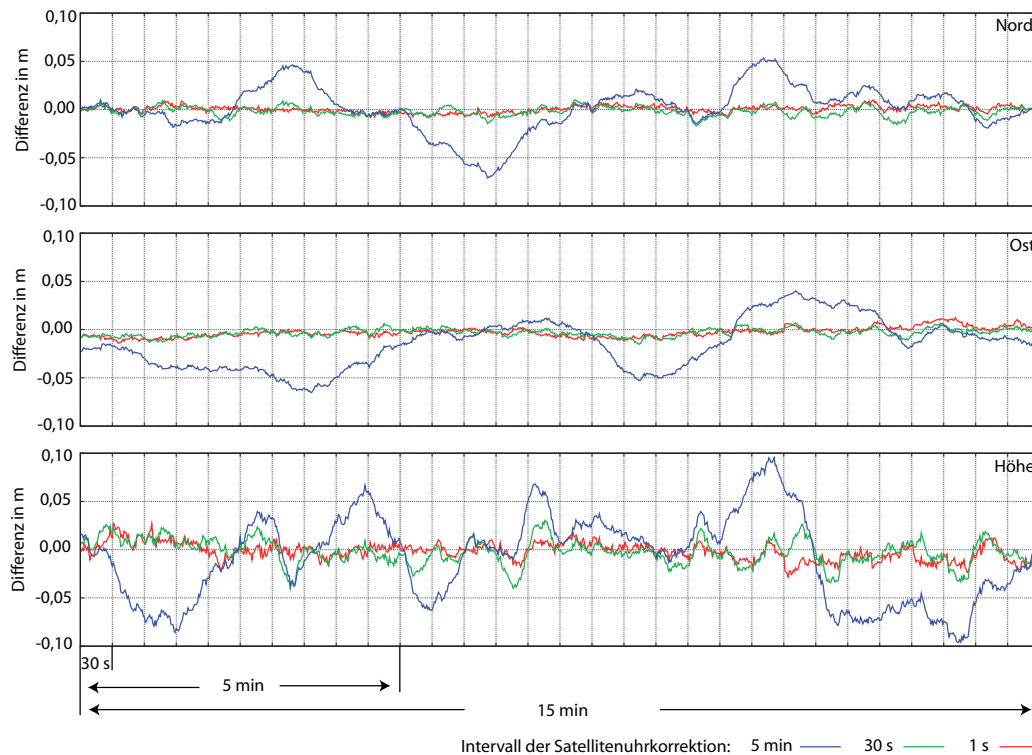


Abb. 6.10: Abweichungen in Nord, Ost und Höhe bei verschiedenen Intervallen der Satellitenuhrkorrekturen

nen nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit einer statischen PPP-Auswertung. Mit RMS-Werten von 0,6 cm bzw. 0,7 cm in der Lage und 1,0 cm bzw. 1,1 cm in der Höhe ist der Genauigkeitsunterschied zwischen den Ergebnissen, die Uhrkorrekturen im Intervall von 30 Sekunden bzw. 5 Minuten verwenden, nur gering. Bei der kinematischen Auswertung betragen die RMS-Werte der Lösungen, die 30-sekündige Uhrkorrekturen nutzen, in Lage und Höhe 2,2 cm und 4,0 cm. Hingegen sind die RMS-Werte der Ergebnisse, die 5-minütige Uhrkorrekturen verarbeiten, mit 6,8 cm und 9,5 cm um den Faktor zwei bis drei größer. Um diese Unterschiede zwischen den kinematischen PPP-Ergebnissen zu bestätigen, wurden zusätzliche *highrate*-Beobachtungen mit verschiedenen Uhrinformationen prozessiert. Die erreichten RMS-Werte in Nord, Ost und Höhe mit 1,4 cm, 2,9 cm und 3,3 cm für IGS-Uhren im Intervall von 30 Sekunden und 4,2 cm, 5,3 cm und 11,0 cm für IGS-Uhren im Intervall von 5 Minuten zeigen die deutliche Abhängigkeit zwischen dem Intervall der Uhrkorrektur und der Genauigkeit der kinematischen PPP-Prozessierungen.

Bock u. a. (2009) demonstrierten Verbesserungen im Millimeterbereich bei der Verwendung von Uhrkorrekturen in einem Intervall von 5 oder 2 Sekunden gegenüber den Intervallen von 30 Sekunden.

6.4.2 Konvergenzverhalten

In diesem Abschnitt wird analysiert, welchen Einfluss die Intervalle der Uhrkorrekturen auf die statische und kinematische Auswertung von *highrate*-Beobachtungen auf die Positionsbestimmung bei Epochen von weniger als einer Stunde haben. Die IGS- und EUREF-Stationen mit entsprechenden Sollkoordinaten, der Beobachtungszeitraum, die Elevation und die verwendeten Satellitenuhrkorrekturen entsprechen

denen von Kap. 6.4.1. Wie in Kap. 5.4 beschrieben, wurden für die statische Auswertung die empirischen und für die kinematische Auswertung die mittleren empirischen Standardabweichungen für jeden Beobachtungsblock (5, 10, 15 Minuten usw.) bestimmt. Für die Auswertung wurden die Uhrkorrekturen mit 1-, 30- und 300-Sekunden Intervallen verwendet. Bei einem Stützpunktabstand von 30 und 300 Sekunden wurde mit und ohne Gewichtung der Interpolationsabweichung gearbeitet.

Statische Auswertung

In Abb. 6.11 sind die empirischen Standardabweichungen in Abhängigkeit des Beobachtungszeitraums für die verschiedenen Auswertungen in Nord, Ost und Höhe dargestellt.

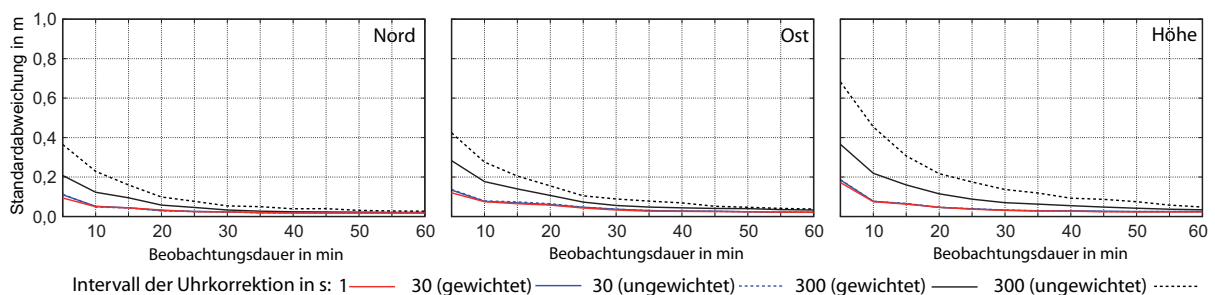


Abb. 6.11: Konvergenzverhalten einer statischen PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen mit und ohne Gewichtung der Interpolationsabweichung

Besonders zu Beginn der Auswertung, wenn die Anzahl der Unbekannten recht hoch und die Anzahl der Beobachtungen niedrig sind, zeigen die Standardabweichungen der Lösungen, die ein 1- oder 30-sekündiges Intervall der Uhrkorrektur verwenden, eine deutlich höhere Genauigkeit. Nach 20 Minuten werden Genauigkeiten von weniger als einem Dezimeter in Lage und Höhe erreicht. Wird hingegen nur eine Uhrkorrektur im Intervall von 300 Sekunden verarbeitet, erhöhen sich die Standardabweichungen in diesem Bereich nahezu um das Doppelte. Nach 60 Minuten sind alle Prozessierungen in etwa auf einem Niveau von wenigen Zentimetern. So wird bei einer längeren Beobachtungsdauer der Einfluss des Intervalls der Uhrkorrektur wesentlich geringer. Wird bei der Verwendung der Uhrkorrekturen im Intervall von 5 Minuten allerdings eine Gewichtung der Interpolationsabweichung berücksichtigt, verbessert sich die Konvergenzzeit.

Kinematische Auswertung

Die Relationen zwischen den mittleren Standardabweichungen und Beobachtungsepochen von wenigen Minuten bis zu einer Stunde sind in Abb. 6.12 veranschaulicht.

Ähnlich wie bei der statischen Auswertung werden die geringsten Konvergenzzeiten unter Verwendung der Uhrkorrekturintervalle von 1 oder 30 Sekunden erzielt. In den ersten 5 Minuten ist die Lösung basierend auf *highrate*-Uhrkorrekturen sogar noch etwas präziser. Die Ergebnisse auf Grundlage der 5-minütigen Uhrkorrekturen zeigen, besonders in der Höhe, Standardabweichungen, die um den Faktor vier größer sind. Der Einfluss der Uhrkorrektur bei einer kinematischen Auswertung der Beobachtungen ist besonders in den ersten 30 Minuten sehr ausgeprägt. Es wird bei der Verwendung der 5-minütigen

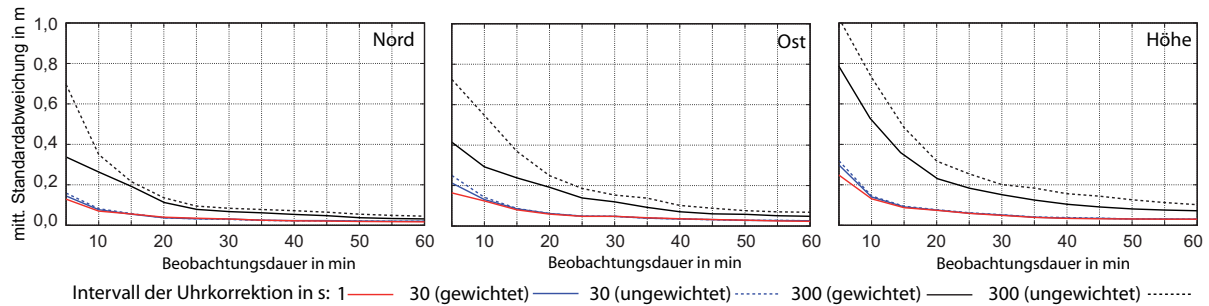


Abb. 6.12: Konvergenzverhalten einer kinematischen PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen mit und ohne Gewichtung der Interpolationsabweichung

Uhrkorrekturen nur Dezimetergenauigkeit erreicht und auch nach 60 Minuten haben die mittleren Standardabweichungen Beträge von mehreren Zentimetern bzw. in der Höhe sogar von einem Dezimeter. Stehen nur diese Uhrinformationen für die Prozessierung zur Verfügung, sollten die Interpolationsabweichungen entsprechend gewichtet werden.

6.4.3 Residuen

Am Ende dieses Kapitels werden nochmals die Phasenresiduen genauer analysiert. Wie schon in Abb. 6.5 dargestellt, sind bei einem 5-Minuten Intervall der Uhrkorrektion starke Schwankungen zwischen den Stützpunkten vorhanden. Dieses Rauschen ist abhängig vom verwendeten Frequenzstandard der Satellitenuhr. In Abb. 6.13 sind die Phasenresiduen der *highrate*-Beobachtungen der Station LAMA am Tag 093/2010 für die GPS-Satelliten G3 und G6 sowie für den GLONASS-Satelliten R18 für einen Zeitraum von 30 Minuten veranschaulicht.

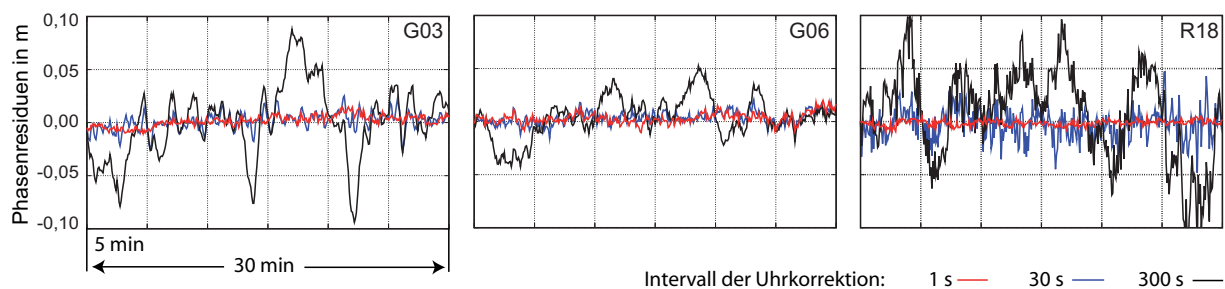


Abb. 6.13: Phasenresiduen einer PPP-Auswertung bei verschiedenen Intervallen der Uhrkorrekturen für drei verschiedene Satelliten, LAMA 093/2010

Je kleiner das Intervall der Uhrkorrektion ist, desto geringer werden die Interpolationsabweichungen und demzufolge auch die Phasenresiduen. Für die beiden GPS-Satelliten sind diese Phasenresiduen bei der Verarbeitung der Uhrkorrekturen mit einem Stützpunkt Abstand von 1 oder 30 Sekunden nahezu identisch. Bei dem GLONASS-Satelliten 18 sind die Residuen, basierend auf der Verwendung des 30-sekündigen Intervalls, deutlich verrauschter als die Residuen des 1-sekündigen Intervalls. Grund dafür ist die höhere Allan Abweichung (vgl. Abb. 6.3) und demzufolge die geringere Stabilität der Atomuhr bei diesem Intervall. An den Stützpunkten haben alle Residuen die geringsten Abweichungen.

Sollen die Phasenresiduen der PPP-Auswertungen weiterverarbeitet werden, z. B. zur Mehrwegeanalyse, müssen Uhrkorrekturen in einem Intervall von 30 Sekunden verwendet werden, da ansonsten die Residuen vom Einfluss der Interpolationsabweichung überlagert werden.

7 Untersuchungen zu verschiedenen Troposphärenmodellen

In diesem Kapitel werden ausführlich die Verfahren zur Laufzeitkorrektur und Schätzung der troposphärischen Refraktion behandelt. Am Anfang werden kurz die Varianten zur Troposphärenmodellierung und die dafür notwendigen Mappingfunktionen (Projektionsfunktionen) beschrieben. Anhand konkreter Stationen erfolgt ein Vergleich dieser Mappingfunktionen. Am Ende werden Auswirkungen der verschiedenen Möglichkeiten zur Troposphärenmodellierung auf die PPP-Positionsbestimmung hinsichtlich Koordinatengenauigkeit und Konvergenzzeit untersucht.

7.1 Troposphärenmodellierung bei PPP

Wie schon in Kap. 3.4.2 dargestellt wurde, lässt sich die gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung $T(E)$ für die jeweilige Elevation E mit folgender Formel berechnen:

$$T(E) = Z_h \cdot m_h(E) + Z_w \cdot m_w(E). \quad (7.1)$$

Die troposphärische Laufzeitverzögerung ergibt sich in Abhängigkeit von der Elevation E aus der Summe der Produkte der Verzögerung im Zenit Z_h und Z_w und der dazugehörigen Mappingfunktion $m_h(E)$ und $m_w(E)$. Die Indizes h und w stehen jeweils für den hydrostatischen und den feuchten Teil der Laufzeitverzögerung (Boehm u. a. 2006b). Ziel der Troposphärenmodellierung ist es, die einzelnen Parameter von Gl. 7.1 zu bestimmen.

Die Verzögerung im Zenit für den trockenen Anteil Z_h kann exakt modelliert werden. Die benötigten Informationen dafür sind der Luftdruck p_0 sowie die Höhe H und Breite φ der Station (Leick 2004). Nach Saastamoinen (1973) ergibt sich folgende Gleichung:

$$Z_h = \frac{0,0022768 \cdot p_0}{1 - 0,0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0,00028H}. \quad (7.2)$$

Der Betrag in Meereshöhe ist je nach geographischer Breite der Station ca. 2,3 m. Dies entspricht ca. 90% der gesamten Verzögerung in Zenitrichtung.

Weitaus schwieriger ist die Bestimmung des restlichen feuchten Anteils der Zenitverzögerung. Saastamoinen (1973) gibt diesen mit:

$$Z_w = 0,002277 \cdot \left(\frac{1255}{T_0} + 0,05 \right) \cdot p_w \quad (7.3)$$

an. Die Temperatur T_0 kann vereinfachend mit 288 K angenommen werden. Problematischer ist es auf-

grund der räumlichen und zeitlichen Variationen, den Partialdampfdruck des Wasserdampfes p_w an der Station festzulegen (Leick 2004).

Die Verzögerungen im Zenit werden mit dem Multiplikationsfaktor, der mit einer Mappingfunktion berechnet wird, auf die jeweilige Elevation umgerechnet. Die derzeit meist genutzte Mappingfunktion, entwickelt von Herring (1992), kann sowohl für den hydrostatischen als auch feuchten Anteil der troposphärischen Verzögerung verwendet werden:

$$m(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \cdot \frac{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}{\sin(E)}. \quad (7.4)$$

Diese Formel ist Grundlage für die Berechnung der Funktionswerte der drei nachfolgenden hydrostatischen und feuchten Mappingfunktionen. Die Bestimmung der Koeffizienten a_h , b_h und c_h für den trockenen Betrag sowie a_w , b_w und c_w für den feuchten Betrag sind bei der Niell Mapping Funktion (NMF), der Globalen Mapping Funktion (GMF) und der Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1) unterschiedlich.

Der Standardansatz für die Troposphärenmodellierung bei PPP ist zunächst die Berechnung des hydrostatischen Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Dies erfolgt über eine Standardmodellierung im Zenit (Gl. 7.2) und das Verwenden einer Mappingfunktion (Gl. 7.4). Anschließend können die Code- und Phasenbeobachtungen korrigiert werden. Die starken Variationen des feuchten Anteils der Troposphäre bleiben so vorerst unberücksichtigt (Kouba 2008).

Der feuchte Anteil sowie die hydrostatische Restabweichung werden im Ausgleichsprozess als Unbekannte eingeführt und anschließend bestimmt. Der Koeffizient der A-Matrix (vgl. Gl. 3.42) ist der Funktionswert der Mappingfunktion des feuchten Anteils in Abhängigkeit von der Elevation. Für eine bessere zeitliche Auflösung kann dieser Troposphärenparameter nach z. B. drei Stunden neu geschätzt werden.

Eine weitere Variante wäre, auf die Einführung einer zusätzlichen Unbekannten zu verzichten. Die gesamte Laufzeitverzögerung für den hydrostatischen und feuchten Anteil ist dann vorab zu berechnen. Die Code- und Phasenbeobachtungen werden anschließend um diesen gesamten Anteil korrigiert. Dies empfiehlt sich jedoch nur dann, wenn beide Anteile der Zenitverzögerungen ausreichend genau bekannt sind oder ermittelt werden können.

7.1.1 Niell Mapping Funktion (NMF)

Die wichtigsten Informationen für die Niell Mapping Funktion werden aus Messwerten von Radiosonden erhalten. Dafür wurden hauptsächlich die Daten amerikanischer und europäischer Stationen aus den Jahren 1987, 1988 und 1992 genutzt. Die Berechnung der NMF ist von tatsächlichen Wetterdaten an der Station unabhängig. Es sind lediglich Informationen zur Breite und Höhe der Station sowie der Tag des Jahres erforderlich. Dies ermöglicht eine leichte Implementierung dieser Mappingfunktion in eigene Programme (Niell 1996).

Der Koeffizient a_h für die hydrostatische Mappingfunktion m_h bestimmt sich nach folgender Gleichung:

$$a_h(\varphi, DOY) = a_{\varnothing}(\varphi) - a_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \frac{DOY - DOY_0}{365,25}\right). \quad (7.5)$$

Für die Koeffizienten b_h und c_h gilt die Gleichung analog. Die Parameter a_{\varnothing} bzw. b_{\varnothing} und c_{\varnothing} sowie a_{amp} bzw. b_{amp} und c_{amp} sind für die Breiten $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ und 75° gegeben (Tab. 7.1). Die Koeffizienten für die erforderliche Stationsbreite können durch eine Interpolation ermittelt werden. DOY kennzeichnet den Tag des Jahres. DOY_0 ist für die nördliche Hemisphäre der 28. Tag und für die südliche Hemisphäre der 211. Tag eines Jahres. Diese Tage definieren die Phasen der Mappingfunktionen (Niell 1996).

Tab. 7.1: Koeffizienten der hydrostatischen Niell Mapping Funktion (Niell 1996)

| | Breite φ in $^\circ$ | | | | |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | \varnothing | | | | |
| a | $1,2769934 \cdot 10^{-3}$ | $1,2683230 \cdot 10^{-3}$ | $1,2465397 \cdot 10^{-3}$ | $1,2196049 \cdot 10^{-3}$ | $1,2045996 \cdot 10^{-3}$ |
| b | $2,9153695 \cdot 10^{-3}$ | $2,9152299 \cdot 10^{-3}$ | $2,9288445 \cdot 10^{-3}$ | $2,9022565 \cdot 10^{-3}$ | $2,9024912 \cdot 10^{-3}$ |
| c | $62,610505 \cdot 10^{-3}$ | $62,837393 \cdot 10^{-3}$ | $63,721774 \cdot 10^{-3}$ | $63,824265 \cdot 10^{-3}$ | $64,258455 \cdot 10^{-3}$ |
| | Amplitude | | | | |
| a | 0,0 | $1,2709626 \cdot 10^{-5}$ | $2,6523662 \cdot 10^{-5}$ | $3,4000452 \cdot 10^{-5}$ | $4,1202191 \cdot 10^{-5}$ |
| b | 0,0 | $2,1414979 \cdot 10^{-5}$ | $3,0160779 \cdot 10^{-5}$ | $7,2562722 \cdot 10^{-5}$ | $11,723375 \cdot 10^{-5}$ |
| c | 0,0 | $9,0128400 \cdot 10^{-5}$ | $4,3497037 \cdot 10^{-5}$ | $84,795348 \cdot 10^{-5}$ | $170,37206 \cdot 10^{-5}$ |

Bei der hydrostatischen Mappingfunktion ist zusätzlich noch die Höhe der jeweiligen Beobachtungsstation zu beachten. Diese Höhenkorrektur $\Delta m_h(E)$ wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta m_h(E) = \left(\frac{1}{\sin(E)} - f(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right) \cdot H [km]. \quad (7.6)$$

Die Struktur der Funktion $f(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht})$ entspricht Gl. 7.4. Deren Parameter werden durch folgende Werte ersetzt:

$$\begin{aligned} a_{ht} &= 2,53 \cdot 10^{-5} \\ b_{ht} &= 5,49 \cdot 10^{-3} \\ c_{ht} &= 1,14 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Der Koeffizient H steht für die Stationshöhe in km.

Für die Berechnung der feuchten NMF sind nur die Parameter a , b und c in Abhängigkeit der Breite (Tab.7.2) zu interpolieren. Die saisonalen Effekte werden bei der feuchten NMF nicht mit berücksichtigt (Niell 1996).

Tab. 7.2: Koeffizienten der feuchten Niell Mapping Funktion (Niell 1996)

| | Breite φ in $^\circ$ | | | | |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
| a | $5,8021897 \cdot 10^{-4}$ | $5,6794847 \cdot 10^{-4}$ | $5,8118019 \cdot 10^{-4}$ | $5,9727542 \cdot 10^{-4}$ | $6,1641693 \cdot 10^{-4}$ |
| b | $1,4275268 \cdot 10^{-3}$ | $1,5138625 \cdot 10^{-3}$ | $1,4572752 \cdot 10^{-3}$ | $1,5007428 \cdot 10^{-3}$ | $1,7599082 \cdot 10^{-3}$ |
| c | $4,3472961 \cdot 10^{-2}$ | $4,6729510 \cdot 10^{-2}$ | $4,3908931 \cdot 10^{-2}$ | $4,4626982 \cdot 10^{-2}$ | $5,4736038 \cdot 10^{-2}$ |

Bei der Anwendung der NMF zeigen sich zwei größere Mängel. Da diese Mappingfunktion hauptsächlich auf den Radiosondendaten der nördlichen Hemisphäre basiert, ergeben sich einerseits auf der Südhalbkugel breitenabhängige Bias. Andererseits ist auch die Berücksichtigung der geographische Länge für die Berechnung nicht möglich. Dadurch treten in einigen Regionen (im Nordosten von China und Japan) systematische Verzerrungen auf. Die Anwendung der NMF ist aufgrund dieser Mängel räumlich stark begrenzt (Boehm u. a. 2006a).

7.1.2 Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1)

Um die tatsächliche Atmosphäre an einer Station zu erfassen, sind numerische Wettermodelle (NWM) notwendig. Niell (2001) entwickelte als Verbesserung der NMF die isobarische Mappingfunktion (IMF), basierend auf diesen Wettermodellen. Eingangsgrößen hierfür sind die geopotentiellen Höhen bei einem Druck von 200 hPa und das Verhältnis der Verzögerung des feuchten Anteils bei einer Elevation von $3,3^\circ$ und im Zenit.

Die Vienna Mapping Funktion 1 beruht auf den Wetterdaten des *European Centre for Medium Range Weather Forecast* (ECMWF). Dabei werden die erforderlichen Parameter aus Gl. 7.4 durch eine Strahlverfolgung bestimmt. Die Eingangsparameter für die Strahlverfolgung sind ein Startwert für die Elevation, die Höhe, die Temperatur und der Wasserdampfdruck in der neutralen Atmosphäre für verschiedene Druckflächen. Das Ergebnis der Strahlverfolgung sind die Werte für die hydrostatische und feuchte Mappingfunktion sowie der Elevationswinkel im Vakuum bei 3° (Boehm und Schuh 2004).

Es gibt zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Koeffizienten. Bei der sogenannten rigorosen Bestimmung werden für jede Station und in einer Auflösung von 6 Stunden die verfügbaren Informationen des ECMWF genutzt. Die Strahlverfolgung durch verschiedene Druckschichten wird für zehn verschiedene Startwerte der Elevation (90° bis $3,3^\circ$) durchgeführt. Die jeweils drei Koeffizienten für die trockene und feuchte Mappingfunktion werden anschließend durch die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Boehm und Schuh 2004).

Zu dieser sehr aufwendigen Variante wurde eine schnellere Version entwickelt, die ähnliche Werte für die Mappingfunktionen liefert. Die Strahlverfolgung wird dabei nur noch für eine Anfangselevation von $3,3^\circ$ durchgeführt. Des Weiteren werden lediglich die Koeffizienten a_h und a_w durch eine einfache Invertierung von Gl. 7.4 berechnet. Die Werte b_h und c_h werden von der hydrostatischen IMF übernommen. Für b_w und c_w können diese von der NMF für $\varphi = 45^\circ$ verwendet werden (Boehm und Schuh 2004).

Die Parameter, die zur Berechnung der VMF1 notwendig sind, werden vom *Institute of Geodesy and Geophysics (IGG)* der Technischen Universität Wien für nichtkommerzielle Zwecke seit September 2003 zur Verfügung gestellt¹. Für alle VLBI- und zahlreiche IGS-Stationen werden in einer Auflösung von 6 Stunden bezogen auf den modifizierten julianischen Tag (MJD) folgende Informationen angeboten: Koeffizienten a_h und a_w , Zenitverzögerung Z_h und Z_w , mittlere Temperatur in K, Luftdruck in hPa, Temperatur in $^\circ\text{C}$, Partialdampfdruck des Wassers in hPa sowie die genäherte Stationshöhe in m (Abb. 7.1) (Boehm und Schuh 2004).

Stammen die GNSS-Aufzeichnungen von Stationen, die nicht zum IGS-Netz gehören oder zeitlich vor

¹ <http://www.hg.tuwien.ac.at/ecmwf1/>

| | | | | | | | | | | |
|------|----------|------------|------------|--------|--------|-------|---------|------|------|------|
| HERT | 55211.00 | 0.00121648 | 0.00046654 | 2.2976 | 0.0581 | 271.2 | 1008.50 | 2.55 | 7.37 | 38.2 |
| HERT | 55211.25 | 0.00121942 | 0.00053760 | 2.3052 | 0.0546 | 268.9 | 1012.83 | 1.63 | 7.42 | 38.2 |
| HERT | 55211.50 | 0.00122404 | 0.00057649 | 2.3104 | 0.0968 | 270.0 | 1015.12 | 4.74 | 8.27 | 38.2 |
| HERT | 55211.75 | 0.00122686 | 0.00049467 | 2.3106 | 0.0654 | 273.8 | 1014.96 | 5.23 | 9.06 | 38.2 |

Abb. 7.1: Parameter der VMF1

dem Jahre 2004 liegen, werden die Informationen zu den Mappingfunktionen und Zenitverzögerungen in einem Netz von $2,0^\circ \times 2,5^\circ$ angeboten. Durch Interpolation der Werte kann für jede Station die VMF1 in der PPP-Auswertung verwendet werden (Kouba 2008).

Die Koeffizienten der VMF1 werden täglich mit einer Verzögerung von einem Tag vom IGG kostenfrei zur Verfügung gestellt. Für Echtzeitanwendungen müssen diese Koeffizienten vorab geschätzt werden. Informationen dazu liefert Boehm u. a. (2008).

Bei der VMF1 wird die Zenitverzögerung auch für den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung angegeben (vgl. Abb. 7.1). Dadurch kann die gesamte Laufzeitverzögerung modelliert und als Korrektur an die Phasen- und Codebeobachtungen angebracht werden. Die Schätzung des Troposphärenparameters würde bei dieser Methode entfallen. Welchen Einfluss diese Methode auf die Positionsbestimmung hat und ob diese eine sinnvolle Alternative zur herkömmlichen Troposphärenmodellierung bei PPP ist, wird in Kap. 7.2 untersucht.

7.1.3 Globale Mapping Funktion (GMF)

Für die VMF1 ist die Berücksichtigung der aktuellen Werte der externen Koeffizienten a_h und a_w sowie der Zenitverzögerungen erforderlich. Die NMF weist in einigen geographischen Regionen erhebliche Defizite auf. Bei der Ableitung der Globalen Mapping Funktion bestand das Ziel zum einen darin, eine Mappingfunktion zu entwickeln, die möglichst für alle Stationen, unabhängig von ihrer geographischen Länge und Breite, angewendet werden kann. Zum anderen sollten die Algorithmen für die Berechnung der benötigten Parameter der Mappingfunktionen in eigene Programme leicht umsetzbar sein.

Zur Ermittlung der Parameter sind Wetterdaten aus einem möglichst dichten globalen Netz erforderlich. Solche Daten liefert wiederum das ECMWF. Für die GMF standen die monatlichen Daten für Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur aus einem $15^\circ \times 15^\circ$ globalen Netz zur Verfügung. Dabei wurden für die feuchte und hydrostatische Mappingfunktion nur die Koeffizienten a_h und a_w über einen Zeitraum von drei Jahren bestimmt. Wie bei der VMF1 erfolgte dies über eine Strahlverfolgung bei $3,3^\circ$. Für die 312 Netzpunkte sind die Wetterdaten von 36 Monaten zur Bestimmung der hydrostatischen Parameter a_h und feuchten Parameter a_w einbezogen worden. Der hydrostatische Parameter wurde auf den mittleren Meeresspiegel reduziert.

Zur Bestimmung der Parameter a_h und a_w gilt für die GMF folgende Gleichung (Boehm u. a. 2006a):

$$a_{h/w} = a_0 + A \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{DOY - DOY_0}{365}\right) \cdot 10^{-5}. \quad (7.7)$$

Die Mittelwerte a_0 und die jährlichen Amplituden A werden aus Kugelflächenfunktionen 9. Ordnung und 9. Grades ermittelt. Die Phase der Mappingfunktion stimmt mit der NMF zum Tage 28 (bzw. Tag 211) überein. Für den Parameter c_h gilt folgende Gleichung (Boehm u. a. 2006b):

$$c_h = c_0 + \left[\left(\cos \left(2\pi \cdot \frac{DOY - DOY_0}{365} + \Psi \right) + 1 \right) \cdot \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right] \cdot (1 - \cos(\varphi)). \quad (7.8)$$

Für die Parameter c_0 , c_{11} , c_{10} und Ψ gelten für die nördliche Hemisphäre folgende Werte:

$$\begin{aligned} c_0 &= 0,062 \\ c_{11} &= 0,005 \\ c_{10} &= 0,001 \\ \Psi &= 0 \end{aligned}$$

und für die südliche Hemisphäre:

$$\begin{aligned} c_0 &= 0,063 \\ c_{11} &= 0,007 \\ c_{10} &= 0,002 \\ \Psi &= \pi. \end{aligned}$$

Die weiteren Parameter der feuchten und hydrostatischen Mappingfunktion lauten:

$$\begin{aligned} c_w &= 0,04391 \\ b_h &= 0,00290 \\ b_w &= 0,00146. \end{aligned}$$

Der detaillierte FORTRAN-Quellcode für die hydrostatische und feuchte GMF ist wiederum auf der Internetseite des IGG der Technischen Universität Wien veröffentlicht. Die Funktionswerte der hydrostatischen Mappingfunktion sind wie schon bei der NMF mit selbiger Gl. 7.6 auf die Stationshöhe zu korrigieren (Boehm u. a. 2006a).

Die Algorithmen der GMF sind wie bei der NMF leicht zu implementieren, da keine externen Daten notwendig sind. Als zusätzliche Information ist lediglich die geographische Länge erforderlich. Dafür verspricht sie eine bessere Genauigkeit. Ein Vergleich der mittleren Höhenänderung bei der Verwendung der GMF anstatt der NMF zeigte Differenzen im Januar von bis zu 10 mm im Nordosten von China und Japan sowie den Regionen südlich von 45° südlicher Breite (Boehm u. a. 2006a).

7.1.4 Vergleich der Mappingfunktionen anhand konkreter Stationen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Mappingfunktionen für den hydrostatischen und feuchten Anteil haben Gl. 7.4 als Grundlage. Sie unterscheiden sich durch die Art der Bestimmung der einzelnen Koeffizienten. Die Funktionswerte der hydrostatischen Mappingfunktionen für 5° und 10° Elevation wurden für einen Zeitraum von zwölf Monaten für sechs IGS-Stationen berechnet. Diese sechs Stationen unterscheiden sich deutlich in ihrer geographischen Lage. Drei der vier Stationen der Nordhalbkugel sind in Europa verteilt. Eine Station liegt im Osten Asiens. Zwei Stationen befinden sich auf der Südhalbkugel (Tab. 7.3).

Für alle Stationen konnten für die VMF1 die diskreten Werte a_h und a_w (vgl. 7.1) zur Berechnung

Tab. 7.3: IGS-Stationen zur Untersuchung der verschiedenen Mappingfunktionen

| Station | Stadt | Land | Länge in ° | Breite in ° | Höhe in m |
|---------|------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| BJFS | Fangshan | China | 115,89 | 39,61 | 87,4 |
| HERT | Hailsham | England | 0,33 | 50,87 | 83,3 |
| MAC1 | MacQuarie Eiland | Australien | 158,94 | -54,50 | -6,7 |
| OHI2 | O'Higgins | Antarktis | -57,90 | -63,32 | 32,2 |
| ORID | Ohrid | Mazedonien | 20,79 | 41,13 | 773,0 |
| TRO1 | Tromsoe | Norwegen | 18,94 | 69,66 | 138,0 |

verwendet werden. Für die GMF und die NMF wurden die Koeffizienten anhand der geographischen Länge und Breite (GMF) bzw. nur der geographischen Breite (NMF) bestimmt. Bei den Funktionswerten der hydrostatischen GMF und NMF wurde zusätzlich noch die Höhenkorrekturen angebracht (Gl. 7.6). Bei der VMF1 sind keine Höhenkorrekturen notwendig, da die Werte direkt für die Station gelten.

In Abb. 7.2 sind die Werte der hydrostatischen Mappingfunktionen für diese Stationen in einem Zeitraum vom 07.09.2009 bis 07.09.2010 dargestellt. Die oberen sechs Diagramme wurden für 5° und die unteren sechs Diagramme für 10° Elevation ermittelt. Die Skaleneinteilung ist für alle Mappingfunktionen gleich.

Die Funktionswerte der einzelnen Mappingfunktionen präsentieren deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Elevation und der Lage der Station. Bei 5° Elevation wird der Faktor, mit dem die hydrostatische Verzögerung im Zenit zu multiplizieren ist, deutlich größer. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind stark ausgeprägt. Es wird ersichtlich, dass die GMF mit der VMF1 übereinstimmt. Da bei der VMF1 aktuelle Wetterdaten genutzt werden, zeigt sich ein ausgeprägtes Rauschen. Bei den europäischen Stationen stimmt die NMF mit der GMF relativ gut überein. Allerdings bestätigen sich die von Boehm u. a. (2006a) demonstrierten Defizite der NMF auf der Südhalbkugel sowie in Ostasien. Der maximale Unterschied zwischen den Werten der beiden Mappingfunktionen ist am 28. Januar, der Tag an dem die Phasen übereinstimmen.

Bei einer Elevation von 10° ist dieser Multiplikationsfaktor für die hydrostatische Zenitverzögerung um die Hälfte kleiner. Auch werden die jahreszeitlichen Schwankungen und demzufolge auch die Unterschiede zwischen den Funktionswerten der drei Mappingfunktionen sichtbar geringer.

7.2 Auswirkungen verschiedener Troposphärenmodelle auf die statische Positionsbestimmung

Im letzten Abschnitt wurden die verschiedenen Möglichkeiten zur Modellierung der Troposphäre beschrieben und die Funktionswerte der hydrostatischen Mappingfunktionen sind anhand verschiedener Stationen und Elevationen über einen längeren Zeitraum miteinander verglichen worden. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen auf die Positionsbestimmungen untersucht. Dabei wird wieder zwischen der Koordinatengenauigkeit bei einer Beobachtungsdauer von 24 Stunden sowie der Konvergenzzeit unterschieden. Da die Troposphärenmodellierung besonders in niedrigen Elevationen einen großen Einfluss auf die Positionsbestimmung hat, wird in diesem Kapitel jeweils zwischen 5° und 10° Elevati-

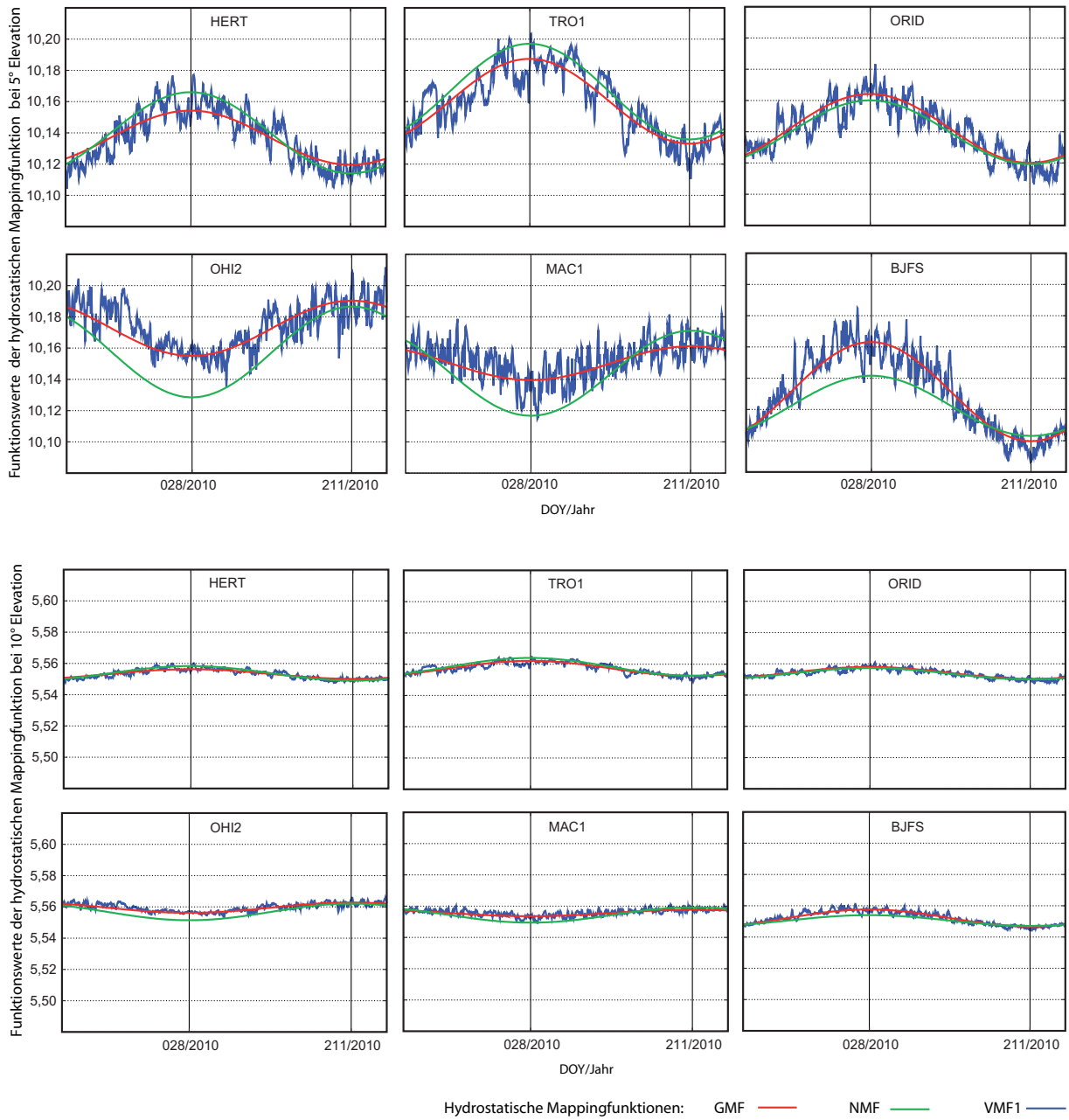


Abb. 7.2: Funktionswerte der hydrostatischen Mappingfunktionen bei 5° und 10° Elevation an verschiedenen Stationen

onsmaske differenziert.

Bei der VMF1 ist auch die Verzögerung im Zenit für den feuchten Anteil Bestandteil der Informationen. Aus diesem Grunde wird in diesem Abschnitt auch die Auswirkung der vollständigen Korrekturen der Beobachtungen (Gl. 7.1) ohne Schätzung der Resttroposphärenabweichung im Ausgleichsprozess untersucht.

Grundlage für die statische Auswertung sind zwei GPS-Beobachtungsabschnitte von jeweils 30 Tagen der in Tab. 7.3 aufgeführten Stationen. Dabei entspricht der 28.01. bzw. der 28.07.2010 der Mitte der einzelnen Abschnitte. Am 28. Januar sind die Abweichungen zwischen den Funktionswerten der hydrostatischen NMF und GMF bzw. VMF1 am größten und es sollten daher die größten Positionsdifferenzen auftreten. Die Abweichungen zwischen den Mappingfunktionen um den 28. Juli sind am geringsten. Demnach sollten in diesem Untersuchungszeitraum die Differenzen am kleinsten ausfallen.

7.2.1 Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Mappingfunktion

Für die Bestimmung der Lage- und Höhengenaugigkeiten bei 24-stündigen Beobachtungen wurden für die jeweiligen Tage bei einer Elevationsmaske von 5° und 10° die Koordinaten der angegebenen Stationen mit PPP berechnet. Aus den Abweichungen zu den IGS05-Sollkoordinaten des EPN-Netzes wurden die empirischen Standardabweichungen (Gl. 5.1) ermittelt. In Tab. 7.4 und Tab. 7.5 sind diese Standardabweichungen für die Beobachtungen vom 15. Januar bis 14. Februar 2010 für die sechs Stationen und die Mappingfunktionen bei 5° und 10° Elevationsmaske dokumentiert. Die Standardabweichungen in Nord und Ost wurden zu einer Standardabweichung in der Lage s_{0L} zusammengefasst.

Die ersten drei Troposphärenmodelle entsprechen dem Standardverfahren mit jeweils verschiedenen Mappingfunktionen. Das heißt, zuerst werden die Beobachtungen um den hydrostatischen Anteil der Laufzeitverzögerung korrigiert. In der Ausgleichung wird mit der Mappingfunktion des feuchten Anteils die restliche Verzögerung geschätzt. VMF1 (komplett) kennzeichnet die Variante, bei der die Beobachtungen um den gesamten Anteil der troposphärischen Verzögerungen korrigiert und im späteren Ausgleichsprozess kein Schätzparameter eingeführt wird.

Tab. 7.4: Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 10° Elevationsmaske, Tage 15-45, 2010

| Station | GMF | | NMF | | VMF1 | | VMF1 (komplett) | |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm |
| HERT | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 3,0 |
| TRO1 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 1,1 | 0,8 | 1,9 |
| ORID | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 1,3 | 2,4 | 3,1 |
| OHI2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 2,3 |
| BJFS | 0,8 | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 2,9 |
| MAC1 | 0,5 | 0,9 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 5,6 |

Die Standardvarianten mit den drei verschiedenen Mappingfunktionen erreichen ein hohes Genauigkeitsniveau. Wird die Elevationsmaske auf 10° gesetzt, sind die Standardabweichungen in der Lage und Höhe mit maximal 2 mm Differenz fast identisch. Die geringen Abweichungen zwischen den Funktionswerten

Tab. 7.5: Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 5° Elevationsmaske, Tage 15-45, 2010

| Station | GMF | | NMF | | VMF1 | | VMF1 (komplett) | |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm |
| HERT | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,4 | 3,3 |
| TRO1 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 1,2 | 2,8 | 2,9 |
| ORID | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 1,4 | 0,8 | 1,4 | 2,0 | 2,9 |
| OHI2 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 1,5 | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 2,2 |
| BJFS | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 1,4 | 0,8 | 1,0 | 2,8 | 2,8 |
| MAC1 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 5,9 |

der verschiedenen Mappingfunktionen bei 10° Elevation (Abb. 7.2) haben nahezu keine Auswirkungen auf die Positionsbestimmung.

Wird allerdings eine Elevationsmaske von 5° verwendet, sind die Höhengenaugigkeiten der Stationen OHI2, BJFS und MAC1 unterschiedlich. Die Standardabweichungen, basierend auf der NMF sind um ca. 0,5 cm schlechter als die, die auf der GMF oder VMF1 beruhen. Die Differenzen zwischen den Werten der hydrostatischen NMF und GMF bzw. VMF1 dieser Stationen sind im beschriebenen Zeitraum sehr ausgeprägt (Abb. 7.2). Dies wirkt sich auch auf die Positionsbestimmung aus.

In Tab. 7.6 und Tab. 7.7 sind im Vergleich dazu die Standardabweichungen für die 24-stündigen Beobachtungen im Zeitraum vom 14. Juli bis 13. August aufgeführt.

Tab. 7.6: Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 10° Elevationsmaske, Tage 195-225, 2010

| Station | GMF | | NMF | | VMF1 | | VMF1 (komplett) | |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm |
| HERT | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 4,6 |
| TRO1 | 0,5 | 1,2 | 0,5 | 1,2 | 0,6 | 1,3 | 0,7 | 5,3 |
| ORID | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 1,8 | 4,9 |
| OHI2 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 2,7 |
| BJFS | 1,2 | 0,7 | 1,2 | 0,7 | 1,2 | 0,6 | 1,2 | 7,6 |
| MAC1 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 4,6 |

Tab. 7.7: Empirische Standardabweichungen in der Lage und Höhe einzelner Stationen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion bei 5° Elevationsmaske, Tage 195-225, 2010

| Station | GMF | | NMF | | VMF1 | | VMF1 (komplett) | |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm | s_{0L} , cm | s_{0H} , cm |
| HERT | 0,6 | 1,2 | 0,6 | 1,4 | 0,5 | 1,2 | 0,7 | 5,0 |
| TRO1 | 0,7 | 1,7 | 0,7 | 1,5 | 0,7 | 1,4 | 0,8 | 6,0 |
| ORID | 1,3 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,4 | 1,4 | 2,1 | 4,5 |
| OHI2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 2,8 |
| BJFS | 1,2 | 1,9 | 1,2 | 1,7 | 1,2 | 1,9 | 1,4 | 8,5 |
| MAC1 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 4,8 |

Auch in diesem verwendeten Zeitraum werden bei den ersten drei Standardvarianten zur Troposphären-

modellierung zentimetergenaue Ergebnisse erreicht. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Tab. 7.5 sind die Standardabweichungen in der Höhe bei den Stationen OHI2, BJFS und MAC1 auch bei einer Elevationsmaske von 5° nahezu identisch. Zu diesem Zeitpunkt haben, wie schon erwähnt, die Funktionswerte der Mappingfunktionen nur minimale Differenzen.

Beide Untersuchungszeiträume demonstrieren, dass es immer sinnvoll ist, die Resttroposphärenabweichungen im Ausgleichsprozess zu schätzen. Wird die komplette Laufzeitverzögerung vorab berechnet und die Beobachtung korrigiert, erhöhen sich die Standardabweichungen, vor allem in der Höhenkomponente. Besonders deutlich wird dies in Tab. 7.6 und 7.7.

Wird anstatt der Standard-elevation von 10° eine Elevationsmaske von 5° verwendet, führt dies zu einer Vergrößerung der Standardabweichung in der Höhe, insbesondere im zweiten Untersuchungsabschnitt. Da die Signale niedrigstehender Satelliten nicht nur von der troposphärischen Refraktion verstärkt beeinflusst werden, sondern auch von Mehrwegeeffekten, empfiehlt es sich, eine Elevationsmaske von 10° zu verwenden.

7.2.2 Konvergenzzeiten in Abhängigkeit von der Mappingfunktion

Abschnitt 7.2.1 zeigte, dass vor allem die Genauigkeit der Höhenkomponente von den unterschiedlichen Troposphärenmodellierungen und Elevationen betroffen ist. Die größten Differenzen zwischen den Standardabweichungen in der Höhe sind bei den Stationen OHI2, BJFS und MAC1 aufgetreten. Für die Untersuchung der Konvergenzzeit der Höhengenaugkeit werden deshalb im Folgenden auch nur diese erwähnten IGS-Stationen verwendet.

Die Beobachtungsdaten umfassen die Tage 25 bis 31 sowie 207 bis 213 des Jahres 2010. Die 24-stündigen Beobachtungen wurden in Blöcke von 5, 10, 15 bis 60 Minuten unterteilt. Aus den Abweichungen zu den Sollkoordinaten wurden für jeden Beobachtungsblock die empirischen Standardabweichungen berechnet.

In Abb. 7.3 sind die Konvergenzzeiten der Höhen in Abhängigkeit von der verwendeten Mappingfunktion für den ersten Untersuchungsabschnitt dargestellt. Die Ergebnisse, basierend auf der Standardmodell-

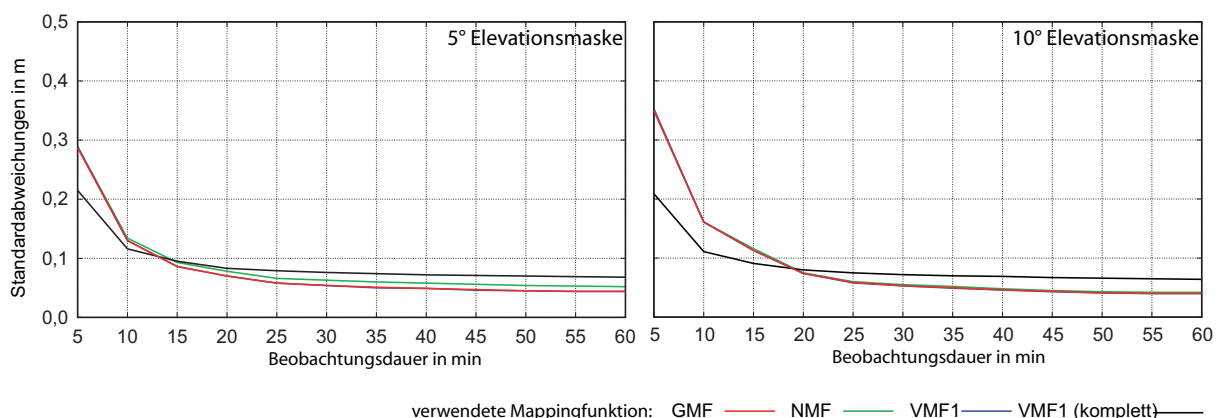


Abb. 7.3: Konvergenzverhalten in der Höhe bei Verwendung verschiedener Mappingfunktionen, Tage 25 bis 31, 2010

lierung, sind bei 10° Elevationsmaske identisch. Bei einer Elevationsmaske von 5° sind Unterschiede in

den Standardabweichungen von ca. 1 cm zwischen der PPP-Auswertung mit NMF und GMF bzw. VMF1 vorhanden.

Die Variante, die troposphärische Verzögerung vor der Ausgleichung komplett zu berechnen und auf eine Schätzung der Restabweichung zu verzichten, führt bei einer Elevationsmaske von 10° in den ersten 20 Minuten zu einer relativ deutlichen Verringerung der Konvergenzzeit. Danach bleiben die Standardabweichungen dieser Modellierung etwa auf einem Niveau und sind größer als die Standardabweichungen der Standardmodellierungen.

Abb. 7.4 präsentiert die Standardabweichungen der Höhe bei Beobachtungszeiten von 5 bis 60 Minuten für Ende Juli 2010. Dies ist die Zeitspanne, bei der die Mappingfunktionen die geringsten Abweichungen aufweisen. Demzufolge sind auch die Standardabweichungen der Ergebnisse, basierend auf der GMF, der

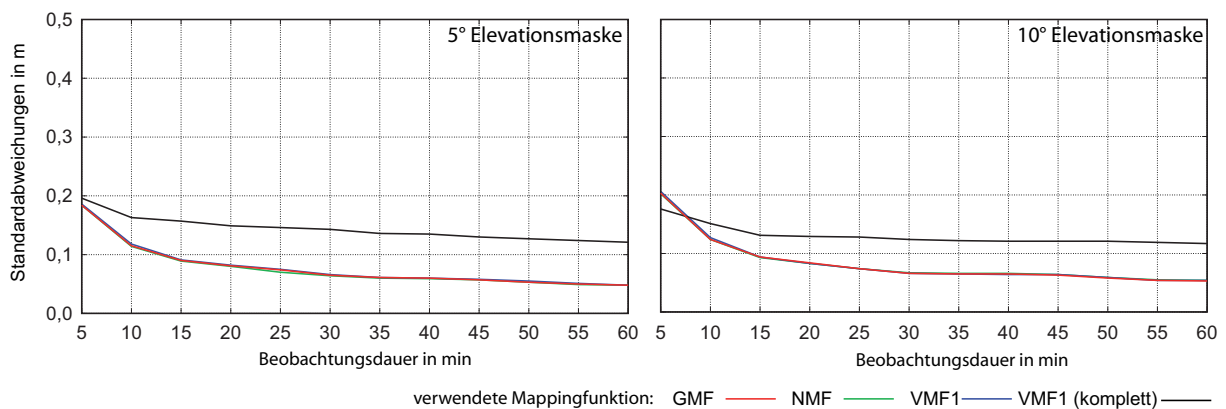


Abb. 7.4: Konvergenzverhalten in der Höhe bei Verwendung verschiedener Mappingfunktionen, Tage 207 bis 213, 2010

VMF und der NMF für 10° und 5° Elevationsmaske identisch.

Für diese Beobachtungsdaten zeigt sich, dass die komplette Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung und die anschließende Korrektur der Beobachtungen nahezu keine Verbesserung bringt. Im Gegenteil, die Standardabweichungen werden bereits nach 10 Minuten deutlich schlechter. Offensichtlich kann in diesem Zeitraum die Troposphäre nicht so genau erfasst werden wie im vorhergehenden Untersuchungsabschnitt.

Da die Anwendungen von PPP meist längere Beobachtungszeiten bevorzugen, sollte bei der Modellierung immer ein Anteil der Troposphäre korrigiert und die Restabweichungen in der Ausgleichung geschätzt werden.

8 Beispiele für kinematische und statische PPP-Auswertungen

In diesem Kapitel werden zwei praktische Anwendungen kinematischer PPP-Auswertungen sowie ein Beispiel für statische PPP-Auswertungen von 24-stündigen Beobachtungsdaten vorgestellt. Im ersten Beispiel sind GNSS-Messungen auf einem Schiff in der Ostsee durchgeführt worden. Basislinienauswertungen sind aufgrund der großen Entfernungen zu einer Referenzstation schwierig. Eine PPP-Auswertung ist daher für dieses Einsatzgebiet ideal. In den anschließenden Anwendungen wird gezeigt, dass geodynamische Stationsbewegungen aufgrund von Erdbeben oder Plattentektonik zentimetergenau nachgewiesen werden können. Auch dies sind klassische Anwendungen für PPP, da die Bewegungen einer Station einfach analysiert werden können.

8.1 PPP-Anwendungen in der Hydrographie

In einem Zeitraum von Juli bis September 2009 wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Pegelmessungen mit dem Forschungs- und Vermessungsschiff "Komet" auf der Ostsee durchgeführt. Die kinematischen GPS+GLONASS-Beobachtungsdaten wurden in einem Intervall von einer Sekunde mit einem LEICA GX1230GG-Empfänger aufgezeichnet. Die GNSS-Beobachtungsdaten wurden anschließend nach dem Ansatz des PPP ausgewertet.

Als präzise Uhr- und Orbitinformationen sind die des ESOC AC verwendet worden. Für den Zeitpunkt der Messungen standen noch keine gemeinsamen GPS- und GLONASS-Uhrkorrekturen in einem Intervall von 30 Sekunden zur Verfügung. Der Stützpunktabstand dieser Uhrkorrekturen betrug Mitte 2009 noch 5 Minuten. Da dieses Intervall aber entscheidend für die Qualität einer PPP-Lösung ist, wurde eine Phaseninterpolation mit den ermittelten Residuen der Referenzstationen SASS (Sassnitz), WARN (Warnemünde) und BUDP (Kopenhagen) durchgeführt (vgl. Kap. 6.3.1).

Im Gegensatz zu bisherigen kinematischen Auswertungen von unbeweglichen Referenzstationen entstanden diese Beobachtungsdaten auf einer bewegten Plattform. Sollkoordinaten sind daher nicht vorhanden, sondern müssen erst erzeugt werden. Für diese Berechnung wurden kinematische Basislinienauswertungen mit dem Modul *WAI* durchgeführt. Die dafür erforderliche Referenzstation war die IGS-Station SASS (Sassnitz, Deutschland). Die Basislinienlänge beträgt im Mittel ca. 50 km.

Durch diese relative GNSS-Auswertung standen in einem Intervall von 30 Sekunden Vergleichskordinaten für die berechneten PPP-Koordinaten zur Verfügung. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass diese Sollkoordinaten auch bei idealen Bedingungen nur eine Genauigkeit von 1 cm bis 2 cm in Lage und Höhe haben. Es konnte auch nicht für jeden Datensatz eine Basislinienlösung mit der erforderlichen

Genauigkeit erzeugt werden. Je länger die Basislinien sind, desto schwieriger wird die Mehrdeutigkeitsfestsetzung.

Aus den Abweichungen in Nord, Ost und Höhe zwischen den jeweiligen Koordinaten der PPP- und der Basislinienauswertung wurden die empirischen Standardabweichungen berechnet. In den folgenden zwei Abschnitten werden die Positionsgenauigkeit bei einer Beobachtungszeit von mindestens 4 Stunden und das Konvergenzverhalten untersucht.

8.1.1 Positionsgenauigkeiten der hydrographischen Datensätze

Die jeweiligen empirischen Standardabweichungen in Nord s_{0N} , Ost s_{0E} und Höhe s_{0H} der einzelnen GPS- sowie GPS+GLONASS-Auswertungen sind zusammen mit dem Beobachtungsdatum, der Dauer sowie der durchschnittlichen Satellitenanzahl und der mittleren Länge der Basislinien zur Referenzstation in Tab. 8.1 dargestellt. Zusätzlich sind noch die mittleren Standardabweichungen angegeben.

Tab. 8.1: Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe einer PPP-Auswertung von kinematischen GPS-Datensätzen und GPS+GLONASS-Datensätzen, Jahr 2009

| Datum | Dauer in h | Basislinie in km | GPS | | | | GPS+GLONASS | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Sat. ∅ | s_{0N} in cm | s_{0E} in cm | s_{0H} in cm | Sat. ∅ | s_{0N} in cm | s_{0E} in cm | s_{0H} in cm |
| 08. Jul. | 4,4 | 44 | 8,0 | 1,6 | 1,0 | 2,3 | 14,4 | 1,6 | 0,8 | 2,1 |
| 15. Jul. | 4,0 | 47 | 8,5 | 2,7 | 2,1 | 8,7 | 14,1 | 2,4 | 1,9 | 6,7 |
| 16. Jul. | 12,5 | 47 | 8,6 | 1,0 | 0,8 | 3,8 | 13,7 | 1,0 | 0,9 | 3,9 |
| 22. Jul. | 13,3 | 51 | 8,4 | 2,4 | 1,4 | 7,0 | 13,6 | 2,5 | 1,3 | 6,3 |
| 29. Jul. | 9,5 | 34 | 8,0 | 1,0 | 0,7 | 5,2 | 13,5 | 1,3 | 0,8 | 6,1 |
| 05. Aug. | 11,3 | 51 | 9,0 | 1,8 | 1,6 | 3,8 | 14,0 | 1,6 | 1,5 | 2,5 |
| 11. Aug. | 4,6 | 34 | 10,0 | 1,3 | 0,8 | 2,1 | 14,8 | 1,2 | 0,6 | 1,5 |
| 23. Aug. | 13,1 | 24 | 8,3 | 1,8 | 1,3 | 3,1 | 11,9 | 2,0 | 1,3 | 3,2 |
| mittlere Standardabweichung | | | | 1,7 | 1,2 | 5,0 | | 1,9 | 1,3 | 4,3 |

Die Ergebnisse zeigen, dass mit mittleren Standardabweichungen in Nord und Ost von kleiner als 2 cm sehr gute horizontale Genauigkeiten erreichbar sind. Die einzelnen Standardabweichungen in der Höhe sind deutlich unter einem Dezimeter. Die mittleren Standardabweichungen der Höhe betragen für eine alleinige GPS-Auswertung 5,0 cm und für eine kombinierte GPS- und GLONASS-Auswertung 4,3 cm. Damit sind diese erreichten Standardabweichungen etwas größer als die, die in Kap 5.3.2 erreicht wurden. Es muss allerdings beachtet werden, dass die Solllösungen auch nur eine Genauigkeit von 1 cm bis 2 cm haben. Die erhaltenen Standardabweichungen spiegeln daher nicht die alleinige Genauigkeit der PPP-Auswertung wider.

Im Gegensatz zu den bisherigen Auswertungen sind bei diesen Ergebnissen die Standardabweichungen in der Ostkomponente erstmals besser als die der Nordkomponente. Eine mögliche Ursache ist, dass in den mittleren Breiten die Genauigkeit der Nordkoordinate bei einer *fixed*-Lösung schlechter ist als die Ostkoordinate. Bei der Basislinienauswertung, die als Referenz verwendet wird, werden die Mehrdeutigkeiten ganzzahlig festgesetzt. So könnte diese Verschiebung des Genauigkeitsniveaus der Ost- und Nordkomponente durch die Basislinienlösung verursacht worden sein.

Die Verbesserungen in der Genauigkeit durch die zusätzlichen GLONASS-Satelliten sind wegen der meist langen Beobachtungszeiten relativ gering. Bei vier Datensätzen wird die Höhengenaugkeit aufgrund der zusätzlichen Signale um mehr als einen halben Zentimeter verbessert. Die mittlere Standardabweichung verbessert sich von 5,0 cm auf 4,3 cm.

Alle ausgewerteten Datensätze haben eine Beobachtungsdauer von mindestens 4 Stunden. Über diesen langen Beobachtungszeitraum sind meist gute Genauigkeiten in allen drei Komponenten erreichbar. Weitere Vorteile sind, dass auf hoher See kaum Signalunterbrechungen und somit Cycle Slips auftreten und dass keine Referenzstation zur Auswertung benötigt wird. PPP ist daher ein geeignetes Verfahren in der Hydrographie.

Böder (2010) demonstrierte PPP-Auswertungen für das hydrographische Multisensorsystem der Hafen-City Universität Hamburg. Mehrstündige GNSS-Messungen auf der Elbe zeigten, dass die PPP-Lösungen die erforderlichen Genauigkeiten für weitere hydrographische Anwendungen im Bereich der Gravimetrie oder Archäologie erfüllen.

8.1.2 Konvergenzverhalten der hydrographischen Datensätze

Um das Einlaufverhalten dieser realen kinematischen GNSS-Messungen des BSH in einem Zeitbereich von 5 Minuten bis 1 Stunde zu untersuchen, wurden die Beobachtungen wiederum in 5, 10 Minuten usw. Blöcke unterteilt. Für diese jeweiligen Beobachtungsblöcke konnten so die PPP-Lösungen, die empirischen Standardabweichungen zu den Basislinienlösungen und anschließend die mittleren empirischen Standardabweichungen in Nord, Ost und Höhe für die einzelnen Beobachtungsblöcke berechnet werden (Abb. 8.1).

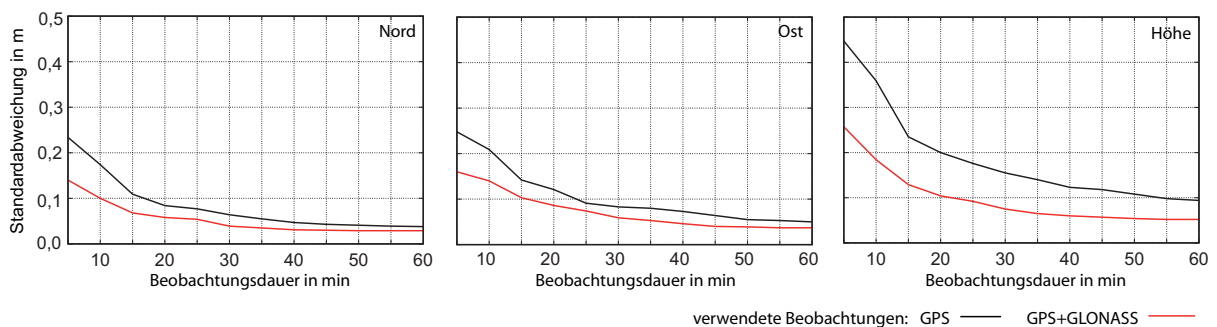


Abb. 8.1: Konvergenzverhalten der kinematischen BSH-Datensätze, unterschieden in GPS- und kombinierte GPS und GLONASS-Auswertung

Während bei langen Beobachtungsdaten die zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen nur vereinzelt Verbesserungen brachten, zeigt sich wiederum der Vorteil der zusätzlichen GLONASS-Satelliten bei kurzen Beobachtungszeiten. So sind nach 30 Minuten schon Genauigkeiten kleiner als einen Dezimeter in Nord, Ost und auch in der Höhe erreichbar. Nach einer Stunde wird in der Höhenkomponente eine mittlere empirische Standardabweichung von ca. 5 cm erreicht. Hingegen ist die Standardabweichung der alleinigen GPS-Auswertung mit ca. 10 cm doppelt so groß.

8.2 Geodynamische Stationsbewegungen

Neben den vorangegangenen klassischen kinematischen GNSS-Anwendungen können auch geodynamische Stationsbewegungen, verursacht durch Plattenbewegungen oder auch Erdbeben, mit einer PPP-Auswertung sehr einfach erfasst werden. Bei einer klassischen differentiellen Auswertung werden die Bewegungen der Referenzstationen immer mit erfasst, sodass es schwierig ist, die Lage- und Höhenänderungen der eigentlichen Station zuzuordnen. Diese Problematik entfällt bei einer Einzelpunktbestimmung mit dem PPP-Algorithmus.

8.2.1 Erdbeben

Ein Beispiel für sehr starke plötzliche geodynamische Stationsbewegungen sind Erdbeben, meist verursacht durch die Plattentektonik. Besonders an Plattengrenzen können Spannungen entstehen, die sich bei ruckartigen Bewegungen der Erdkruste entladen und so diese Erschütterungen des Erdkörpers hervorrufen. Durch ein Erdbeben werden seismische Wellen erzeugt, welche ihren Ursprung im sogenannten Erdbebenherd haben. Die seismischen Wellen im Inneren des Erdkörpers, auch Raumwellen genannt, werden als P- und S-Wellen bezeichnet. Bei einem besonders starken Beben oder wenn der Erdbebenherd nicht besonders tief ist, erreichen die seismischen Wellen die Erdoberfläche und breiten sich als Oberflächenwellen weiter aus. Der Punkt der Erdoberfläche, der direkt über dem Erdbebenherd liegt, ist das Epizentrum. Die Oberflächenwellen unterscheiden sich in Rayleigh- und Lovewellen. Diese Wellen verursachen horizontale Punktverschiebungen. Bei der Rayleighwelle verlaufen diese in und bei der Lovewelle quer zur Ausbreitungsrichtung. Zusätzlich verursacht die Rayleighwelle noch vertikale Verschiebungen (Berckhemer 1997).

Die Bewegungen auf der Erdoberfläche, hervorgerufen durch die seismischen Oberflächenwellen, können durch GNSS-Messungen erfasst werden. Umfangreiche Untersuchungen dazu wurden von Kouba (2003) durchgeführt. Mit PPP wurden die Bewegungen von IGS-Stationen nahe der Epizentren der Erdbeben in Alaska (Denali Fault) im November 2002 sowie in Japan im Mai 2003 und Algerien ebenfalls im Mai 2003 ausgewertet. Es zeigte sich, dass besonders in Alaska die horizontalen Stationsverschiebungen sehr gut die Bewegungen der Rayleigh- und Lovewelle widerspiegeln. Allerdings sind dafür Aufzeichnungen im Intervall von einer Sekunde notwendig. Bei einer Beobachtungsrate von 30 Sekunden gehen wichtige Informationen der Oberflächenschwingungen verloren. Die vertikale Wellenbewegung ist hingegen nur schwer zu erkennen. Eine Ursache ist das verstärkte Rauschen in der Höhenkomponente.

Ein sehr schweres Erdbeben mit der Stärke 8,7 auf der Richter Skala ereignete sich am 26. Februar 2010 an der Küste Zentralchiles. Die Koordinaten des Epizentrums werden mit $72,75^\circ$ West und $36,05^\circ$ Süd angegeben. Die offizielle Zeit war 06:34:11,9 Uhr UTC (GFZ 2010).

Im folgenden Abschnitt werden im ersten Teil die Koordinaten umliegender IGS-Stationen vor und nach dem Beben mit dem PPP-Ansatz erfasst, um anschließend eine mögliche Stationsveränderung zu berechnen. Im zweiten Teil werden von zwei IGS-Stationen, deren Beobachtungen in einem Intervall von einer Sekunde vorliegen, die Bewegungen während der Erschütterung untersucht, um eventuelle Aussagen über die Ausbreitung der Oberflächenwelle zu treffen.

Für die Bestimmung der Stationsbewegungen wurden acht Stationen (Tab. 8.2), welche in einem Abstand

von 100 km bis 1350 km um das Epizentrum verteilt sind, jeweils sieben Tage vor und nach dem Beben statisch ausgewertet. Die Beobachtungsdauer betrug jeweils 24 Stunden und das Intervall 30 Sekunden. Als Uhrkorrekturen und Orbitinformationen wurden die des ESOC AC verwendet. Die Uhrkorrekturen haben ebenfalls ein Intervall von 30 Sekunden. Aus den Koordinaten vor und nach dem Beben wurde ein Mittelwert gebildet, sodass durch Differenzbildung ein Verschiebungsvektor abgeleitet werden konnte. Tab. 8.2 gibt diese Verschiebungen zum einen in Nord und Ost sowie den Betrag längs und quer zur Ausbreitungsrichtung (bzw. zur Richtung des Epizentrums) an.

Tab. 8.2: Koordinatenänderungen von IGS-Stationen in Südamerika am 27.02.2010

| Stationsname | Distanz zum Epizentrum in km | Azimut zum Epizentrum in ° | Verschiebung in cm | | | |
|--------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|------|-------|------|
| | | | Nord | Ost | Längs | Quer |
| CONZ | 100 | 26 | -79 | -295 | 57 | 300 |
| ANTC | 167 | 327 | 16 | -83 | 31 | 78 |
| VALP | 345 | 192 | -1 | -8 | 1 | 8 |
| SANT | 360 | 206 | -15 | -26 | 2 | 30 |
| CFAG | 630 | 218 | -1 | -3 | 1 | 3 |
| COPO | 985 | 11 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| BUE2 | 1285 | 85 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| LPGS | 1330 | 87 | 0 | 1 | 1 | 0 |

Es sind sehr deutliche Stationsverschiebungen nach Westen und leichte nach Süden erkennbar. Die Bewegungen quer zur Ausbreitungsrichtung des Erdbebens sind deutlich größer als die in Ausbreitungsrichtung. Die größten Bewegungen verzeichnet die IGS-Station CONZ (Concepción) mit knapp 3 m in Richtung West und ca. 0,8 m Richtung Süd. Über die Verschiebung der Stadt Concepción um mehr als drei Meter wurde in zahlreichen Medien berichtet. Auch die IGS-Station SANT (Santiago de Chile) wurde um mehr als 30 cm verschoben. Je größer die Entfernung zum Epizentrum wird, desto kleiner werden die Verschiebungen. Bei den Stationen, die weiter als 800 km entfernt liegen, kann mit der PPP-Auswertung keine Bewegung erkannt werden.

Um die Verschiebungen zum Zeitpunkt des Bebens zu erfassen, ist eine kinematische Auswertung über den entsprechenden Zeitraum erforderlich. Ein Beobachtungsintervall von 30 Sekunden ist allerdings nicht ausreichend, um die seismische Wellenbewegung zu erkennen (Kouba 2003). Aus diesem Grund wurde die Auswertung nochmals mit den verfügbaren 1-sekündigen *highrate*-Beobachtungsdaten der Stationen CONZ und SANT am Tag des Bebens durchgeführt. Zur Erfassung der Bewegung wurden diese Beobachtungsdaten kinematisch über mehrere Stunden ausgewertet. Als präzise Ephemeriden und 30-sekündige Uhrkorrekturen wurden wiederum die Daten des ESOC AC genutzt. Die Station CONZ wurde am Tag des Erdbebens sowie einige Tage danach nicht mit in die Berechnung dieser Ephemeriden und Uhrkorrekturen einbezogen¹. Auch die Beobachtungen der Station SANT wurden nicht verwendet.

Der Empfänger der Station SANT zeichnet im Gegensatz zur Station CONZ nur GPS-Beobachtungen auf. Nach der kinematischen PPP-Auswertung wurden die Verschiebungen zu den IGS05-Sollkoordinaten vor dem Erdbeben berechnet. Die ermittelten Verschiebungen wurden anschließend in Längs- und Querichtung zur Ausbreitungsrichtung transformiert (Abb. 8.2).

¹ Analysereport des ESOC AC der Woche 1572

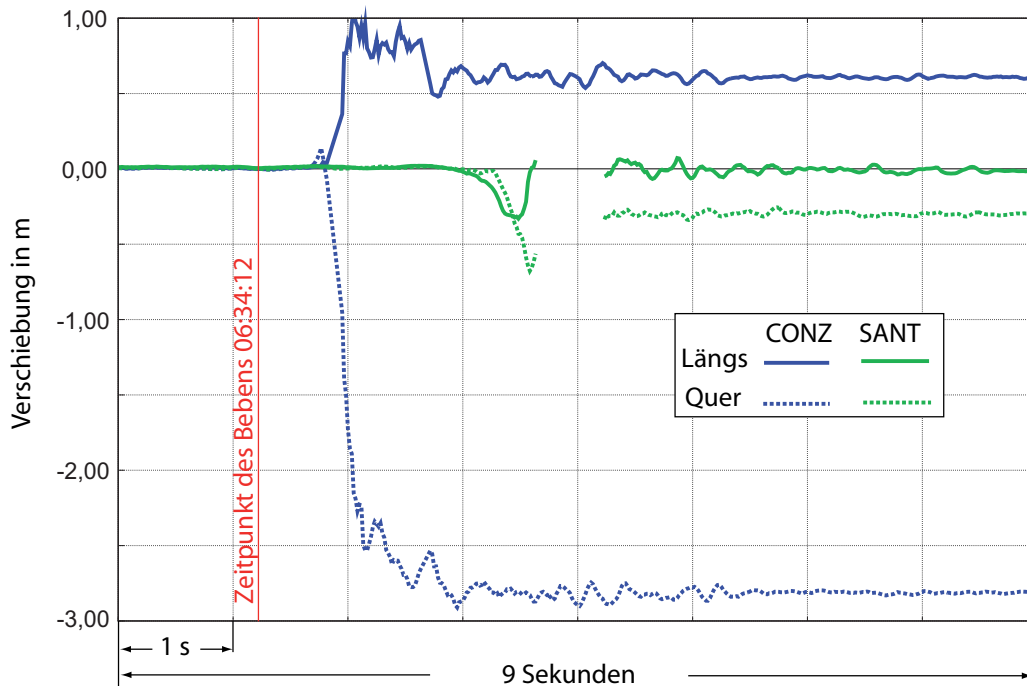


Abb. 8.2: Bewegungen der IGS-Stationen CONZ und SANT längs und quer zur Ausbreitungsrichtung des Erdbebens, 27. Februar 2010

Die Abb. 8.2 verdeutlicht, dass ca. 30 Sekunden nach dem Beben die Station CONZ und erst nach ca. 110 Sekunden die Station SANT von den seismischen Oberflächenwellen erfasst wurden. Dies entspricht einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen von ca. 3000 m/s. Nach Eintreffen der seismischen Wellen treten sehr starke Verschiebungen, besonders in Querrichtung auf. Innerhalb weniger Sekunden verschiebt sich die Station CONZ um mehr als zwei Meter quer zur Ausbreitungsrichtung. Zu erkennen sind auch die deutlichen Schwingungen in Längs- und Querrichtung. Diese Schwingungen spiegeln in etwa die Bewegung der Rayleigh- und Lovewelle wider. Leider wurden nach dem Beben für die Station SANT keine Daten aufgezeichnet, sodass wichtige Informationen über den Schwingungsverlauf der Wellen nicht vorhanden sind. Auffällig ist weiterhin, dass die Station SANT nach diesen Schwingungen keine nennenswerte Verschiebung in Längsrichtung aufweist.

Nahezu identische Ergebnisse hinsichtlich der Verschiebungsbeträge der IGS-Stationen zeigte Kouba (2010) in seiner Untersuchung zum Erdbeben in Chile. Allerdings standen zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen noch keine 1-sekündigen Beobachtungsdaten für die Station CONZ zur Verfügung. Für die Station SANT waren ebenfalls für einige Zeit nach der Erschütterung keine Daten vorhanden und war somit keine Auswertung möglich.

8.2.2 Plattentektonik

Wie gezeigt wurde, ist, sofern die Beobachtungen vollständig und in einem ausreichend dichten Intervall vorliegen, PPP eine gute Methode, um plötzliche Stationsbewegungen, z. B. hervorgerufen durch ein Erdbeben, zu erfassen. Eine andere verbreitete Anwendung ist die Auswertung von langperiodischen Stationsbewegungen aufgrund der Plattenbewegungen. Werden z. B. die 24-stündigen GNSS-Messungen

über einen längeren Zeitraum mittels einer PPP-Prozessierung statisch ausgewertet, kann der Verschiebungsvektor in der Lage mit einer Genauigkeit von weniger als einem Zentimeter berechnet werden. Auch hier ist bei einer relativen Auswertung zu beachten, dass die Referenzstation diese Bewegungen mit ausführt und somit die Verschiebung der eigentlichen Station verfälscht.

Abb. 8.3 zeigt die Verschiebungen der IGS-Station MKEA (Hawaii, USA) in Nord und Ost im Jahr 2010. Zur Bestimmung dieser Stationsbewegungen wurden im genannten Zeitraum die Positionen alle sieben

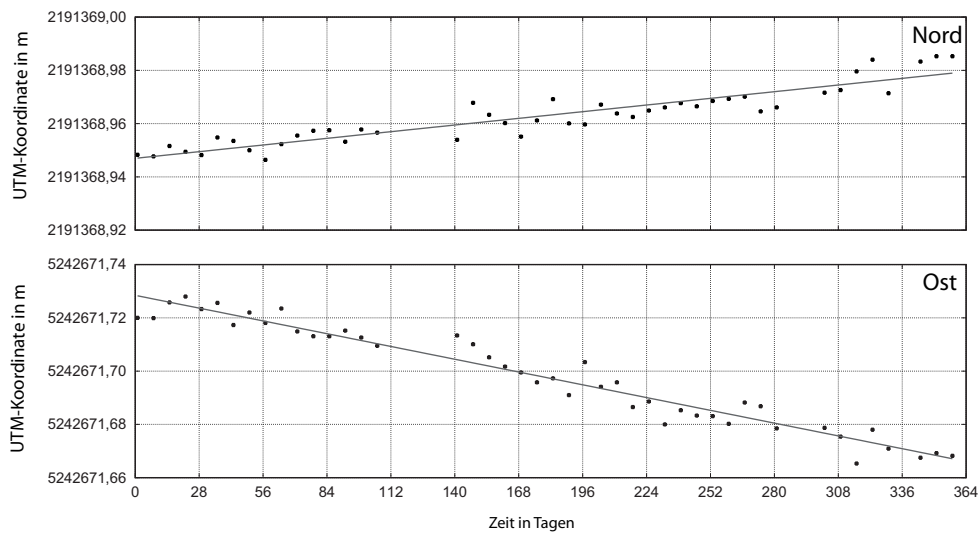


Abb. 8.3: Mit PPP-Auswertung berechnete Bewegung der IGS-Station MKEA, Jahr 2010

Tage berechnet und zur besseren Verdeutlichung für die einzelnen Positionen der Nord- und Ostkomponente eine ausgleichende Gerade berechnet. Die Nordkomponente des Verschiebungsvektors beträgt ca. 3 cm. In Ost ist eine deutliche Verschiebung von ca. 6,5 cm erkennbar. Die Abweichungen zur ausgleichenden Gerade betragen nicht mehr als einen Zentimeter.

Für neun weitere, weltweit verteilte IGS-Stationen wurden die Verschiebungsvektoren des Jahres 2010 aus den 24-stündigen GPS-Beobachtungen berechnet. In Abb. 8.4 sind die unterschiedlichen Vektoren dargestellt.

Werden diese Berechnungen für eine Vielzahl von Stationen bzw. ein ganzes Stationsnetz durchgeführt, können wertvolle Informationen zur Plattentektonik gewonnen werden.

Zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Stationsverschiebungen mit PPP wurden bisher veröffentlicht. Perez u. a. (2003) bestimmten die Koordinaten und Geschwindigkeitsvektoren von GPS-Stationen der südamerikanischen Platte. Die Wiederholgenauigkeit der Koordinaten war kleiner als 9 mm. Die Geschwindigkeiten konnten für alle Stationen mit einer Genauigkeit von weniger als 1,3 mm pro Jahr angegeben werden. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Verschiebungsvektoren verschiedener GPS-Stationen mit PPP und die anschließende Analyse der Bewegung der nordamerikanischen Kontinentalplatten wurden u. a. von Calais u. a. (2006) und Hammond und Thatcher (2005) durchgeführt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass PPP eine geeignete Technik ist, um genaue Positionsberechnungen in Regionen durchzuführen, in denen keine Referenzstationen vorhanden sind. Neben hy-

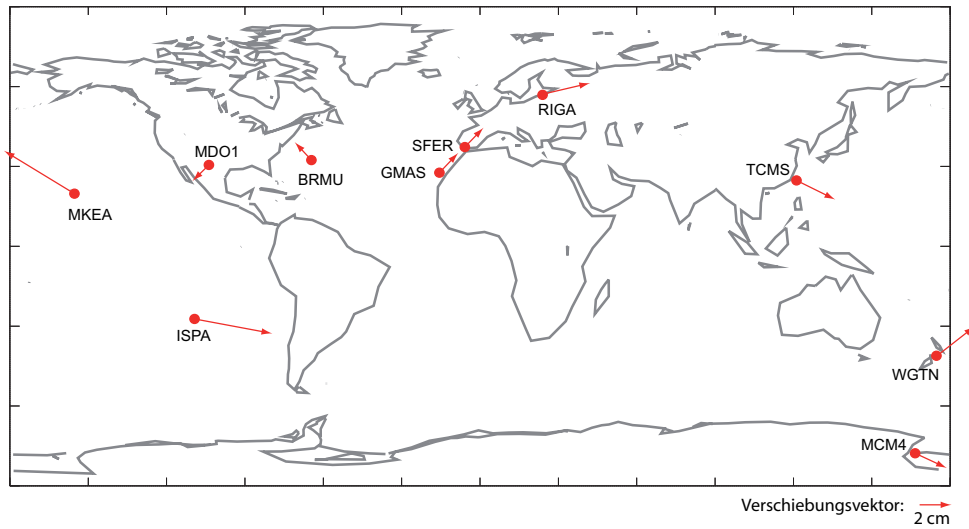


Abb. 8.4: Mit PPP-Auswertung berechnete Bewegung von IGS-Stationen durch Plattentektonik, Jahr 2010

drographischen Anwendungen können dies auch die Positionsbestimmungen von Flugzeugen oder LEO-Satelliten sein. Ebenfalls ermöglicht die PPP-Auswertung eine einfache Analyse von Stationsverschiebungen, da diese nicht durch die Bewegung der Referenzstation verfälscht werden.

9 Ausblick auf die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bei PPP

Wie die vorangegangenen Kapitel zeigten, ist bei PPP eine zentimetergenaue Positionsbestimmung möglich. Allerdings sind dafür Beobachtungszeiten von mehreren Stunden erforderlich. Ursache ist, dass die Mehrdeutigkeiten geschätzt werden. Erst wenn diese in der Ausgleichung genau genug bestimmt worden sind, erreichen die Koordinaten die entsprechende Genauigkeit. Eine Verkürzung der Konvergenzzeiten und somit ein schnelleres Erreichen einer zentimetergenauen Position ist aber möglich, wenn die Mehrdeutigkeiten ganzzahlig festgesetzt werden können. Dieses Kapitel soll einen kurzen Einblick in das Lösen der Mehrdeutigkeiten auf der Basis von doppelten und einfachen Differenzen geben.

9.1 Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei differentiellen Verfahren

Die ganzzahlige Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bei differentiellen Verfahren erfolgt meist auf der Grundlage von doppelten Differenzen. Doppelte Phasendifferenzen ergeben sich aus den Empfänger-Einfachdifferenzen zweier Satelliten. Eine Vielzahl von Messabweichungen wird bei diesem Verfahren eliminiert oder zumindest minimiert. Wenn die Mehrdeutigkeiten zuverlässig festgesetzt sind, kann bei vielen statischen Anwendungen die Messung beendet werden.

Bei einer kurzen Basislinie und relativ genauen Näherungswerten für den Basislinienvektor können die Mehrdeutigkeiten schnell und zuverlässig bestimmt werden. Eine Variante ist die geometrische Methode. Diese basiert auf der zeitlichen Veränderung der geometrischen Beziehung zwischen Empfänger und Satellit. Voraussetzung dafür ist, dass Mehrwegeeffekte, ungenaue Näherungskordinaten der Empfängerstation (Roverstation) und Messrauschen deutlich kleiner als eine halbe Wellenlänge sind. Vergrößert sich der Abstand zwischen Referenz- und Roverstation, erhöhen sich die Messabweichungen und die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten wird erschwert (Wanninger 2000, Seeber 2003).

Hilfsmittel für die Festsetzung von Mehrdeutigkeiten sind Linearkombinationen, die sich aus den Zweifrequenz-Phasenmessungen bilden lassen. Diese Linearkombinationen haben oftmals günstigere Eigenschaften als die Ursprungssignale hinsichtlich der Wellenlänge, des Einflusses der Ionosphäre und des Messrauschens. Nach Wübbena (1989) lassen sich die Linearkombinationen nach folgender Formel bilden:

$$\Phi_{n,m} = n \cdot \Phi_1 + m \cdot \Phi_2. \quad (9.1)$$

Die ganzzahligen Koeffizienten der Linearkombination werden als n und m bezeichnet. Φ_1 und Φ_2 sind die Phasenmessungen auf den zwei Frequenzen in Zyklen. Die abgeleitete Phasenbeobachtung der Line-

arkombination wird als $\Phi_{n,m}$ gekennzeichnet. In Tab. 9.1 sind die wichtigsten ganzzahligen Linearkombinationen der Trägerphasen sowie deren Merkmale dokumentiert.

Tab. 9.1: Merkmale der wichtigsten Linearkombinationen (Wübbena 1989, Wanninger 2000)

| Linearkombination | n | m | Wellenlänge in cm | ionosphärischer Einfluss auf | | Messrauschen in cm |
|-----------------------|----|-----|----------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | | Koordinaten | Mehrdeutigkeit in 1/m | |
| Originalsignal L_1 | 1 | 0 | 19,0 | 0,779 | 4,1 | 0,30 |
| Originalsignal L_2 | 0 | 1 | 24,4 | 1,283 | 5,3 | 0,39 |
| Widelane L_W | 1 | -1 | 86,2 | -1,000 | -1,2 | 1,94 |
| Narrowlane L_N | 1 | 1 | 10,7 | 1,000 | 9,3 | 0,24 |
| ionosphärenfrei L_0 | 77 | -60 | 0,6 | 0,000 | 0,0 | 0,98 |

Die ionosphärenfreie Linearkombination wird verwendet, um den Einfluss der Ionosphäre zu eliminieren (vgl. Kap. 3.4.1). Aufgrund der kurzen Wellenlänge und des verstärkten Messrauschens ist eine direkte Mehrdeutigkeitsfestsetzung mit dieser Linearkombination nicht möglich. Die Mehrdeutigkeiten der L_0 -Linearkombination können allerdings aus den Mehrdeutigkeiten zweier anderer Linearkombinationen berechnet werden.

Durch ihre große Wellenlänge ist die *Widelane*-Linearkombination (Differenzsignal aus L_1 und L_2) zur Festsetzung der Mehrdeutigkeit geeignet. Nachteile sind das sich aus der Wellenlänge ergebende hohe Messrauschen und der Einfluss der Ionosphäre auf die Koordinaten. Die Positionslösung ist daher für viele Anwendungen zu ungenau. Allerdings kann diese als sehr gute Näherungslösung für die Koordinaten verwendet werden. Wenn die Mehrdeutigkeiten gelöst worden sind, kann z. B. die *Narrowlane*-Linearkombination (Summensignal aus L_1 und L_2) für die Koordinatenberechnung genutzt werden. Bei gelösten Mehrdeutigkeiten können mit dieser Linearkombination die genauesten Koordinaten berechnet werden. Dies gilt nur für kurze Basislinien, bei denen der ionosphärische Einfluss keine Rolle spielt (Wanninger 2000, Bauer 2003).

9.2 Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei PPP

Das Lösen der Mehrdeutigkeiten der Beobachtungen von einer einzelnen Station kann nur auf der Basis von Phasendifferenzen zwischen zwei Satelliten erfolgen. Allerdings wird im Gegensatz zu doppelten Differenzen das Festsetzen der Mehrdeutigkeiten bei PPP erschwert. Die Hauptursache ist die instrumentelle Verzögerung der Code- und Phasenbeobachtungen im Empfänger und Satelliten. Weiterhin ist aufgrund der kurzen Wellenlänge der ionosphärenfreien Linearkombination eine direkte Festsetzung der Mehrdeutigkeiten mit dieser Linearkombination nicht möglich.

Im Folgenden werden einige Ansätze zur Festsetzung von Mehrdeutigkeiten beschrieben. Anschließend werden die daraus resultierenden Ergebnisse dieser Lösungsansätze bzw. die zu erwartenden Verbesserungen basierend auf einer Genauigkeitsvoranalyse dargestellt.

9.2.1 Lösungsansätze zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung

Bei der Auswertung der Phasenbeobachtungen ist ein Phasenbias sowohl im Satelliten als auch im Empfänger vorhanden. Bei einer, wie in dieser Arbeit erfolgten Schätzung der Mehrdeutigkeiten werden diese Bias direkt in die Mehrdeutigkeitsunbekannten übertragen (Banville u. a. 2008). Bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten können aufgrund dieses Bias die Mehrdeutigkeiten zwischen zwei Satelliten keine ganzzahligen Werte annehmen. Erst wenn der Phasenbias oder zumindest der Bruchanteil (engl. *fractional part*) bekannt ist, können die Mehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden. Lösungsansätze zur Bestimmung des Phasenbias werden u. a. von Ge u. a. (2008), Geng u. a. (2009) und Banville u. a. (2008) beschrieben.

Ge u. a. (2008) bestimmten den Phasenbias (*uncalibrated hardware delay*) zwischen den Satelliten für die *Widelane*- und *Narrowlane*-Linearkombination aus einem Netz von 180 IGS-Stationen. Als Beobachtungszeitraum wurden mehrere aufeinanderfolgende Tage des Jahres 2006 gewählt. Es wurde demonstriert, dass die Phasenbias zwischen zwei Satelliten nicht ganzzahlig sind. Somit können auch die Phasendifferenzen zwischen zwei Satelliten und entsprechend auch die Mehrdeutigkeiten nicht ganzzahlig werden. Der Bruchanteil der Phasenbias ist für einen Beobachtungszeitraum von mehreren Tagen für die *Widelane*-Kombination relativ stabil. Dieser Bruchanteil kann direkt aus den Code- und Phasenbeobachtungen mit einer Genauigkeit von weniger als 0,05 Zyklen geschätzt werden. Bei der *Narrowlane*-Linearkombination ändert sich der Phasenbias innerhalb weniger Stunden. Zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten sollten daher zeitabhängige Korrekturwerte für die *Narrowlane*-Mehrdeutigkeiten verwendet werden. Ein Nachteil ist allerdings, dass diese Bias in einer hohen zeitlichen Auflösung (15 min) zur Verfügung stehen müssen. Mittels des präzisen Bruchanteils des Phasenbias der beiden Linearkombinationen können die Mehrdeutigkeiten in der PPP-Prozessierung ganzzahlig gesetzt werden.

Eine Weiterentwicklung des Ansatzes von Ge u. a. (2008) zur Bestimmung des Phasenbias aus der *Widelane*- und *Narrowlane*-Linearkombination erfolgte durch Geng u. a. (2009). Der größte Unterschied liegt im Intervall des berechneten *Narrowlane*-Phasenbias eines Satellitenpaares. Ge u. a. (2008) führten aufgrund der geringen Stabilität des Phasenbias der *Narrowlane*-Linearkombination diesen in einer Auflösung von 15 Minuten ein. Geng u. a. (2008) bestimmten den Phasenbias für einen Satellitendurchlauf und somit nur zweimal an einem Tag. Diese deutliche Reduktion der Daten führt dazu, dass diese Bias auch in regionalen Netzen eingesetzt werden können.

Einen weiteren Lösungsansatz zeigen Banville u. a. (2008) zur Bestimmung des Phasenbias. Dabei wird zunächst der Phasenbias sowohl im Satelliten als auch im Empfänger kalibriert. Der Phasenbias im Empfänger kann durch einen GPS-Signal-Simulator bestimmt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass der vorhandene Codebias die Schätzung der Empfängeruhr und somit die Schätzung der Mehrdeutigkeit negativ beeinflusst. Zur Bestimmung des Phasenbias im Satelliten wird die Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Melbourne 1985, Wübbena 1985) verwendet. Diese Linearkombination bildet sich aus der Differenz der *Widelane*-Phasenkombination und der *Narrowlane*-Codekombination und nutzt somit die Vorteile der großen Wellenlänge der Trägerphasen-Linearkombination und des geringen Rauschens der Code-Linearkombination.

Die Bedeutung des Codebias und dessen zeitliche Variationen bei der ganzzahligen Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bei PPP werden von Laurichesse und Mercier (2007), Collins (2008), Collins u. a. (2008)

und Shi und Gao (2010) präsentiert. Im Beobachtungsmodell werden deswegen getrennte Satellitenuhrparameter für die Code- und Phasendaten eingeführt.

Anhand der Residuen der P1-C1 ionosphärenfreien Linearkombination wurde die Existenz eines sich zeitlich verändernden Codebias bestätigt. Dieser Codebias muss ebenso wie der Phasenbias bei der ganzzahligen Bestimmung der Mehrdeutigkeiten beachtet werden. Collins (2008) präsentierte ein sogenanntes *decoupled clock*-Modell. Das heißt, bei der gemeinsamen Auswertung der Code- und Phasendaten werden für jede Beobachtung zu einem Satelliten unterschiedliche Uhrparameter geschätzt. Im Detail bedeutet dies, dass ein Uhrparameter für die Phasendaten, ein Uhrparameter für die Codedaten und ein Uhrbias für die *Widelane*-Linearkombination als zusätzliche Unbekannte geschätzt werden. Durch diese Methode wird der Codebias bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung der Phasendaten eliminiert, sozusagen entkoppelt. Aufgrund der kurzen Wellenlänge der ionosphärenfreien Linearkombination ist diese nicht für die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten geeignet. Deswegen wird auch in dieser Variante die Melbourne-Wübbena-Linearkombination verwendet.

Die umfangreichen Korrekturen, die bei dem *decoupled clock*-Modell notwendig sind, können nur durch ein umfangreiches Referenzstationsnetz zur Verfügung gestellt werden. Die Standardprodukte der Uhrkorrekturen des IGS sind dafür nicht geeignet, da diese einen konstanten Codebias und keinen Bruchanteil des Phasenbias enthalten. Collins u. a. (2008) nutzen ein umfangreiches Referenznetz von IGS-Stationen, um die ganzzahligen Phasenmehrdeutigkeiten bei PPP zu bestimmen. Die Prozessierung der Daten lieferte die Standarduhrparameter sowie die Uhrparameter des *decoupled clock*-Modells. Bei der anschließenden PPP-Auswertung wurden neben den unbekanntem Stationskoordinaten und der troposphärischen Verzögerung im Zenit die Abweichungen der Empfängeruhr hinsichtlich Phase, Code und *Widelane*-Linearkombination geschätzt. Die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten erfolgte mit der *Least-square ambiguity decorrelation adjustment* (LAMBDA)-Technik (Teunissen 1995).

Auch bei Laurichesse und Mercier (2007) werden getrennte Uhrparameter für die Code- und Phasenbeobachtungen verwendet. Zuerst werden die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten für die Melbourne-Wübbena-Linearkombination aus den Phasen- und Codedaten eines Referenzstationsnetzes bestimmt. Mit den ganzzahligen Uhrkorrekturen der Phase können anschließend die Mehrdeutigkeiten für die erste Frequenz festgesetzt werden.

Die bisherigen Ansätze demonstrieren das Hauptproblem bei der ganzzahligen Bestimmung der Mehrdeutigkeiten, die instrumentellen Verzögerungen der Code- und Phasenbeobachtungen. Auch wurde deutlich, dass zur Bestimmung dieser Bias immer die Daten eines Referenzstationsnetzes erforderlich sind.

Bisher wurden nur die Mehrdeutigkeitsfestsetzungen für die GPS-Beobachtungen untersucht. Bei GLO-NASS müssen zusätzlich die vielen unterschiedlichen Signalfrequenzen berücksichtigt werden. Außerdem ist das erhöhte Rauschen der GLONASS-Codedaten zu beachten.

9.2.2 Verbesserungen für PPP bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung

Die aufwendige Festsetzung der Mehrdeutigkeiten hat positive Auswirkungen auf die PPP-Prozessierung. Der größte Vorteil ist die deutliche Verkürzung der Konvergenzzeit. Die größten Verbesserungen werden dabei in der Ostkomponente erreicht. Geng u. a. (2009) demonstrierten anhand von 1-stündigen GPS-

Beobachtungen die erreichten Genauigkeitssteigerungen. Die RMS-Werte der *float*-Lösung mit 3,8 cm, 1,5 cm und 2,8 cm in Ost, Nord und Höhe wurden auf 0,5 cm, 0,5 cm und 1,4 cm verbessert. Bei den einzelnen Ergebnissen der verschiedenen Stationen ist bei der *float*-Lösung in der Ostkomponente wiederum eine deutliche Breitenabhängigkeit erkennbar. Durch die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten wird diese beseitigt.

Collins u. a. (2008) präsentierten ebenso die Genauigkeitssteigerungen von PPP-Auswertungen basierend auf einer Beobachtungsdauer von einer Stunde. In der Lage wurde bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten nach ca. 30 Minuten das Zentimeterniveau erreicht. Auch in der Höhe sind geringe Verbesserungen erreicht worden. Bei 24-stündigen Beobachtungen werden die hohen Genauigkeiten der *float*-Lösung nur gering verbessert. Allerdings werden auch hier die größten Verbesserungen in der Ostkomponente erzielt.

Abschließend werden die Standardabweichungen aus der Ausgleichung bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bestimmt (vgl. Kap. 4.2). Dafür waren auch diesmal keine Beobachtungsdaten erforderlich. Im Gegensatz zu Kap. 4.2 werden die Mehrdeutigkeitsparameter nicht in den Ausgleichungsprozess mit eingeführt, sondern als bekannt vorausgesetzt. In Abb. 9.1 sind die mittleren Standardabweichungen, berechnet aus den einzelnen Varianzen der Kofaktormatrix, für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente in Abhängigkeit der geographischen Breite dargestellt.

Anhand dieser Standardabweichungen bestätigt sich, dass bei festgesetzten Mehrdeutigkeiten das hohe Genauigkeitsniveau der PPP-Lösung schneller erreicht wird. Ein Vergleich der Standardabweichungen der geschätzten und festgesetzten Mehrdeutigkeiten (Abb. 4.3 und Abb. 9.1) bei einer Beobachtungsdauer von einer Stunde zeigt die deutlichen Verbesserungen, vor allem in der Ostkomponente. Diese erreicht das hohe Niveau der Nordkomponente oder ist in den mittleren Breiten sogar etwas besser. Die starke Breitenabhängigkeit der Ostkomponente in Abb. 4.3 wird deutlich reduziert. Die Standardabweichungen der Höhe sind auch bei dieser Lösungsvariante am schlechtesten. Nach 24 Stunden Beobachtungszeit erreichen die Standardabweichungen der *float*- und *fixed*-Lösung das gleiche hohe Genauigkeitsniveau.

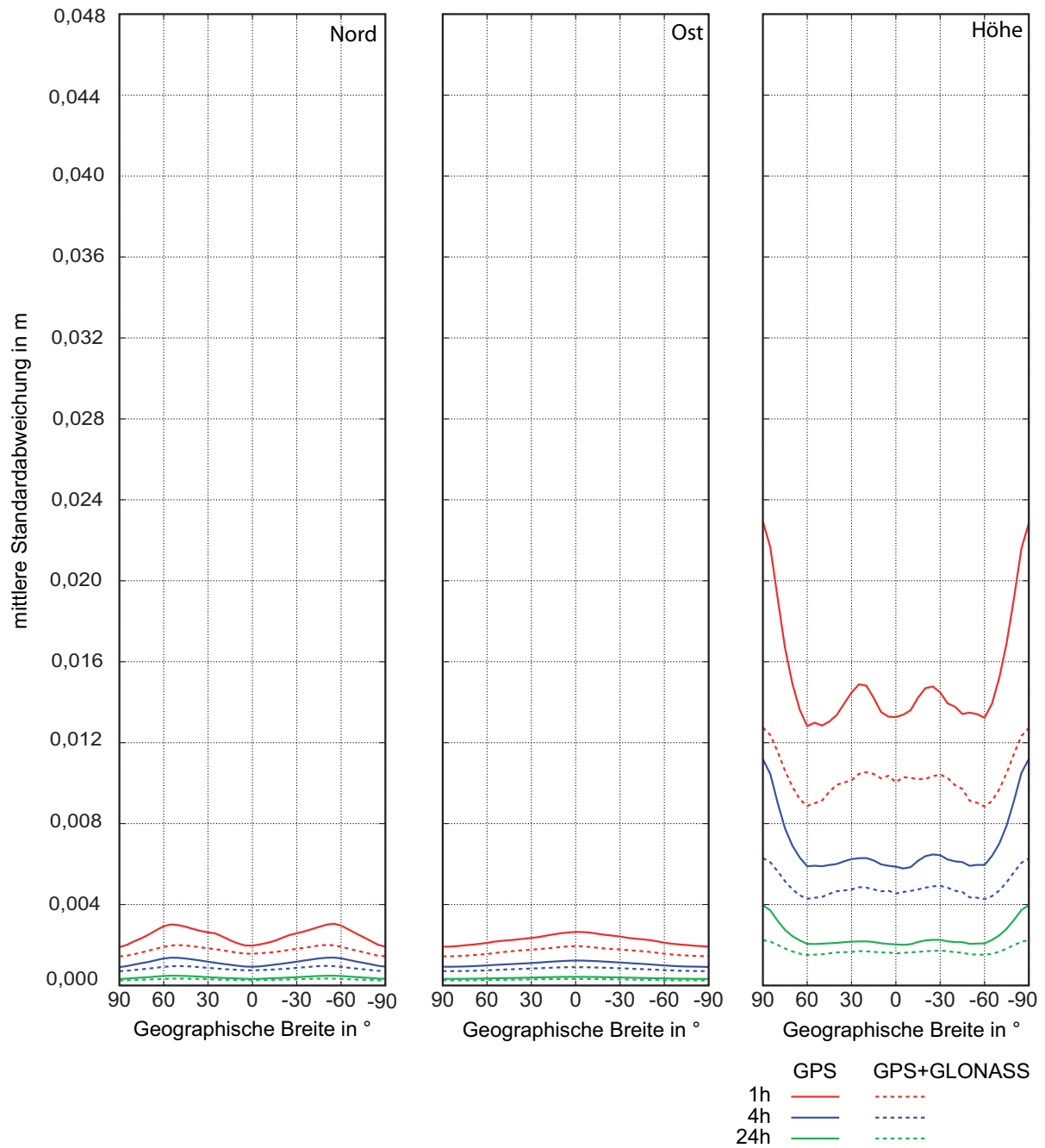


Abb. 9.1: Mittlere Standardabweichungen (Nord, Ost, Höhe) einer *fixed*-Lösung aus der Kofaktormatrix von GPS- und GPS+GLONASS-Beobachtungen in Abhängigkeit von der Breite

10 Zusammenfassung

Das Ziel dieser vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Umsetzung von Algorithmen sowie die umfangreiche Genauigkeitsanalyse von GNSS-Auswertungen nach dem Prinzip des *Precise Point Positioning* (PPP). Die zahlreichen Auswertungen erfolgten sowohl statisch als auch kinematisch. Spezielle Schwerpunkte der Arbeit waren Untersuchungen zum Einfluss der zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen, der Satellitenuhrkorrekturen sowie der Troposphärenmodellierung auf die Genauigkeit einer PPP-Lösung.

Die notwendigen theoretischen Grundlagen umfassen zunächst die Darstellung verschiedener Referenz- und Koordinatensysteme. Bei der Beschreibung der GNSS-Systeme steht neben GPS besonders die Modernisierung von GLONASS und die sich daraus ergebenden Vorteile einer gemeinsamen Nutzung im Vordergrund. Die folgenden Ausführungen zu den absoluten und relativen Auswertverfahren von Code- und Phasenbeobachtungen sowie deren Genauigkeitsbegrenzungen sind für die Einordnung der PPP-Prozessierung hinsichtlich zusätzlicher Korrekturen und erreichbarer Genauigkeiten erforderlich.

Voraussetzungen für eine möglichst genaue PPP-Auswertung sind präzise Uhr- und Orbitinformationen. Die Orbitkoordinaten für die GPS- und GLONASS-Satelliten werden vom *International GNSS Service* (IGS) und dessen *Analytical Centers* (AC) in einem Datenintervall von 15 Minuten angeboten. Die für PPP entscheidenden Uhrkorrekturen liegen, in Abhängigkeit von der zeitlichen Verfügbarkeit, in einem Intervall von 5 Minuten oder 30 Sekunden vor.

Aufgrund dessen, dass im Gegensatz zu relativen Auswertungen nur die Beobachtungen einer Station in der Auswertung verwendet werden, sind bei PPP zahlreiche Korrekturen notwendig, die bei herkömmlichen Auswertverfahren z. B. durch Doppeldifferenzbildung eliminiert werden. Der Satellitenantennenoffset und die Erdzeiten haben bei einer Nichtberücksichtigung den größten Einfluss auf die Genauigkeit einer Positionsbestimmung. Die Messabweichungen, verursacht durch die ionosphärische Laufzeitverzögerung, werden durch die ionosphärenfreie Linearkombination erfasst und eliminiert. Der Einfluss der Troposphäre auf die Beobachtungen kann hingegen nur durch aufwendige Modelle minimiert werden. Die Ausführungen zur Ausgleichung von statischen und kinematischen Code- und Phasenbeobachtungen einer PPP-Prozessierung beinhalten spezielle Aspekte zur Parametereliminierung und sequentiellen Ausgleichung.

Eine Genauigkeitsvoranalyse diente dem Ziel, die Gewichtungen der einzelnen Beobachtungen für den Ausgleichungsprozess festzulegen. Diese wurden aus Code- und Phasenresiduen einer Ausgleichung nach dem Prinzip des PPP und den sich daraus ergebenden a priori Standardabweichungen bestimmt. Anhand dieser Standardabweichungen ist eine Gewichtung in Abhängigkeit von der Beobachtungsgrößen und der Elevation erforderlich.

Eine Voruntersuchung der Standardabweichungen der Kovarianzmatrix der Koordinatenunbekannten zeigt eine starke Breitenabhängigkeit der Genauigkeiten der Ost- und Höhenkomponente. Bei einer Beobach-

tungsdauer von einer Stunde ist daher zu erwarten, dass diese Koordinaten an den Polregionen ein höheres Genauigkeitsniveau erreichen.

Für die umfangreiche Genauigkeitsuntersuchung wurden die Beobachtungen von zehn europäischen IGS-Stationen statisch und kinematisch bei unterschiedlicher Beobachtungsdauer ausgewertet. Aus der Gegenüberstellung der PPP-Ergebnisse mit Sollkoordinaten ergaben sich die empirischen Standardabweichungen. Die statische Auswertung von 24-stündigen Beobachtungen demonstriert das hohe Genauigkeitspotential einer PPP-Auswertung. Mit Standardabweichungen von weniger als einem Zentimeter in den Komponenten Nord, Ost und Höhe wird nahezu das Niveau einer relativen GNSS-Auswertung erreicht.

Der Vorteil der zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen wird vor allem bei Beobachtungszeiten von einer Stunde deutlich. Insbesondere bei einer kinematischen Auswertung verbessert sich die Genauigkeit der kombinierten GPS- und GLONASS-Auswertung gegenüber der alleinigen GPS-Auswertung um nahezu 50%. Die empirischen Standardabweichungen von 1-stündigen Beobachtungen dieser europäischen Stationen erreichen bei der Nutzung der Beobachtungsdaten beider Systeme sowohl bei statischer als auch kinematischer Auswertung Beträge von wenigen Zentimetern in Lage und Höhe.

Die Auswertungen von GPS-Beobachtungen von über 80 weltweit verteilten IGS-Stationen bestätigen die in der Voruntersuchung erhaltene Breitenabhängigkeit der Genauigkeit der Ost- und Höhenkoordinate. Die Standardabweichungen für Stationen nahe den Polregionen erreichen das höchste Genauigkeitsniveau.

Die präzisen Uhrkorrekturen haben einen großen Einfluss auf die PPP-Auswertung von GNSS-Beobachtungen. Die Allan Varianz, als Kenngröße für die Stabilität der Atomuhren der GPS- und GLONASS-Satelliten, wurde für Intervalle von 1 bis 1000 Sekunden berechnet. In diesem untersuchten Kurzzeitbereich gibt es Unterschiede in der Stabilität der einzelnen Uhren. Bei den GPS-Satelliten sind die Allan Varianzen der Rubidiumfrequenzstandards deutlich kleiner als die der Cäsiumfrequenzstandards. Die Stabilität der Atomuhren der GLONASS-Satelliten ist vom Alter des Satelliten abhängig.

Aufgrund der Instabilitäten der Satellitenuhren treten bei einer mathematischen Interpolation zwischen den Stützpunkten der gegebenen Uhrkorrekturen Interpolationsabweichungen in Abhängigkeit des Intervalls und der Uhrstabilität auf. Damit diese Abweichungen möglichst gering ausfallen, sind Uhrinformationen in einem Intervall von mindestens 30 Sekunden notwendig. Liegen diese nicht im erforderlichen Datenintervall vor, kann mit einer sogenannten Trägerphaseninterpolation eine Verdichtung vorgenommen werden. Dafür sind Phasenresiduen von Referenzstationen erforderlich. Die dringende Notwendigkeit von Uhrkorrekturen in einem Intervall von 30 Sekunden wird bei den ermittelten Positionsgenauigkeiten einer kinematischen Auswertung ersichtlich. Bei einer Verwendung von Uhrkorrekturen in einem Intervall von 5 Minuten werden die Standardabweichungen, die sich aus dem Vergleich zu Sollkoordinaten ergeben, in den Komponenten Nord, Ost und Höhe um mehr als das Doppelte vergrößert. Weiterhin verbessern Uhrkorrekturen in einem Stützpunktabstand von 30 Sekunden deutlich das Konvergenzverhalten von statischen und kinematischen Auswertungen.

Die Minimierung der Messabweichung aufgrund der troposphärischen Refraktion erfolgt über eine aufwendige Modellierung. Dazu sind für den hydrostatischen und feuchten Anteil die Laufzeitverzögerungen im Zenit zu berechnen. Der hydrostatische Betrag der Zenitverzögerung kann relativ leicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. Schwieriger ist die Schätzung des feuchten Anteils. Aus diesem

Grund ist es bei PPP empfehlenswert, diesen im Ausgleichsprozess als Unbekannte zu bestimmen. Zur Umrechnung der hydrostatischen und feuchten Laufzeitverzögerungen im Zenit auf die Verzögerung für die jeweiligen Elevationen werden Mappingfunktionen (Projektionsfunktionen) benötigt. In dieser Arbeit wurden die Funktionswerte der Niell Mapping Funktion (NMF), der Globalen Mapping Funktion (GMF) und der Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1) für den hydrostatischen und feuchten Anteil für verschiedene Stationen berechnet. Es bestätigen sich die bekannten Mängel der hydrostatischen NMF in den Regionen Ostasiens sowie auf der Südhalbkugel. Allerdings haben diese Mängel erst bei einer Elevationsmaske von 5° Auswirkungen auf die Höhengenaugkeit. Bei der VMF1 werden unter Verwendung von aktuellen Wetterdaten auch die Zenitverzögerungen für den feuchten Anteil angegeben und dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Daher besteht die Möglichkeit, die komplette troposphärische Laufzeitverzögerung zu berechnen, sodass in der Ausgleichung auf eine Schätzung der Restabweichung verzichtet werden kann. Aufgrund der größeren Standardabweichungen der Höhenkoordinate gegenüber der Standardmodellierung ist die Methode auch bei kurzen Beobachtungszeiten nicht zu empfehlen.

Der Vorteil von PPP, dass keine direkten Beobachtungen von regionalen Referenzstationen notwendig sind, kommt insbesondere zum Tragen, wenn aufgrund oft großer Entfernungen zu Referenzstationen relative Auswerteverfahren für diese Anwendungen ungeeignet sind. Aus diesem Grund sind besonders hydrographische Anwendungen auf hoher See ein idealer Einsatzbereich für dieses Auswerteverfahren. Hier sind im Allgemeinen keine Abschattungen vorhanden und somit können auch kaum Signalunterbrechungen, die zu Cycle Slips führen, auftreten. Die Analyse der kinematischen PPP-Auswertung der GNSS-Messungen auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff "Komet" auf der Ostsee demonstriert, dass in der Lage eine zentimetergenaue Positionsbestimmung möglich ist. Die Standardabweichungen in der Höhe betragen ca. 4 cm, wenn GLONASS-Beobachtungen mit genutzt werden.

Bei der Erfassung von Koordinatenänderungen mittels relativer Auswertung treten zwei Probleme auf. Bei nahe gelegenen Referenzstationen kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich deren Koordinaten ebenfalls ändern. Bei der Nutzung weiter entfernter Stationen sinkt die Koordinatengenaugkeit. Daher bietet es sich an, zur Erfassung von z. B. geodynamischen Stationsbewegungen die Auswertemethode des PPP zu verwenden. Damit ist eine einfache Analyse von Stationsverschiebungen möglich. Zwei Beispiele präsentieren die berechneten Koordinatenänderungen von IGS-Stationen aufgrund eines Erdbebens sowie der Plattentektonik.

Mit PPP sind, wie die Arbeit anhand umfangreicher Untersuchungen zeigte, Genauigkeiten im Bereich einer relativen Positionsbestimmung möglich. Voraussetzung ist, dass lange Beobachtungszeiten vorliegen, um die Mehrdeutigkeiten in der Ausgleichung genügend genau schätzen zu können.

Gelingt es darüber hinaus, die Mehrdeutigkeiten bei PPP zuverlässig festzusetzen, sind deutliche Verbesserungen in der Konvergenzzeit zu erwarten. Problematisch bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung von PPP sind derzeit noch die instrumentell bedingten Verzögerungen der Code- und Phasendaten.

Literaturverzeichnis

- Allan, D. W. (1987): *Time and frequency (Time-Domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. UFFC-34. No 6.
- Allan, D. W., Ashby, N. und Hodge, C. C. (1997): *The science of timekeeping / Hewlett Packard Application Note 1289*.
- Allan, D. W. und Barnes, J. A. (1981): *A modified Allan Variance with increased oscillator characterization ability*. Proceedings 35th Annual Frequency Control Symposium, Seite 470–474.
- Allan, D. W., Weiss, M. A. und Jespersen, J. L. (1991): *A frequency-domain view of time-domain characterization of clocks and time and frequency distribution systems*. Forty-Fifth annual symposium on frequency control, Seite 667–678.
- Altamimi, Z., Collilieux, X. und Métivier, L. (2011): *ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame*. Journal of Geodesy, 85, Seite 457–473.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., L. J., Garayt, B. und Boucher, C. (2007): *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on the time series of station position and Earth Orientation Parameters*. Journal of Geophysical Research, 112(B09401).
- Arias, E. F., Charlot, P., Feissel, M. und Lestarde, J. F. (1995): *The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, IERS*. Astronomy and Astrophysics, 303, Seite 604–608.
- Banville, S., Santerre, R., Cocard, M. und Langley, R. B. (2008): *Satellite and receiver phase bias calibration for undifferenced ambiguity resolution*. Proc. ION NTM 2008, Seite 711–719.
- Bartsch, H. J. (2001): *Taschenbuch Mathematischer Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig, 19. Auflage.
- Bauer, M. (2003): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 5. Auflage.
- Becker, M. (2009): *Status und Perspektiven der Modernisierung von GPS und GLONASS*. In: *GNSS 2009: Systeme, Dienste und Anwendungen*. Schriftenreihe des DVW Band, 57, Seite 3–20.
- Berckhemer, H. (1997): *Grundlagen der Geophysik*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2. Auflage.
- Beyerle, G. (2009): *Carrier phase wind up in GPS-reflectometry*. GPS Solutions, 13, Seite 1991–1998.
- Bisnath, S. und Gao, Y. (2009): *Precise Point Positioning: a powerful technique with a promising future*. GPS World, Seite 43–53.

- Bock, H., Dach, R., Jäggi, A. und Beutler, G. (2009): *High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz applications*. Journal of Geodesy, 83, Seite 1083–1094.
- Böder, V. (2010): *Applications for a hydrographic multi sensor system on lakes and rivers*. FIG Congress 2010. http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts02i%5Cts02i_boeder_3962.pdf.
- Boehm, J., Kouba, J. und Schuh, H. (2008): *Forecast Vienna Mapping Functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations*. Journal of Geodesy, 83, Seite 397–401.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P. und Schuh, H. (2006a): *The Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data*. Geophysical Research Letters, 33(L07304).
- Boehm, J. und Schuh, H. (2004): *Vienna Mapping Functions in VLBI analyses*. Geophysical Research Letters, 31(L01603).
- Boehm, J., Werl, B. und Schuh, H. (2006b): *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*. Journal of Geophysical Research, 111(B02406).
- Cai, C. (2009): *Precise Point Positioning using dual-frequency GPS- and GLONASS measurements*. Dissertation, University of Calgary.
- Cai, C. und Gao, Y. (2007): *Performance analysis of Precise Point Positioning based on combined GPS and GLONASS*. Proc. ION GNSS 2007, Seite 858–865.
- Calais, E., Han, J. Y., DeMets, C. und Nocquet, J. M. (2006): *Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements*. Journal of Geophysical Research, 111(B06402).
- Collins, P. (2008): *Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities*. Proc. ION NTM 2008, Seite 720–732.
- Collins, P., Lahaye, F., Héroux, P. und Bisnath, S. (2008): *Precise Point Positioning with ambiguity resolution using the decoupled clock model*. Proc. ION GNSS 2008, Seite 1315–1322.
- Dach, R., Schmid, R., Schmitz, M., Thaller, D., Schaer, S., Lutz, S., Steigenberger, P., Wübbena, G. und Beutler, G. (2010): *Improved antenna phase center models for GLONASS*. GPS Solutions, 15, Seite 49–65.
- Dow, J. M., Neilan, R. E. und Rizos, C. (2009): *The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems*. Journal of Geodesy, 83, Seite 191–198.
- ESA (2009): *NAPEOS Mathematical Models and Algorithms*. ESA European Space Agency, Directorate of Operations and Infrastructure.
- Feissel, M. und Mignard, F. (1998): *The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences*. Astronomy and Astrophysics, 331, Seite 33–36.
- Feng, Y. und Zheng, Y. (2005): *Efficient interpolation to GPS orbits for precise wide area applications*. GPS Solutions, 9, Seite 273–282.

- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C. und Liu, J. (2008): *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*. Journal of Geodesy, 82, Seite 389–399.
- Geng, M., Teferle, F. N., Shi, C., Meng, X., Dodson, A. H. und Liu, J. (2009): *Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data*. GPS Solutions, 13, Seite 263–270.
- GFZ (2010): *GeoForschungsZentrum Potsdam - earthquake bulletin*. <http://geofon.gfz-potsdam.de/db/eqpage.php?id=gfz2010eaoy>.
- Giese, M., Kaczkowski, J., Lange, A., Stiegert, C., Wiegratz, J., Zakrzewski, P. und Wanninger, L. (2010): *Berechnungsdienste für Precise Point Positioning (PPP)*. In: *GNSS 2010 Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert*. Schriftenreihe des DVW, 63, Seite 133–142.
- Granström, C. und Johansson, J. (2007): *Site-Dependent effects in high-accuracy applications of GNSS*. EUREF Meeting 2007.
- Gruber, B. (2010): *GPS program update to ION GNSS 2010*. Proc. ION GNSS 2010, Seite 590–608.
- Hammond, W. C. und Thatcher, W. (2005): *Northwest basin and range tectonic deformation observed with the Global Positioning System, 1999-2003*. Journal of Geophysical Research, 110.
- Hauschild, A. (2010): *Precise GNSS clock-estimation for real-time navigation and Precise Point Positioning*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Heßelbarth, A. (2009): *GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP)*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 134, Seite 278–286.
- Heßelbarth, A. und Wanninger, L. (2008): *Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effect on Precise Point Positioning*. Proc. ION GNSS 2008, Seite 1855–1863.
- Herring, T. A. (1992): *Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data*. Symposium on refraction of transatmospheric signals in geodesy, 36, Seite 157–164.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und Wasle, E. (2008): *GNSS Global Navigation Satellite Systems*. Springer-Verlag Wien, New York.
- Héroux, P., Cassy, M. und Gallace, J. (1993): *Canadian active control system data acquisition and validation*. Proceedings of the 1993 IGS Work Shop, Seite 49–58.
- Héroux, P. und Kouba, J. (1995): *GPS Precise Point Positioning with a difference*. Geomatica '95, Ottawa, Ontario.
- IGS (2008): *International GNSS Service, Strategic Plan 2008-2012*. IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory.
- IGS (2010): <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- Kouba, J. (2003): *Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS*. Stud. Geophys. Geod, 47, Seite 741–755.

- Kouba, J. (2008): *Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)*. Journal of Geodesy, 82, Seite 193–205.
- Kouba, J. (2009): *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kouba, J. (2010): *IGS Observations during the February 27, 2010 M 8.8 Chilean earthquake*. <http://ftp.igs.org/igsceb/resource/pubs/ChileQk2010.pdf>.
- Kouba, J. und Héroux, P. (2001): *GPS Precise Point Positioning using IGS orbit products*. GPS Solutions, 5, Seite 12–28.
- Kouba, J. und Springer, T. (2001): *New IGS station and satellite clock combination*. GPS Solutions, 4, Seite 31–36.
- Kreikenbohm, P. (2008): *Interpolation von GNSS-Satellitenuhrkorrekturen für kinematisches Precise Point Positioning (PPP)*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- Laurichesse, D. und Mercier, F. (2007): *Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP*. Proc. ION GNSS 2007, Seite 839–848.
- Leandro, R. F. (2009): *Precise Point Positioning with GPS - A new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis*. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Technical Report No. 267.
- Leandro, R. F., Langley, R. B. und Santos, M. C. (2007a): *Estimation of P2-C2 biases by means of Precise Point Positioning*. Proceedings of the ION 63rd Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, Seite 225–231.
- Leandro, R. F., Santos, M. C. und Langley, R. B. (2007b): *GAPS: The GPS analysis and positioning software - A brief overview*. Proc. ION GNSS 2007, Seite 1807–1811.
- Leick, A. (2004): *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, Inc., 3. Auflage.
- Li, X., Zhang, X. und Guo, F. (2009): *Study on Precise Point Positioning based on combined GPS and GLONASS*. Proc. ION GNSS 2009, Seite 2449–2459.
- Maeda, H. (2010): *QZSS The Japanese Quasi-Zenith Satellite System: Program updates and current status*. Proc. ION GNSS 2010, Seite 660–708.
- Mallette, L. A. und White, J. (2007): *An introduction to satellite based atomic frequency standards*. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4526366&userType=inst>.
- Melbourne, W. G. (1985): *The case for ranging in GPS based geodetic systems*. Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System, Seite 373–386.
- Montenbruck, O. (2001): *Grundlagen der Ephemeridenberechnung*. Sterne und Weltraum, Heidelberg, 6. Auflage.
- Miréault, Y., Tétreault, P., Lahaye, F., Héroux, P. und Kouba, J. (2008): *Online Precise Point Positioning a new, timely service from Natural Resources Canada*. GPS World, Seite 59–64.

- Niell, A. E. (1996): *Global Mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*. Journal of Geophysical Research, 101, Seite 3227–3246.
- Niell, A. E. (2001): *Preliminary evaluation of atmospheric mapping function based on numerical weather models*. Phys. Chem. Earth, 26, Seite 475–480.
- Niemeier, W. (2008): *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2. Auflage.
- Perez, J. A. S., Monico, J. F. G. und Chaves, J. C. (2003): *Velocity field estimation using GPS Precise Point Positioning: The South American plate case*. Journal of Global Positioning Systems., 2, Seite 90–99.
- Petit, G. und Luzum, B. (2010): *IERS Conventions 2010*. IERS Technical Note No. 36. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Píriz, R., Calle, D., Mozo, A., Navarro, P., Rodríguez, D. und Tobías, G. (2009): *Orbits and clocks for GLONASS Precise Point Positioning*. Proc. ION GNSS 2009, Seite 2415–2424.
- Píriz, R., Mozo, A., Navarro, P. und Rodríguez, D. (2008): *magicGNSS: Precise GNSS products out of the box*. Proc. ION GNSS 2008, Seite 1241–1242.
- Ray, J. (2000): *[IGS-Mail-2744]: new pseudorange bias convention*. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2000/msg00084.html>.
- Ray, J. und Gurtner, W. (2006): *RINEX extensions to handle clock information*. <http://geofon.gfz-potsdam.de/db/eqpage.php?id=gfz2010eaoy>.
- Ray, J. und Senior, K. (2003): *IGS/BIPM pilot project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and timescale information*. Institute of Physics Publishing Metrologia 40, 40, Seite 270–288.
- Rebischung, P. (2011): *[IGS-Mail 6354] Upcoming switch to IGS08/igs08.atx*. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006347.html>.
- Reußner, N. (2009): *Untersuchungen zur Detektierung und Lokalisierung von Phasemehrwegeinflüssen auf GNSS-Referenzstationen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- Revnivkykh, S. (2010): *GLONASS status and progress*. Proc. ION GNSS 2010, Seite 609–633.
- Rothacher, M. und Schmid, R. (2010): *ANTEX: The Antenna Exchange Format Version 1.4*. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/antex14.txt>.
- Saastamoinen, J. (1973): *Contributions to the theory of atmospheric refraction, Part II*. Bulletin Géodésique, 107, Seite 13–34.
- Santerre, R. und Lavoie, M. (1991): *Propagation of GPS errors or ambiguities-fixed and ambiguities-free solutions*. IAG Scientific Meeting of Section I/IV: "GPS Procedure and Application" IUGG XX General Assembly, Vienna, Austria.
- Schaer, S. und Dach, R. (2010): *Biases in GNSS analysis*. IGS Workshop 2010, New Castle, England.
- Scherneck, H. G. (1991): *A parameterized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements*. Geophysical Journal International, 106, Seite 677–694.

- Schmid, R. und Rothacher, M. (2002): *Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites*. Journal of Geodesy, 77, Seite 440–446.
- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M. und Rothacher, M. (2007): *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas*. Journal of Geodesy, 81, Seite 781–798.
- Schödlbauer, A. (2000): *Geodätische Astronomie*. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Schüler, T. (2001): *On ground based GPS tropospheric delay estimation*. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München, Heft 73.
- Schüler, T. (2009): *Entwicklungsstand GALILEO im Kontext des "GNSS Evolution Programme"*. In: *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen*. Schriftenreihe des DVW, 57, Seite 21–37.
- Seeber, G. (2003): *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Berlin, New York, 2. Auflage.
- Seitz, M. (2009): *Kombination geodätischer Raumberechnungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems*. Deutsche Geodätische Kommission in der Reihe C, Heft 630.
- Senior, K., Koppang, P. und Ray, J. (2003): *Developing an IGS Time Scale*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 50, Seite 585–593.
- Senior, K., Ray, R. J. und Beard, R. L. (2008): *Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks*. GPS Solutions, 12, Seite 211–225.
- Shi, J. und Gao, Y. (2010): *Analysis of the integer property of ambiguity and characteristics of code and phase clocks in PPP using a decoupled clock model*. Proc. ION GNSS 2010, Seite 2553–2564.
- Spofford, P. und Remondi, B. W. (2006): *The National Geodetic Survey Standard GPS Format SP3*. http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3_docu.txt.
- Springer, T. und Dach, R. (2010): *GPS, GLONASS, and more - Multiple constellation processing in the International GNSS Services*. GPS World, Seite 48–58.
- Teunissen, P. J. G. (1995): *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation*. Journal of Geodesy, 70, Seite 65–82.
- Torge, W. (2002): *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 3. Auflage.
- Urlichich, Y., Subbotin, V., Stupak, G., Dvorkin, V., Povalyaev, A. und Karutin, S. (2010): *GLONASS developing strategy*. Proc. ION GNSS 2010, Seite 1566–1571.
- Wanninger, L. (2000): *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. Deutsche Geodätische Kommission in der Reihe C, Heft 508.
- Wanninger, L. (2002): *Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 127, Seite 51–58.
- Wanninger, L. (2009): *Code- und Phasenmessungen zu SBAS-Satelliten für Positionsbestimmung*. In: *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen*. Schriftenreihe des DVW, 57, Seite 39–50.
- Wanninger, L., Frevert, V. und Wildt, S. (2000): *Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 125, Seite 8–16.

- Welsch, W., Heunecke, O. und Kuhlmann, H. (2000): *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg.
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I. und Lichten, S. M. (1993): *Effects of antenna orientation on GPS carrier phase center variations of GPS satellites*. Manuscripta Geodaetica.
- Wübbena, G. (1985): *Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements*. Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the global positioning systems, Seite 403–412.
- Wübbena, G. (1989): *The GPS adjustment software package -GEONAP-concepts and models*. 5. International Geodetic Symposium on Satellite Positioning I, Seite 452–461.
- Xu, G. (2003): *GPS - Theory, Algorithms and Applications*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. und Webb, F. H. (1997): *Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network*. Journal of Geophysical Research, 102, Seite 5005–5017.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger für die Betreuung der Promotion und die damit verbundene fachliche Unterstützung sowie die zahlreichen fachlichen Diskussionen während der Bearbeitung.

Ebenso geht ein herzlicher Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Böder für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kollegen für ihre fachliche Diskussionen und Anmerkungen beim Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Zu guter Letzt geht ein Dank an die Organisationen und Institutionen ohne deren Daten die Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere sind dies das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, das *European Space Operations Centre*, der *International GNSS Service*, das *EUREF Permanent Network* sowie das *Institute of Geodesy and Geophysics* der Technischen Universität Wien.