



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

M A S T E R A R B E I T

Analyse des GNSS-Referenzstationsnetzes EPOSA

Modellierung systematischer Fehlereinflüsse

Ausgeführt am Institut für
Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
a.o. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Robert Weber

durch
B.Sc. Gregor Möller

Währinger Straße 26/2/12

1090 Wien

Wien, den 27. Oktober 2010

Kurzfassung

EPOSA ist ein Echtzeitpositionierungsdienst mit Österreich weiter Abdeckung, basierend auf 37 über das ganze Staatsgebiet verteilten GNSS-Referenzstationen. Die Dachmarke EPOSA entstand in Kooperation der Firmen ÖBB, BEWAG und WIENSTROM und wurde im Herbst 2009 das erste Mal der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Herausforderung in Referenzstationsnetzen besteht darin, aus den GNSS-Beobachtungsdaten der koordinativ sehr genau bekannten vernetzten Permanentstationen entfernungsabhängige Fehler zu modellieren und diese in Form von Korrekturdaten in Echtzeit an den Nutzer zu übertragen. Dieser verwendet die Daten um seine Position im Idealfall innerhalb von wenigen Sekunden mit cm-Genauigkeit zu bestimmen. Die Ansprüche die nutzerseitig an Referenznetzbetreiber gestellt werden sind sehr hoch. Zum einen muss die Qualität der abgegebenen Korrekturdaten eine cm-genaue Positionierung im gesamten Versorgungsgebiet erlauben. Zum anderen soll der Dienst jederzeit und mit hoher Zuverlässigkeit zur Verfügung stehen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die reale Umsetzung dieser Vorgaben für den EPOSA Service zu untersuchen. Von den Betreibern des Referenzstationsnetzes wurden Datensätze zur Verfügung gestellt, die es erlauben Zustandsparameter des Netzes abzuleiten. Die Qualität der Daten einzelner Referenzstationen wurde anhand des Signal-Rausch-Verhältnisses, auftretender Mehrwegeausbreitungen und möglicher Abschattungen untersucht. Des Weiteren wurden die Zustandsdaten hinsichtlich der Verfügbarkeit des Dienstes, dem Zeitaufwand zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten innerhalb der Netzdaten und der Initialisierungszeit am Rover ausgewertet. Über den Auswertungszeitraum September 2009 konnte eine Verfügbarkeit des Dienstes zu 94% gewährleistet werden. Potential zu Verbesserungen ist bezüglich der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten von Satellitenbeobachtungen in geringer Elevation und der darauf basierenden erreichbaren Qualität der Korrekturparameter gegeben. Auf fast allen Stationen konnte eine sehr gute Performance erreicht werden. Bei einer Aufstelldauer von 30 Sekunden bis 2 Minuten ist für den Nutzer durch die Verwendung der Echtzeit-Korrekturdaten eine hochgenaue Positionierung selbst im alpinen Raum des Versorgungsgebietes möglich.

von Gregor Möller

gregor.moeller@gmx.at

Titel der Masterarbeit: Analyse des GNSS-Referenzstationsnetzes EPOSA - Modellierung systematischer Fehlereinflüsse

Abstract

EPOSA stands for a GNSS real-time positioning service which offers its customers observation corrections valid over the whole Austrian territory. It is based on the observation data of 37 well distributed GNSS reference sites. The brand EPOSA, emerged from the cooperation of the companies ÖBB, BEWAG and WIENSTROM, was presented to the public for the first time in autumn 2009. The challenge within reference networks is to model distance-dependent errors from GNSS-observations of the reference stations and to forward them as correction-data in real time. The users are interested to determine their position with cm-accuracy, ideally within a few seconds. The requirements on the network performance asked for from user side are extremely demanding. The quality of the corrections should be as good as necessary to achieve cm-accuracy. Furthermore, the service should be available any time with high reliability.

The aim of this study is to examine at which level these requirements are guaranteed by the EPOSA service. To complete this task the network operator has provided data covering a full month, which allowed to observe the status-parameters of the network. The quality of every reference station was evaluated by means of the signal to noise ratio, occurring multipath and possible obstructions. In addition, the status data were evaluated with regard to the availability of the service, the time to fix the ambiguities within the network and the time for initialization at rover site. Over the period September 2009 the availability of the service was ensured to 94%. Potential for improvement has been identified with respect to the fixing time of the ambiguities of observations in low elevation which relates to the achievable quality of the correction parameters. At almost all stations a very good performance could be achieved. By taking advantage of the real-time correction data of the EPOSA network the user is able to establish high accurate positions at the few cm level even in alpine areas with an occupation time between 30sec up to 2 minutes.

by Gregor Möller

gregor.moeller@gmx.at

Title of Masterthesis: Analysis of the GNSS reference station network EPOSA - modeling the effects of systematic errors

Vielen Dank an meine Familie und Freunde sowie an
Robert Weber, Rene Hellerschmid und Rainer Seisenbacher.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	GPS und GLONASS	2
2.1.1	GPS / GLONASS Systemkomponenten	2
2.1.2	Signalstruktur	4
2.1.3	Code- und Phasenmessungen	5
2.2	Fehlereinflüsse	6
2.2.1	entfernungsabhängige Fehler	7
2.2.2	stationsabhängige Fehler	11
2.2.3	sonstige Fehlereinflüsse	14
3	Satelliten-Positionierung in Echtzeit	17
3.1	Relative Positionierung	17
3.2	Differentielle Verfahren	18
3.2.1	DGPS	18
3.2.2	PDGPS (RTK)	19
3.3	Referenzstationsnetze	19
3.3.1	Prinzip der Vernetzung	19
3.3.2	Fehlerparametrisierung in Referenzstationsnetzen	20
3.4	Datenübertragungsformat RTCM SC-104	23
3.5	Modelle der Datenübertragung	25
3.5.1	GSM, GPRS und UMTS	25
3.5.2	NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)	25
4	EPOSA Netzwerk	27
4.1	Historische Entwicklung	27
4.2	Systemüberblick	29
4.2.1	Netzaufbau	29

4.2.2	Datenübertragung	30
4.2.3	Monitoring Konzept	33
4.2.4	Kundenservice	35
4.2.5	Transformationsparameter	36
4.2.6	Kosten für die Nutzer	38
5	EPOSA Zustandsdaten	39
6	Analyse der relevanten Parameter	44
6.1	Vollständigkeit der RINEX-Daten	44
6.2	Stations- und tracking-Informationen	46
6.3	Signal-Rausch-Verhältnis	56
6.4	Koordinaten der Referenzstationen	59
6.5	Stationsresiduen und Mehrwegeausbreitung	69
6.6	Flächenkorrekturparameter	72
6.7	Dauer der Initialisierung am Rover	76
A	Anhang	79
A.1	Preisblatt EPOSA	80
A.2	RINEX-Daten	81
A.3	Signal-Rausch-Verhältnis	84
A.4	Residuen und Mehrwegeausbreitungen	92
A.5	Flächenkorrekturparameter	100

1 Einleitung

Anfang Oktober 2009, zum Österreichischen Geodätentag in Schladming wurde EPOSA zum ersten Mal der Öffentlichkeit vorgestellt. Für Einige überraschend – neben APOS ein weiterer ganz Österreich abdeckender Echtzeit Positionierungsdienst – welcher Anbieter steht dahinter? Welche Produkte werden angeboten und wie gut ist die Datenqualität? Zum einen möchte ich in dieser Arbeit versuchen diese Fragen zu beantworten. Zum anderen geht es darum, den noch jungen Dienst EPOSA unter technischen Gesichtspunkten genauer zu betrachten, Stärken und Schwächen des Systems herauszuarbeiten und damit verbunden das Potential, sich in dem immer weiter wachsenden Markt der GNSS Korrekturdatenanbieter behaupten zu können.

Auf der Webseite [1] wirbt EPOSA mit

- Österreich weiter Abdeckung,
- hochgenauen Positionsdaten,
- 24/7 Support,
- unter Berücksichtigung aller operativen Satellitensysteme,
- mit höchster Zuverlässigkeit,
- beste Verfügbarkeit und
- geprüfter Qualität.

Grundsätzlich sind damit die Voraussetzungen geschaffen, als Topanbieter am Markt aufzutreten. Ob dies gerechtfertigt ist, wird anhand der Zustandsdaten, die von EPOSA zur Verfügung gestellt wurden [Kapitel 5], untersucht. Als Auswertezeitraum wurde der Monat September 2009 gewählt. Alle aus den Zustandsdaten gewonnenen Ergebnisse beschreiben den Ist-Zustand in diesem Zeitraum.

2 Grundlagen

Bevor auf den Echtzeitpositionierungsdienst EPOSA eingegangen wird, werden zunächst die Grundlagen beschrieben, die es überhaupt ermöglichen, derartige Dienste anbieten zu können. Dazu zählen die Satellitenpositionierungsverfahren GPS und GLONASS, ihre Systemkomponenten, die Signalstruktur, die Messverfahren, sowie alle auf diese Verfahren einwirkenden Fehler.

2.1 GPS und GLONASS

2.1.1 GPS / GLONASS Systemkomponenten

Für die präzise Positionierung und die Navigation stehen derzeit die zwei Satellitensysteme NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System) und GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System, Russisches Pendant zu GPS) zur Verfügung. Beide Systeme können in drei Hauptsegmente (**Space Segment**, **Control Segment**, **User Segment**) unterteilt werden. Des Weiteren lässt sich ein direkt vom Systembetreiber kontrolliertes **Ground Segment** definieren, zu dem die Permanentnetze und GPS-Dienste (IGS, IGLOS und Regionale Dienste) gehören, die für den Benutzer verschiedene Produkte bereitstellen. Das User Segment sei an dieser Stelle nur erwähnt, die ersten beiden Segmente werden im Folgenden näher beschrieben.

Das **Space Segment** umfasst die Konstellation der Satelliten und die Satelliten selbst. Um eine weltweite Abdeckung zu gewährleisten, arbeiten beide Systeme mit nominal 24 Satelliten. Der erste GPS-Satellit wurde 1978 in seine Umlaufbahn gebracht, die volle Betriebsbereitschaft (Full Operational Capability) wurde erstmalig im Juli 1995 erreicht, seit Mai 2010 sind 31 operationelle GPS-Satelliten im All, zu denen elf GPS IIA-, zwölf GPS IIR-, sieben GPS IIR-M- und ein GPS IIF-Satellite gehören. Die Satelliten IIR-M und GPS IIF sind bereits von der neuen Generation. Im September 2005 wurde der erste

IIR-M-Satellit gestartet, dieser unterstützt als Erster eine zweite Frequenz für die zivile Nutzung (L2C) und ein neues militärisches Signal (L1M, L2M). Der erste IIF-Satellit ist seit Mai 2010 im All, der ein zusätzliches Signal auf der L5-Frequenz ausstrahlt. Diese dritte zivile Frequenz auf 1175,45 Megahertz soll vorrangig für sogenannte sichere Dienste wie etwa die zivile Luftfahrt Verwendung finden. Bei GLONASS gestaltete sich die Entwicklung etwas schwieriger. 1995 konnte erstmals die volle Betriebsbereitschaft erreicht werden. Auf Grund der kurzen Lebensdauer der ersten GLONASS-Satelliten waren 2001 jedoch nur noch sieben operationelle Satelliten im All. Seitdem befindet sich das System wieder im Aufbau. Im Oktober 2010 waren 21 operationelle Uragan-M-Satelliten verfügbar; Anfang 2011 wird vermutlich die volle Betriebsbereitschaft wieder erreicht werden können. Die neue Generation (GLONASS-K; Start des ersten Test-Satelliten Ende 2010) wird bereits CDMA-Signale aussenden können [Kapitel 2.1.2]. Die Bahn-Charakteristik beider Systeme ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

	GPS	GLONASS
Große Halbachse	26'600 km	25'500 km
Umlaufzeit	11 ^h 58 ^{min}	11 ^h 16 ^{min}
Inklination	55°	64°
Anzahl Bahnebenen	6	3
PRN Code	satellitenabhängig	satellitenunabhängig
Referenzsystem	WGS 84	PZ/PE-90/2
Zeitsystem	UTC (USNO)	UTC (SU)
Satelliten	Soll 24 (ist 31)	Soll 21+3 (ist 21)

Tab. 2.1: Vergleich der GPS- und GLONASS Konstellation

Das **Control Segment (Operational Control System OCS)** beinhaltet die Bodenstationen, Infrastruktur und Software für die Überwachung und das Betreiben des GPS-beziehungsweise des GLONASS-Systems. Die Station in Colorado Spring wird als *GPS-Master Control Station* (MCS) bezeichnet. Sie ist für die Steuerung und Überwachung des System verantwortlich. Ihre Aufgaben liegen in der Berechnung der Satellitenbahnen und Satellitenuhrkorrekturen sowie der Generierung der GPS-Zeit. Darüber hinaus besteht das Control Segment aus *Monitor Stations* welche Beobachtungsdaten für die Bestimmung genauerer Bahnen liefern. Die *Ground Control Stations* sind mit großen Antennen ausgerüstet und realisieren die Kommunikation mit den Satelliten. Das GLONASS Control Segment besteht aus einem Kontrollzentrum in Moskau. Alle anderen Stationen sind über das Gebiet der ehemaligen Sowjetunion verteilt. Dafür sind die Satelliten in der Lage gegenseitig Informationen auszutauschen. Auf den GPS-Satelliten ist dies ebenfalls in den neuen Generationen angedacht.

2.1.2 Signalstruktur

Die zur Positionierung verwendeten GPS-Signale basieren auf einer Grundfrequenz von 10.23 MHz. Aus dieser Grundfrequenz werden zwei Trägerphasen (L1 und L2) und zwei Codes (C/A-Code und P-Code) durch ganzzahlige Frequenzvervielfachung abgeleitet.

- $L1 : f_1 = 1575.43 \text{ MHz} (= 154 \times 10.23 \text{ MHz}), \lambda_1 = 19 \text{ cm}$
- $L2 : f_2 = 1227.60 \text{ MHz} (= 120 \times 10.23 \text{ MHz}), \lambda_1 = 24 \text{ cm}$

Der C/A-Code und der P-Code werden in der Form von Pseudozufalls-codes (Pseudo Random Noise, PRN) den Trägerphasen aufmoduliert. Die Abkürzung C/A (clear/acquisition) bezeichnet dabei den freien Zugriff auf das Code-Signal. Der C/A-Code ist satellitenspezifisch, besteht aus einer Sequenz von 1023 Bits, hat eine Chip-Länge (1 Bit) von 293 m und wird nur L1 aufmoduliert. Der P-Code (P steht sowohl für precision als auch für protected) hat eine Chip-Länge von 29.3 m, wird auf beide Trägerphasen aufmoduliert und ist durch eine Überlagerung mit dem unbekannten W-Code jedoch nur für autorisierte Nutzer zugänglich. Zusätzlich zu den Codes wird die Navigations-Nachricht auf beide Trägersignale aufmoduliert. Diese Nachricht wird wie bereits erwähnt zur Ortung des Empfängers verwendet. Auch bei GLONASS wird diese Nachricht über die Trägersignale L1 und L2 übertragen. Im Gegensatz zu GPS unterscheiden sich die GLONASS-Trägerfrequenzen für jeden Satelliten geringfügig. Der Grund dafür ist, dass die einzelnen Satelliten durch die Auftrennung der unterschiedlichen Frequenzen im Empfänger unterschieden werden (FDMA Frequency Division Multiple Acces). Im Gegensatz dazu nennt man die bei GPS zum Einsatz kommende Methode CDMA (Code Division Multiple Access), wobei die Satelliten durch die unterschiedlichen C/A-Code unterschieden werden, die dem Empfänger bekannt sind. Die GLONASS-Frequenzen ergeben sich somit zu

- $L1 : f_1 = 1602 + k \cdot 0.5625 \text{ MHz}, \lambda_1 = 19 \text{ cm}$
- $L2 : f_2 = 1246 + k \cdot 0.4375 \text{ MHz}, \lambda_1 = 24 \text{ cm},$

wobei $k = 1, 2, \dots, 24$ als *Frequenz Channel Number* bezeichnet wird. Die aufmodulierten Codes sind für alle Satelliten identisch und besitzen eine Wellenlänge

- von 587 m (0.511 MHz, C/A-Code) beziehungsweise
- von 58.7 m (5.11 MHz, P-Code).

2.1.3 Code- und Phasenmessungen

Der Empfänger muss die einzelnen Komponenten aus dem Signalgemisch rekonstruieren. Dabei kann zwischen Code- und Phasenmessungen unterschieden werden. Das Grundprinzip der Codemessung ist, dass zwischen einem Empfängersystem und mindestens drei Satelliten zunächst die Pseudoentfernung $P_{R,i}^S$ über die Signallaufzeit bestimmt wird. Dies ist möglich, da alle Satellitenuhren zu einem bekannten Zeitsystem synchronisiert sind und der Zeitpunkt der Aussendung des Satellitensignals in der Zeitskala hoch genauer Atomuhren im Satelliten bestimmt werden. Diese Informationen werden mit der Navigations-Nachricht an den Empfänger übertragen¹. Dieser verwendet die Informationen aus der Navigations-Nachricht, um die Laufzeit des Signals zu bestimmen. Im Empfänger werden aus Kostengründen nur Quarzuhren verwendet, die zum einen nicht sehr langzeitstabil sind und zum anderen nicht zu den Satellitenuhren synchronisiert wurden. Daraus resultiert, dass die gemessenen Entfernungen kürzer beziehungsweise länger als die wirklich geometrische Distanz ρ_R^s zwischen Empfänger und Satellit werden, je nachdem ob die Empfängeruhr vor oder nach geht. Eine Verfälschung der gemessenen Laufzeit von nur 1 μ s verursacht zum Beispiel einen Streckenfehler von 300 m. Aus diesem Grund wird bis jetzt auch von Pseudoentfernungen (falsch, unecht) gesprochen. Um die tatsächliche Entfernung ρ_R^s zu bestimmen, muss die Empfängeruhr im selben Zeitsystem wie die Satellitenuhren synchronisiert werden. Dafür werden die Beobachtungsdaten eines weiteren Satelliten benötigt. Aus der simultanen Beobachtung von insgesamt vier oder mehr Satelliten ist es somit möglich die Position des Benutzers, sowie den Empfängeruhrfehlern Δt_R zu berechnen. Die Beobachtungsgleichung der Codemessung lautet somit

$$P_R^s(t_i) = \rho_R^s(t_i) + c \cdot [\Delta t_R(t_i) - \Delta t^s(t_i - \tau)] + \varepsilon_R^s(t_i) \quad (2.1)$$

Die geometrischen Distanz ρ_R^s ergibt sich zu einem diskreten Zeitpunkt t_i aus der Pseudoentfernung $P_{R,i}^s$ zwischen Satellit s und Empfänger R unter Berücksichtigung der Satelliten- und Empfängeruhrfehler $[\Delta t_R(t_i) - \Delta t^s(t_i)]$, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit c . Die Signallaufzeit vom Satellit zum Empfänger wird mit τ bezeichnet, die systematischen Fehlereinflüsse $\varepsilon_{R,i}^s$ werden in Kapitel 2.2 diskutiert. Messgröße ist die Phase des im Empfänger generierten Codes. Die Messung erfolgt durch die Korrelation einer im Empfänger generierten Kopie des Codes mit dem empfangenen Code. Die reine

¹Darüber hinaus beinhaltet die Navigations-Nachricht, die Ephemeriden, den *Health Status* und Parameter des Klobuchar-Modells zur Korrektur des ionosphärischen Einflusses

Auflösung der Phasenmessung des Codes wird mit rund 1% der Chip-Länge angegeben, bei modernen Geräten liegt sie im wenigen Promille Bereich. Für viele Anwendungen ist die dadurch erreichbare Genauigkeit ausreichend, eine hoch genaue Positionsbestimmung ist jedoch nicht möglich. Um diese zu erreichen wird ein anderes Verfahren angewandt, dass im Folgenden als Trägerphasenmessung bezeichnet wird. Dabei wird nicht wie bei der Codemessung die gesamte Strecke zwischen Empfänger und Satellit gemessen, sondern nur ein Differenzsignal, die Schwebungsphase (engl. *carrier beat phase*), zwischen einem empfängerinternen Referenzsignal und der empfangenen Trägerwelle. Die Entfernung zwischen Empfänger und Satellit, beziehungsweise die Anzahl an ganzen Wellenlängen der Trägersignale bleibt weiterhin unbekannt. Für Trägerphasenmessungen erweitert sich daher die Beobachtungsgleichung um den Mehrdeutigkeitsterm $\lambda_i \cdot N_{R,i}^s$.

$$L_{R,i}^S = \rho_R^s + c \cdot [\Delta t_R(t_i) - \Delta t^s(t_i - \tau)] + \lambda_i \cdot N_{R,i}^s + \varepsilon_R^s(t_i) \quad (2.2)$$

Die Anzahl an ganzen Wellenzyklen wird mit $N_{R,i}^s$ bezeichnet, λ_i ist die Wellenlänge des Trägersignals. Der Index i beschreibt dabei, ob es sich um das L1- oder das L2-Signal handelt. Die erreichbare Genauigkeit der Trägerphasenmessung kann mit 1% der Wellenlänge (~ 3 mm) angegeben werden, praktisch liegt sie noch darunter (1-2 mm). Diese hohe theoretische Genauigkeit kann jedoch nur erreicht werden, wenn die Mehrdeutigkeiten gelöst werden können. Dazu sind lange Beobachtungszeiten oder eine Modellierung der auf die Messung wirkenden Fehlereinflüsse $\varepsilon_{R,i}^s$ unabdingbar.

2.2 Fehlereinflüsse

In der Beobachtungsgleichung für Code- und Phasen-Messungen beinhaltet der Term $\varepsilon_R^s(t_i)$ alle systematischen Fehlereinflüsse. In den weiteren Betrachtungen werden diese in entfernungsabhängige Fehler $D_{R,i}^s$, in stationsabhängige Fehler $S_{R,i}^s$ und in sonstige Einflussfaktoren $Z_{R,i}^s$ unterteilt. Der Index i wird hierbei eingeführt, um die Frequenzabhängigkeit der Fehlerterme zu verdeutlichen. Im Folgenden werden alle signifikanten Fehlerquellen beschrieben.

2.2.1 entfernungsabhängige Fehler

Die Laufzeitverzögerungen in der Ionosphäre $\delta I_{R,i}^s$ und in der Troposphäre δT_R^s bilden zusammen mit dem Vektor der Satellitenbahnfehler δ^s und dem nicht modellierten Drift der Satellitenuhren δt^s den entfernungsabhängigen Fehlerterm $D_{R,i}^s$ [Gleichung 2.3]. Zu beachten ist der unterschiedliche Einfluss der Ionosphäre auf Code- und Trägerphasen. Da sich Code-Signale nur mit Gruppengeschwindigkeit ausbreiten, werden sie gegenüber den Trägerwellen, die sich mit Phasengeschwindigkeit ausbreiten verzögert. Die Differenzen beider Geschwindigkeiten zur Lichtgeschwindigkeit sind annähernd gleich groß. Wie in Gleichung zu sehen, gehen beide jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen in die Beobachtungsgleichung ein ($+\delta I$ für Code, $-\delta I$ für Phase).

$$D_{R,i}^s = \pm \delta I_{R,i}^s + \delta T_R^s + \delta^s + \delta t^s \quad (2.3)$$

Die Modellierung dieser Fehlereinflüsse ist für hoch genaue Echtzeitpositionierung Voraussetzung. Deren Schätzung in einem Referenzstationsnetz ist für die schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung und der damit verbundenen zentimetergenauen Positionierung auch über größere Entfernungen notwendig. Inwieweit sich die entfernungsabhängigen Fehler auf die absolute und die relative Positionierung auswirken, kann der Tabelle 2.2 entnommen werden.

entfernungsabhängiger Fehler	Fehlereinfluss	
	absolut	relativ
Ionosphäre	0.5..100 m	0.1..50 ppm
Troposphäre	0.01..0.5 m	0.1..3 ppm
Satellitenbahn (Broadcast)	1..2 m	0.1ppm
Satellitenuhr (Broadcast)	1..2 m	0 ppm

Tab. 2.2: Einfluss entfernungsabhängiger Fehler

Ionosphäre

Als die Ionosphäre wird der Teil der Atmosphäre zwischen 50 km und 1000 km Höhe über der Erdoberfläche bezeichnet, der große Mengen an freien Elektronen und Ionen enthält. Für die Satellitenvermessung ist vor allem der TEC (total electron content), auch Gesamtelektroneninhalt genannt, von Interesse. Diese Kenngröße der Ionosphäre

beschreibt die Elektronendichte über den gesamten Ausbreitungsweg des Signals und nimmt Werte zwischen 10^{16} und 10^{19} Elektronen/ m^2 an. Die Elektronendichte unterliegt somit zeitlichen Schwankungen, die vor allem von der geographischen Breite, der Tages- und Jahreszeit, sowie von der Sonnenaktivität abhängig sind. Je höher der TEC, desto größer ist der Brechungsindex der Ionosphäre und damit verbunden die Signalverzögerung in der Atmosphäre. Aus Gleichung 2.4 ist ersichtlich, dass die ionosphärische Laufzeitverzögerung proportional der Elektronendichte und indirekt proportional zum Quadrat der Frequenz des ausgestrahlten Signals ist.

$$\delta I_{R,f}^s = \frac{40.3}{f^2} \cdot TEC \quad (2.4)$$

Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um den Einfluss der Ionosphäre durch Verwendung von Zweifrequenzempfängern und der Bildung von Linearkombinationen weitgehend zu eliminieren. Nähere Informationen dazu, sowie weitere Ansätze der Modellierung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung für die absolute Positionierung, sind in [17] beschrieben. Für die relative Positionierung sind vor allem die Inhomogenitäten in der Elektronenverteilung von Interesse, die zu mittelgroßen und kleinräumigen ionosphärischen Störungen führen. Starke ionosphärischen Störungen behindern maßgeblich die Lösung der Mehrdeutigkeitslösung bei kinematischen oder kurzzeitig statischen Beobachtungen. Dies kann soweit gehen, dass für Basislinien größer als 10 km keine Mehrdeutigkeiten mehr gelöst werden können. Diesem Effekt kann entgegengewirkt werden, indem die relativen ionosphärischen Fehler in Referenzstationsnetzen modelliert und korrigiert werden. Wie dies realisiert wird, ist unter anderem in [13] beschrieben.

Troposphäre

Als Troposphäre wird der Bereich der Atmosphäre zwischen der Erdoberfläche und einer Höhe von ca. 50 km bezeichnet. Die troposphärische Laufzeitverzögerung ist bedingt durch die Refraktion der Signale in der neutralen Atmosphäre und ist im Gegensatz zur Ionosphäre nicht von der Frequenz, sondern von der Temperatur, dem Luftdruck und dem Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre abhängig. Die Gesamtverzögerung in Zenitrichtung (*ZTD*) beträgt etwa 2.3 m (8ns) und ergibt sich durch die Integration des Brechungsindexes über den gesamten Ausbreitungsweg [Gleichung 2.5].

$$ZTD = 10^{-6} \cdot \int N_d dr + 10^{-6} \cdot \int N_w dr \quad (2.5)$$

Gewöhnlich wird der ZTD in eine trockene (ZHD) und in eine feuchte Komponente (ZWD) unterteilt. Da die Bestimmung des Brechungsindex sehr aufwendig oder nicht möglich ist, werden die Anteile der troposphärischen Laufzeitverzögerung in der Regel durch Modelle beschrieben. Der trockene Anteil (hydrostatisch) macht rund 90% des Gesamteffektes aus, ist zeitlich sehr stabil und einfach zu modellieren, da er vorwiegend vom Luftdruck abhängt. Saastamoinen hat ein Modell entwickelt, das ermöglicht, den ZHD aus Druckwerten am Boden sehr genau zu berechnen [Gleichung 2.6].

$$ZHD = 10^{-6} \cdot K_1 \cdot R \cdot \frac{P_s}{g_m} \quad (2.6)$$

Der feuchte Anteil der Laufzeitverzögerung kann bis zu 40 cm ausmachen, ist zeitlich und örtlich sehr variabel und somit schwer zu erfassen. Für das Erreichen von hohen Genauigkeiten bei der Positionsbestimmung wird daher oft ein a-priori Modell (z.B. von Niell, Hopfield, Marini-Murray oder die VMF1) verwendet und zusätzlich Parameter geschätzt, um möglichst den gesamten Anteil der troposphärischen Verzögerung zu erfassen. Für die Umrechnung der ZTD auf beliebige Elevationwinkel werden Mapping-Funktionen verwendet. Dies ist notwendig, da bei Satelliten in niedriger Elevation das Signal einen längeren Weg durch die Atmosphäre zum Empfänger zurücklegen muss und sich dadurch die Verzögerung in der Atmosphäre um ein Vielfaches erhöht. Die Fehler, die bei der Umrechnung auftreten sind meist proportional dem Cosinus der Zenitdistanz und somit ein möglicher Grund für Probleme bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung von Satelliten in niedrigen Elevationen [Kapitel 6.2].

Satellitenbahnen

Der Satellitenbahnfehler entspricht der Abweichung der tatsächlichen von der vorausgerechneten Bahn und liegt in der unzureichenden Modellierung der auf den Satelliten angreifenden Kräfte (z.B. Strahlungsdruck der Sonne, Modellierung der konservativen Kräfte und thermische Effekte) begründet. Er kann in drei Komponenten (radial, along track, out of plane) unterteilt werden, wobei sich vor allem die radiale Komponente auf die Positionsgenauigkeit auswirkt [7]. Bei der absoluten Positionierung geht der

Satellitenbahnfehler direkt in die Positionsbestimmung mit ein. Bei relativen Verfahren kann der Einfluss über die Gleichung von I.Bauersima abgeschätzt werden.

$$\Delta r = \frac{l}{\rho} \cdot \Delta R \quad (2.7)$$

Der resultierende Fehler Δr berechnet sich aus dem Bahnfehler ΔR , der Länge der Basislinie und der mittleren Entfernung zwischen Satellit und Empfänger ρ , welche mit 25'000 km angenommen werden kann. Für einen Bahnfehler von 1.0 m ergibt sich bei der Länge der Basislinie von 100 km ein Fehler in den berechneten Stationskoordinaten von rund 4 mm. Zur Reduktion dieses Einflusses werden verschiedene Bahnprodukte angeboten. Je nachdem wie viele Tage beziehungsweise Stunden nach der Aufzeichnung der GPS-Messungen diese Bahnen zur Verfügung stehen sollen, unterscheidet sich die Qualität der angebotenen Bahndaten. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die momentan verfügbaren Bahnprodukte des IGS, beziehungsweise der Broadcast Bahndaten..

IGS-Produkt	Verfügbarkeit	Genauigkeit
GPS Final Orbits	12- 18 Tage	2.5 cm
GPS Rapid Orbits	17 - 41 Stunden	2.5 cm
GPS Predicted Orbits	Echtzeit	5 cm
GLONASS Final Orbits	12 - 18 Tage	5 cm
GPS Broadcast Orbits	Echtzeit	~100 cm
GLONASS Broadcast Orbits	Echtzeit	~100 cm

Tab. 2.3: Qualität der verfügbaren GPS- und GLONASS-Bahnen

Zusätzlich bieten verschiedene Analyse-Zentren des IGS bereits seit einigen Jahren GLONASS-Bahndaten zu Prozessierung in Echtzeit an. Dazu gehört unter anderem das *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE), das seit Juni 2003 präzise Bahndaten für GLONASS-Satelliten berechnet.

Satellitenuhren

Trotz hoch genauer Atomuhren ist ein Drift der Satellitenuhren zu verzeichnen, der als Fehler in der Synchronisation der Satellitenuhren mit der GPS-Systemzeit verstanden werden kann. Auf die relative Positionierung hat er keinen Einfluss, die Auswirkung

auf die absolute Positionierung ist ähnlich dem eines radialen Bahnfehlers. Die Satellitenuhrkorrekturen können dabei nicht als Unbekannte aufgesetzt werden, da für jeden Satelliten, das heißt für jede Messung eine Unbekannte Satellitenuhrkorrektur berechnet werden müsste [5]. Die Drift der Satellitenuhr kann vereinfacht durch ein Polynom zweiten Grades approximiert werden [Gleichung 2.8].

$$\Delta t^s(t_i) = a_0 + a_1(t - t_{oe}) + a_2(t - t_{oe})^2 \quad (2.8)$$

Werden für die Korrektur des Satellitenuhrfehler die *IGS Final Products* (~ 75 ps RMS, ~ 25 ps Standardabweichung) verwendet, kann der Einfluss der Satellitenuhrfehler auf weniger als 1 mm reduziert werden.

2.2.2 stationsabhängige Fehler

Zu den stationsabhängigen Fehlern zählen alle Einflussfaktoren im Umfeld der Beobachtungsstation. Dazu gehören vor allem die Mehrwegeausbreitungen für Code- und Phasenmessungen ($\delta M_{R,i}^S$), die Variation des Antennenphasenzentrums (PCV) der Empfangsantenne ($\delta A_{R,i}^S$) und das Messrauschen ($v_{R,i}^S$) [Gleichung ??]. In Tabelle 2.4 ist deren Einfluss auf die absolute und relative Positionierung angegeben; im Folgenden werden die erwähnten stationsabhängigen Fehler näher beschrieben.

$$S_{R,i}^s = \delta M_{R,i}^S + \delta A_{R,i}^S + v_{R,i}^S \quad (2.9)$$

Mehrwegeausbreitungen

Mehrwegeausbreitungen, im Englischen auch Multipath (MP) genannt, entstehen durch Interferenz des direkt an der Antenne empfangenen elektromagnetischen Signals mit dem indirekten Signal, das an reflektierenden Oberflächen in der Umgebung zur Antenne hin abgelenkt wird. Im Empfänger wird ein so genanntes Summensignal registriert, welches im Vergleich zum direkten Signal mit einer Phasenverschiebung am Empfänger ankommt. Diese Verschiebung resultiert aus dem Abstand des Reflektors zur Antenne und hat neben dem Elevationswinkel des Satelliten und den Reflektoreigenschaften maßgeblichen Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis. Große Mehrwegeeffekte führen zu großen Phasenverschiebungen, bis hin zur völligen Auslöschung des Signals. Eine Unterbrechung

der Phasenmessung und damit verbundene *cycle-slips* auf Grund von Mehrwegeausbreitungen sind somit keine Seltenheit. Besonders kritisch sind die Auswirkungen von MP bei kurzen Beobachtungszeiten (< 30 min).

stationsabhängiger Fehler	Fehlereinfluss absolut/relativ
Mehrwegeausbreitungen Phase	mm..cm
Mehrwegeausbreitungen Code	dm..m
Empfänger-Antennenphasenzentrum	mm..cm
Messrauschen Code	dm..m
Messrauschen Phase	mm..cm

Tab. 2.4: Einfluss stationsabhängiger Fehler

Der Einfluss von Multipath kann verringert werden durch die Wahl der geeigneten Antenne (Grundplatte, Choke rings, ...), einer sorgfältigen Auswahl der Stationsstandorte und durch Differenzbildung der Ergebnisse von aufeinanderfolgenden Tagen (um jeweils 4 Minuten zeitlich versetzt, da nach 23^h56^{min} die selbe GPS-Satellitengeometrie erreicht wird). Über einen längeren Beobachtungszeitraum kann der Einfluss von MP auch verringert werden, da sich die Variationen mit der Zeit ausgleichen. Darüber hinaus sind in der Vergangenheit eine Vielzahl an Methoden entwickelt wurden, die auf der Ebene der Signalverarbeitung eine Reduktion der Mehrwegeeffekte erlauben. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Ansätze wird auf [14] verwiesen. In dieser Arbeit wird anhand der Stationsresiduen untersucht, inwieweit Mehrwegeausbreitungen die Messungen auf den EPOSA-Referenzstationen beeinflussen [Kapitel 6.5].

Antennenphasenzentrum

Die genaue Kenntnis der Empfangseigenschaften der eingesetzten Antennen ist für hoch präzise GNSS Messungen unabdingbar. Sind sie unbekannt, hat dies vor allem Einfluss auf den Höhenfehler. Bei der Kombination von verschiedenen Antennentypen können Abweichungen in der Höhe bis zu mehreren cm auftreten. Werden identische Antennen verwendet, ist die Höhengenaugkeit vor allem von der Entfernung der Stationen abhängig. In [5] wird dieser Einfluss mit bis zu 16 ppb angegeben. Bedingt ist dieser Fehler dadurch, dass eine GNSS-Empfangsantenne kein punktförmiges Phasenzentrum besitzt, das mit der physischen Antenne verknüpft ist. Die Position des Phasenzentrums variiert, je nachdem aus welcher Richtung das GPS-Signal einfällt. Eine Beschreibung der Phasenzentrumsvariationen (PCV) ist durch Gleichung 2.10 gegeben.

$$\Delta r_{ant} = r_0 + \Delta\phi(z, \alpha) \cdot e_{z,a} \quad (2.10)$$

Die Variation des Antennenphasenzentrums Δr_{ant} ergibt sich aus der Position des mittleren Phasenzentrums relativ zum physischen Antennenreferenzpunkt (r_0) und den elevations- und azimutabhängigen Phasenzentrumsvariationen $\Delta\phi(z, \alpha)$. Für die Anbringung von Korrekturdaten muss die Orientierung der Antenne bekannt sein. Diese wird durch Horizontierung und Nordorientierung der Antenne erreicht. Für die Berechnung der Korrekturdaten kommen grundlegend zwei Verfahren, die relative und die absolute Kalibrierung, zum Einsatz. Bei den relativen Verfahren wird die Antenne gegenüber einer Referenzantenne kalibriert. Eine Möglichkeit dazu ist die Schätzung der Antennenoffsets- und -variationen aus GNSS-Beobachtungsdaten auf kurzen Basislinien. Bei der absoluten Kalibrierung wird die Antenne in verschiedene Richtungen gedreht und verkippt und für jeden Drehwinkel Korrekturwerte berechnet. Die Drehwinkel beziehungsweise die Drehachse muss dabei sehr genau bekannt sein. Aus diesem Grund kommen teilweise präzise Roboter zum Einsatz. Die Kalibrierung wird entweder mit echten GPS-Signalen im Feld oder mit künstlich erzeugten GPS-Signalen im “mikrowellentoten” Raum durchgeführt. Für die meisten Antennen bietet IGS konsistente Antennenkorrekturen mit einer Genauigkeit in der Höhe von 3-6 mm und in der Lage von 1-3 mm an. Für die Referenzstation im EPOSA-Referenzstationsnetz liegen für jede Antenne absolute Antennenkalibrierungsdaten vor. Aus diesem Grund reduziert sich der Einfluss der PCV auf weniger als einen Millimeter.

Messrauschen

Das wirkliche Messrauschen (durch den Messprozess gegeben) beträgt typischerweise rund 1% der Länge der Trägerwellen beziehungsweise der Chip-Länge. Durch die Verwendung von verschiedenen Auswertungsstrategien wird das Messrauschen teilweise verstärkt. Zum Beispiel erhöht es sich um den Faktor $\sqrt{2}$, wird die Positionsbestimmung durch Bildung von Einfachdifferenzen realisiert.

Neben den hier genannten Fehlereinflüssen (MP, PCV und Messrauschen) müssen theoretisch auch die Phasenzentrumsvariationen und die Mehrwegeausbreitungen an der Satellitenantenne, sowie die Laufzeitverzögerungen im Satelliten berücksichtigt werden. Diese haben jedoch nur Einfluss auf die absolute Positionierung. Des Weiteren haben Phasensprünge (*cycle slips*), sowie die unterschiedlichen Laufzeitverzögerungen innerhalb

des Empfängers Auswirkungen auf die hoch genaue Positionierung. Die Phasensprünge werden im folgenden Kapitel betrachtet, alle anderen Fehlereinflüsse werden detailliert in [17, 5, 15] beschrieben.

2.2.3 sonstige Fehlereinflüsse

relativistische Effekte

Der relativistische Effekt ist aus mehreren Gründen zu betrachten. Erstens laufen die Satellitenuhren für einen Beobachter auf der Erde scheinbar langsamer, da der Satellit mit einer Geschwindigkeit von rund 3900 m/s um die Erde kreist. Zweitens muss die Bewegung des Beobachters auf Grund der Erdrotation (max. 500 m/s am Äquator) berücksichtigt werden. Dies nennt man den Sagnac-Effekt. Drittens läuft die Satellitenuhr für einen Beobachter auf der Erde scheinbar schneller, da das Gravitationsfeld an der Erdoberfläche um ein Vielfaches stärker ist, als in 26.000 km Höhe. Da der letztgenannte Effekt um das sechsfache größer ist als der erstgenannte und rund das 50-fache des Sagnac-Effekts, scheinen die Satellitenuhren in Summe etwas schneller zu laufen, als es auf der Erde der Fall wäre. Bei den GPS-Satelliten wird dieser Einfluss elegant kompensiert, in dem die Grundfrequenz der Satelliten auf 10.229999995453 MHz eingestellt wird, jedoch mit der Annahme von 10.23 MHz gerechnet wird. Der Sagnac-Effekt bleibt dabei zumeist bedeutungslos und kann bei hoch genauen Positionsbestimmungen in der Empfängersoftware kompensiert werden. Würden die relativistischen Effekte unberücksichtigt bleiben, würde sich diese in einem Positionsfehler bemerkbar machen, der pro Sekunde rund 13 m beträgt. In einer Stunde wären das bereits rund 500 m. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der Satellit sich auf einer leicht exzentrischen Satellitenbahn bewegt. Durch die Annahme einer kreisförmigen Bahn kommt es zu periodischen Schwankungen in den Satellitenuhrlesungen von rund 35ns, die etwa einer Strecke von 10 m entsprechen.

Abschattungen

Die Qualität der GPS-Resultate ist von der Anzahl der sichtbaren Satelliten und der Satellitengeometrie abhängig. Abschattungen, vor allem im niedrigen Elevationsbereich führen dazu, dass weniger Satelliten und somit weniger Beobachtungsdaten für die

Berechnung der Position zur Verfügung stehen. Der Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit wird in Gleichung 6.1 abgeschätzt. Es ist somit äußerst wichtig, den Standort der GPS-Antenne so zu wählen, dass möglichst alle Satelliten über dem Horizont sichtbar sind. Vor allem im Gebirge und in Stadtgebieten ist dies nicht so einfach zu realisieren. Neben Sichthindernissen beeinflussen im urbanen Raum zusätzlich Mikrowellensender die Messungen. GPS-Frequenzen werden von den ausgesendeten Signalen dieser Störquellen überlagert, wodurch eine Auswertung der Satellitensignale nur noch schwer möglich ist.

Phasensprünge (*cycle slips*)

Phasensprünge treten nur bei der Trägerphasenmessung auf. Sie entstehen zumeist durch ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, eine zeitweise Abschattung des Satellitensignals, starke ionosphärische Störungen oder durch Interferenz des Satellitensignals mit anderen Signalen. Wird nach einer Signalunterbrechung das Satellitensignal wieder empfangen, sind die bis dahin gelösten Anfangsmehrdeutigkeiten nicht mehr gültig, da während der Zeit der Unterbrechung der empfängerinterne Zähler die ganze Anzahl an vergangenen Wellenzyklen nicht bestimmen konnte. Im Empfänger beginnt somit erneut die Lösung der Mehrdeutigkeiten und der initialisierte Zähler wird auf Null gesetzt. Die Differenz zwischen neuer und alter Mehrdeutigkeitslösung wird *cycle slips* genannt und beträgt eine ganze Anzahl an Wellenzyklen. Mit Hilfe geeigneter Software können Phasensprünge im Post-Processing erkannt und korrigiert werden. Dabei werden zumeist eine Reihe an statistischen Tests an verschiedenen Linearkombinationen und Beobachtungsdifferenzen der Code- und Trägersignale durchgeführt (z.B. Dreifachdifferenzen).

Satellitengeometrie (DOP)

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung σ kann durch die Gleichung 2.11 beschrieben werden,

$$\sigma = \sigma_r \cdot DOP \quad (2.11)$$

wobei σ_r die Standardabweichung der Einzelbeobachtung (Strecke) und DOP (Dilution of Precision) die geometrische Konfiguration der beobachteten Satelliten beschreibt. Je besser die Satelliten am Himmel verteilt sind, desto kleiner sind die DOPs und desto

genauer können die Positionen, beziehungsweise die gesuchten Parameter bestimmt werden. Zur Berechnung des DOP wird die Varianz-Kovarianz-Matrix C_{XYZT} aus der Ausgleichung der GPS-Beobachtungen bei der Bestimmung der Position und des Empfängeruhrfehlers verwendet [Gleichung 2.12].

$$C_{XYTT} = \sigma_r^2 \cdot (A^T A)^{-1} = \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{tx} & q_{ty} & q_{tz} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Die Positionsgenauigkeit in lokalen Horizontsystem (HDOP) berechnet sich aus:

$$\sigma_H = \sigma_r \cdot HDOP = \sigma_r \cdot \sqrt{q_{nn} + q_{ee}} \quad (2.13)$$

Die Koeffizienten q_{nn} und q_{ee} sind die Varianzen in Nord- und Ostrichtung, die durch die Transformation der C_{XYZT} in ein lokales nordorientiertes kartesisches Koordinatensystem berechnet werden können. Zusätzlich kann der P(Positional)DOP, der G(Geometric)DOP, der V(Vertical)DOP und T(Time)DOP angegeben werden. In Kapitel 6.7 wird nur auf den HDOP näher eingegangen, aus diesem Grund bleiben die anderen DOP-Klassen hier nur erwähnt.

3 Satelliten-Positionierung in Echtzeit

3.1 Relative Positionierung

In Kapitel 2.1.3 wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit den Informationen aus der Navigations-Nachricht und der Messung der Pseudostrecken eine Position zu bestimmen. Diese Methode wird auch absolute Positionierung genannt. Auf Grund der direkt einwirkenden Fehler (vor allem der Satellitenuhrfehler) kann dadurch nur eine Positionsgenauigkeit von mehreren Metern erreicht werden. Für höhere Genauigkeitsanforderungen sind relative und, wenn Echtzeitlösungen angestrebt werden, differentielle Beobachtungsverfahren auf Basis der Code- oder Trägerphase erforderlich¹. Im Gegensatz zur absoluten Positionierung bezeichnet relatives GPS das Grundprinzip gleichzeitig auf mindestens zwei Stationen zu beobachten. Dadurch kann der Einfluss von zeitabhängigen Fehlern eliminiert oder zumindest reduziert werden. Bildet man Differenzen zwischen den simultanen Beobachtungen von zwei Stationen zu demselben Satelliten (Einfachdifferenzen), so fällt der Satellitenuhrfehler heraus, da er an beiden Stationen gleich groß ist. Die dazugehörige Beobachtungsgleichung der Einfachdifferenzen der Codemessung lautet somit

$$dP_{R1,R2,i}^S = d\rho_{R1,R2}^s + c \cdot d\Delta t_{R1,R2}(t_i) + d\varepsilon_{R1,R2}^s(t_i) \quad (3.1)$$

wobei mit R_1 und R_2 die beiden Empfänger bezeichnet werden. Werden Differenzen von zwei Empfängern zu zwei Satelliten gebildet (Doppeldifferenzen) fällt zusätzlich der Empfängeruhrfehler aus der Beobachtungsgleichung heraus.

$$d^2 P_{R1,R2,i}^S = d^2 \rho_{R1,R2}^s + d^2 \varepsilon_{R1,R2}^s(t_i) \quad (3.2)$$

¹Abgesehen vom Verfahren *Precise Point Positioning*, dass eine Lösung der Mehrdeutigkeiten auf Basis der absoluten Positionierung anstrebt

Analog dazu können die Beobachtungsgleichungen der Trägerphasenmessungen gebildet werden. Im Vergleich zu Gleichung 3.2 wird die Beobachtungsgleichung um den Term der Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten $\lambda_i \cdot d^2 N_{R,i}^s$ erweitert und lautet somit

$$d^2 L_{R1,R2,i}^S = d^2 \rho_{R1,R2}^s + \lambda_i \cdot d^2 N_{R,i}^s + d^2 \varepsilon_{R1,R2}^s(t_i) \quad (3.3)$$

Durch die Bildung der Differenzen werden nicht nur die zeitabhängigen Fehler eliminiert, auch der Einfluss der entfernungsabhängigen Fehler (atmosphärischer Fehler und Satellitenbahnfehler) kann stark reduziert werden, da die Satellitensignale identische Teile der Atmosphäre durchlaufen, wenn die beiden Stationen hinreichend nahe beieinander stehen. Die Ergebnisse der Auswertung der Doppeldifferenzen sind Koordinatenunterschiede zwischen beiden Stationen. Aus diesem Grund wird auch von einer relativen Positionierung gesprochen. Sind die Koordinaten einer Station in einem übergeordneten Koordinatenrahmen bekannt (z.B. ITRF), können die Koordinaten einer zweiten Station durch das Anbringen der berechneten Koordinatenunterschiede bestimmt werden. Im Vermessungswesen gebräuchlich ist die Bezeichnung der bekannten Station als Referenzstation und der zweiten, neuen Station als Rover.

3.2 Differentielle Verfahren

3.2.1 DGPS

Von differentiellen Verfahren wird gesprochen, wenn die relative Beobachtungsmethode zu Grunde liegt, die Auswertung jedoch in Echtzeit erfolgt. Dafür müssen die Beobachtungsdaten der Referenzstation mittels geeigneter Übertragungstechnik an den Rover in Echtzeit gesendet werden. Dort werden die empfangenen Daten verwendet, um die Beobachtungen am Rover zu korrigieren und daraus die Position des Neupunktes (X_N) zu berechnen. Da dieses Verfahren zuerst für Codebeobachtungen entwickelt wurde, hat sich die Bezeichnung DGPS für differentielle Codelösungen ergeben. Verfügt der Rover nicht über eine Auswertungseinheit, ist prinzipiell auch eine Datenübertragung an die Referenzstation möglich. Dabei wird von inversem DGPS gesprochen. Dieses Verfahren findet auch dann Anwendung, wenn der Rover seine Position nicht benötigt, z.B. bei der Fernsteuerung von Objekten. Die erreichbaren Genauigkeiten von DGPS können mit rund einem Meter angegeben werden und mit phasengeglättetem Code noch etwas besser.

3.2.2 PDGPS (RTK)

Eine Anwendung des differentiellen Verfahrens auf Basis der Trägerphasenmessung wird auf Grund der damit möglichen Genauigkeitsteigerung als *precise differential GPS* (kurz PDGPS) bezeichnet. Um die Echtzeitfähigkeit diese Methode zu betonen wird auch der Begriff *Real Time Kinematic* (RKT) verwendet. Dabei ist das Verfahren sowohl für kinematische als auch für die statische Positionierung geeignet. Eine Genauigkeit in der Größenordnung von 1-2 cm in der Lage und 3-4 cm in der Höhe können durch die Lösung der Mehrdeutigkeiten auf Basislinien bis zu 15 km erreicht werden [12]. Genauso wie bei DPGS kann die Referenzstation dabei temporär für ein Projekt oder permanent aufgebaut werden. Verfügt die Station über die Möglichkeit Korrekturdaten zu berechnen, so wird diese als aktive Referenzstation bezeichnet.

3.3 Referenzstationsnetze

3.3.1 Prinzip der Vernetzung

Auf Grund der entfernungsabhängigen Fehler ist durch den Betrieb einer aktiven Referenzstation cm-Genauigkeit nur bis zu einer Länge der Basislinie von rund 15 km möglich [12]. Für die Abdeckung eines ganzen Staatsgebietes würde dies eine Vielzahl an Stationen bedeuten und damit sehr schnell unwirtschaftlich werden. Aus diesem Grund wurde das Prinzip der Referenzstationsnetze entwickelt. Durch die Modellierung der entfernungsabhängigen Fehler (Satellitenbahnfehler, ionosphärische sowie troposphärische Laufzeitverzögerungen) in Referenzstationsnetzen kann cm-Genauigkeit bis zu einer Entfernung von 50-80 km gewährleistet werden. Bevor eine Fehlermodellierung erfolgen kann, ist es notwendig, die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasen auf Basis des Doppeldifferenzniveau zu lösen. Dazu müssen die Stationskoordinaten (z.B. im ITRF) einschließlich Antennenkorrekturen hochgenau gekannt sein (mm-Genauigkeit), gegebenenfalls können auch präzise prädiszierte Satellitenephemeriden einbezogen werden [18]. Mit der Länge der Basislinie wächst die Herausforderung für die Lösung der Mehrdeutigkeiten in Echtzeit². Deshalb wird mit der Festsetzung der Mehrdeutigkeitsterme für die kürzeste Basislinie begonnen. Die beiden Stationen, die diese Basislinie bilden, definieren ein Mehrdeutigkeitsniveau [7]. Die schrittweise Festsetzung der Mehrdeutigkeiten aller weiteren Stationen geschieht auf diesem Niveau. Das Ergebnis ist ein mehrdeutigkeitsfreies

²Voraussetzung für Echtzeitpositionierungsdienste

Netz. Gehen Ionosphärenmodelle in die Berechnung ein, kann die Mehrdeutigkeitslösung vor allem bei großen Basislinien deutlich verbessert werden. Wurde die Anzahl an ganzen Wellenzyklen berechnet und der Einfluss der Ionosphäre weitgehend eliminiert, können Zusatzparameter geschätzt werden, die den troposphärischen Restfehler erfassen. Da der Einfluss potentieller Fehlerquellen, wie die Mehrwegeausbreitung oder atmosphärische Laufzeitverzögerung, proportional mit der Zenitdistanz wachsen, kann durch die Verwendung dieser geschätzten Zusatzparameter eine Verbesserung der Mehrdeutigkeitslösung für niedrig stehende Satelliten erwartet werden. In Kapitel 6.2 wird am Beispiel des EPOSA-Netzwerkes untersucht, wie viel Zeit vergeht, bis für einen Satelliten die Mehrdeutigkeiten gelöst werden um dadurch abschätzen zu können, inwieweit Probleme bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten von Satelliten in niedrigen Elevationen auftreten.

Nach der Lösung der Mehrdeutigkeiten werden aus den Beobachtungsresiduen (bezogen auf eine Masterstation im Netz) die entfernungsabhängigen Fehler im Referenznetz modelliert. In Abhängigkeit vom Modell der Fehlerparametrisierung [Kapitel 3.3.2] werden Korrekturen dem Rover zur Verfügung gestellt. Der Rover verwendet diese, um seine Beobachtungsdaten und dadurch seine Position zu verbessern. In Abhängigkeit von der Geometrie der beobachtbaren Satelliten und der Entfernung zur Referenzstation beträgt die Initialisierungszeit teilweise nur wenige Sekunden [Kapitel 6.7]. Die Übertragung der Korrekturdaten erfolgt zumeist über GSM oder NTRIP [Kapitel 3.5] im standardisiertem RTCM-Format [Kapitel 3.4]. Bevor auf diese eingegangen wird, werden die Verfahren der Fehlermodellierung in Referenzstationsnetzen (MAC, FKP, VRS und PRS) näher betrachtet.

3.3.2 Fehlerparametrisierung in Referenzstationsnetzen

Zur Erfüllung des Ziels der schnellen Reduzierung der entfernungsabhängigen Fehler und damit verbunden eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung am Rover, werden Korrekturdaten an die Mobilstation übermittelt. Auf Grund der Komplexität des Modells der Fehlermodellierung in der Zentrale und der beschränkten Bandbreite der verfügbaren Übertragungstechniken, ist es nicht möglich die Gesamtheit der aktuellen Parameter an den Rover zu übertragen [3]. Deshalb wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen zur Fehlerparametrisierung in Referenzstationsnetzen entwickelt, von denen in diesem Kapitel die Modelle *Master-Auxiliary* (MAC), Flächenkorrekturparameter (FKP), Virtuelle Referenzstation (VRS) und Pseudo Referenz Station (PRN) näher beschrieben werden.

Master-Auxiliary (MAC)

Das MAC basiert auf dem Konzept des gemeinsamen Mehrdeutigkeitsniveaus [Kapitel 3.3.1]. Ausgestrahlt werden die Trägerphasenkorrekturen einer *Master*-Referenzstation und darauf bezogen die Trägerphasenkorrekturen aller anderen Referenzstationen (*auxiliary*) [18]. Weiterhin müssen die Positionen der Master- und Auxiliary-Stationen übertragen werden. Zur Reduktion des Datenvolumens werden dafür Koordinatendifferenzen verwendet. Im Unterschied zu anderen Modellen werden die reinen Residuen und keine Fehlermodelle übertragen, dadurch wird dem Nutzer die Wahl eines eigenen Modells zur Interpolation der Differenzen überlassen. Der Vorteil des Konzeptes liegt in der Unabhängigkeit vom Hersteller der GNSS-Empfängern und es ist sehr gut für kinematische Anwendungen geeignet. Darüber hinaus ist es möglich aus dem MAC Konzept alle anderen verfügbaren Modelle (FKP, VRS, PRS) zu rekonstruieren [16]. Für die Übertragung der Trägerphasenkorrektur wird der RTCM-Nachrichtentyp 20 genutzt. Um die Datenmenge weiter zu reduzieren, könnten die übertragenen Differenzen auch in dispersive und nicht dispersive Anteile aufgespalten werden.

Virtuelle Referenzstation (VRS) und Pseudo-Referenzstation (PRS)

Beides, VRS und PRS sind Variationen des selben Konzeptes in dem virtuelle oder nicht physische Referenzstationsbeobachtungen in der Nähe des Rovers erzeugt werden. Im Fall der VRS beträgt der Abstand zwischen virtueller Station und Rover wenige Meter, da sie aus der Navigationslösung berechnet wird, die die Mobile Station an die Zentrale sendet. In der Zentrale werden für diese Näherungsposition aus den Beobachtungen umliegender Referenzstationen Messdaten erzeugt. An diese Daten werden entfernungsabhängige Korrekturen angebracht. Daraus entstehen die Beobachtungsdaten, die ein GNSS-Empfänger an der virtuellen Referenzstation theoretisch beobachten würde. Diese Daten werden an den Rover übermittelt. Der RTK-Rover betrachtet die VRS als Referenzstation in sehr kurzer Entfernung und verwendet die empfangenen Daten zur präzisen relativen Positionierung. Das Konzept PRS ist im Prinzip nur eine Modifikation des VRS Konzeptes durch Geo++. Die virtuelle Basislinie beträgt mehrere Kilometer und die RTK Netzwerk-Korrekturen beziehen sich immer auf die momentane (bekannte) Rover-Position. Das erlaubt die Beschreibung der Änderung der Fehler mit der Bewegung des Rovers und ist somit im Vergleich zu VRS für kinematische Anwendungen geeignet. Auf Grund der notwendigen bidirektionalen Datenverbindung sind beide Konzept jedoch nicht “*Broadcast*” fähig, d.h. auf Grund der notwendigen

Kommunikation zwischen Referenzstation und Rover muss für jede Mobile Station eine eigene Lösung gerechnet werden. Die Aussendung eines Datensatzes für viele Nutzer wie bei MAC ist damit nicht realisierbar. Als Übertragungsformate kommen vor allem die RTCM-Format Versionen V2.3 (Messages 18,19 oder 20,21) und V3.0 als auch die neuste Ausprägung V3.1 (Messages 1015,1016) zum Einsatz.

Flächenkorrekturparameter (FKP)

Im FKP Ansatz werden dispersive und nicht-dispersive Korrekturen durch vier Koeffizienten eines Polynoms repräsentiert. Das Polynom ist parallel zum WGS84 und wird in der Höhe der Referenzstation gelagert. Der Grad des Polynoms wird so gewählt, dass es als beste Beschreibung des Verhaltens der entfernungsabhängigen Fehler betrachtet werden kann. Die Koeffizienten und die Beobachtungsdaten einer Referenzstation (zumeist der nächst gelegenen Referenzstation) wird an die Mobile Station übertragen. Der Rover rechnet aus den Koeffizienten und seiner Näherungsposition die Korrekturen und wendet sie auf seine Positionslösung an. Typischerweise wird ein lineares Polynom zur Beschreibung der entfernungsabhängigen Fehler verwendet, die in dispersive [Gleichung 3.4] und nicht-dispersive lineares FKP Modell [Gleichung 3.5] unterteilt werden können, [16]

$$\delta\phi_{mp,\Delta}^q = 6.37 \cdot \left(1 + 16\left(0.53 - \frac{E_p^q}{\pi}\right)^3 \cdot [n_{\Delta}^q \cdot \varphi_{mp} + e_{\Delta}^q \cdot \lambda_{mp} \cdot \cos(\varphi_m)]\right) \quad (3.4)$$

$$\delta\phi_{mp,\Sigma}^q = 6.37[n_{\Sigma}^q \cdot \varphi_{mp} + e_{\Sigma}^q \cdot \lambda_{mp} \cdot \cos(\varphi_m)] \quad (3.5)$$

mit

$\delta\phi_{mp,\Delta}^q$	genährte Korrektur für dispersive Fehler, beobachtet auf der Station p
E_p^q	Elevation des Satelliten q
$e_{\Delta}^q, n_{\Delta}^q$	dispersive Gradienten in Ost- und Nordrichtung
$\delta\phi_{mp,\Sigma}^q$	genährte Korrektur für nicht-dispersive Fehler
$e_{\Sigma}^q, n_{\Sigma}^q$	nicht-dispersive Gradienten in Ost- und Nordrichtung
φ_m	Koordinaten der Referenzstation
φ_{mp}	Koordinatendifferenz zwischen Referenzstation und Punkt auf der Polynomfläche

Das FKP Konzept ist “*Broadcast*” fähig und geeignet für kinematische Anwendungen. Seit 2001 kommt es durch die Implementierung in der RTCM-Nachricht 59 FKPA_{AdV} bei RTK-Anwendungen zum Einsatz. RTCM-59 FKP-AdV ist ein spezieller Konzept für die Implementierung von RTK, entwickelt von der “Arbeitsgemeinschaft der deutschen Vermessungsverwaltungen” (AdV) für den Echtzeitpositionierungsdienst SAPOS. Die meisten GNSS-Hersteller bieten die Verwendung dieses Konzeptes an. Neben der einfachen Realisierung des FKP Konzeptes besteht die Möglichkeit die Vorteile verschiedenen Verfahren zu kombinieren (z.B. PRS-FKP). In Tabelle 3.1 sind die einzelnen Konzepte noch einmal zusammengefasst.

Technik	Broadcast	Abdeckungs- bereich	Bandbreite	Kinematische Anwendung	Internationaler Standard
PRS+FKP	+	100 km	+	++	-
PRS	-	100 km	+	++	-
VRS	-	local	+	-	-
MAC	+	MAC Stationen	-	++	++

(++ sehr gut, + gut, - eher schlecht) [4]

Tab. 3.1: Vergleich der verschiedenen Modelle der Fehlerparametrisierung

Im EPOSA-Netzwerk werden die Konzepte FKP, VRS und PRS angeboten.

3.4 Datenübertragungsformat RTCM SC-104

Um Korrekturdaten zu übersenden, werden vor allem standardisierte Datenformate verwendet. Diese sind von Hersteller unabhängig und vereinfachen den Datenaustausch. Referenzstationsnetzbetreiber wie zum Beispiel die U.S. Coast Guard haben zur Verbesserung der Navigation solche Standards angestrebt. 1983 wurde das Format *RTCM SC-104* von einem Ausschuss der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) entwickelt. Die RTCM-Formate setzen sich aus unterschiedlichen Nachrichtentypen (*messages*) zusammen. Jede Nachricht besteht aus einem Kopf, darin werden der Nachrichtentyp, die Identifikation der Referenzstation, die Referenzzeit, die Länge der Nachricht und die Qualität der Referenzstation übertragen. Im Rumpf der Nachricht folgen eine unterschiedliche Anzahl an Wörtern, maximal 31 Wörter sind erlaubt. Jedes 30-Bit-Wort enthält 24 Datenbits und sechs Prüfbits um Übertragungsfehler prüfen zu können. Da dieses Format von vielen Herstellern verwendet wurde, hat es sich über den marinen Bereich hinaus verbreitet. Die erste Version RTCM 1.0 wurde 1985 veröffentlicht.

Seitdem wurde der RTCM-Standard mehrfach revidiert. Die aktuelle Version 3.1 wurde 2006 bekannt gegeben. Die Neuerungen in den jeweiligen Versionen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

RTCM-Version	veröffentlicht	Neuerungen
RTCM 1.0	1985	Standard für die DGPS-Positionierung Genauigkeitsziel 5 m
RTCM 2.0	1990	GPS-Codekorrekturen Nachrichtentypen (1-17, 59) Positionsgenauigkeit 1..3 m Aufdatierungsrate < 10 sek
RTCM 2.1	1994	Erweiterung RTK (Typ 18-21) Proprietäre Nachricht erlaubt FKPs Positionsgenauigkeit ~cm Aufdatierungsrate << 10 sek
RTCM 2.2	1998	Inkludiert GLONASS (Typ 31-36) Aufdatierungsrate GLONASS ca. 30 sek
RTCM 2.3	2001	Zusätzliche Nachrichten für RTK-Anwendungen (Typ 23, 24) Reduktion der Menge der Übertragungsdaten Berücksichtigung der Antennenkalibrierungen
RTCM 3.0	2004	Neue Datenstruktur (Datenbankorientiert) Erweiterung für zukünftige GNSS Network RTK-Messages
RTCM 3.1	2006	Fünf neue Messagetypen für Network RTK Zwei neue Messages für Ephemeriden

Tab. 3.2: Versionen des RTCM-Standards

Am 21.Mai 2007 wurde ein *Addendum 1* zu RTCM 3.1 herausgegeben. Dieses beinhaltet acht neue Messagetypen für Transformationsparameter. Das *Addendum 2*, beschlossen am 31.August 2007 führt vier neue Messagetypen für den Vernetzungsbetrieb ein. Die Typen 1030, 1031 und 1032 enthalten Zusatzinformationen für den vernetzten Referenzstationsbetrieb (MAC, FKP, VRS). Der Typ 1033 enthält zusätzliche Informationen über den Empfänger. [2] In Zukunft sind weitere Messagetypen für die Verwendung von FKP und MAC für GLONASS vorgesehen, sowie proprietäre Messages für jeden Hersteller.

3.5 Modelle der Datenübertragung

3.5.1 GSM, GPRS und UMTS

GSM (Global System for Mobile Communications) ist ein *leitungsvermittelltes Kommunikationssystem* [18] und war der erste genormte Standard für den mobilen Funk. Es wurde zur Sprachkommunikation entwickelt, darüber hinaus ermöglicht es die bidirektionale³ Datenübertragung mit 9'600 bps. Mit verschiedenen Verfahren der Kanalbündelung kann die Übertragungsrate auf 19'200 bps gesteigert werden.

GPRS (General Packet Radio Service) ist eine Technik, die in GSM-Netzten eine schnellere Datenübertragung ermöglicht. Der Vorteil besteht darin, dass die gesamte Bandbreite nur genutzt wird, wenn der Nutzer Daten verschickt oder anfordert. Die Abrechnung bei GPRS erfolgt über die Datenmenge und nicht wie bei GSM über die Verbindungszeit. Dadurch konnten die Kosten für die Datenübertragung gesenkt werden.

UMTS ist die dritte Generation der Mobilfunksysteme, ähnlich wie GPRS nutzt es die Vorteile der paketorientierten Übertragung, es können jedoch wesentlich höhere Übertragungsraten von bis zu 2 Mbps erreicht werden. Angesichts der hohen Datenrate können grundsätzlich alle zukünftigen GNSS-Korrekturdaten über dieses Format übermittelt werden. Eine Einschränkung besteht jedoch bei kinematischen Anwendungen. Die maximale Datenrate kann nur bei statischen Messungen erreicht werden. Bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h ist nur noch eine Übertragung mit 384 kbps möglich.

3.5.2 NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)

Das Bundesamt für Kartografie (BKG) entwickelte gemeinsam mit der Universität Dortmund eine http-basierende Technik zur Übertragung von DGPS-Daten über das Internet an mobile Nutzer. Diese Technik basiert auf dem NTRIP-Format und ermöglicht die schnelle Übertragung von RTCM-Korrekturdaten. Um Sicherheitsrisiken auszuschließen und eine weltweite Verbreitung zu gewährleisten, ist NTRIP vierstufig aufgebaut.

- Ntrip Sources (Generierung des DPGS-Datenstroms)

³Voraussetzung für die Anwendung von VRS

- Ntrip Server (Übertragung des NTRIP-Formates)
- Ntrip Caster (Broadcaster, vervielfältigt Daten und stellt sie dem Nutzer zur Verfügung)
- Ntrip Clients (Datenempfänger)

Über das Internet (GPRS / UMTS) verbindet sich der Nutzer über die IP Adresse und dem Port mit dem Datenserver. Nach erfolgreicher Authentifizierung über Nutzernamen und Passwort erhält der Nutzer seine angefragten Daten. Werden VRS-Korrekturdaten übertragen, muss der Nutzer zuerst seine Näherungsposition senden (z.B. im Format NMEA0183 GGA), bevor er die RTCM Daten beziehen kann. Der Vorteil von NTRIP liegt in der hohen Verfügbarkeit und in der *Broadcast*-Fähigkeit. Im EPOSA-Netzwerk werden sowohl GSM als auch NTRIP angeboten.

4 EPOSA Netzwerk

4.1 Historische Entwicklung

EPOSA ist aus der Kooperation ÖBB, BEWAG und WIENSTROM entstanden. Jedes dieser Unternehmen kann neben seinem Hauptgeschäft auf eine langjährige Entwicklungsphase im Bereich der Echtzeitpositionierung zurückblicken, auf die in diesem Kapitel etwas näher eingegangen wird. Da die ÖBB den Großteil an Referenzstationen betreibt¹, wird mit der Betrachtung dieses Unternehmens begonnen.

Die ÖBB unterliegt der gesetzlichen Verpflichtung zur Dokumentation ihrer Infrastruktur. Dazu gehören unter anderem mehr als 20.000 Kilometer Kabel Österreich weit. Bis Anfang der 90er Jahre wurden alle Vermessungen mit Bezug zur Gleisachse durchgeführt. Dies führte allerdings zu Problemen, sobald die Achse verlegt wurde. Deshalb wurde ein Wechsel zur koordinativen Erfassung der Infrastruktur mit Bezug zu einem überregionalen Koordinatenrahmen angestrebt. Zunächst wurde dazu auf die Vermessung mittels Tachymeter zurückgegriffen. Seit 1995 ist die ÖBB auch im Besitz von GPS-Empfängern. Bei der Vermessung mittels GPS stützte man sich auf das relative GPS-Beobachtungsverfahren unter Verwendung von Rover und eingetragener Basisstation [Kapitel 3.2]. Auf Grund des zeitlichen Aufwandes bei der Suche nach bekannten Triangulierungspunkten und des Aufbaus der Basis wuchs das Interesse an Alternativen. Einerseits wollte man Koordinaten in einem übergeordneten Koordinatenrahmen bekommen, andererseits unabhängig von Festpunkten und der teilweise langen Suche danach im Feld sein. 2004 besichtigten Mitarbeiter der ÖBB das Referenzstationsnetz der KELAG. Anfänglich war das Bestreben gering, ein eigenes Referenzstationsnetz aufzubauen. Zunächst wurden Kooperationspartner gesucht, die bereits Erfahrung mit Referenzstationsnetzen haben und auf die man sich stützen konnte. Es zeichnete sich jedoch ab, dass auf lange Sicht eigene GNSS-Referenzstationen notwendig sind, um die

¹31 Stationen; im Vergleich dazu BEWAG mit vier Stationen und WIENSTROM mit zwei Stationen

Anwendungsgebiete der ÖBB, die sich nahezu auf das ganze Staatsgebiet Österreich erstrecken, abdecken zu können. Letztendlich war dies der Grundstein für den Aufbau eines neuen Österreich weiten Referenzstationsnetzes. Für die Realisierung konnte sich die ÖBB auf das Know-How und die Unterstützung der TU Wien sowie den Firmen WIENSTROM und BEWAG stützen. Mit den letztgenannten beiden Unternehmen wurde 2005 ein Kooperationsabkommen geschlossen.

Die BEWAG betreibt bereits seit August 1997 das GPS-Referenzstationsnetzwerk (SATVB), mit vier GPS-Stationen (Güssing, Mattersburg, Oberpullendorf, Neusiedl/See). Im Mai 1999 erfolgte die vollständige Umrüstung auf GPS/GLONASS-Empfänger. Die Station Mattersburg wurde unter anderem Bestandteil des IGS Projektes IGLOS und liefert seitdem einen Beitrag zur Bestimmung präziser GLONASS Satellitenbahnen. Bis 2002 wurde das Netz nach dem Prinzip der autonomen Referenzstationen [6] betrieben. Auf Grund hoher Wartungsintensität wurde 2003 jedoch auf das Konzept der zentralen Referenzstationssteuerung umgestellt. Auch der Positionierungsdienst der Firma WIENSTROM (WEP), der sich seit Ende 2002 im Vollbetrieb befindet, basiert auf diesem Konzept. Neben den eigenen Referenzstationen Leopoldau und Baden konnte die WIENSTROM auf die Daten der BEWAG-Stationen Mattersburg und Neusiedl/See zugreifen. Für die Berechnung der RTCM-Korrekturdatensignale und Fehlermodelle werden bei beiden Unternehmen die Softwarelösungen der Firma Geo++ verwendet.

Gemeinsam decken SATVB und WEP die Gebiete Burgenland, Wien und Umgebung ab. Die Abdeckung des restlichen Staatsgebietes sollte durch den Echtzeitpositionierungsdienst der ÖBB (TEPOS) realisiert werden. Die Arbeiten dafür [Kapitel 4.2] wurden innerhalb von vier Jahren abgeschlossen, wobei drei Ausbaustufen unterschieden werden konnten. Die erste Ausbaustufe wurde im September 2005 erreicht und umfasst

- zehn GPS/GLONASS-Empfänger,
- eine Zentrale bei WIENSTROM und
- Abgabe der Korrekturdaten mittels GSM (4 RTCM-Datenformate).

Das Netz wurde in der ersten Ausbaustufe nur für innerbetriebliche Nutzung freigegeben. Die zweite Ausbaustufe erfolgte in den Jahren 2006 bis 2007. Sie wurde mit einer Österreich weiten Verteilung an Referenzstationen im September 2007 abgeschlossen und umfasst

- 37 GPS/GLONASS-Empfänger,

- zwei Zentralen (WIENSTROM und ÖBB),
- Abgabe der Korrekturdaten mittels GSM und NTRIP (5 RTCM Datenformate) und
- die RINEX Datenabgabe über das Internet.

Die dritte Ausbaustufe mündete im Kooperationsvertrag vom 13.02.2009. Darin einigten sich alle drei Unternehmen auf eine bundesweite Vermarktung und der Gründung einer Dachmarke von TEPOS/WEP/SATVB namens EPOSA. Damit war der Aufbau eines Österreich weiten GNSS-Referenzstationsnetzes grundsätzlich abgeschlossen. Um auch die Abdeckung an den Randgebieten der Staatsgrenze zu sichern und die Qualität der Korrekturen dort zu verbessern, besteht bis heute das Bestreben weitere Partner in angrenzenden Ländern zu finden. Eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Betreibern eines Echtzeitpositionierungsdienstes in Tschechien und Italien existiert bereits, weitere Kooperationen werden angestrebt.

4.2 Systemüberblick

4.2.1 Netzaufbau

Im Jahr 2005² waren wie in Kapitel 4.1 erwähnt, die Dienste SATVB und WEP bereits in Betrieb, das Referenzstationsnetz TEPOS noch im Aufbau. Da Gebäude sowie redundante Übertragungstechnik und Leitungen vorhanden waren, reduzierte sich der Aufwand für den Aufbau des Referenzstationsnetzes der ÖBB. Zunächst wurden mögliche Standorte bereist und Testmessungen durchgeführt. Die Testdaten wurden von der TU Wien ausgewertet und dienten als Grundlage für die Festlegung der Standorte. Neben einer gesicherten Infrastruktur waren ein stabiler Standort, eine homogene Stationsverteilung, der Stationsabstand, geringe Mehrwegereflectionen und eine hindernisfreie Horizontsicht die Hauptausswahlkriterien. Um cm-Genauigkeit in der Positionierung zu erreichen, sollte die Distanz zwischen den Referenzstationen nicht größer sein als 50-80 km. [12]. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurden 31 Standorte ausgewählt. Die Verteilung der Stationen ist in [Abbildung 4.1] zu sehen. Nach der Festlegung der Standorte erfolgte die Mast- und Antennenmontage sowie die Inbetriebnahme der Stromversorgung und der Empfänger. Es wurden Antennen vom Typ TPSCR3_GGD CONE

²Zeitpunkt des Entschlusses in Österreich ein flächendeckendes Referenzstationsnetz aufzubauen

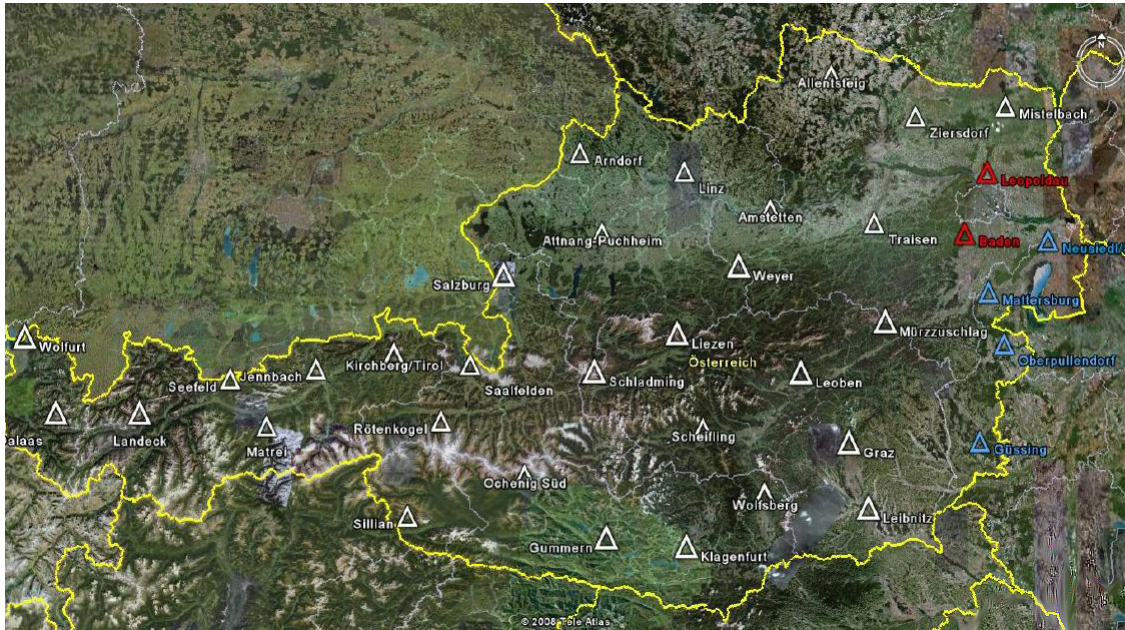


Abb. 4.1: Verteilung der Referenzstationen: In *weiß* die 31 TEPOS Referenzstationen, in *blau* und *rot* die Stationen der Kooperationspartner BEWAG und WIENSTROM.

[Abbildung 4.2] sowie kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger der Marke Topcon verwendet. Die Referenzstationen werden vom jeweiligen Betreiber betreut und gewartet. Die Anbindung der Stationen an das Datennetz erfolgt nach dem Konzept der zentralen Referenzstationssteuerung [6]. Das heißt, die Aufzeichnung der Beobachtungsdaten, die Mehrdeutigkeitsfestsetzung und die Bestimmung der Korrekturmodellparameter erfolgt in den Rechenzentralen der ÖBB und WIENSTROM.

4.2.2 Datenübertragung

Interne Datenübertragung

Datenkommunikationsaspekte sind bei Echtzeitpositionierungsdiensten von großer Bedeutung. Die Echtzeit-Datenübertragung zwischen Referenzstationen und den zwei Rechenzentralen der Netzbetreiber erfolgt über redundante Datenleitungen der Telekommunikation sowie paketorientiert über schnelle Internetverbindungen. Die Daten der sechs WEP und SATVB Stationen werden zuerst in der Zentrale der WIENSTROM empfangen, die Beobachtungsdaten der 31 TEPOS Stationen werden als erstes am Server der ÖBB registriert. Nach dem Empfang der RINEX Daten erfolgt der wegeredundan-



Abbildung 4.2: GNSS Antenne TPSCR3_GGD Choke Ring with Radome

te Datenaustausch zwischen WIENSTROM und ÖBB über das Rechenzentrum der Interxion und den Zentralserver Brünnerstraße, die als Kopplung zwischen den Betreibern dienen. Anschließend werden in beiden Rechenzentralen die Mehrdeutigkeiten der Phasensignale sowie die Korrekturmodellparameter mit dem Softwarepaket der Firma Geo++ bestimmt. Grundsätzlich sollten daher die Lösungen in beiden Zentralen identisch sein. Ein Vergleich der beiden Lösungen wurde bis jetzt jedoch noch nicht durchgeführt, wird aber durch die geplante Realisierung des *Zero-Baseline Monitoring* Konzeptes [Kapitel 4.2.3] angestrebt.

Externe Datenübertragung

Aus den Parametern der Fehlermodellierung [Kapitel 3.3.2] ist es möglich individuelle Korrekturen für Basislinien innerhalb des Referenzstationsnetzes zu berechnen. Im EPOSA Netzwerk werden dafür die Konzepte FKP, VRS und PRS angeboten [Kapitel 3.3.2]. Um den Echtzeitpositionierungsdienst nutzen zu können, muss sich der Nutzer zunächst registrieren lassen. Neben persönlichen Informationen wird der Kunde nach einer Mobiltelefonnummer, dem eingesetzten Gerätetyp und dem gewünschten Format zur Übertragung der Korrekturdaten gefragt. Die Rufnummer dient dazu, den Kunden bei der Einwahl über GSM identifizieren zu können. Die Abfrage des Gerätetyps hat mehrere Gründe. Zum einen kann daraus abgelesen werden, ob der Empfänger überhaupt für die Echtzeitpositionierung geeignet ist und wenn ja, welche RTCM-Formate nutzerseitig unterstützt werden. Zum anderen können technische Probleme oft durch

Kenntnis des Gerätetyps schneller gelöst werden (zum Beispiel wenn der Nutzer Korrekturdaten im RTCM3.+ bestellt, welche ältere Geräte in der Regel nicht verarbeiten können). Außerdem wird ab dem Format RTCM3.0 der Gerätetyp benötigt, weil bei der Verwendung von GLONASS-Beobachtungen herstellerspezifische Daten bezüglich der zeitlichen Synchronisierung von GPS- und GLONASS-Daten mit übertragen werden.

Für die Übertragung der Korrekturdaten stehen dem Nutzer mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Angeboten werden DGNSS-Korrekturdaten im Format RCTM2.0 mit Submetergenauigkeit und PDGNSS-Korrekturdaten im Format RCTM2.3 oder RCTM3.+ [Kapitel 3.4] mit Zentimetergenauigkeit. Werden die Daten über den NTRIP-Server [Kapitel 3.5] bezogen, werden dem Nutzer nach erfolgreicher Registrierung die Zugangsdaten (Nutzer, Passwort, IP-Adresse und Port, beziehungsweise Mountpoint) für die Einwahl übermittelt. Für den Zugang via GSM genügt die Kenntnis der Einwahlnummer.

Neben dem Echtzeitpositionierungsdienst können außerdem Aufzeichnungen von Beobachtungsdaten im RINEX-Format [Kapitel 5] zur Auswertung im *Post Processing* bezogen werden. Dafür steht die Applikation *GNWEB* [Abbildung 4.3] von Geo++ zur Verfügung. Je nachdem ob die Daten vom RINEX-Datenserver der ÖBB oder von der WIENSTROM bezogen werden, kann *GNWEB* über <http://tepos.oebb.at/> oder über http://rinex.wienstrom.at/geopp_gnweb/gnweb.html aufgerufen werden.

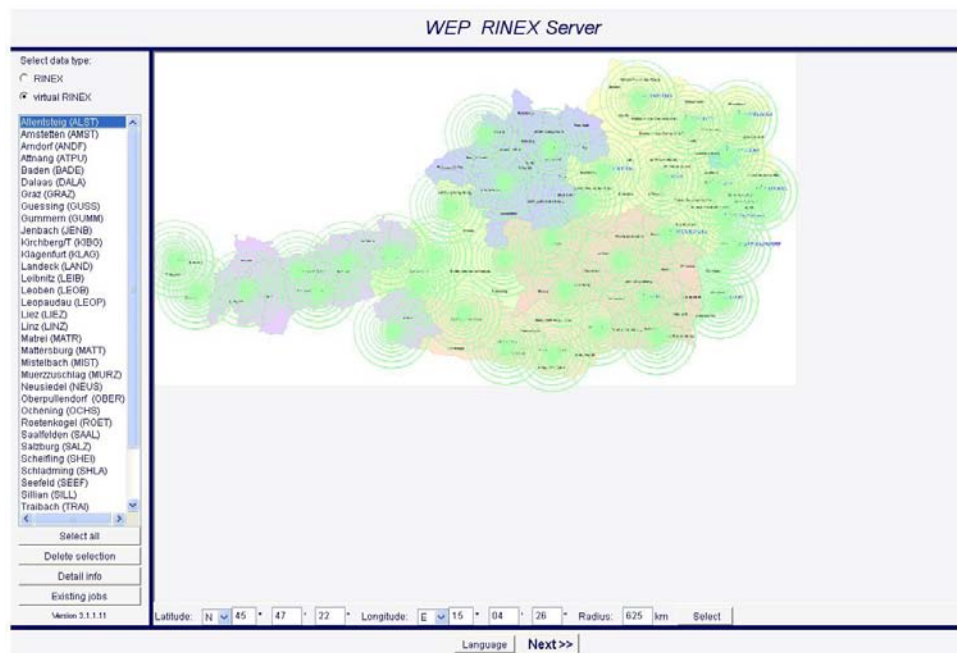


Abb. 4.3: GNWEB Benutzeroberfläche, EPOSA Stationsnetz

Die Zugangsdaten müssen separat bei dem jeweiligen Unternehmen angefordert werden. Die von beiden Servern angebotenen Daten sind jedoch identisch. Entweder wählt man eine der 37 Referenzstationen aus oder lässt sich für eine beliebige Position virtuelle RINEX Daten berechnen. Die GNSS-Beobachtungsdaten stehen für jede Station ab dem 01.01.2008 im Sekundentakt zur Verfügung und können komprimiert oder unkomprimiert, stunden- oder tagesweise bezogen werden.

Seit Anfang 2010 besteht auch die Möglichkeit, den *RINEX Postprocessing Service* von EPOSA zu nutzen. Dieser wird über das Web Interface SSRPOST von Geo++ realisiert und erlaubt die Prozessierungen von statischen oder kinematischen RINEX Daten. Bis jetzt ist der Zugang nur über den Server der ÖBB (<http://tepos.oebb.at/>) realisiert. Dem Nutzer wird der Service angeboten, seine eigenen RINEX Daten hochzuladen und prozessierte Koordinaten für einen Punkt oder eine Trajektorie zu erhalten. Der dabei zugrunde liegende Berechnungsansatz wird Precise Point Positioning-RTK (PPP-RTK) bezeichnet [2], die erreichbaren Genauigkeiten werden in der Größenordnung von wenigen cm abhängig von der Dauer der eingesendeten Messdaten angegeben.

4.2.3 Monitoring Konzept

Das Ziel des Monitorings ist die automatische Überwachung des Referenzstationsnetzes mit Hilfe geeigneter Beobachtungsverfahren. Für die Betreiber ergibt sich dadurch die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit ihrer Dienste erhöhen und gleichzeitig die Qualität der Korrekturdaten überprüfen zu können. In diesem Kapitel wird näher auf die Konzepte eingegangen, die im EPOSA Netzwerk realisiert wurden, beziehungsweise die sich in Planung befinden. Zum einen gehört dazu die Überwachung der Korrekturdaten. Wie dies umgesetzt werden kann, wird anhand der beiden Konzepte *Zero-Station Monitoring* und *Zero-Baseline Monitoring* beschrieben. Zum anderen bedarf es einer stetigen Kontrolle der Koordinaten der Referenzstationen. Im Folgenden werden auch dazu zwei Modelle vorgestellt.

Für die Umsetzung des *Zero-Station Monitoring* Konzeptes wurde eine zusätzliche GNSS-Station am Dach der Rechenzentrale der ÖBB errichtet, die als RTK Rover im Referenzstationsnetz fungieren soll. Diese Station wird als mobile Station betrachtet und empfängt von der Zentrale Korrekturdaten via RTCM, um daraus ihre Position zu bestimmen. Für einen kontinuierlichen Betrieb wird der Rover in bestimmten Zeitintervallen (z.B. alle 6 Minuten) neu gestartet, worauf der Empfänger erneut beginnt seine

momentane Position zu bestimmen. Da die Referenzkoordinaten dieser Station bekannt sind, ist es möglich nach erfolgreicher Positionsrechnung die Koordinatendifferenz “gerechnet minus bekannt” zu bilden. Des Weiteren wird die Zeit gemessen, die notwendig ist, um die gerechneten Koordinaten zu bestimmen. Beides, die Koordinatendifferenzen sowie die Initialisierungszeit geben Auskunft über die momentane Qualität der abgegebenen Korrekturdaten und sollten einen definierten Grenzwert nicht überschreiten. Falls dies doch geschieht, könnte an das Monitoring Konzept ein Alarmsystem geknüpft werden, das ein schnelles Reagieren des Referenznetzbetreibers ermöglicht.

Das *Zero-Baseline Monitoring* kann als Erweiterung des ersten Konzeptes betrachten werden. Wiederum wird eine feste GNSS-Station mit bekannten Referenzkoordinaten benötigt. An welchem Standort diese aufgebaut wird, ist noch nicht bekannt. Sie sollte jedoch möglichst schnell und ohne viel Aufwand an das interne Übertragungsnetz angeschlossen werden können, da sie als RTK Rover für beide Zentralen gleichzeitig genutzt wird. Der Rover bestimmt seine Position zum einen mit den Korrekturdaten der ÖBB, zum anderen mit den Korrekturdaten, gerechnet in der Zentrale WIENSTROM. Anschließend wird die Basislinie aus beiden Lösungen bestimmt. Da in beiden Zentralen die gleichen GNSS-Beobachtungsdaten sowie die gleichen Softwarepakete von Geo++ für die Berechnungen verwendet werden, sollte die Basislinie die Länge 0 haben (*Zero Baseline Prozessierung*). Abweichungen davon lassen auf Fehler in den Berechnungen von mindestens einer Rechenzentrale schließen. Aussagen darüber, welche Zentrale fehlerhafte Korrekturdaten anbietet, können aus dem Vergleich der gerechneten Positionen mit der Referenzposition des Rovers ermittelt werden. Der Vorteil dieses Konzeptes ist es, dass nicht nur die Qualität der Korrekturdaten einer Zentrale überprüft werden kann, sondern auch gleichzeitig die Berechnungsmethoden beider Zentralen kontinuierlich und in Echtzeit miteinander verglichen werden können.

Das Ziel des Monitorings der Referenzstationen ist die Gewährleistung der Stabilität der Stationskoordinaten (für Georeferenzierung und hoch genaue Positionierung). Dafür sollten die Koordinaten auf wenige Millimeter genau bekannt sein und bei Änderungen entsprechend nachgeführt werden. Als Ursachen kommen geologische beziehungsweise tektonische Deformationen, regionale Geländedeformationen (z.B. auf Grund von Grundwasserschwankungen) und lokale Verformungen der Gebäude in Frage. Auch mögliche Risiken auf Grund von Naturkatastrophen oder Unwettern sollten nicht ausgeschlossen werden. Um auch diese kurzzeitigen Änderungen erfassen zu können, sollten die Stationskoordinaten in möglichst kurzen Abständen überwacht werden. Dafür wird das GNNET-Tool *RefCheck* verwendet. Dabei werden die Positionen der festgehaltenen

Referenzstationen fortlaufend geprüft. Änderungen der Stationskoordinaten machen sich vor allem in den Schätzungen der Troposphäre sowie der Beobachtungsresiduen bemerkbar. Daher erfolgt das Monitoring der Referenzstationskoordinaten durch die Analyse der Residuen. Auswirkungen auf die Koordinaten sowie die Troposphäre lassen sich aus diesen zurückrechnen. Mit Hilfe des frei wählbaren *RefCheck*-Parameters “Korrelationslänge” können kurz-periodische Einflüsse eliminiert werden. Als Ergebnis wird der momentane Offset in allen drei Koordinatenrichtungen ausgegeben. Überschreiten diese den Grenzwert von 10 mm, wird der Referenznetzbetreiber darüber informiert. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Echtzeit-Realisierung. Nachteile ergeben sich durch den relativen hohen Grenzwert von 10 mm.

Eine andere Möglichkeit wäre, aus den gespeicherten Beobachtungsdaten im *Post Processing* die Stationskoordinaten zu berechnen und diese mit den Referenzkoordinaten zu vergleichen. Werden für die Auswertung die RINEX Daten mehrerer Tage herangezogen, können Genauigkeiten von wenigen Millimetern erreicht werden. Dieser Test wird als externe Überprüfung an der TU Wien durchgeführt. Der Nachteil dieser Methode ist, dass Deformationen erst mit größerer zeitlicher Verzögerung bestimmt werden können. Der Vorteil besteht darin, dass selbst geringfügige Änderungen der Stationskoordinaten sichtbar werden. Eine Kombination beider Verfahren wäre somit erstrebenswert. Die Erweiterung durch Konzepte der automatischen Nachführung der Koordinaten sollte auch nicht vernachlässigt werden.

4.2.4 Kundenservice

Im Kooperationsvertrag vom 13.02.2009 haben sich die Betreiber darauf geeinigt, dass WIENSTROM den Vertrieb und den Kundenservice für EPOSA übernimmt. Dies umfasst die Wartung der Homepage, den Abschluss der Nutzungsverträge, die Verrechnung mit dem Kunden sowie die Beantwortung aller technischen und administrativen Fragen. Ansprechpartner für vertragstechnische Fragen oder Fragen zur Verrechnung ist Dipl.-Ing. Christian Klug. Die Kontaktdaten sind der Webseite von EPOSA zu entnehmen (<http://www.eposa.at>). Darüber hinaus können alle Anfragen zum EPOSA-Netzwerk auch an die Mitarbeiter der ÖBB gerichtet werden, insbesondere wenn diese den *RINEX Postprocessing Service* betreffen. Grundsätzlich wird ein 24/7 Support angeboten. Dieser Service ist für den Nutzer jedoch mit Mehrkosten verbunden. Da es bis jetzt noch keine nutzerseitigen Anfragen diesbezüglich gab, wird die Zuverlässigkeit des Systems momentan nur wochentags zwischen 07:30 und 18:00 Uhr gewährleistet. Das umfasst zum einen

den Support via EPOSA-Hotline und zum anderen eine schnelle Systemwiederherstellung bei Ausfällen. Der Server meldet Systemausfälle automatisch per Email an die Betreiber, die über Fernwartung per Laptop jederzeit auf den Zentralserver zugreifen und somit das System schnellst möglich wiederherstellen können. Ausfälle nach 18 Uhr sowie am Wochenende werden in der Regel erst am folgenden Wochentag bearbeitet. Dies führt teilweise zu längeren Ausfallzeiten, die sich auch negativ auf die Vollständigkeit der RINEX Daten [Kapitel 6.1] auswirken. Ein 24 h / 7 Tage Support ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit und wird vermutlich auch in naher Zukunft nicht realisiert werden. Vorhersehbare Ausfallzeiten, zum Beispiel auf Grund von Wartungsarbeiten am Server, werden dem Nutzer jedoch rechtzeitig per E-mail mitgeteilt.

4.2.5 Transformationsparameter

Neupunktskoordinaten aus GNSS-Referenzstationsnetzwerken beziehen sich meist auf Realisierungen des ITRS. Für die Überführung dieser Koordinaten in das geodätische Datum der nationalen Vermessung stehen verschiedene Möglichkeiten der Koordinatentransformation zur Verfügung. In der Geodäsie wird zur verzerrungsfreien Überführung vor allem das Modell von Bursa-Wolf verwendet [Gleichung 4.1].

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i & 0 & z_i & -y_i \\ 0 & 1 & 0 & y_i & -z_i & 0 & x_i \\ 0 & 0 & 1 & z_i & y_i & -x_i & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \Delta k \\ E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Dabei handelt es sich um eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit sieben Transformationsparametern (drei Translationen, drei Rotationen und eine Maßstabsänderung). Zur Bestimmung der Parameter werden gemäß der Anzahl an Unbekannten mindestens sieben Beobachtungsgleichungen benötigt. Stehen drei Vollpasspunkte zur Verfügung, liegt bereits eine leichte Überbestimmung von zwei vor. Deshalb erfolgt die Berechnung der Transformationsparameter $(T_x, T_y, T_z, \Delta k, E_x, E_y, E_z)$ in einem vermittelnden Ausgleich.

Auf Grund der historisch gewachsenen Struktur kommt es zu Netzspannungen im nationalen Vermessungsnetz. Um diese möglichst klein zu halten, werden in der Regel

regional angepasste Parametersätze oder alternativ eine geographische Rasterlösung (NTv2) verwendet. Beide können mittels RTCM-Formaten an den Rover übertragen werden. Um eine Rasterlösung für ganz Österreich zu bekommen, wurden statische Messungen auf bekannten Punkten des nationalen Festpunktfeldes durchgeführt. Die Messdaten wurden von der TU Wien ausgewertet und daraus Residuen in Länge, Breite und Höhe bezüglich eines mittleren Transformationsparametersatzes [Tabelle 4.1] berechnet [Abbildung 4.4]. Eine genauere Betrachtung der Rasterinterpolation sowie der Verfügbarkeiten im EPOSA-Netzwerk entnehmen Sie [11] beziehungsweise [8].

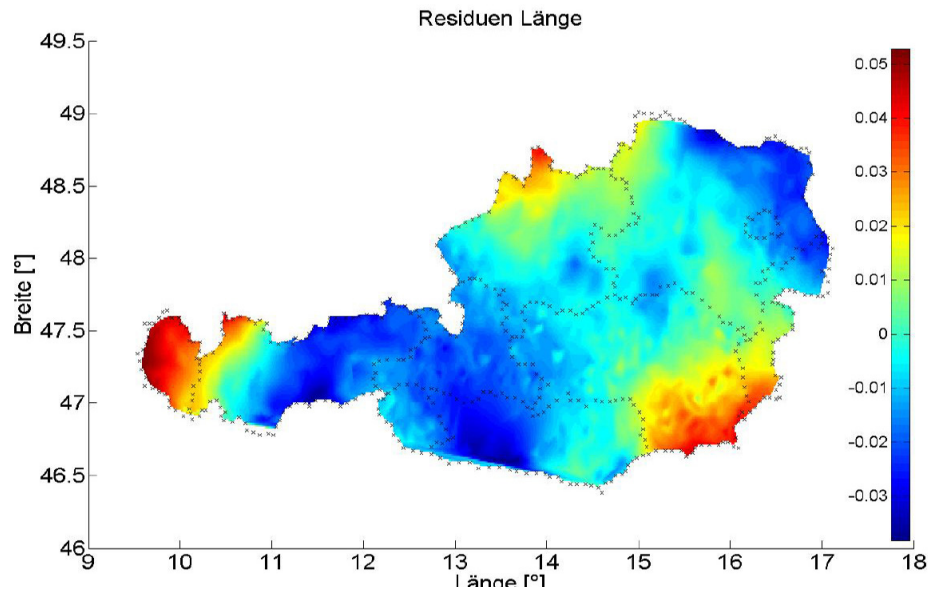


Abbildung 4.4: Residuen in Länge bezüglich dem mittleren Transformationsparametersatz

T_X	-577.326 m
T_Y	-90.129 m
T_Z	-463.919 m
ΔK	-0.0000024232
E_X	5.137 "
E_Y	1.474 "
E_Z	5.297 "

Tab. 4.1: Mittlerer Transformationsparametersatz

4.2.6 Kosten für die Nutzer

Alle in Tabelle 4.3 angeführten Preisangaben beziehen sich auf den Stand vom 01. Oktober 2009 und wurden dem Preisblatt von EPOSA entnommen. Eine Kopie davon befindet sich im Anhang [A.1]. Grundsätzlich steht dem Kunden frei, den Echtzeitpositionierungsdienst für einen bestimmten Tag, einen Monat oder für ein ganzes Jahr zu nutzen. Je nachdem, welche Korrekturdaten und welche Transformationsparameter gekauft werden, sind die Preise für jeden Zeitraum unterschiedlich gestaffelt. Bei der Erstanmeldung wird eine Auftragspauschale von 50 EUR verrechnet. Für die Einwahl mittels GSM oder NTRIP fallen neben den Providergebühren keine weiteren Kosten an.

Produkt	Beschreibung	pro Tag	pro Monat	pro Jahr
TP-DGNSS	Präzise DGNSS, TP für ganz Österreich	55 EUR	700 EUR	3600 EUR
P-DGNSS	Präzise DGNSS, TP für ein Bundesland	55 EUR	500 EUR	2000 EUR
T-DGNSS	DGNSS, TP für ganz Österreich	55 EUR	500 EUR	2000 EUR
DGNSS	DGNSS, TP für ein Bundesland	15 EUR	250 EUR	1000 EUR
RINEX	GNSS Beobachtungsdaten im 1s-Takt	36 EUR pro Referenzstation		

(TP) Transformationsparameter

Tab. 4.3: Preisliste EPOSA, Stand 01.Oktober 2009

5 EPOSA Zustandsdaten

Die Referenzstationssoftware des EPOSA-Netzwerkes erlaubt die Extraktion vieler wichtiger Systemparameter und die kontinuierliche Sicherung dieser in speziellen Formaten auf dem Datenserver. Die meisten Informationen davon liegen im ASCII-Format vor und können direkt ausgelesen werden. Andere werden binär gespeichert und müssen erst in ASCII Dateien umgewandelt werden, bevor sie weiterverarbeitet werden können. Im Vorfeld dieser Arbeit wurden Parameter [Kapitel 6] gesucht, die für die Analyse des Referenzstationsnetzes relevant sind. Anschließend wurde überprüft, ob die Daten bereits am EPOSA Datenserver gespeichert werden. Falls nicht, wurde dies eingerichtet. Als Auswertungszeitraum wurde der September 2009 gewählt. Alle Zustandsdaten, die über diesen Zeitraum am Datenserver zur Verfügung stehen, sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Alle *Datenformate* die in dieser Arbeit Verwendung finden, sind im Folgenden beschrieben.

RINEX Daten

RINEX wurde für den einfachen Austausch von GNSS-Beobachtungsdaten entwickelt [20]. Der Vorteil dieses Formates liegt in der Empfängerunabhängigkeit; für Aufgaben der Echtzeitpositionierung ist es allerdings nur mittelbar geeignet. Zumeist wird RINEX für die Archivierung oder für *Postprocessing*-Anwendungen genutzt. Für die Sicherung von 60 Minuten unkomprimierter Beobachtungsdaten einer Station im Sekundentakt werden ungefähr neun MB an Speicherplatz benötigt. Für die Betreiber des EPOSA Netzwerkes bedeutet dies eine Datenmenge von mehreren Terabyte pro Jahr. Eine Reduzierung der Datenmenge würde neben der Archivierung auch die Verbreitung der RINEX-Daten via Internet vereinfachen. Aus diesem Grund hat sich das *Compact* RINEX-Format durchgesetzt. Im ersten Schritt werden nach einem Algorithmus von Hatanaka die redundanten Informationen aus den Daten eliminiert und die Zeitreihen der Code- und Trägerphasenbeobachtungen durch mehrfaches Differenzieren ausgedünnt. Im zweiten

File-Bezeichnung	Beschreibung
<i>grs</i>	<i>Stationsresiduen</i>
<i>lrx</i>	<i>RINEX Protokolldatei</i>
<i>rxr</i>	<i>Hatanaka komprimierte rxo</i>
<i>rxg</i>	GLONASS Navigation file
<i>rxn</i>	GPS Navigation file
<i>rxo</i>	<i>RINEX Beobachtungsdaten</i>
<i>rxv</i>	komprimierte rxg
<i>rxx</i>	komprimierte rxn
<i>sin</i>	<i>GNtracking Zustandsdaten</i>
<i>sol</i>	<i>stündlich geschätzte Stationskoordinaten</i>
<i>sp3</i>	Präzise Satellitenbahndaten
<i>ssa</i>	GNNET Zustandsdaten
<i>ssr</i>	binäre ssa
<i>geop*log</i>	Protokoll der Systemprozesse
<i>GNC*log</i>	NTRIP Protokolldatei
<i>NMEAlogs</i>	<i>NMEA-Standard 0183</i>

Tabelle 5.2: EPOSA Zustandsdaten

Schritt erfolgt eine UNIX-Standard Komprimierung der Dateien. Dadurch kann die Datenmenge um das Zwölfwache im Verhältnis zur Ausgangsgröße reduziert werden.

Mit dem RINEX-Format ist es nicht nur möglich Beobachtungsdaten, sondern auch Navigations-Informationen für GPS und GLONASS auszutauschen. Diese beinhalten vor allem die Satellitenuhr- und die Satellitenbahn-Daten und werden bis jetzt im Format v2.11 getrennt für jedes Satellitennavigations-System in RINEX NAV-Dateien¹ gespeichert. Die aktuell verfügbare RINEX Version (v3.00) erlaubt bereits die Speicherung aller Navigations-Informationen in nur einer RINEX NAV-Datei. Außerdem können in v3.0 die Signale zukünftiger Satellitenmissionen (Galileo und Compass) abgebildet werden. Ein Beispiel der im EPOSA Netzwerk verwendeten RINEX-Formate befindet sich im Anhang [A.1 ff].

RINEX Protokolldatei

Die RINEX Protokolldateien (*lrx*) werden durch GNSMART gemeinsam mit den RINEX-Daten, stündlich generiert. Sie geben statistische Zusatzinformationen über die Anzahl

¹ *rxn* und *rxg*, beziehungsweise komprimiert im *rxr*- und *rxv*-Format

der Epochen, die in der letzten Stunde von jedem Empfänger aufgenommen wurden und über die vorhandenen GPS und GLONASS Navigations-Informationen. Die Daten wurden bei der Analyse des Parameters “Vollständigkeit der RINEX-Daten” verwendet, der im Kapitel 6 näher beschrieben wird.

GNtracking Zustandsdaten

GNtracking erlaubt es, aktuelle Werte, die in der Regel nur programmintern verwendet werden, stündlich in eine ASCII-Datei zu exportieren. Diese Dateien, mit der Endung *sin*, werden auch „Allgemeiner Statusvektor Output“ genannt. Sie beinhalten Informationen über

- das lokale geodätische Datum,
- die Parameter des Ausgleichs der Beobachtungen
- Stationen und Messdaten,
- Satelliten-Parameter,
- die Ionosphäre und Troposphäre,
- Mehrdeutigkeiten,
- Flächenkorrekturparameter sowie
- Stationsbewegungen.

Die Daten werden fortlaufend mit einem Zeitstempel versehen und mit einer zeitlichen Auflösung von rund 20 Sekunden gespeichert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Auswertung von wenigen, ausgewählten Parametern. In Kapitel 6 werden die Stations- und tracking-Informationen, die Flächenkorrekturparameter sowie die Stationsbewegungen genauer betrachtet.

Stationsresiduen und Signalstärke

Während der Prozessierung in der Zentrale werden alle bekannten Fehlereinflüsse modelliert oder in einem Ausgleich geschätzt. Fehler, die nicht durch Modelle beschrieben

und deshalb nicht eliminiert werden können, werden als Residuen stationsweise in den *grs*-Dateien gespeichert. Die Analyse dieser Dateien erlaubt die genauere Betrachtung der Mehrwegeausbreitung im Fern- und Nahfeld in Abhängigkeit vom Elevations- und Azimutwinkel. Zusätzlich werden die *Carrier-to-Noise* Werte (*CN0*) registriert, die als Signalstärke der L1- und L2-Signale interpretiert werden können. Eine zu geringe Signalstärke ist nicht selten mit Problemen bei der kontinuierlichen Beobachtung von Satelliten gleichzusetzen und kann zu einer größeren Anzahl an *Cycle Slips* führen. Über das *CN0*-Muster lassen sich Informationen über den Empfänger, die Antenne und über das Setup an der Referenzstation (z.B. Antennenkabel,...) ableiten.

Stündlich geschätzte Stationskoordinaten

Im *sol*-Format werden Positionsinformationen aller Rover und aller nicht-festgehaltenen Referenzstationen stündlich gespeichert. Neben den geschätzten ITRF2000 Koordinaten zur Epoche 1997.0 werden zusätzlich auch die Standardabweichungen sowie die Korrelationen zwischen den Koordinatenkomponenten gespeichert. Mit diesen Informationen kann die Stabilität der Positionen der Referenzstationen überprüft und eine mögliche Drift festgestellt werden. Darüber hinaus gibt die Variation der Koordinaten indirekt Auskunft über die Qualität der abgegebenen Korrekturdaten. Treten *tracking*-Probleme auf, führt dies meist zu einer geringeren Anzahl an Beobachtungen und zu einer höheren Anzahl an *Cycle Slips*. Beides wirkt sich negativ auf die erreichbaren Genauigkeiten der Koordinaten aus. Deshalb können die Standardabweichungen der Stationskoordinaten unter anderem auch für die Erkennung von *tracking*-Problemen herangezogen werden.

NMEA-Standard 0183

Der Standard der U.S. National Marine Electronics Association (NMEA) vereinfacht die Kommunikation zwischen GNSS-Empfänger und der Software des Referenzstationsnetzes. Im Jahre 2002 wurde die aktuelle Version (v3.01) des NMEA-Standards 0183 definiert. Es können keine Beobachtungsdaten, sondern nur Navigations-Informationen im ASCII-Format in Sätzen von 20 bis maximal 80 Zeichen übertragen werden. Ein typisches Beispiel für einen NMEA-Datensatz ist die Zeile

```
$GPGGA,085830.00,4810.0073065,N,01620.7298031,E,2,04,3.80,239.7147,M,43.3865,M,0.8,,*72,
```

die mit dem *Header \$GPGGA* begonnen wird und mit der Prüfsumme (**72*) endet. Die ersten zwei Ziffern im *Header* definieren das sendende Gerät (*GP* für GPS-Empfänger), die letzten drei Ziffern des *Headers* geben das Format vor. Zu den am häufigsten verwendeten NMEA-Formaten zählen *GGA*, *GLL* und *GSV*. Die genäherte Position des GPS-Satelliten wird im Datensatz *GSV* (GPS-Satellite in View) übertragen, das *GLL*-Format (Geographic Position, Latitude/Longitude) beinhaltet die Position eines Nutzers sowie den Zeitpunkt der Positionsbestimmung. Der *GGA* (Global Positioning System Fix Data) Datensatz (siehe obiges Beispiel) beinhaltet die Zeit der Positionsbestimmung, die Position des Nutzers, einen Qualitätsindikator, die Anzahl der verwendeten Satelliten, die HDOP-Werte, die Antennenhöhe, die Geoidundulation und das Alter der differentiellen Daten [18]. In Referenzstationsnetzen wird dieses Format in der Regel verwendet, um die Näherungskordinaten des Rovers an die Zentrale zu übertragen. Das ist notwendig, wenn das Konzept der VRS oder der PRS [Kapitel 3.3.2] verwendet wird.

Für die Analyse der relevanten Parameter wird aus diesem Format vor allem die Zeit der Positionsbestimmung, der Qualitätsindikator sowie der HDOP verwendet. Mittels Indikator ist es möglich, den Status der Positionierung zu erkennen. In Kombination mit der Zeit lässt sich dadurch die Dauer berechnen, die für das Bestimmen der Koordinaten am Rover vergangen ist. Darüber hinaus ist interessant, welchen Einfluss der HDOP-Wert auf die Zeit hat, die für die Positionierung benötigt wird. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Kapitel 6.7 detailliert behandelt.

6 Analyse der relevanten Parameter

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden Parameter gefunden, die für die Analyse des Referenzstationsnetzes von Bedeutung sind. Die Auswahlkriterien dafür wurden der EPOSA Webseite entnommen und finden bereits in Kapitel 1 Erwähnung. Dazu gehören eine Österreich weite Abdeckung, ein 24/7 Support, die Berücksichtigung aller operativen Satellitensysteme sowie die Abgabe von hochgenauen Positionsdaten, mit höchster Zuverlässigkeit, bester Verfügbarkeit und geprüfter Qualität. Eine Österreich weite Abdeckung sowie der 24/7 Support wurden in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.4 diskutiert. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf den technischen Aspekten des EPOSA-Netzwerkes und der Modellierung systematischer Fehlereinflüsse. Zunächst wird mit der Betrachtung der RINEX-Daten begonnen.

6.1 Vollständigkeit der RINEX-Daten

Das EPOSA-Netzwerk ist für einen kontinuierlichen Betrieb konzipiert worden, das bedeutet eine Verfügbarkeit der Dienste zu jeder Zeit und möglichst ohne Ausfälle. Praktisch ist dies jedoch schwer zu realisieren. Probleme an den Referenzstationen, sowie Fehler in der Daten-Übertragung, Wartungsarbeiten oder Probleme am Server sind mögliche Ursachen für Systemausfälle und führen zu unterschiedlich langen Ausfallzeiten. Diese sind vor allem bei der Echtzeitpositionierung ärgerlich, wenn zum Beispiel Vermessungen im Feld nicht fortgeführt werden können. Aber auch bei Postprocessing-Auswertungen, wie zum Beispiel im Projekt GNSS-MET Austria [19], für die RINEX-Daten benötigt werden, muss mit gewissen Einschränkungen durch Ausfälle in der Aufzeichnung der GNSS-Beobachtungsdaten gerechnet werden. Inwieweit die *Vollständigkeit der RINEX-Daten* und damit verbunden die Verfügbarkeit des System im September 2009 gewährleistet werden konnte, wird in diesem Abschnitt untersucht.

In der Zeit zwischen *DOY* (Tag des Jahres) 244 und 276 (01. bis 30. September 2009) wurden für alle 37 Stationen die Anzahl der vorhandenen Messepochen ermittelt.

Die Station Klagenfurt war in dieser Zeit nicht aktiv (deshalb sind für diese Station keine Beobachtungsdaten vorhanden). Für alle anderen 36 Stationen ist die Anzahl der vorhandenen Epochen (in Stunden/Tag) in Abbildung 6.1 aufgelistet. Tage mit

	DOY																													
Station	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	
ALST	20	23	24	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
AMST	20	22	24	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
ANDF	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
ATPU	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
BADE	20	14	19	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	22	19	24	24	13	0	0	15	24	
DALA	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
GRAZ	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
GUES	19	13	19	24	24	24	24	24	24	19	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	15	24	
GUMM	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	12	0	0	17	24	
JENB	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
KIBG	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
LAND	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
LEIB	21	23	24	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
LEOB	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
LEOP	20	14	19	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	22	19	24	24	13	0	0	15	24	
LIEZ	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
LINZ	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
MATR	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
MATT	20	13	19	24	24	24	24	24	24	19	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	22	19	24	24	13	0	0	15	24	
MIST	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
MURZ	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
NEUS	20	13	19	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	15	24	
OBER	20	13	19	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	15	24	
OCHS	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
ROET	20	23	24	24	24	24	24	24	24	21	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SAAL	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	18	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SALZ	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SEEF	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SHEI	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SHLA	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
SILL	20	23	24	24	24	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	18	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
TRAI	21	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
WEYE	20	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	12	0	0	17	24	
WOBG	21	23	24	24	24	24	24	24	24	19	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	23	13	0	0	17	24
WOFU	20	23	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	
ZIDF	20	22	24	24	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	0	0	17	24	

Abb. 6.1: Vollständigkeit der RINEX-Daten

Datenlücken sind farbig markiert. Grün sind die Tage, an denen trotz Ausfällen mehr als 20 Stunden Daten aufgezeichnet wurden. Sind weniger Beobachtungsdaten vorhanden, sind die Tage gelb eingefärbt. In rot wurden die Tage markiert, an denen keine RINEX-Daten vorhanden sind.

Aus dem Mittelwert, gebildet über alle Stationen (außer Klagenfurt) und alle Tage, ergibt sich eine Gesamt-Verfügbarkeit der RINEX-Daten von 87%. Wie bereits in Kapitel 4.2.4 erwähnt, können Systemausfälle vor 7 Uhr, nach 18 Uhr und am Wochenende sowie an Feiertagen erst am nächsten Werktag bearbeitet werden. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine Werktags-Verfügbarkeit angegeben. Diese beträgt 94% und wurde aus den 22 Wochentagen im September zwischen 7:00 Uhr und 18:00 Uhr berechnet. Ausfälle des gesamten Netzwerkes waren stundenweise an fünf Tagen des Monats zu verzeichnen (DOY 244, 245, 253, 268 und 271). Zusätzlich war der Echtzeitpositionierungsdienst an den Tagen 269 und 270 des Jahres zu keiner Zeit verfügbar. Der Grund dafür ist, dass niemand den Ausfall am Freitag Nachmittag (DOY 268) bemerkte und dieser

erst am Montag Morgen (*DOY* 271) behoben wurde. Weil an diesen Tagen neben den RINEX-Daten auch keine anderen Informationen gespeichert wurden, lässt sich ein Ausfall des Servers oder der Referenzstationssoftware vermuten. Wartungen wurden in dieser Zeit jedenfalls nicht durchgeführt. Des Weiteren konnten auch einzelne Ausfälle der Stationen Sillian (*DOY* 249 bis 261), Baden, Leopoldau, Güssing, Mattersburg, Neusiedl am See und Oberpullendorf verzeichnet werden. Aus dem Protokoll der Systemprozesse ist für diese Stationen eine fehlerhafte IP/TCP Verbindung¹ zu den einzelnen Stationen herauszulesen.

6.2 Stations- und tracking-Informationen

Einleitung

Durch die Verwendung von kombinierten GPS/GLONASS-Empfängern auf allen Referenzstationen und der geeigneten Auswertungssoftware wurden die Voraussetzungen geschaffen, alle operativen Satellitensysteme mit in die Berechnung der Korrekturdaten einbeziehen zu können und damit die Anzahl der Beobachtungen zu erhöhen. Die Gleichung 6.1

$$\sigma_n = \sigma \cdot \sqrt{n} \tag{6.1}$$

besagt, dass eine formale Qualitätssteigerung durch eine höhere Anzahl an Beobachtungen n erreicht werden kann. Es reicht jedoch nicht aus, nur die Satellitensignale zu empfangen (*tracked*) und zu speichern. Für jeden Satelliten müssen auch die Trägerphasenmehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte festgesetzt (*fixed*) werden, bevor dieser für die Berechnung der Fehlermodelle verwendet werden kann. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel untersucht, wie viel Zeit zwischen *tracking* und der Lösung der Mehrdeutigkeiten vergeht, um festzustellen, inwieweit alle GPS- und GLONASS-Beobachtungsdaten auch optimal für die Berechnungen verwendet werden.

¹connect failed! err=-1 "Error connecting TCP/IP. Error code 10060"

Zeit zwischen *tracking* und *fixing*

Zunächst wurden die Stations- und tracking-Informationen über einen Zeitraum von 30 Tagen aus den *sin*-Daten extrahiert und wochenweise zusammengefasst. Die Informationen sind zunächst noch hexadezimal in Bitfeldern verspeichert und müssen in binäre Codes umgewandelt werden. Für jede Referenzstation wurden im 20-Sekundentakt² acht Bitfelder angelegt. Vier davon beziehen sich auf die *tracked* Satelliten, die anderen vier auf die *fixed* Satelliten. Für jedes GPS relevante Bitfeld ergibt sich ein 32 Zeichen langer und für jedes GLONASS relevante Feld ein 24 Zeichen langer binärer Code. Jedes Zeichen entspricht einem Satelliten (PRN). Wurde zum Beispiel das L1-Signal des GPS-Satelliten mit der PRN 32 beobachtet, ist das erste Zeichen des ersten binären Codes eine Eins. Wurden für den Satellit mit der PRN 32 bereits die Mehrdeutigkeiten der L1-Frequenzen gelöst, ist das erste Zeichen des zweiten binären Codes eine Eins, usw. Für alle nicht beobachtbaren Satelliten (weil sie zum Beispiel nicht über dem Horizont zu sehen sind oder durch Abschattungen kurzzeitig aus dem Sichtfeld der Antenne verschwinden) ist das entsprechende Zeichen Null. Das gleiche gilt für die Satelliten, für die noch keine Mehrdeutigkeitslösung gefunden wurde. Somit ist es möglich aus diesen Daten für jede der 36 Stationen im Netzwerk herauszufinden, wann, welche und wie viele Satelliten beobachtet wurden und für welche die Mehrdeutigkeiten gelöst werden konnten.

ALST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12+
trGPSL1	365	0	0	0	0	0	206	6057	14236	24373	56364	24576	5758
trGPSL2	365	0	0	0	0	0	206	6059	14240	24374	56364	24570	5757
fiGPS L1	977	483	1471	6281	18053	33755	36516	22514	8303	2559	899	124	0
fiGPS L2	977	483	1474	6278	18053	33758	36512	22516	8302	2559	899	124	0
trGLOL1	1733	0	490	4187	18754	36036	47760	20061	2914	0	0	0	0
trGLOL2	1735	2	539	4379	19116	36337	47376	19612	2839	0	0	0	0
fiGLOL1	38193	36650	30595	15163	8348	2232	742	12	0	0	0	0	0
fiGLOL2	38601	37098	30249	15033	8067	2173	702	12	0	0	0	0	0

Tab. 6.1: Anzahl der Epochen der gleichzeitig *tracked* und *fixed* Satelliten auf der Station Allentsteig

Um diese Informationen aus den Zustandsdaten zu bekommen, wurden als erstes die PRN aller *tracked* und *fixed* Satelliten (1-32 GPS, 101-124 GLONASS) extrahiert und anschließend daraus die Anzahl der gleichzeitig beobachteten Satelliten bestimmt. Dazu ein Beispiel.

²zeitliche Auflösung schwankt zwischen 10 und 30 Sekunden

Über den Zeitraum von 30 Tagen wurden insgesamt 131935 Einzelfälle untersucht, in 5758 Fällen wurden mehr als 12 GPS-Satelliten gleichzeitig beobachtet, in 24576 Fällen waren 11 Satelliten gleichzeitig zu sehen, usw. [Tabelle 6.1]. Anhand dieser Untersuchung, getrennt für GPS und GLONASS, sowie für L1- und L2-Signale ergibt sich folgende Situation. Es wurden deutlich weniger Satelliten von GLONASS als von GPS beobachtet. Dies liegt vor allem daran, dass im September 2009 nur 16 operationelle GLONASS-Satelliten im All waren. Des Weiteren ist die Anzahl an simultan beobachteten Satelliten auf L1 etwas höher als auf L2. Das liegt an der geringeren Signalstärke der L2-Frequenz, die durch die verschiedenen Wege auf denen die L1- und L2-Signale im Empfänger registriert werden, hervorgerufen wird. Durch eine geringere Signalstärke erhöht sich die Gefahr einen Satelliten kurzfristig zu “verlieren” oder erst später beobachten zu können. Dieser Effekt trägt somit zu einer Verringerung der Anzahl an beobachteten Satelliten bei. Eine geringere Signalstärke lässt sich in den Daten erkennen, sie ist bei GLONASS etwas stärker ausgeprägt als bei GPS, hat jedoch in Summe keine großen Auswirkungen auf die Ergebnisse in diesem Kapitel. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf diesen Einfluss nicht näher eingegangen. Viel wichtiger ist die Tatsache, dass nicht so viele Mehrdeutigkeiten gelöst sind wie von den Beobachtungen her zu erwarten wären. Um dies etwas genauer zu betrachten, wird zunächst über jede der Zeilen in Tabelle 6.1 der Mittelwert gebildet. Dabei bleiben die Ausfallzeiten (wenn Null Satelliten beobachtet wurden) unberücksichtigt. Die Ergebnisse sind in [Tabelle 6.3] für alle EPOSA-Stationen aufgelistet.

Station	trGPSL1	trGPSL2	fiGPSL1	fiGPSL2	trGLOL1	trGLOL2	fiGLOL1	fiGLOL2
ALST	9.73	9.73	5.62	5.62	5.52	5.50	1.48	1.46
AMST	9.72	9.72	5.78	5.78	5.47	5.45	1.67	1.65
ANDF	9.75	9.75	5.50	5.50	5.52	5.50	1.38	1.37
ATPU	9.70	9.70	5.63	5.63	5.49	5.47	1.50	1.48
BADE	9.70	9.70	5.09	5.09	5.51	5.51	1.35	1.35
DALA	7.22	7.22	4.70	4.70	3.79	3.78	1.70	1.68
GRAZ	9.63	9.63	5.16	5.16	5.40	5.37	1.44	1.42
GUES	9.46	9.46	4.98	4.98	5.40	5.40	1.38	1.38
GUMM	8.50	8.50	5.44	5.44	4.52	4.51	1.34	1.33
JENB	8.46	8.46	5.39	5.39	4.60	4.59	1.92	1.89
KIBG	8.74	8.74	5.76	5.76	4.72	4.71	2.05	2.03
LAND	7.42	7.42	4.96	4.96	4.11	4.10	1.82	1.79
LEIB	9.63	9.63	5.43	5.43	5.46	5.44	1.41	1.39
LEOB	8.80	8.80	5.71	5.71	4.79	4.78	1.64	1.62
LEOP	9.65	9.65	5.00	5.00	4.77	4.77	1.09	1.08
LIEZ	8.55	8.55	5.67	5.67	4.76	4.75	1.57	1.55
LINZ	9.51	9.51	5.34	5.34	5.41	5.39	1.33	1.31
MATR	7.48	7.48	5.11	5.11	4.48	4.47	1.85	1.82
MATT	9.51	9.51	5.13	5.13	5.41	5.41	1.40	1.40
MIST	9.68	9.68	5.01	5.01	5.51	5.49	1.21	1.20
MURZ	8.94	8.94	5.52	5.52	4.89	4.87	1.60	1.58
NEUS	9.68	9.68	3.08	3.07	5.50	5.50	1.08	1.08
OBER	9.59	9.59	4.94	4.94	5.46	5.46	1.40	1.39
OCHS	7.85	7.85	4.70	4.70	4.13	4.12	1.63	1.61
ROET	8.79	8.79	4.75	4.75	5.06	5.04	1.71	1.69
SAAL	8.72	8.72	5.77	5.77	4.94	4.93	2.06	2.04
SALZ	9.60	9.60	5.93	5.93	5.44	5.42	2.09	2.06
SILL	7.94	7.94	5.42	5.42	4.30	4.29	1.85	1.83
SEEF	8.97	8.97	5.27	5.27	5.10	5.05	1.77	1.72
SHEI	8.74	8.74	5.61	5.61	4.91	4.90	1.50	1.49
SHLA	8.39	8.39	5.97	5.97	4.48	4.47	1.86	1.84
TRAI	8.89	8.89	5.57	5.57	4.76	4.74	1.57	1.55
WEYE	8.34	8.34	5.75	5.75	4.71	4.69	1.70	1.69
WOBG	9.34	9.34	5.48	5.48	5.28	5.27	1.44	1.42
WOFU	9.62	9.62	5.06	5.06	5.43	5.41	1.82	1.80
ZIDF	9.68	9.68	5.44	5.44	5.42	5.40	1.22	1.20

Tab. 6.3: Mittelwert der *tracked* und *fixed* Satelliten für alle Stationen

An der Station Allentsteig konnten über den Zeitraum von 30 Tagen 9.7 GPS-Satelliten simultan auf L1 und L2 beobachtet werden. Mehrdeutigkeiten wurden jedoch im Mittel gleichzeitig nur für im Mittel 5.6 Satelliten gelöst. Bei den GLONASS-Satelliten ist die Situation vergleichbar. Von 5.5 beobachteten Satelliten waren nur jeweils von 1.5 die Mehrdeutigkeiten bestimmt. Es muss jedoch gesagt werden, dass bei GLONASS die Mehrdeutigkeitsfixierung der FDMA Signale sehr schwierig ist und zudem der in der Netzwerksoftware verwendete Algorithmus dem Autor nicht bekannt ist.

Wie in Tabelle 6.3 zu sehen, ist die Station Allentsteig allerdings kein Ausnahmefall. Auf allen anderen 36 Stationen wurden ähnliche Ergebnisse erreicht. Im Mittel über 30 Tage und über alle Stationen ergeben sich folgende Werte:

	tracked GPS-Satelliten	fixed GPS-Satelliten	tracked GLONASS- Satelliten	fixed GLONASS- Satelliten
Anzahl	9.0	5.2	5.0	1.6

Tab. 6.4: Mittelwert aus der Anzahl *tracked* und *fixed* Satelliten für alle Stationen

Das bedeutet, nur in 58% der Fälle im Beobachtungszeitraum konnten die Mehrdeutigkeiten der GPS- und nur in 32% der Fälle die Mehrdeutigkeiten der GLONASS-Signale gelöst werden.

Selbst wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass mindestens ein GLONASS-Satellit benötigt wird, um den Uhrenoffset zwischen GPS und GLONASS zu bestimmen und nicht zur Positionsberechnung verwendet wird, ist trotzdem abzusehen, dass durch die Hinzunahme der GLONASS-Beobachtungsdaten zu diesem Zeitpunkt keine großen Verbesserungen zu erwarten sind. Mögliche Ursachen dafür werden im Folgenden diskutiert.

Ursachen

Eine Ursache, die Ausfallzeiten einzelner Stationen [Kapitel 6.1], wurden in den bisherigen Berechnung bereits berücksichtigt. Weitere Ursachen könnten Probleme bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung von Satelliten in niedrigen Elevationen, ein unterschiedlich voreingestellter Elevationswinkel für *tracking* und *fixing* sowie ein schlechtes Antennen Signal-Rausch-Verhältnis sein. Letzterer Grund wird in Kapitel 6.3 beschrieben. Auf die ersten beiden Ursachen wird nun etwas näher eingegangen.

Ein Höhenwinkel (*Cut off angle*) wird zumeist in der Auswertung vorab definiert, um GNSS-Beobachtungsdaten von Satelliten in niedrigen Elevationen von der Berechnung auszuschließen. Dies ist sinnvoll, da mit der Zenitdistanz auch der Einfluss der potentiellen Fehlerquellen wie die Mehrwegeausbreitung oder die troposphärische Laufzeitverzögerung zunimmt und dadurch die Festsetzung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten erschwert wird. Er sollte jedoch nicht zu hoch sein, um nicht unnötig Beobachtungsdaten zu verlieren. In der Auswertungssoftware des EPOSA-Netzwerkes wurde für absteigende Satelliten ein Elevationswinkel von fünf Grad für *tracking* und *fixing* voreingestellt. Für aufsteigende Satelliten gibt es Unterschiede. Ein Satellit wird ab einem Elevationswinkel von fünf Grad beobachtet und ab einem Elevationswinkel von acht Grad wird eine Mehrdeutigkeitslösung angestrebt. Dies hat einen Einfluss auf die bisherigen Ergebnisse. Ein fehlendes *fixing* zwischen fünf und acht Grad Elevation verursacht eine Zeitdifferenz (t_{elev}), die nun berücksichtigt werden muss. Wie groß dieser Einfluss auf die Statistik ist, wird beispielhaft für die Station Allentsteig für den *DOY* 244 des Jahres 2009 gezeigt.

Zwischen 00:00 Uhr und 23:59 Uhr konnten auf der Station Allentsteig 30 GPS-Satelliten und 16 GLONASS-Satelliten beobachtet werden [Abbildung 6.3].

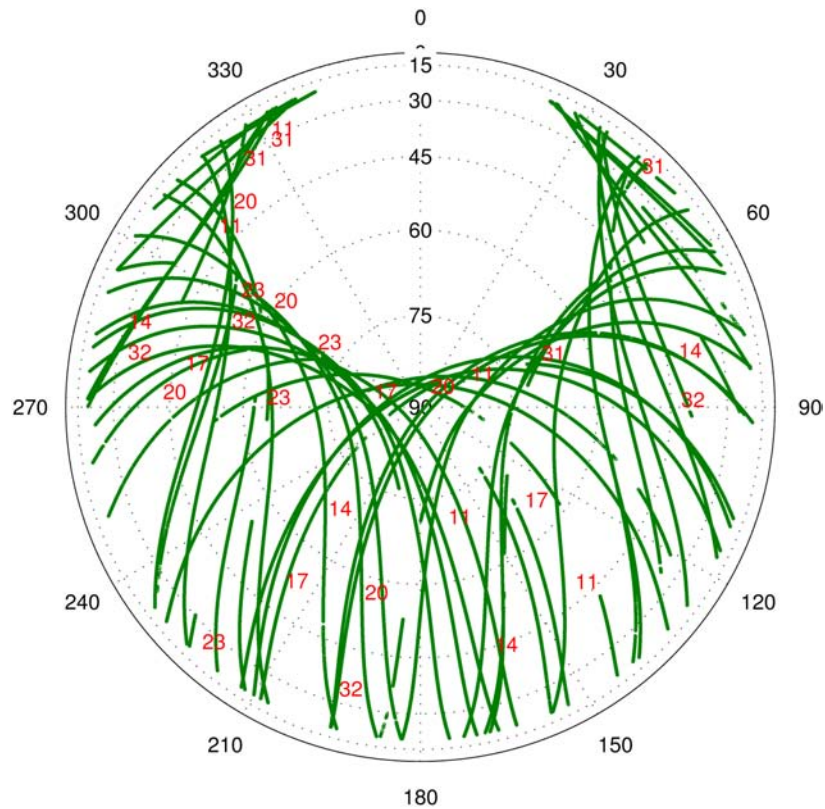


Abb. 6.3: skyplot für den *DOY* 244; sichtbare GNSS-Satelliten an der Station Allentsteig

Zunächst wurden für jeden Satelliten Zeitpunkte bestimmt, die den Lauf des Satelliten charakterisieren und in weiterer Folge die Grundlage aller Auswertungen sind. Dazu gehören die Zeitpunkte, an denen ein aufsteigender Satellit den Elevationswinkel von fünf Grad überschreitet, das erste *tracking* erreicht wird, der Satellit das erste Mal einen Elevationswinkel von acht Grad überschreitet, das erste und das letzte *fixing* erreicht wird, sowie der Zeitpunkt, an dem ein absteigender Satellit zum letzten Mal beobachtet wird, bevor er den Elevationswinkel von fünf Grad unterschreitet. In Abbildung 6.4 ist dieser Verlauf zum besseren Verständnis noch einmal grafisch dargestellt. Für die Berechnung

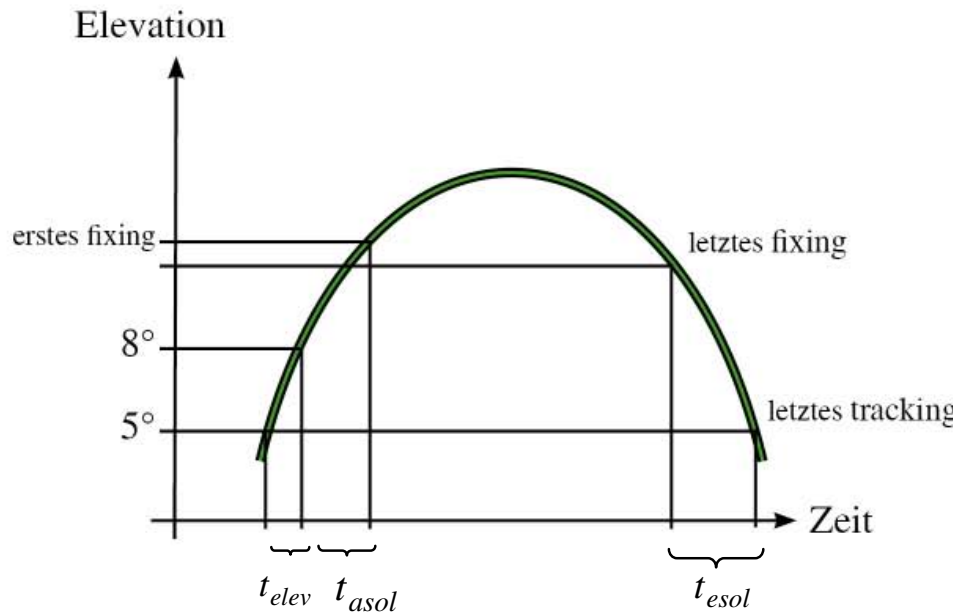


Abb. 6.4: Elevationsabhängige Parameter eines beobachteten Satelliten

der Zeitpunkte, an denen ein Satellit den Elevationswinkel von fünf Grad, beziehungsweise acht Grad erreicht, werden die *grs*-Dateien verwendet. Neben den Residuen und den *Carrier-to-noise*-Werten beinhalten diese Dateien die Elevations- und Azimutwinkel für jeden beobachteten Satelliten stationsweise mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Sekunden. Die Zeitpunkte für *tracking* und *fixing* werden aus den Stations- und *tracking*-Informationen extrahiert. Anschließend werden diese Zeitinformatoren verwendet, um aus den *grs*-Dateien den dazugehörigen Elevationswinkel zu bestimmen. Somit ist es nicht nur möglich, die Zeit zu berechnen, die vergeht, bis die erste Mehrdeutigkeitslösung erreicht wird, sondern auch für jeden Satelliten den dazugehörigen Elevationswinkel zu bestimmen. Für absteigende Satelliten ist in gleicher Weise zu berechnen, ab welchem Elevationswinkel die Mehrdeutigkeitslösung abbricht und wie lange der Satellit noch

beobachtet wird, bevor er unter einem Elevationswinkel von fünf Grad verschwindet. Im folgenden werden die einzelnen Ergebnisse in chronologischer Reihenfolge (mit dem Verlauf des Satelliten) beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf der Bestimmung von t_{elev} sowie auf der Untersuchung von möglichen Problemen bei der Mehrdeutigkeitslösung von Satelliten in niedrigen Elevationen liegt. Es wird mit dem Zeitpunkt begonnen, an dem der Satellit den Elevationswinkel von fünf Grad überschreitet, da ab diesem Moment Aufzeichnungen am EPOSA-Server vorliegen.

Die Differenz zwischen dem Zeitpunkt, an dem ein Satellit das erste Mal den Elevationswinkel von fünf Grad überschreitet und dem Zeitpunkt der ersten Satellitenbeobachtung beträgt für jeden Satelliten im Durchschnitt 13 Sekunden. Die beiden Zeitpunkte sind somit fast identisch, vor allem wenn berücksichtigt wird, dass die Daten für diese Erhebung nur mit einer Samplingrate von rund 20 Sekunden vorliegen, vereinzelt Abschattungen im niedrigen Elevationsbereich auftreten und es einer gewissen Zeit bedarf, bis ein Satellit vom Empfänger registriert wird.

Als nächstes wird die Zeit t_{elev} bestimmt in der ein Satellit bereits beobachtet wird, eine Lösung der Mehrdeutigkeiten jedoch noch nicht angestrebt wird. Im Idealfall war diese Zeit am *DOY 244* rund sechs Minuten. Es gibt jedoch auch Satelliten, die zwar über dem Elevationswinkel von fünf Grad beobachtet wurden, den Winkel von acht Grad aber niemals erreichten, bevor sie wieder hinter dem Horizont verschwanden. Diese Satelliten in niedrigen Elevationen werden am Empfänger leicht 20 Minuten und länger registriert, eine Mehrdeutigkeitslösung wird jedoch niemals angestrebt. Im Durchschnitt ergibt sich an der Station Allentsteig am Tag 244 des Jahres 2009 für t_{elev} eine Dauer von neun Minuten. Diese Zeit wurde bei der Berechnung der Ergebnisse in Tabelle 6.4 noch nicht berücksichtigt. Würde man davon ausgehen, dass auf den meisten anderen Stationen eine ähnliche Zeit t_{elev} wie auf der Station Allentsteig erreicht wird, würde sich die Anzahl der GPS-Satelliten, für die Mehrdeutigkeiten gelöst werden können, rechnerisch um rund 4% erhöhen (ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen t_{elev} und der Fixingdauer t_{fix} von rund 225 min, t_{fix} wurde dabei aus der Zeitdifferenz zwischen erstem und letztem *fixing* berechnet). Das bedeutet von 9.0 regelmäßig beobachteten Satelliten werden die Mehrdeutigkeiten nicht wie bisher angenommen von 5.2 Satelliten, sondern von 5.5 Satelliten gelöst. Dies trifft jedoch nur zu, wenn der *Cut off angle* für das *tracking* auf acht Grad erhöht wird und sich dadurch die Zeit, die für die Mehrdeutigkeitslösung benötigt wird (t_{asol}), nicht ändert.

Wie verhält es sich bei der Lösung der Mehrdeutigkeiten von GNSS-Signalen? An der Station Allentsteig werden die Mehrdeutigkeiten der GPS-Signale in der Regel erst

nach 29 Minuten gelöst und bei den GLONASS-Satelliten wird eine Lösung sogar erst nach 48 Minuten erreicht. Die dazugehörigen Elevationswinkel sowie Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 6.5 veranschaulicht. Die Initialisierungszeiten t_{asol} wurden

	GPS			GLONASS		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
Initialisierungszeit [min]	10.5	55.9	28.7	13.5	134.2	48.0
Elevationswinkel [°]	12.5	26.6	17.5	13.9	37.4	22.7

Tab. 6.5: Initialisierungszeit und dazugehöriger Elevationswinkel für GPS- und GLONASS-Satelliten

ab dem Zeitpunkt bestimmt, an dem jeder Satellit den Elevationswinkel von acht Grad erreicht hat. Der unterschiedlich voreingestellte *Cut off angle* für *tracking* und *fixing* wurde somit schon berücksichtigt. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich vermuten, dass Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung von Satelliten in niedrigen Elevationen auftreten. Bestätigt werden könnte diese Annahme durch die Untersuchung der Zeiten t_{esol} und der dazugehörigen Elevationswinkel, die aussagen, ab welchem Zeitpunkt keine Mehrdeutigkeitslösung mehr für absteigende Satelliten bestimmt werden konnte. Darüber hinaus wäre es auch interessant zu wissen, ob bei Satelliten höherer Elevation die Initialisierungszeit t_{asol} kleiner wird; dazu ein Beispiel. Nach einem Systemausfall am *DOY* 244 des Jahres 2009 kommt es um 11:36 Uhr zum Systemneustart. Innerhalb von wenigen Sekunden werden alle neun sichtbaren Satelliten beobachtet (G02, G04, G09, G12, G14, G17, G26, G27, G30). 5.7 Minuten später werden bei sechs GPS-Satelliten das erste Mal die Mehrdeutigkeiten gelöst. All diese Satelliten haben einen Elevationswinkel größer 34 Grad. Sechs Minuten später wird dies bei dem Satellit G04 (23° Elevationswinkel) erreicht und 6.7 Minuten später bei dem Satellit G02 (18.6° Elevationswinkel). Bei dem neunten Satellit (G17) konnten keine Mehrdeutigkeiten mehr gelöst werden. Dieser hatte zum Zeitpunkt des Systemneustarts einen Elevationswinkel von 15.6° und wurde noch 28 Minuten lang vom Empfänger registriert, bevor er den Elevationswinkel von fünf Grad unterschritt. Ein *fixing* wäre also innerhalb der 28 Minuten theoretisch möglich gewesen, wurde jedoch niemals erreicht.

Inwieweit Satelliten betroffen sind, für die bereits Mehrdeutigkeitslösungen bestimmt werden konnten, bevor sie sich dem Horizont nähern, wird im Folgenden anhand der Zeit t_{esol} untersucht. Für alle am Tag 244 des Jahres 2009 an der Station Allentsteig sichtbaren GPS- und GLONASS-Satelliten wurde bestimmt, wann die letzte Mehrdeutigkeit gelöst werden konnte, wie groß der dazugehörige Elevationswinkel war und wie lange danach der jeweilige Satellit noch beobachtet wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

	GPS			GLONASS		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
$t_{esol}[\text{min}]$	1.1	86.4	31.4	23.4	102.8	50.5
Elevationswinkel der letzten Mehrdeutigkeitslösung [°]	5.6	32.0	15.5	12.4	49.4	25.6

Tab. 6.6: Frühzeitiger Abbruch der Mehrdeutigkeitslösung an der Station Allentsteig

Da es sich hierbei nur um eine statistische Abschätzung handelt, können die Werte aus Tabelle 6.6 nicht direkt mit den Initialisierungszeiten in Tabelle 6.5 verglichen werden. Anhand der bisherigen Untersuchungen lässt sich jedoch ein deutlicher Trend erkennen. Bei Satelliten mit niedrigerem Elevationswinkel vergeht deutlich mehr Zeit bis die Mehrdeutigkeiten gelöst werden und ab einem bestimmten Wert, der bei rund 16.5 Grad Elevation bei GPS-Satelliten und bei rund 24 Grad bei GLONASS-Satelliten liegt, wird keine Lösung der Mehrdeutigkeiten mehr erreicht. Dass die Differenz zwischen beiden Satellitensystemen so deutlich ausfällt, könnte vermutlich auf generelle Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung der GLONASS-Signale zurückzuführen sein. Für eine nähere Betrachtung dieses Problems wird an dieser Stelle auf [9] verwiesen. Neben möglichen Schwächen in der Auswertungsstrategie zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten könnte der zeitweise große Abstand der Referenzstationen und die damit verbundenen höheren Einflüssen der entfernungsabhängigen Fehler [Kapitel 2.2] eine mögliche Ursache sein. Des Weiteren könnten Mehrwegeausbreitungen das *fixing* beeinflussen. Inwieweit diese auftreten, wird in Kapitel 6.5 diskutiert. Letztendlich lässt sich ohne Kenntnis des genauen Fixierungsalgorithmuses nicht im Detail klären, worin die Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung von Satelliten in niedrigen Elevationen begründet liegen. Potential für Verbesserungen wäre im EPOSA-Referenzstationsnetz jedoch gegeben.

6.3 Signal-Rausch-Verhältnis

Treten Probleme bei der kontinuierlichen Beobachtung der Satelliten auf, kann das auch auf ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis zurückzuführen sein. Um Informationen über den Empfänger, die Antenne und über das Setup an der Referenzstation ableiten zu können, wurden die *Carrier-to-Noise* Werte (CN0) aus den grs-Dateien für jede EPOSA-Referenzstation über den Zeitraum von sieben Tagen in *skyplots* dargestellt. Das heißt, es wird für GPS und GLONASS die Trajektorie jedes Satelliten durch die beiden Winkel Elevation und Azimut grafisch veranschaulicht. Jeder Punkt der Trajektorie wird

mit einem Farbwert versehen, der dem dazugehörigen CN0-Wert entspricht. Dadurch ist es möglich, das Signal-Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit von der Satellitenposition zu beschreiben. Daraus lässt sich erkennen, dass bei Satelliten die sich nahe dem Zenit befinden generell ein höherer CN0-Wert erreicht wird, als bei Satelliten mit niedrigem Elevationswinkel. Hinzu kommt, dass das Signal-Rausch-Verhältnis der L2-Signale schwächer ist als auf dem L1-Signal. Ein direkter Vergleich der einzelnen *skyplots* ist jedoch nicht möglich, da das CN0-Muster empfängerabhängig ist. Trotzdem lassen sich gewisse Qualitätskriterien definieren. Die Muster sollten sehr regelmäßig sein und einen glatten Verlauf zeigen. Außerdem sollten die CN0-Werte auf dem L1-Signal in Zenitrichtung in der Größenordnung von 55dbHz liegen und in niedrigen Elevationen 35dbHz nicht unterschreiten. Bei dem L2-Signal kann eine vergleichbare Unterteilung gemacht werden, wobei die Werte in Zenitrichtung zumindest 50dbHz erreichen sollten und die nahe dem Horizont nicht kleiner werden als 25dbHz.

In der Abbildung 6.5 sind die *skyplots* der L1-Signale der vier auffälligsten Stationen dargestellt. Für alle anderen Stationen können die Ergebnisse im Anhang [A.3] eingesehen werden. Das CN0-Muster der Station Allentsteig wird hier aus zwei Gründen gezeigt. Zum einen dient es als Referenz für die anderen Stationen, da es ein gutes Signal-Rausch-Verhalten zeigt, zum anderen wird hiermit bestätigt, dass Probleme bei der Lösung der Mehrdeutigkeiten von Satelliten in niedrigen Elevationen [Kapitel 6.2] nicht zwanghaft auf ein zu geringes Signal-Rausch-Verhältnis zurückzuführen sind. Insgesamt konnte auf keiner der EPOSA-Stationen ein schlechtes CN0-Muster gefunden werden. Im Vergleich der *skyplots* der drei Stationen Liezen, Leopoldau und Guessing mit dem von Allentsteig sind jedoch geringe Unterschiede auszumachen. Bei der Station Leopoldau ist auffällig, dass sich einzelne Trajektorien farblich abheben. Des Weiteren ist eine systematische Abschwächung der Signalstärke auf den Stationen Guessing und Liezen zu beobachten. Im Vergleich zu Leopoldau gilt dies für die beiden Stationen nicht nur für einzelne Satelliten, sondern für alle Elevationen gleichermaßen. Auf allen drei Stationen ist somit mit *tracking*-Problemen zu rechnen. Inwieweit diese auch auftreten, wird im Folgenden nach der Betrachtung der CN0-Muster der L2-Signale untersucht. Wie in diesem Kapitel bereits erwähnt, ist das Signal-Rausch-Verhältnis auf den L2-Signalen etwas schlechter als auf den L1-Signalen. Aus diesem Grund unterscheiden sich die CN0-Muster in Abbildung 6.6 deutlich von denen der L1-Signale. Zum einen ist auffällig, dass die CN0-Muster unregelmäßiger und “rauer” sind als auf den L1-Signalen, zum anderen lassen sich ähnliche Effekte wie in Abbildung 6.5, nur verstärkt beobachten. Es heben sich die Trajektorien einzelner Satelliten häufiger farblich ab. Auf den Stationen Leopoldau und Liezen kann selbst bei hohen Elevationen nicht überall ein Signal-Rausch-

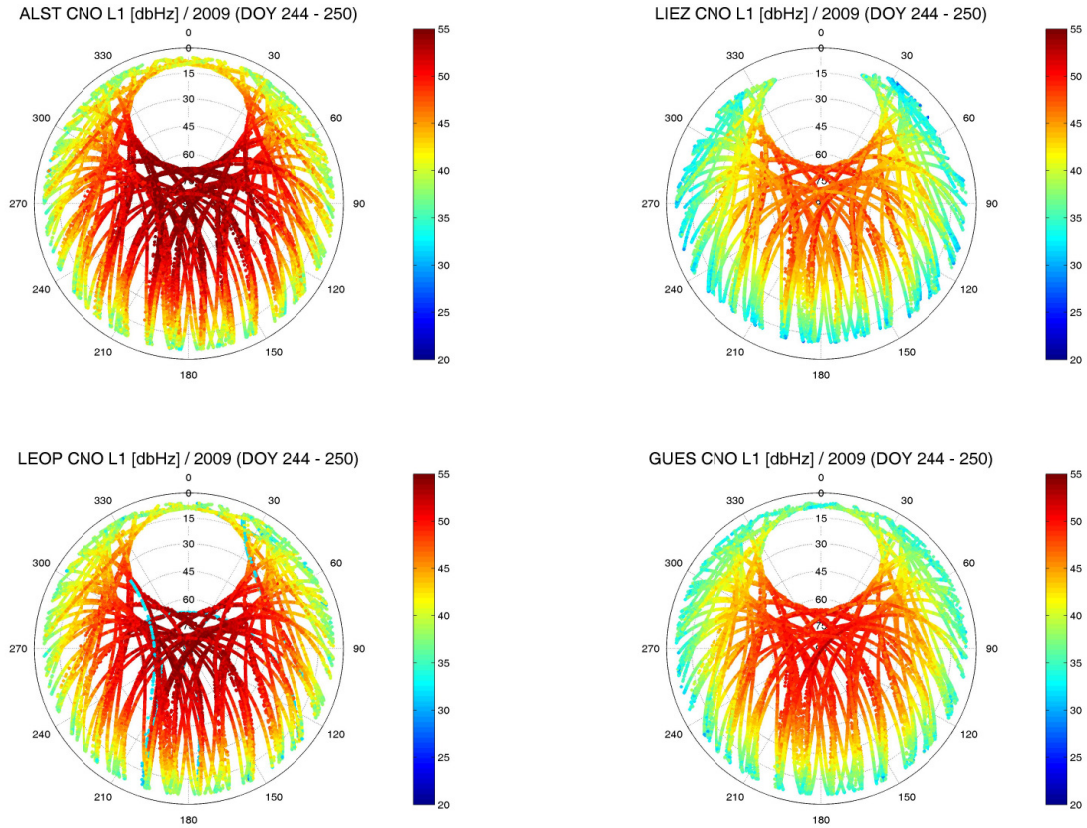


Abbildung 6.5: CN0-Muster der GPS und GLONASS L1-Signale

Verhältnis größer als 30dBHz erreicht werden. In Summe ist somit auf dem L2-Signal mit größeren *tracking*-Problemen als auf L1-Signalen zu rechnen. Für die Station Allensteig wurden diese auf Basis der Werte in Tabelle 6.1 bereits in Kapitel 6.2 bestätigt. Werden nun alle Stationen für die Auswertung über einen Zeitraum von 30 Tagen herangezogen, kann berechnet werden, wie groß die Differenz der Beobachtungen zwischen den beiden Signalen im Durchschnitt ist. Bei GPS-Satelliten beträgt diese Differenz nur 0.025% (max 0.059%, min 0.004%), bei GLONASS-Satelliten ist sie ungefähr 60 Mal größer. Das heißt rund 1.4% (max 4.68%, min 0.01%) weniger GLONASS L2-Signale als L1-Signale werden an jedem Empfänger registriert.

Der *skyplot* der Station Dalaas wurde in Abbildung 6.6 hinzugefügt, um zu verdeutlichen, dass es auch Stationen gibt, an denen Abschattungen im niedrigen Elevationsbereich auftreten. Im Durchschnitt können an dieser Station 2.5 GPS- und 0.9 GLONASS-Satelliten weniger beobachtet werden, als an einer Station, an der keine Abschattungen auftreten. Das lässt sich auf die Mittelgebirgslage der Station Dalaas (am Fuße des Verwallgebirges) zurückführen. Es ist auf Grund der geographischen Gegebenheiten in

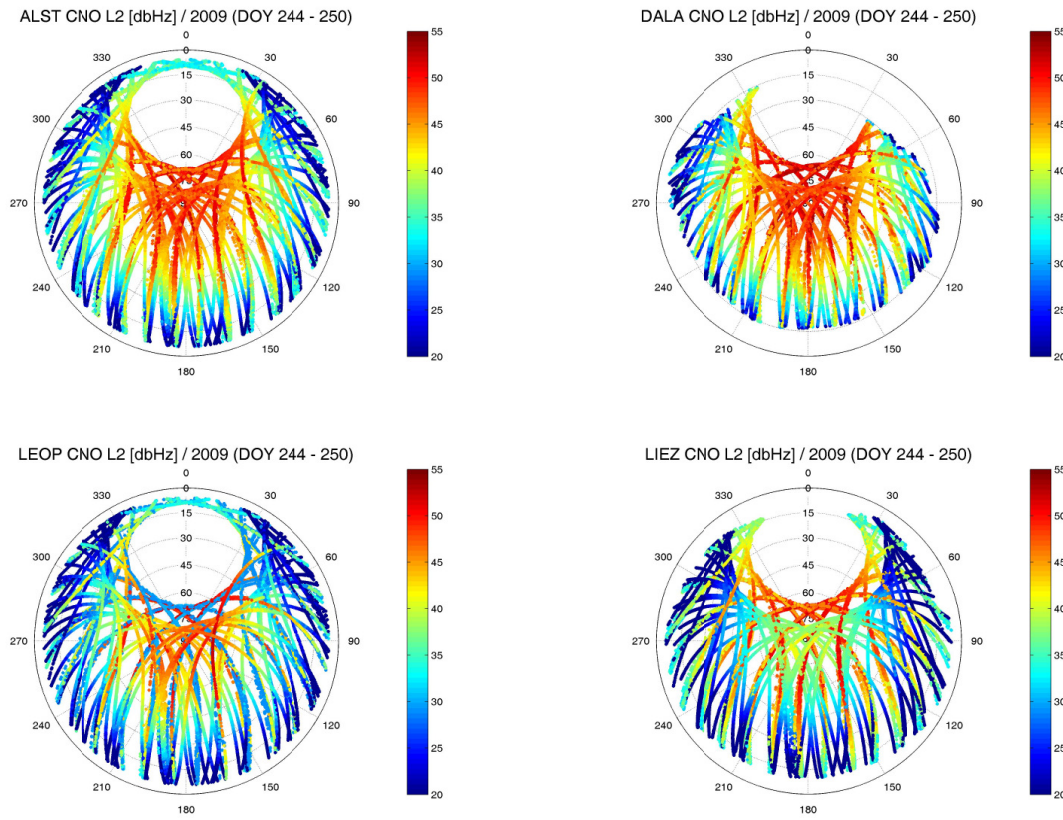


Abbildung 6.6: CN0-Muster der GPS und GLONASS L2-Signale

Österreich klar, dass es schwierig war, geeignete Standorte im alpinen Raum zu finden, die alle Auswahlkriterien (einen stabilen Standort, eine homogene Stationsverteilung mit maximal 50-80 km Stationsabstand, geringe Mehrwegereflexionen und freie Sicht bis in niedrige Elevation) für die Standortwahl erfüllen. Der Einfluss der fehlenden Horizontsicht gewisser Stationen wirkt sich jedoch nur wenig auf die Ergebnisse aus, weil wie im Kapitel 6.2 beschrieben, die Mehrdeutigkeiten zumeist erst ab einem Elevationswinkel von 15 Grad gelöst werden.

6.4 Koordinaten der Referenzstationen

Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung in Echtzeit verbessert sich, wenn die Koordinaten der Referenzstationen mit hoher Genauigkeit (wenige Millimeter) bekannt sind. In Kapitel 4.2.3 wurde bereits erwähnt, dass durch regelmäßige Überprüfung der Stationskoor-

dinaten die Qualität und Zuverlässigkeit des Echtzeitpositionierungsdienstes erhöht werden kann. In diesem Kapitel wird zunächst einen Schritt zurück gegangen und kurz beschrieben, wie die Koordinaten berechnet wurden. Des Weiteren werden die stündlich berechneten Positionen der Referenzstationen mit den Referenzkoordinaten verglichen. Außerdem wird durch eine Analyse der Standardabweichungen die Qualität der stündlich berechneten Stationskoordinaten überprüft.

Station	X_{REF} [m]	Y_{REF} [m]	Z_{REF} [m]	Station	X_{REF} [m]	Y_{REF} [m]	Z_{REF} [m]
ALST	4066601.7	1114763.2	4770206.0	MATT	4122590.8	1213676.6	4697542.0
AMST	4122668.2	1096200.5	4726131.4	MIST	4053396.6	1205696.8	4758955.9
ANDF	4126933.9	995816.6	4744563.1	MURZ	4148264.6	1164222.8	4688125.3
ATPU	4152715.4	1014088.1	4718411.9	NEUS	4095701.4	1239419.3	4714113.4
BADE	4105058.5	1196330.0	4717155.5	OBER	4138700.0	1226336.7	4680193.2
DALA	4282049.9	754383.8	4652140.5	OCHS	4248035.3	997314.3	4637781.1
GRAR	4195411.4	1156914.5	4647666.2	ROET	4240012.2	950940.7	4656267.7
GUES	4176516.0	1222812.2	4647591.2	SAAL	4215506.6	960185.1	4674515.1
GUMM	4259979.2	1043827.3	4615978.3	SALZ	4180487.8	968819.5	4703482.3
JENB	4235314.5	883092.0	4671552.1	SEEF	4249374.6	840573.5	4667544.1
KIBG	4222324.0	921282.2	4676288.7	SHEI	4209341.0	1082262.7	4653578.9
KLAF	4253059.7	1084814.6	4612874.2	SHLA	4203442.8	1022979.8	4672082.2
LAND	4272327.0	797848.6	4653615.3	SILL	4276538.6	942215.8	4623275.1
LEIB	4215607.0	1172794.2	4625357.4	TRAI	4113716.7	1149530.6	4721389.8
LEOB	4177339.7	1126399.9	4671446.6	WEYE	4147740.8	1085612.8	4706901.4
LEOP	4079879.6	1202310.3	4737221.2	WOBG	4225106.7	1119379.6	4630151.8
LIEZ	4179660.5	1060891.4	4684733.9	WOFU	4258470.4	731025.6	4676581.5
LINZ	4120325.3	1049707.6	4738627.9	ZIDF	4069722.8	1160947.7	4756220.5
MATR	4261484.4	863332.7	4652172.8				

Tab. 6.7: ITRF2000 Koordinaten der EPOSA-Referenzstationen - Stand April 2010 (Werte genähert auf dm genau)

X_{REF} , Y_{REF} und Z_{REF} sind die ITRF2000 Soll-Koordinaten der Referenzstationen zur Epoche 1997.0. Sie wurden zuletzt über einen Zeitraum von 40 Tagen im Frühling 2010 aus den GNSS-Beobachtungsdaten der Stationen berechnet. Die Koordinaten X_M , Y_M und Z_M ergeben sich aus der Mittelung der stündlich geschätzten Koordinaten im September 2009, die aus den *sol*-Dateien [Kapitel 5] extrahiert wurden.

$$\begin{pmatrix} dX_{REF} \\ dY_{REF} \\ dZ_{REF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{REF} \\ Y_{REF} \\ Z_{REF} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Wird nach Gleichung 6.2 die Differenz aus den genannten Koordinaten gebildet, erhält

man den Offset der geschätzten Stationskoordinaten zu den Referenzkoordinaten [Tabelle 6.8].

Station	dX_{REF} [cm]	dY_{REF} [cm]	dZ_{REF} [cm]	$StdX_M$ [mm]	$StdY_M$ [mm]	$StdZ_M$ [mm]
ALST	1.41	-0.82	0.13	0.58	0.22	0.67
AMST	0.08	-0.85	-0.23	0.54	0.20	0.61
ANDF	1.31	-0.76	0.22	0.45	0.19	0.50
ATPU	1.02	-0.54	-0.39	0.53	0.19	0.60
BADE	1.05	-0.67	0.24	0.59	0.24	0.67
DALA	-2.32	-0.79	-1.39	0.72	0.26	0.79
GRAZ	1.99	-0.54	0.88	1.44	0.85	1.52
GUES	0.94	-0.54	-0.19	0.62	0.25	0.69
GUMM	1.41	-0.40	0.22	0.63	0.22	0.68
JENB	-1.84	-1.96	-1.61	0.60	0.21	0.65
KIBG	-2.96	-1.46	-2.45	0.57	0.20	0.62
LAND	-2.75	-1.38	-2.21	0.66	0.24	0.72
LEIB	0.83	-0.35	-0.34	0.60	0.23	0.66
LEOB	163.83	42.45	183.45	0.56	0.21	0.62
LEOP	0.44	-0.56	-0.25	0.60	0.24	0.69
LIEZ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LINZ	1.03	-0.78	-0.06	0.56	0.21	0.64
MATR	-1.07	-0.87	-1.08	0.64	0.22	0.69
MATT	0.69	-0.43	-0.22	0.59	0.24	0.66
MIST	0.78	-0.29	0.03	0.61	0.25	0.70
MURZ	0.50	-0.40	0.38	0.56	0.22	0.63
NEUS	364.35	119.67	419.92	0.69	0.29	0.79
OBER	0.81	-0.31	-0.41	0.60	0.24	0.67
OCHS	1.67	-0.44	0.70	2.58	2.31	2.66
ROET	-2.05	-0.96	-1.92	2.48	2.09	2.55
SAAL	-2.57	-1.18	-1.90	0.55	0.19	0.61
SALZ	-1.32	-0.88	-1.16	0.54	0.19	0.60
SEEF	-2.54	-1.19	-2.01	0.60	0.22	0.66
SHEI	1.21	-0.50	0.24	0.57	0.20	0.63
SHLA	1.40	-0.64	0.11	0.55	0.19	0.61
SILL	-2.69	-1.04	-2.27	0.66	0.22	0.71
TRAI	1.05	-0.30	0.08	0.57	0.22	0.64
WEYE	1.09	-0.75	0.15	0.57	0.20	0.63
WOBG	1.08	-0.53	0.05	0.60	0.22	0.65
WOFU	-2.38	-1.20	-2.30	0.65	0.25	0.71
ZIDF	0.47	-0.59	0.09	0.59	0.23	0.68

Tab. 6.8: Offsets der stündlich geschätzten Stationskoordinaten zu den Referenzkoordinaten und dazugehörige Standardabweichungen

Die dazugehörigen Mittelwerte der Standardabweichungen der Koordinatenlösung ($StdX_M$, $StdY_M$ und $StdZ_M$) sind ebenfalls in dieser Tabelle aufgelistet. Von sechs Stationen wurden auffällige Werte in der Tabelle 6.8 hervorgehoben. Dazu gehört die Station Liezen, für die keine Daten vorhanden waren. Die Stationen Graz, Rötenskogel und Ochenig Süd fallen auf, da an diesen Stationen deutlich höhere Mittelwerte der Standardabweichungen auftreten als bei den anderen Stationen. Mögliche Gründe dafür könnten unter anderem weniger Beobachtungsdaten auf Grund eines schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses, Abschattungen oder Mehrwegeausbreitungen sein. Ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis wurde wie in Kapitel 6.3 bereits erwähnt nur an den Stationen Liezen, Leopoldau und Guessing registriert. Anhand des Vergleiches der Standardabweichungen lässt sich jedoch kein signifikanter Einfluss des Signal-Rausch-Verhältnisses auf die Qualität der Ergebnisse feststellen.

Abschattungen im niedrigen Elevationsbereich treten vor allem an den Stationen Dalaas, Landeck, Matrei, Ochenig Süd und Sillian auf. Abgesehen von den Stationen Graz und Rötenskogel sind das auch die Stationen mit den größten Standardabweichungen. Der Einfluss ist signifikant, jedoch nicht größer als 0.2 mm und somit nicht die Hauptursache für die großen Standardabweichungen an den Stationen Rötenskogel, Ochenig Süd und Graz. Inwieweit Mehrwegeausbreitungen (MP) die Beobachtungen an diesen Stationen beeinflussen, wird im nächsten Kapitel erst untersucht. Um es vorwegzunehmen, MP treten an den genannten Stationen nicht auf. Es lässt sich jedoch erkennen, dass sich die hohen Standardabweichungen auch in den Residuen der Code-Beobachtungen der einzelnen Satelliten widerspiegeln. In Abbildung 6.12 wird dies exemplarisch für die Station Ochenig veranschaulicht.

Die Stationen Neusiedl/See und Leoben wurden in Tabelle 6.8 hervorgehoben, da an den beiden Stationen die Differenz zwischen den stündlich geschätzten Koordinaten und den Referenzstationskoordinaten mehrere Meter beträgt. An beiden Stationen ist dies auf einen Antennenwechsel im Herbst 2009 zurückzuführen, der eine Änderung der Referenzkoordinaten zur Folge hatte. Werden zum Test die alten Referenzkoordinaten zur Berechnung des Offsets verwendet, verringert sich die Differenz an beiden Stationen auf wenige Zentimeter.

In den folgenden Abbildungen 6.7 bis 6.9 sind von fünf auffälligen Stationen zum einen die Variationen der stündlich geschätzten Koordinaten und zum anderen die dazugehörigen Koordinaten-Standardabweichungen dargestellt. Die Station Leoben kann als gute Referenz angesehen werden, denn die Variation der Koordinaten beträgt maximal 2 cm und die der Standardabweichungen maximal 1.5 mm. Die Streuung der stündlich

geschätzten Koordinaten kann als normalverteilt angenommen werden können. Die Stationen Rötenskogel und Ochenig Süd zeigen ein ähnliches Verhalten. Auf Grund der Sprünge an den Tagesgrenzen, deren Einfluss auf diese Stationen besonders hoch ist, werden die Standardabweichungen [Tabelle 6.8] und somit auch die Streuung der geschätzten Koordinaten größer als an anderen Stationen. Eine mögliche Erklärung für diese Sprünge wäre, dass in den *sol*-Dateien, die hierfür ausgewertet wurden nicht die stündlichen Werte gespeichert werden, sondern mehrere Stundenlösungen zusammengefasst werden. Die Lösung der ersten Stunde hat noch eine relativ hohe Standardabweichung. Die Qualität des zweiten Wertes ist deutlich besser, da dieser über den Zeitraum von zwei Stunden gebildet wurde, usw. Es könnte somit von einem Aufsummieren der stündlich geschätzten Koordinaten und der dazugehörigen Standardabweichung gesprochen werden. Beginnt ein neuer Tag, wiederholt sich dieser Vorgang. Auf Grund der fehlenden Kenntniss über die dahinter stehenden Algorithmen zur Speicherung der stündlichen Koordinaten und den dazugehörigen Standardabweichungen, kann dies nur durch erneute Untersuchungen bestätigt werden.

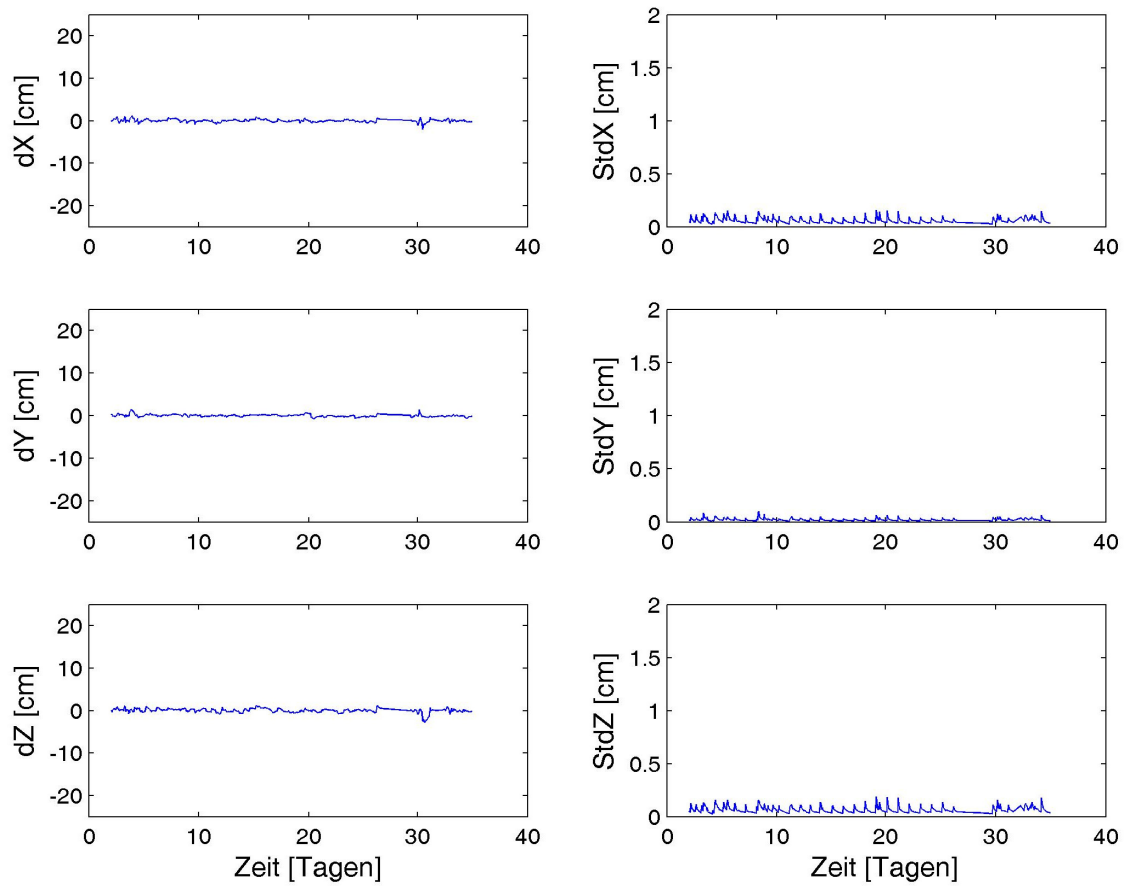


Abb. 6.7: Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Leoben

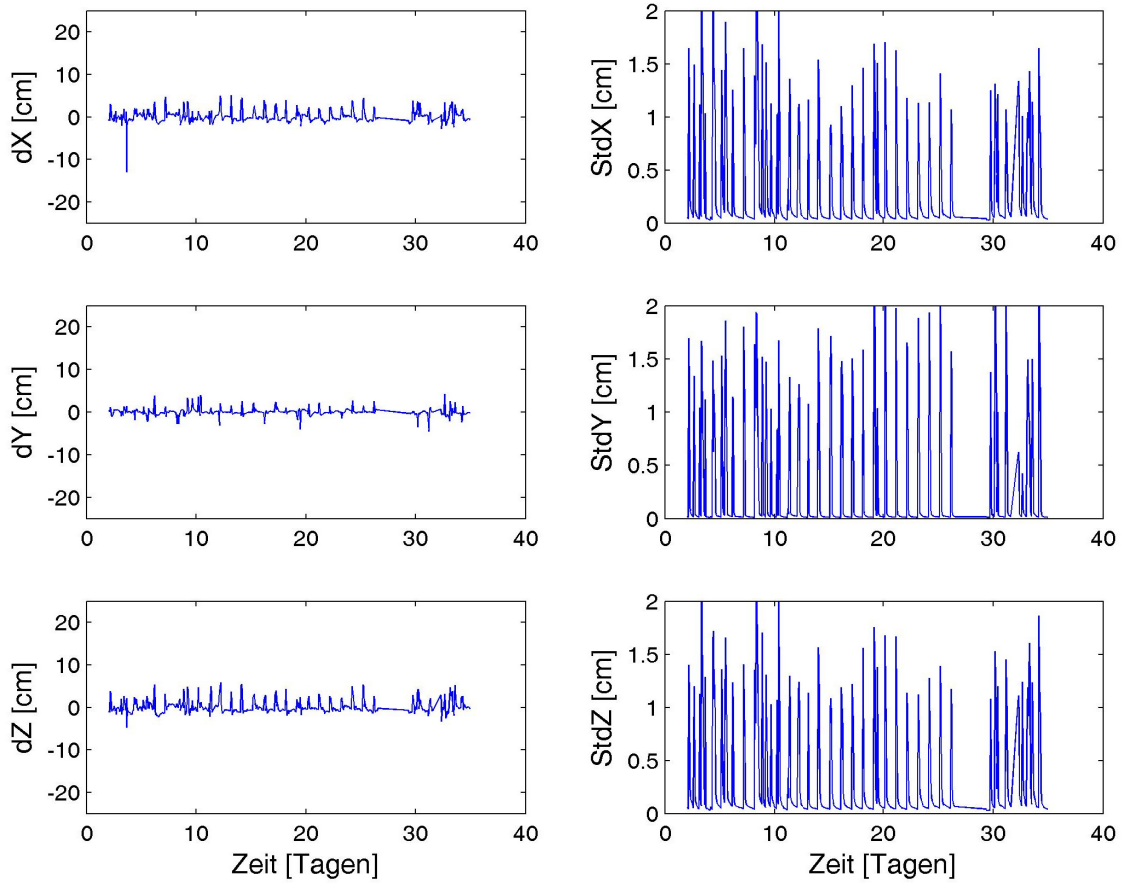


Abb. 6.8: Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Ochenig Süd

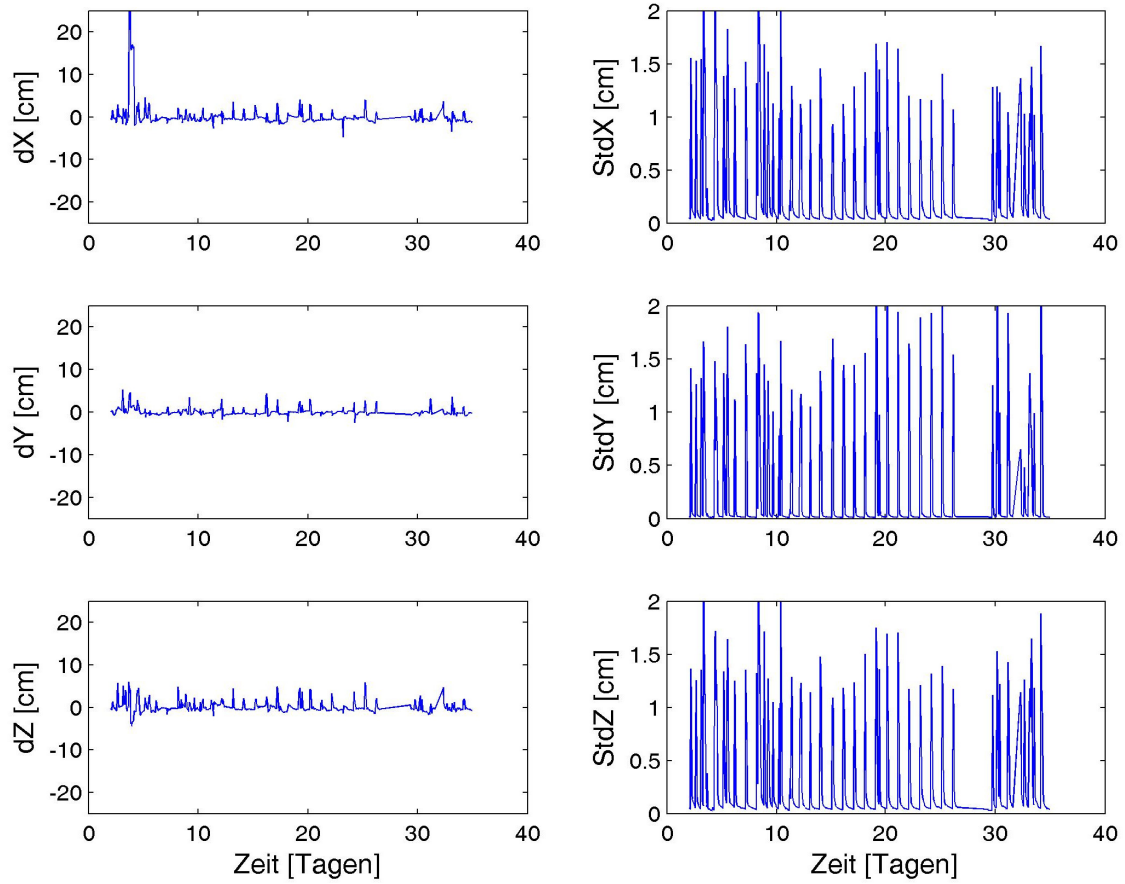


Abb. 6.9: Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Röntenkogel

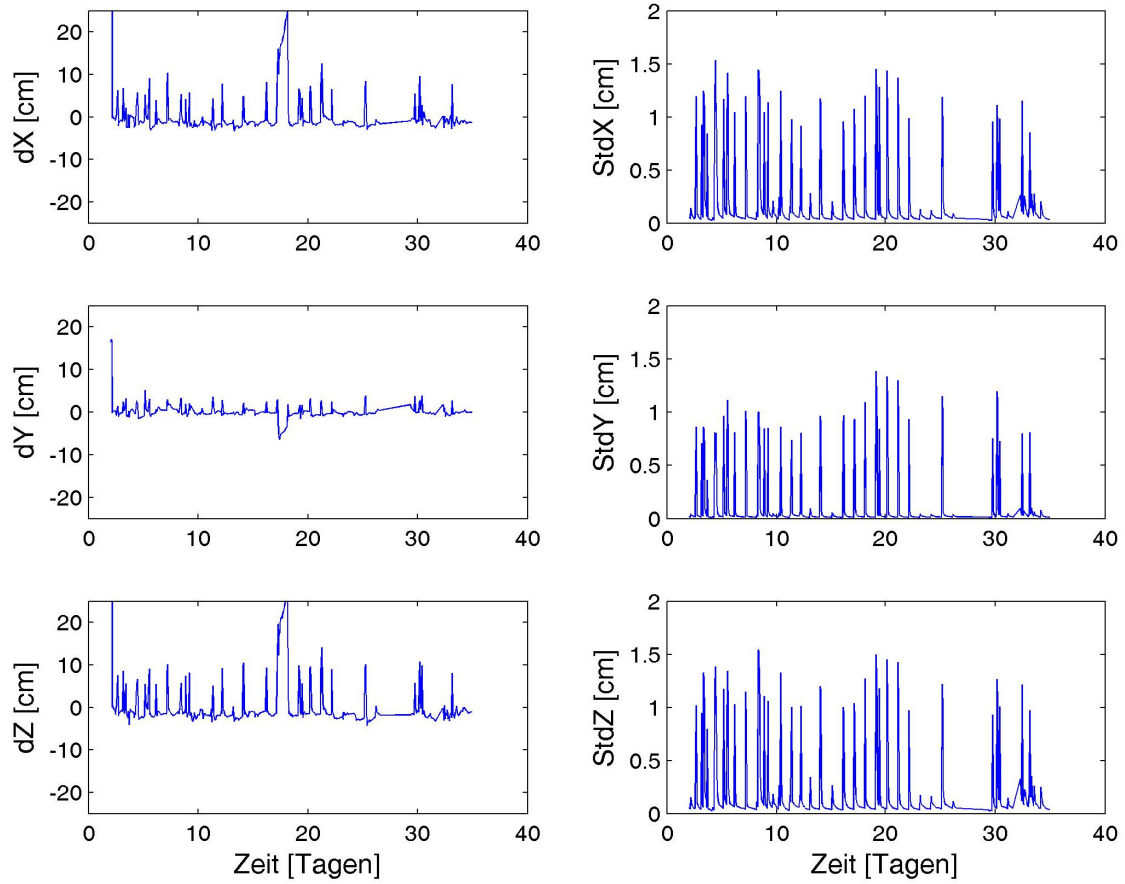


Abb. 6.10: Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Graz

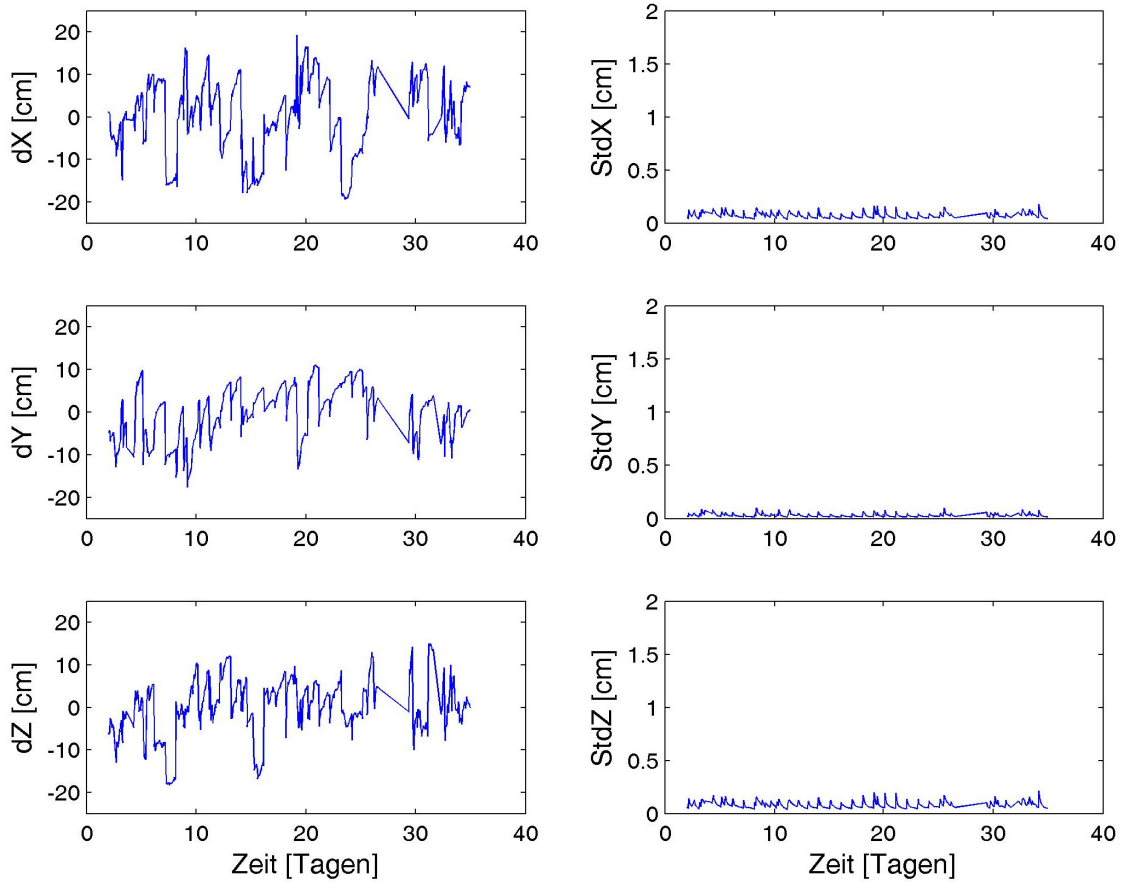


Abb. 6.11: Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Neusiedl/See

Die letzten beiden Stationen Graz und Neusiedl sind Sonderfälle. Auf der Station Graz kann nicht mehr von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Die Variation der stündlich geschätzten Koordinaten ist vorwiegend einseitig positiv; systematische Einflüsse lassen sich daher vermuten. Darauf wird hier jedoch nicht näher eingegangen, da es sich bei der Station GRAZ um einen Einzelfall handelt. Die Station Neusiedl/See zeigt auch ein sehr untypisches Verhalten. Auf Grund der relativ kleinen Standardabweichungen von maximal 1.8 mm lässt sich eine gute Stabilität der stündlich geschätzten Koordinaten erwarten. Die wahre Streuung der Stationskoordinaten beträgt jedoch rund 18 cm und ist somit um das 100-fache größer als die Standardabweichung. Die Bewegungen der Station Neusiedl/See scheinen jedoch eher zufällig aufzutreten. Der Verlauf des Graphen der Station Neusiedl erinnert eher an ein “Aufschwimmen” der Station und lässt einen systematischen Einfluss vermuten. Ein Fehler bei der Aufzeichnung der hier verwendeten Daten ist jedoch auszuschließen. Da dieser Effekt auch in den Residuen zu sehen ist, werden diese im Folgenden betrachtet.

6.5 Stationsresiduen und Mehrwegeausbreitung

Die theoretische Behandlung von MP wurde bereits in Kapitel 2.2.2 gegeben. Darin wurde erwähnt, dass eine völlige Auslöschung des Signals, eine Unterbrechung der Phasenmessung, sowie *cycle-slips* auf Mehrwegeeffekte zurückzuführen sein können. Aus diesem Grund wird im Folgenden untersucht, inwieweit Mehrwegeausbreitungen im Umfeld der Antenne auftreten und inwieweit diese die Lösungen im EPOSA-Referenzstationsnetz beeinflussen. In [10] wird demonstriert, wie Multipath anhand der Betrachtung des Signal-Rausch-Verhältnisses an den Stationen bestimmt werden kann. In dieser Arbeit werden mögliche Mehrwegeausbreitungen durch Analyse der verbleibenden Residuen an den Referenzstationen bestimmt.

Je nachdem, wie weit die Reflektoren von der Antenne entfernt sind, werden kurzwellige und langwellige Effekte unterschieden, diese werden auch als Nahfeld- und Fernfeld-Multipath bezeichnet. Bei der Codemessung ist mit Residuen von maximal 1-2 m zu rechnen. Bei der Phasenmessung liegen die nicht modellierbaren Anteile im Bereich von wenigen Millimetern bis Zentimetern. Treten größere Residuen auf, liegt dies vermutlich an Mehrwegeausbreitungen. Je nachdem wie diese verteilt sind (ob eher gepunktete Muster in den *skyplots* zu sehen sind oder ob diese eher flächenhaft verteilt sind), lässt sich auf Nahfeld- beziehungsweise Fernfeld-Multipath schließen. Nahfeld-MP zu betrachten ist deshalb wichtig, da sich diese nicht über die Zeit herausmitteln lassen.

Im den Abbildungen 6.12 und 6.13 sind die Residuen der Code- und Trägerphasen-Beobachtungen einiger auffälligen Stationen dargestellt. Für die L2-Signale sind die Grafiken fast mit denen für L1-Signale identisch. Aus diesem Grund wird darauf nicht näher eingegangen. Die Abbildungen sind vollständigkeithalber im Anhang [A.4] zu finden. Dies gilt gleichermaßen für die Abbildungen der anderen in diesem Kapitel nicht erwähnten Stationen. Mattersburg ist eine Station, bei der anhand der Residuen-Verteilung abgeleitet werden kann, dass keine Mehrwegeausbreitungen die Code- und Phasenmessungen beeinflussen. Maximal in sehr niedrigen Elevationen lässt sich Fernfeld-Multipath vermuten, der Einfluss auf die Messungen kann jedoch vernachlässigt werden. Die Station Neusiedl/See ist ein Extrembeispiel. Die Residuen der Code-Beobachtungen sind sehr stark mit dem Elevationswinkel korreliert. Bei den Phasen-Beobachtungen ist diese Abhängigkeit nicht zu sehen. Im Vergleich mit anderen Stationen lässt sich jedoch erkennen, dass die Restfehler der Modellierung für Code- und für Phasen-Beobachtungen um rund das 10-fache höher sind. Auf Grund der Verteilung der Residuen lassen sich jedoch keine Mehrwegeausbreitungen vermuten. Auf Grund der Besonderheit der Station

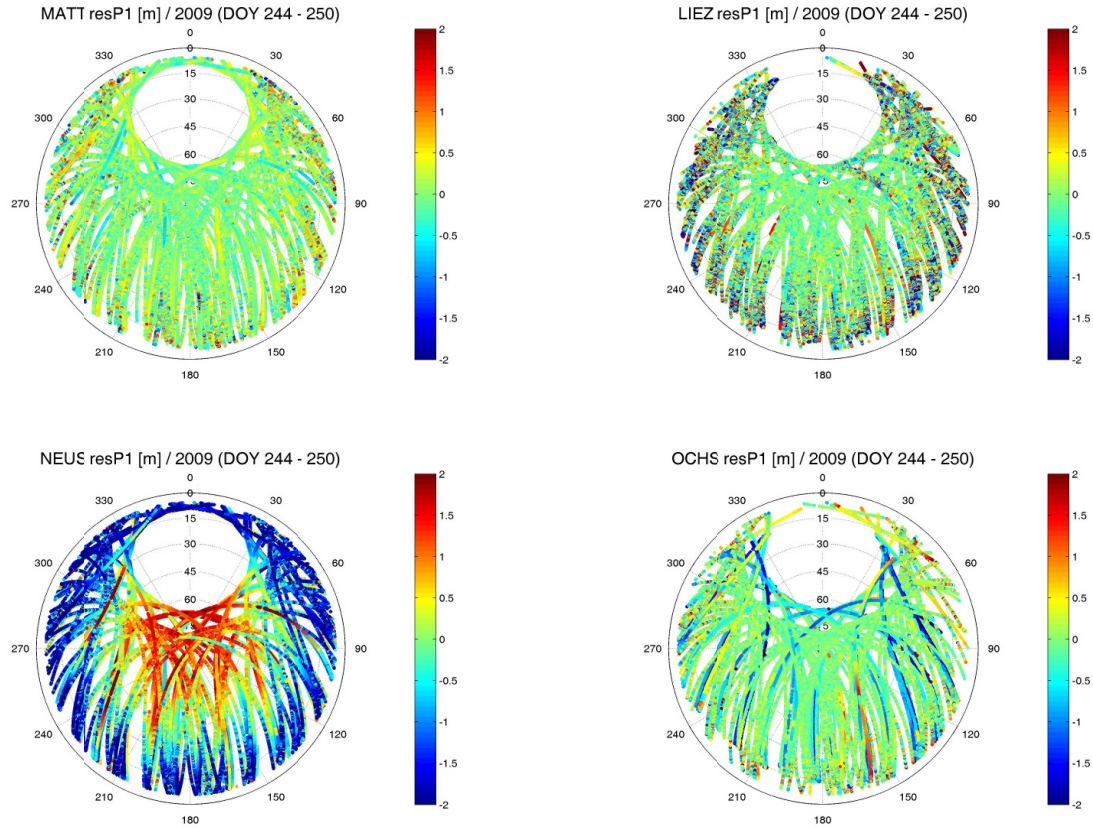


Abbildung 6.12: Residuen der L1-Code-Beobachtungen

wurden zusätzlich die GNSS-Rohdaten mit dem Programm LEICA GNSS QC in Hinsicht Code-Multipath ausgewertet. Als Auswertungszeitraum wurde der 19.07.2010 zwischen 00:00 Uhr und 23:00 Uhr gewählt. In dieser Zeit konnte nur ein *cycle slip* detektiert werden. Auf dem L1-Signal wurde eine durchschnittliche Signalstärke von 47dbHz registriert, auf dem L2-Signal lag diese bei rund 38dbHz. Code-Multipath konnte auf keiner Frequenz festgestellt werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass die großen Residuen, die an der Station Neusiedl/See registriert wurden, nicht durch Mehrwegeausbreitungen verursacht werden. Des Weiteren wurde durch die Auswertung mit LEICA GNSS QC gezeigt, dass die Station Neusiedl/See im Juli 2010 wieder eine gute Performance zeigt. Das schlechte Signal-Rausch-Verhältniss und die hohen Residuen der Code- und Phasenbeobachtungen an der Station Neusiedl/See sind somit auf die Antenne zurückzuführen, die im Herbst 2009 ausgetauscht wurde. Des Weiteren konnte nach Auswertung der Residuen aller Stationen festgestellt werden, dass im EPOSA-Referenzstationsnetz keine Station durch Nahfeld-Multipath beeinflusst wird.

In Abbildung 6.12 lässt sich erkennen, dass die Station Liezen stärker von Fernfeld-

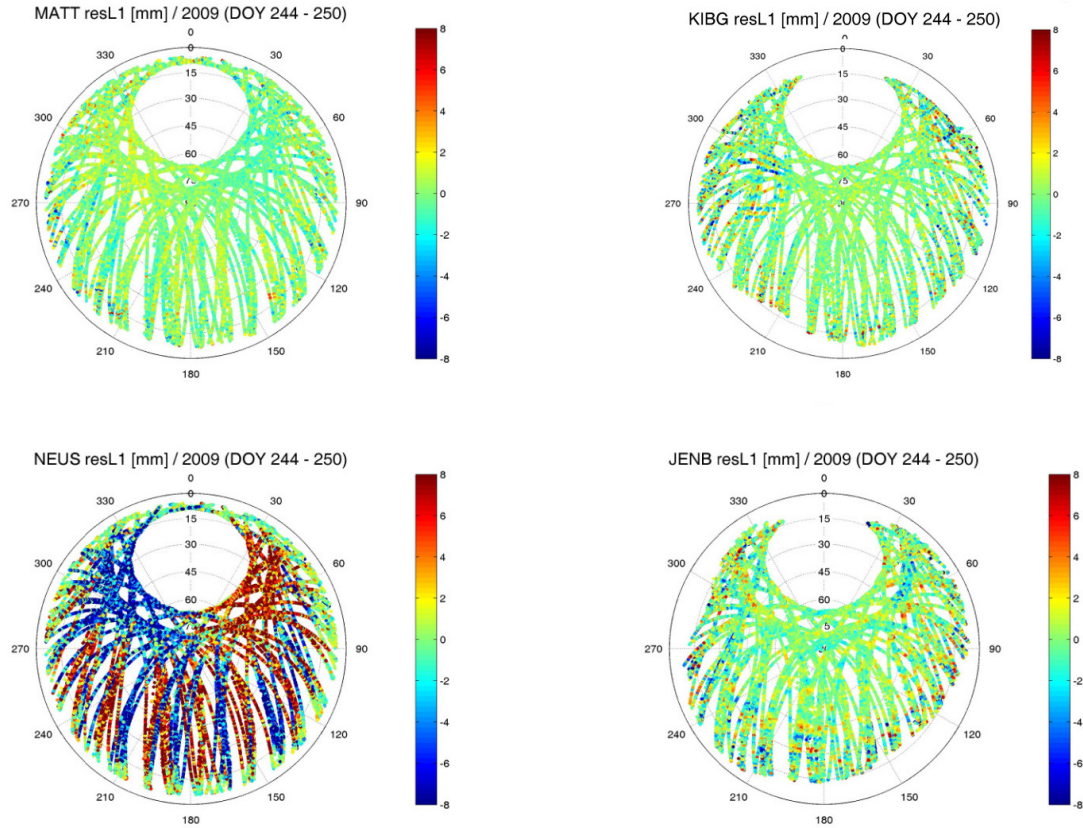


Abbildung 6.13: Residuen der L1-Phasen-Beobachtungen

Multipath beeinflusst wird. Dies würde zumindest auch das schlechtere Signal-Rausch-Verhältnis im niedrigen Elevationsbereich an dieser Station erklären [Abbildung 6.5]. Darüber hinaus gibt es weitere Stationen, die auch von Fernfeld-Multipath beeinflusst werden. Dazu gehören vor allem die Stationen Jennbach, Linz, Scheifling und Ziersdorf. Der Einfluss auf diese Stationen ist jedoch wesentlich geringer, aus diesem Grund werden diese Stationen nicht untersucht.

Die Station Ochenig Süd ist auffällig, da sich an dieser Station die Trajektorien einzelner Satelliten auf Grund großer negativer Residuen farblich abheben. Das dieser Effekt mit den hohen Standardabweichungen der Koordinaten in Verbindung steht, wurde bereits in Kapitel 6.4 erwähnt. Mehrwegeausbreitungen lassen sich als Grund dafür jedoch ausschließen, da nur einzelne Satelliten davon betroffen sind und das unabhängig vom Elevationswinkel. Bei näherer Betrachtung lässt sich erkennen, dass der Effekt nur in den Code-Beobachtungen zu erkennen ist. In den Residuen der Phasen-Beobachtungen ist dieser Einfluss völlig verschwunden. Somit lässt sich vermuten, dass die Flächenkorrekturparameter dadurch nicht beeinflusst werden. Inwieweit dies auch zutrifft, muss

noch näher untersucht werden.

6.6 Flächenkorrekturparameter

Dispersive und nicht-dispersive Korrekturen werden wie in Kapitel 3.3.2 bereits beschrieben durch vier Parameter repräsentiert.

$e_{\Delta}^q, n_{\Delta}^q$ dispersive Gradienten in Ost- und Nordrichtung

$e_{\Sigma}^q, n_{\Sigma}^q$ nicht-dispersive Gradienten in Ost- und Nordrichtung

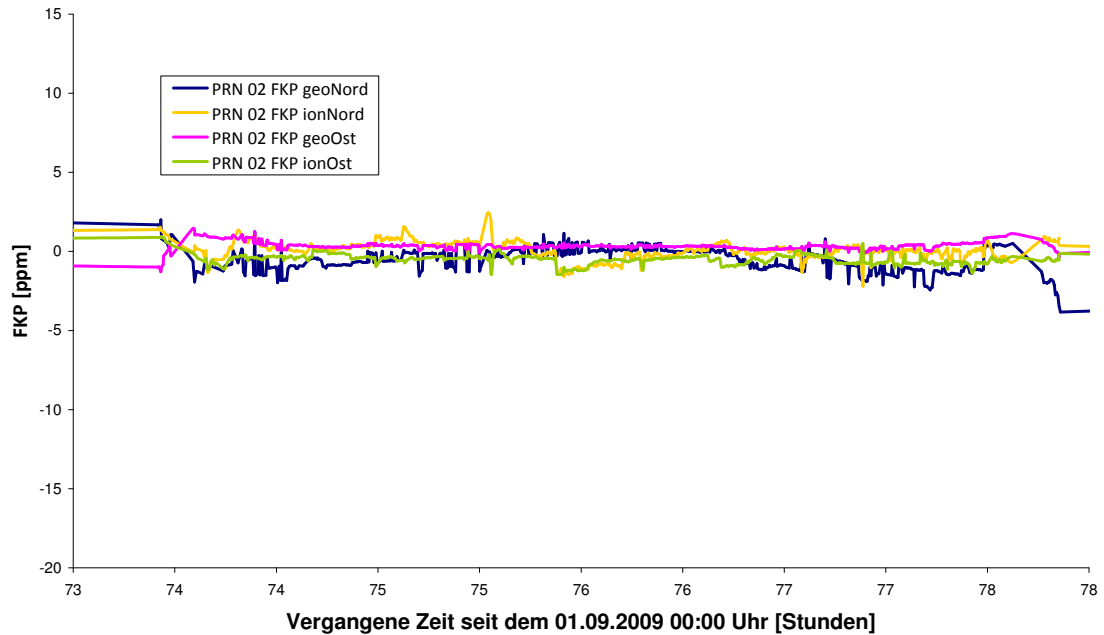


Abb. 6.14: FKP's an der Station Ochenig Süd für den GPS-Satelliten PRN 02 über die Dauer eines Satellitendurchlaufes

Wünscht der Nutzer die Übermittlung der Korrekturdaten in FKP, werden neben den Beobachtungsdaten einer Referenzstation diese Parameter übertragen. Aus den Zustandsdaten war es möglich, die dispersiven und nicht-dispersiven Gradienten in Nord- und Ostrichtung stationsweise für jeden Satelliten zu extrahieren. Die nicht-dispersiven Gradienten (auch geometrische Gradienten der FKP, kurz *FKP geo* genannt) beinhalten außer der Ionosphäre alle entfernungsabhängigen Fehler. Die Ionosphäre wird durch die

dispersiven Gradienten (kurz *FKP ion* genannt) beschrieben. In den Abbildungen 6.14 und 6.15 sind exemplarisch für die Stationen Ochenig Süd und Matterburg die FKPs für den GPS-Satelliten mit der PRN 02 über einen Zeitraum eines Satelliten-Durchlaufes (fünf Stunden) dargestellt.

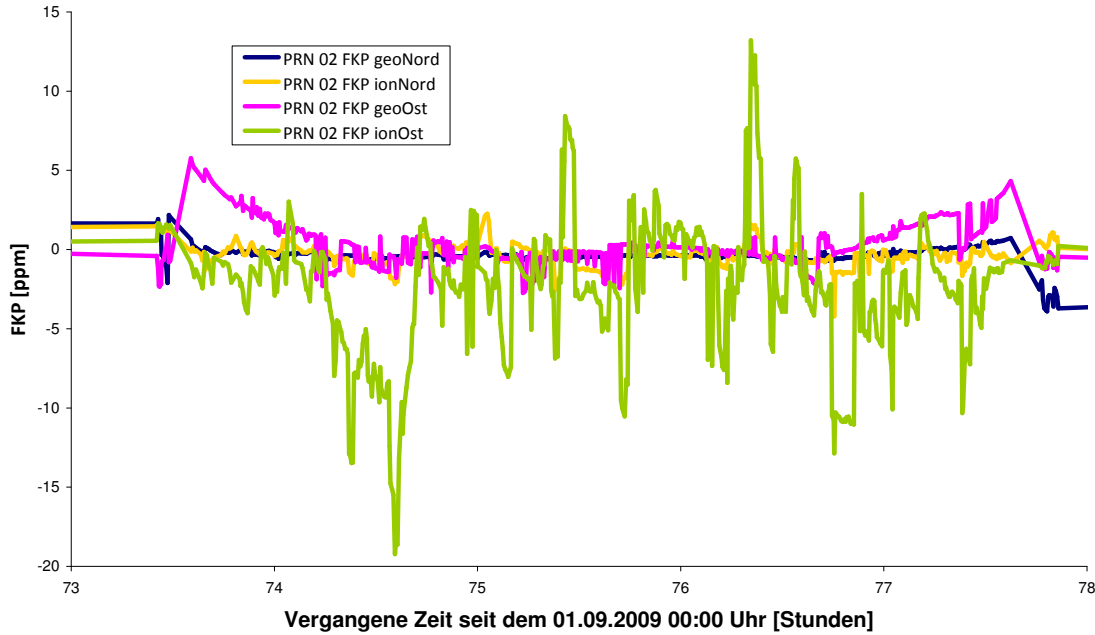


Abb. 6.15: FKPs an der Station Mattersburg für den GPS-Satelliten PRN 02 über die Dauer eines Satelliten-Durchlaufes

Die beiden Stationen wurden ausgewählt, da an der Station Ochenig Süd Abschattungen im niedrigen Elevationsbereich auftreten [Abbildung A.4] und sie ein auffälliges Residuen-Muster der L1 Code-Beobachtungen zeigt [Abbildung 6.12]. Außerdem treten ungewöhnlich hohe Standardabweichungen der stündlich geschätzten Stationskoordinaten auf [Abbildung 6.8]. Die Station Mattersburg ist auf Grund der gegebenen Fernsicht in alle Richtungen nahezu abschattungsfrei. Des Weiteren ist anhand der Residuen der Code- und Trägerphasenbeobachtungen [Abbildung 6.13], sowie des Signal-Rausch-Verhältnisses an dieser Station nichts ungewöhnliches festzustellen. Die Station Mattersburg zeigt somit eine gute Performance.

Im Vergleich der Abbildungen 6.15 und 6.14 ist zu erkennen, dass die FKPs an der Station Mattersburg Werte zwischen -20 und +15 ppm annehmen und um ein vielfaches höher sind als der Station Ochenig Süd. Besonders auffällig ist in Abbildung 6.15, dass

der ionosphärische Gradient in Ost-Richtung deutlich alle anderen Gradienten überlagert. Deshalb wird dieser Gradient im folgenden näher betrachtet.

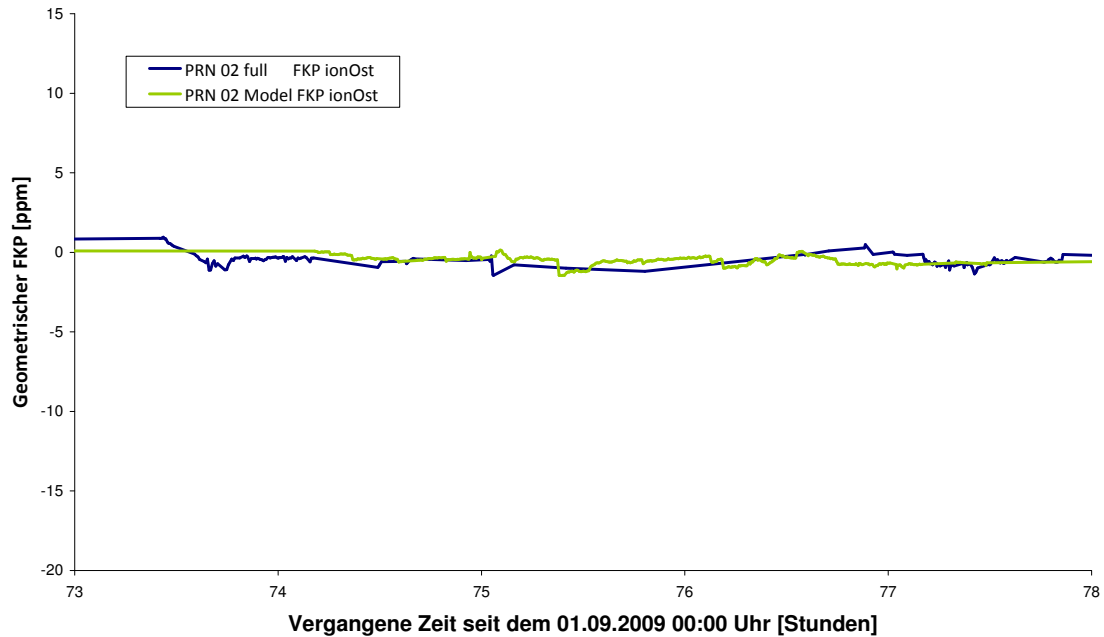


Abb. 6.16: Station Ochenig Süd - Vergleich der berechneten und der modellierten geometrischen FKPs

In Abbildung 6.16 und 6.17 sind für beide Stationen in Blau die *full FKP ion Ost* dargestellt, das sind die aus den Beobachtungsdaten der Referenzstationen berechneten dispersiven Gradienten in Ostrichtung. In Grün eingefärbt werden die *Model FKP ion Ost* dargestellt. *Model* bedeutet, FKPs werden geschätzt da keine *full FKPs* berechnet werden können (zum Beispiel weil zu diesem Zeitpunkt keine Mehrdeutigkeiten für den Satellit gelöst sind). Anhand der Abbildungen ist zu erkennen, dass zwischen Stunde 74 und 77 sehr viele FKPs nur geschätzt wurden. Dabei gehen die *full FKP* als Eingangsparameter in die Schätzung mit ein. Der Verlauf der *Model FKPs* entspricht somit ungefähr dem vorgegebenen Verlauf der *full FKP*. Umso mehr, je kleiner die Ausfallzeiten sind und je weniger die berechneten FKPs variieren. Bei der Station Ochenig Süd ändern sich die Werte der *full FKP ion Ost* nur wenig, aus diesem Grund fällt die Differenzen zwischen beiden Kurven sehr klein aus. An der Station Mattersburg sind die Variationen der *FKP ion Ost* größer. Da nur wenig *full FKP ion Ost* berechnet werden konnten, fällt an dieser Station die Differenz zwischen *full-* und *Model FKPs* größer aus.

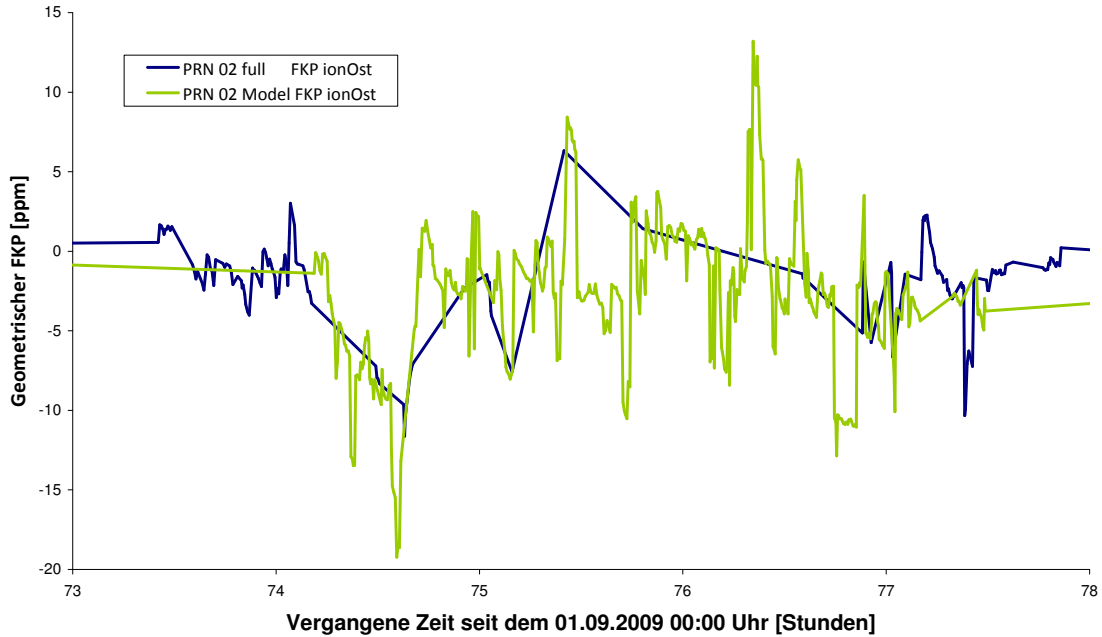


Abb. 6.17: Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs

In Anhang A.5 befinden sich weitere Abbildungen die eine ähnliche Charakteristik zeigen. In Abbildung 6.18 sind die FKPs der Station Mattersburg über einen Zeit von fünf Tagen dargestellt³. Anhand dieser Grafiken lässt sich erkennen, dass es sich bei Abbildungen 6.16 und 6.17 nicht um Einzelfälle handelt. Da der Berechnung der FKPs zu Grunde liegende Algorithmus nicht bekannt ist, kann an dieser Stelle nicht diskutiert werden, warum die berechneten FKPs an der Station Mattersburg deutlich stärkeren Schwankungen unterworfen sind, als an der Station Ochenig Süd. Auf Grund der besseren Performance der Station Mattersburg hätte ein umgekehrtes Bild vermutet werden können. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die modellierten FKPs stärker variieren als die berechneten und dass diese Variationen zunehmen, je weniger *full FKPs* vorhanden sind. Daraus lässt sich ableiten, dass sich fehlende Beobachtungen sowie fehlende Mehrdeutigkeiten negativ auf die Genauigkeit der FKPs auswirken, da in den Fehlzeiten die Parameter geschätzt werden müssen.

³die Zeitpunkte, in denen der Satellit nicht sichtbar war, wurden aus der dieser Abbildung entfernt, da für diese Zeitpunkte keine FKPs berechnet wurden

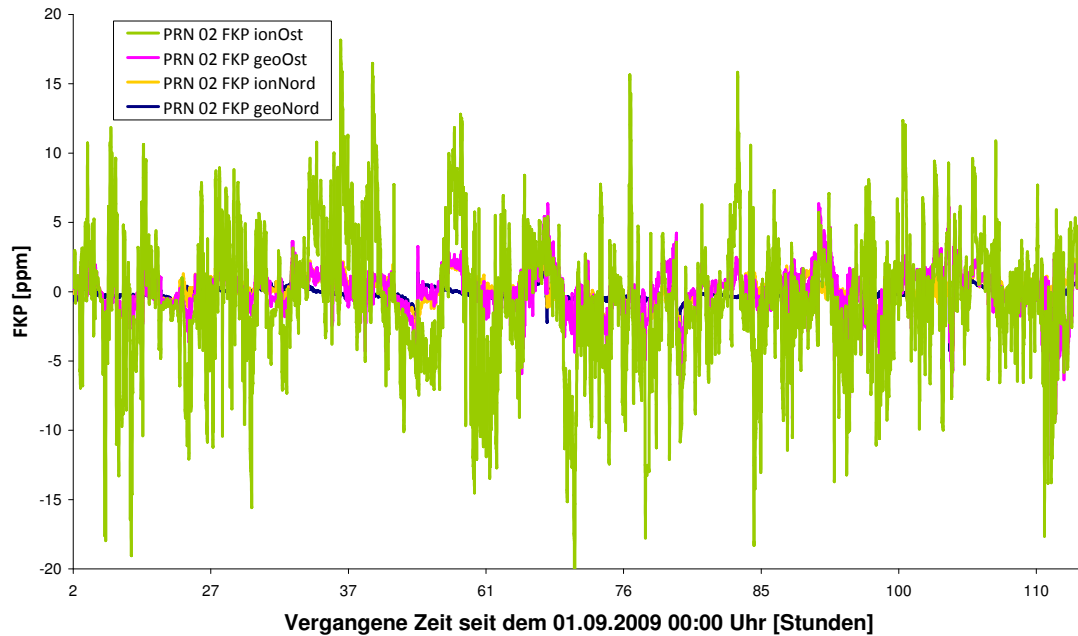


Abb. 6.18: FKP's an der Station Mattersburg für den GPS-Satelliten PRN 02 über den Zeitraum von fünf Tagen

6.7 Dauer der Initialisierung am Rover

In diesem Kapitel wird untersucht, wie viel Zeit die Mobile Station im Durchschnitt für die Positionslösung benötigte. Dabei werden die Informationen des NMEA-Formates zur Auswertung verwendet. Die berechnete Dauer der Initialisierung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Zeitpunkt, an dem in den NMEA-Daten das erste Mal der Qualitätsindikator *Eins* ist (Rover beginnt *tracking*) und dem Zeitpunkt, an dem der Qualitätsindikator auf *Fünf* springt (Mehrdeutigkeiten wurden gelöst). Ausfälle in der Zwischenzeit sowie Messungen, in denen die Mehrdeutigkeitslösung nicht gefunden werden konnte, sind bei der Auswertung berücksichtigt wurden. Zusätzlich wurde der HPOD, sowie die Anzahl an Satelliten extrahiert. Insgesamt standen für die Auswertung die NMEA-Protokolle von zehn Benutzern zur Verfügung, die insgesamt 498 Mal erfolgreich ihre Position bestimmen konnten. Wieviel Zeit der Benutzer dafür benötigte und die daraus resultierende Gesamtzeit, sowie die Anzahl an beobachteten Satelliten und die HDOP sind in Tabelle 6.9 zusammengefasst.

Nutzer	Positonierungen	Wert	Min	Max	Median
Nutzer1	35	ZEIT [s]	9	2037	121
		Anz Sat	7	16	12
		HDOP	0,7	2,2	1,0
Nutzer2	53	ZEIT [s]	4	275	33
		Anz Sat	3	10	7
		HDOP	0,6	17,9	1,4
Nutzer3	63	ZEIT [s]	4	1509	22
		Anz Sat	7	17	14
		HDOP	0,6	4,0	0,9
Nutzer4	136	ZEIT [s]	18	1029	52
		Anz Sat	4	9	6
		HDOP	0,5	7,6	1,5
Nutzer5	14	ZEIT [s]	23	5982	501
		Anz Sat	8	15	9
		HDOP	0,9	7,9	2,7
Nutzer6	9	ZEIT [s]	3	159	51
		Anz Sat	7	11	10
		HDOP	1,0	4,6	1,3
Nutzer7	26	ZEIT [s]	7	138	10
		Anz Sat	11	17	14
		HDOP	0,6	1,6	0,9
Nutzer8	10	ZEIT [s]	10	541	26
		Anz Sat	4	15	8
		HDOP	0,6	2,9	1,0
Nutzer9	15	ZEIT [s]	3	184	21
		Anz Sat	6	14	13
		HDOP	0,7	2,7	0,8
Nutzer10	137	ZEIT [s]	4	480	20
		Anz Sat	4	11	8
		HDOP	0,6	18,9	1,3
GESAMT	498	ZEIT [s]	3	5982	34
		Anz Sat	2	17	8
		HDOP	0,5	18,9	1,2

Tabelle 6.9: Initialisierungszeit am Rover, HDOP und Anzahl der beobachteten Satelliten

Der Median aus allen Beobachtungen ergibt eine Gesamtzeit von 34 Sekunden. Anhand der mit dem NMEA-Format übersandten Position des Nutzers, der Anzahl an beobachteten Satelliten und dem dazugehörigen HDOP war es möglich abzuschätzen, in welchem Gebiet sich der Beobachter ungefähr befand. Für eine schlechte Geometrie auf Grund von Abschattungen in Stadtgebiet und im alpinen Raum erhöht sich die Initialisierungszeit

auf rund 2 Minuten. Eine starke Korrelation zwischen Initialisierungszeit und HDOP sowie Anzahl an beobachteten Satelliten konnte jedoch nicht festgestellt werden.

A Anhang

A.1 Preisblatt EPOSA



Preisblatt 2010

Stand vom 1.10.2009

Produkt	Beschreibung	Preis
TP-DGNSS	österreichweiter Korrekturdatendienst GPS + GLONASS präzise mit Zentimetergenauigkeit und österreichweite Online-Transformationsparameter (Format RTCM 2.3, RTCM 3.0 oder NTRIP)	pro Tag EUR 55,00
		pro Monat EUR 700,00
		pro Jahr ab EUR 3.600,00
P-DGNSS	österreichweiter Korrekturdatendienst GPS + GLONASS präzise mit Zentimetergenauigkeit und für ein Bundesland Online-Transformationsparameter (Format RTCM 2.3, RTCM 3.0 oder NTRIP)	pro Tag EUR 55,00
		pro Monat EUR 500,00
		pro Jahr ab EUR 2.000,00
T-DGNSS	österreichweiter Korrekturdatendienst GPS + GLONASS präzise mit Submetergenauigkeit und österreichweite Online-Transformationsparameter (Format RTCM 2.0 oder NTRIP)	pro Tag EUR 55,00
		pro Monat EUR 500,00
		pro Jahr ab EUR 2.000,00
DGNSS	österreichweiter Korrekturdatendienst GPS + GLONASS präzise mit Submetergenauigkeit und für ein Bundesland Online-Transformationsparameter (Format RTCM 2.0 oder NTRIP)	pro Tag EUR 15,00
		pro Monat EUR 250,00
		pro Jahr ab EUR 1.000,00
RINEX	RINEX-Daten mit Taktrate von 1 Sekunde (Mindestabnahmemenge 1 Stunde)	pro Referenzstation EUR 36,00

Bei Tages- und Monatspauschalen wird bei Neukunden eine Auftragspauschale von EUR 50,00 in Rechnung gestellt.

A.2 RINEX-Daten

RINEX Beobachtungs-Datei

```

2.11      OBSERVATION DATA      M      RINEX VERSION / TYPE
GN-RINEX 1.3      Geo++ GmbH      03-OCT-10 01:59      PGM / RUN BY / DATE
Allensteig      MARKER NAME
ALST      MARKER NUMBER
0      OEBB Bau      OBSERVER / AGENCY
      TPS LEGACY      REC # / TYPE / VERS
2170245      TPSCR3_GGD_____CONE      ANT # / TYPE
      4066601.6900      1114763.2120      4770206.0580      APPROX POSITION XYZ
      0.0000      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
      1      1      WAVELENGTH FACT L1/2
      9      C1      L1      D1      P2      L2      D2      P1      S1      S2# / TYPES OF OBSERV
      1.000      INTERVAL
2010      10      3      0      0      0.0000000      GPS      TIME OF FIRST OBS
15      LEAP SECONDS
      END OF HEADER
10 10 3 0 0 0.0000000 0 16G13G23G 4G10G 7G 2G20G16G 8G32R 5R15
      R14R21R22R20
19999931.977 6 -24923048.699 6 2951.242 19999936.702 6 -18766872.920 6
2299.659 19999931.689 53.000 47.750
20862391.217 6 -20390794.779 6 1280.804 20862394.383 6 -15235239.727 6
998.015 20862390.501 53.250 43.750
21310731.920 6 -13840452.195 6 1990.096 21310738.375 6 -9205081.908 6
1550.716 21310731.737 50.000 42.000
22092817.818 6 -9730561.856 6 5822.298 22092824.222 5 -6002555.516 5
4536.845 22092817.156 45.750 35.500
22203448.670 6 -13343508.756 6 6191.398 22203454.166 6 -9743853.648 6
4824.455 22203447.972 48.750 38.250
22295164.135 6 -12861538.063 6 4816.919 22295167.544 5 -9368305.765 5
3753.437 22295163.730 48.250 36.250
23511750.911 6 -2273999.483 6 -297.563 23511754.166 5 -4386548.559 5

```

Abb. A.1: RINEX GNSS OBS 2.11

RINEX GPS-Navigations-Datei

```

2.10      NAVIGATION DATA      RINEX VERSION / TYPE
GN-RINEX 1.3      Geo++ GmbH      03-OCT-10 01:59      PGM / RUN BY / DATE
                                     END OF HEADER
13 10 10 3 0 0 0.0 0.295928679407D-03-0.909494701773D-12 0.000000000000D+00
    0.900000000000D+02 0.554687500000D+02 0.364693762388D-08-0.519602197026D+00
    0.286288559437D-05 0.431711762212D-02 0.106077641249D-04 0.515370452690D+04
    0.000000000000D+00-0.614672899246D-07-0.843172974979D+00 0.223517417908D-07
    0.991871558175D+00 0.191062500000D+03 0.181066628634D+01-0.770639243075D-08
    -0.159649507186D-09 0.100000000000D+01 0.160400000000D+04 0.000000000000D+00
    0.000000000000D+00 0.000000000000D+00-0.107102096081D-07 0.900000000000D+02
    -0.718000000000D+04 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
23 10 10 3 0 0 0.0 0.350885093212D-03-0.193267624127D-11 0.000000000000D+00
    0.910000000000D+02 0.510312500000D+02 0.413160066918D-08-0.132955464017D+01
    0.254996120930D-05 0.700735289138D-02 0.108703970909D-04 0.515364471245D+04
    0.000000000000D+00-0.335276126862D-07-0.907035382213D+00-0.111758708954D-06
    0.966774519731D+00 0.172593750000D+03 0.310955704005D+01-0.788461414011D-08
    -0.150720563831D-09 0.100000000000D+01 0.160400000000D+04 0.000000000000D+00
    0.000000000000D+00 0.000000000000D+00-0.200234353542D-07 0.910000000000D+02
    -0.717700000000D+04 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
4 10 10 3 0 0 0.0 0.184342265129D-03 0.943600753089D-11 0.000000000000D+00
    0.790000000000D+02 0.347500000000D+02 0.543236913712D-08 0.175375421753D+01
    0.188127160072D-05 0.933702476323D-02 0.781565904617D-05 0.515375581551D+04
    0.000000000000D+00-0.281259417534D-06-0.300984979710D+01 0.134110450745D-06
    0.939051495058D+00 0.220437500000D+03 0.649488761151D+00-0.850856870175D-08
    0.332513850537D-09 0.100000000000D+01 0.160400000000D+04 0.000000000000D+00
    0.000000000000D+00 0.000000000000D+00-0.605359673500D-08 0.790000000000D+02
    -0.718200000000D+04 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
10 10 10 3 0 0 0.0-0.541135668755D-04-0.113686837722D-11 0.000000000000D+00
    0.390000000000D+02-0.965625000000D+01 0.515557189312D-08 0.552776607444D+00
    -0.260770320892D-06 0.939719693270D-02 0.682659447193D-05 0.515351979828D+04
    0.000000000000D+00-0.391155481339D-07-0.194190948755D+01 0.894069671631D-07
    0.951566043860D+00 0.240750000000D+03 0.664562162870D+00-0.850892585949D-08
    -0.506449667090D-09 0.100000000000D+01 0.160400000000D+04 0.000000000000D+00
    0.100000000000D+01 0.000000000000D+00-0.279396772385D-08 0.390000000000D+02
    -0.544100000000D+04 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
7 10 10 3 0 0 0.0-0.159954652190D-05 0.227373675443D-12 0.000000000000D+00

```

Abb. A.2: GPS RINEX NAV 2.10

RINEX GLONASS-Navigations-Datei

```

      2.10          GLONASS NAVMESS DATA          RINEX VERSION / TYPE
GN-RINEX 1.3      Geo++ GmbH          03-OCT-10 01:59      PGM / RUN BY / DATE
      2010   10       3      0.175088644028D-06      CORR TO SYSTEM TIME
      15                                          LEAP SECONDS
                                          END OF HEADER
5 10 10 2 23 45 0.0-0.157475471497D-03 0.000000000000D+00 0.846300000000D+05
      0.113742973633D+05 0.568837165833D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
      0.253482812500D+04 0.305485630035D+01 0.000000000000D+00 0.100000000000D+01
      0.226880996094D+05-0.626525878906D+00-0.279396772385D-08 0.000000000000D+00
15 10 10 2 23 45 0.0 0.304654240608D-04 0.000000000000D+00 0.846300000000D+05
      0.202625625000D+05-0.122256469727D+01-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
      0.117960561523D+05-0.638697624207D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
      0.993406542969D+04 0.326187229156D+01-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
14 10 10 2 23 45 0.0-0.184259377420D-03-0.181898940355D-11 0.846300000000D+05
      0.347364208984D+04-0.286808776855D+01-0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
      0.118864228516D+05-0.106819152832D+01 0.186264514923D-08-0.700000000000D+01
      0.222968217773D+05 0.100774383545D+01-0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
21 10 10 2 23 45 0.0-0.208538956940D-03-0.181898940355D-11 0.846300000000D+05
      0.730554589844D+04 0.176164436340D+01 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
      -0.169944902344D+05-0.163860797882D+01-0.931322574615D-09 0.400000000000D+01
      0.175048061523D+05-0.233390522003D+01-0.279396772385D-08 0.000000000000D+00
22 10 10 2 23 45 0.0-0.765174627304D-05 0.000000000000D+00 0.846300000000D+05
      -0.841626220703D+04 0.240171527863D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
      -0.706373876953D+04-0.204229259491D+01 0.931322574615D-09-0.300000000000D+01
      0.230129687500D+05 0.265700340271D+00-0.279396772385D-08 0.000000000000D+00
20 10 10 2 23 45 0.0-0.749062746763D-04 0.000000000000D+00 0.846300000000D+05
      0.188603110352D+05 0.106040954590D+00 0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
      -0.170887641602D+05-0.332582473755D+00-0.279396772385D-08 0.200000000000D+01
      0.215655712891D+04-0.355956363678D+01-0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
15 10 10 3 0 15 0.0 0.304663553834D-04 0.000000000000D+00 0.300000000000D+02
      0.173184892578D+05-0.202965068817D+01-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
      0.106531967773D+05-0.589166641235D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
      0.153432622070D+05 0.270923233032D+01-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
21 10 10 3 0 15 0.0-0.208542682230D-03-0.181898940355D-11 0.300000000000D+02
      0.985196191406D+04 0.106431484222D+01 0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
      -0.197584365234D+05-0.138605403900D+01-0.186264514923D-08 0.400000000000D+01

```

Abb. A.3: GLONASS RINEX NAV 2.10

A.3 Signal-Rausch-Verhältnis

CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen

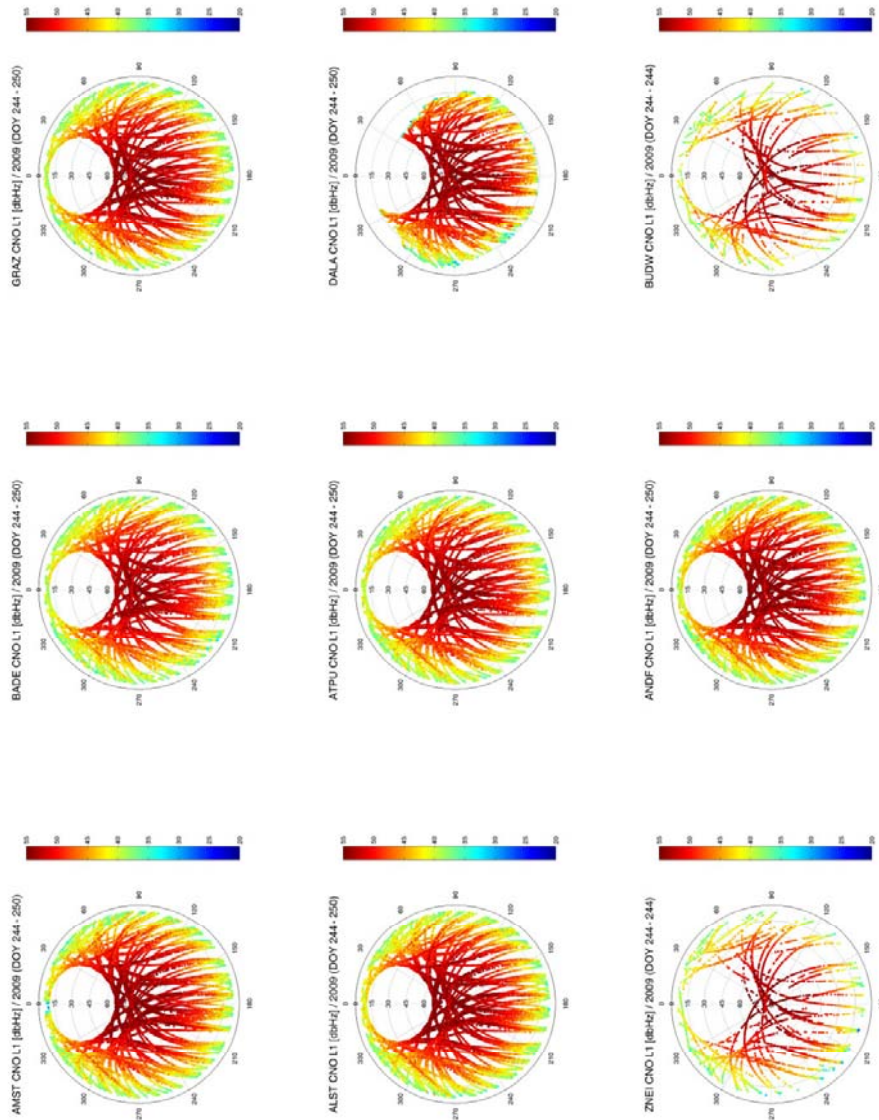


Abb. A.4: CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (1)

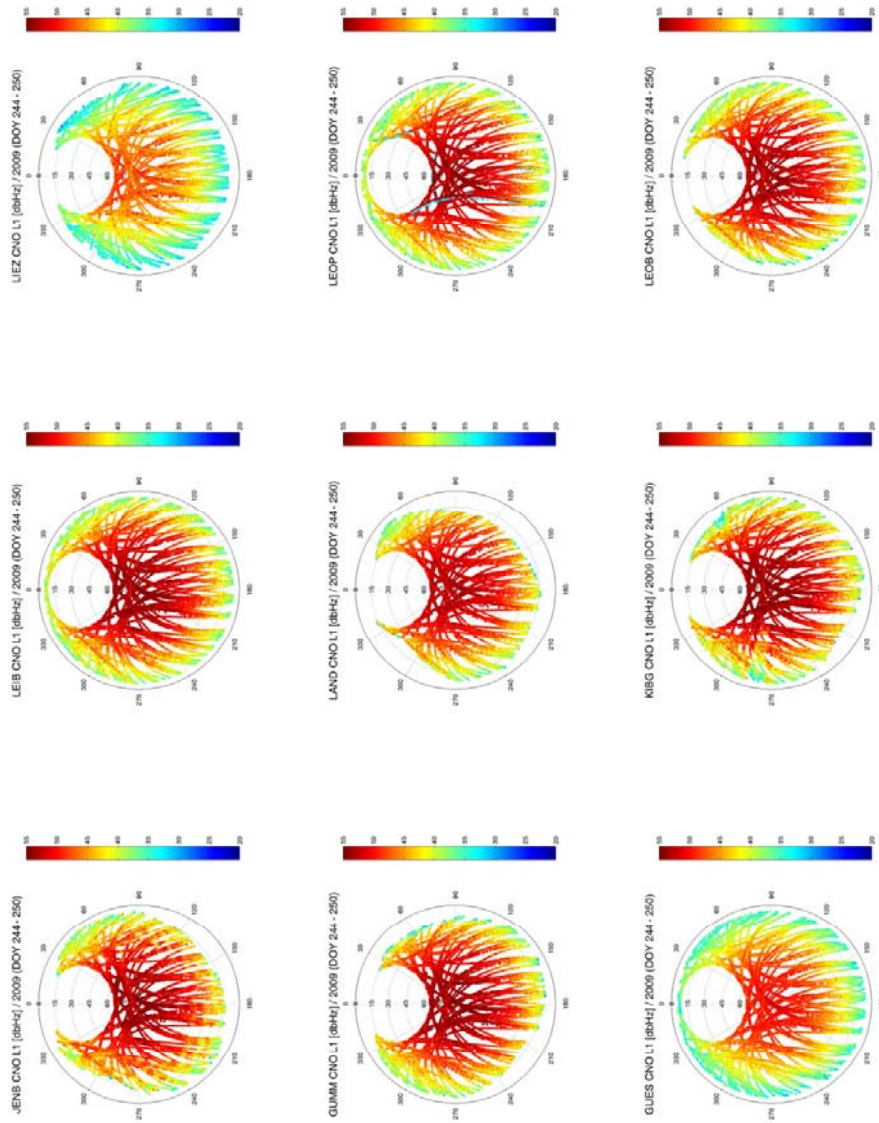


Abb. A.5: CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (2)

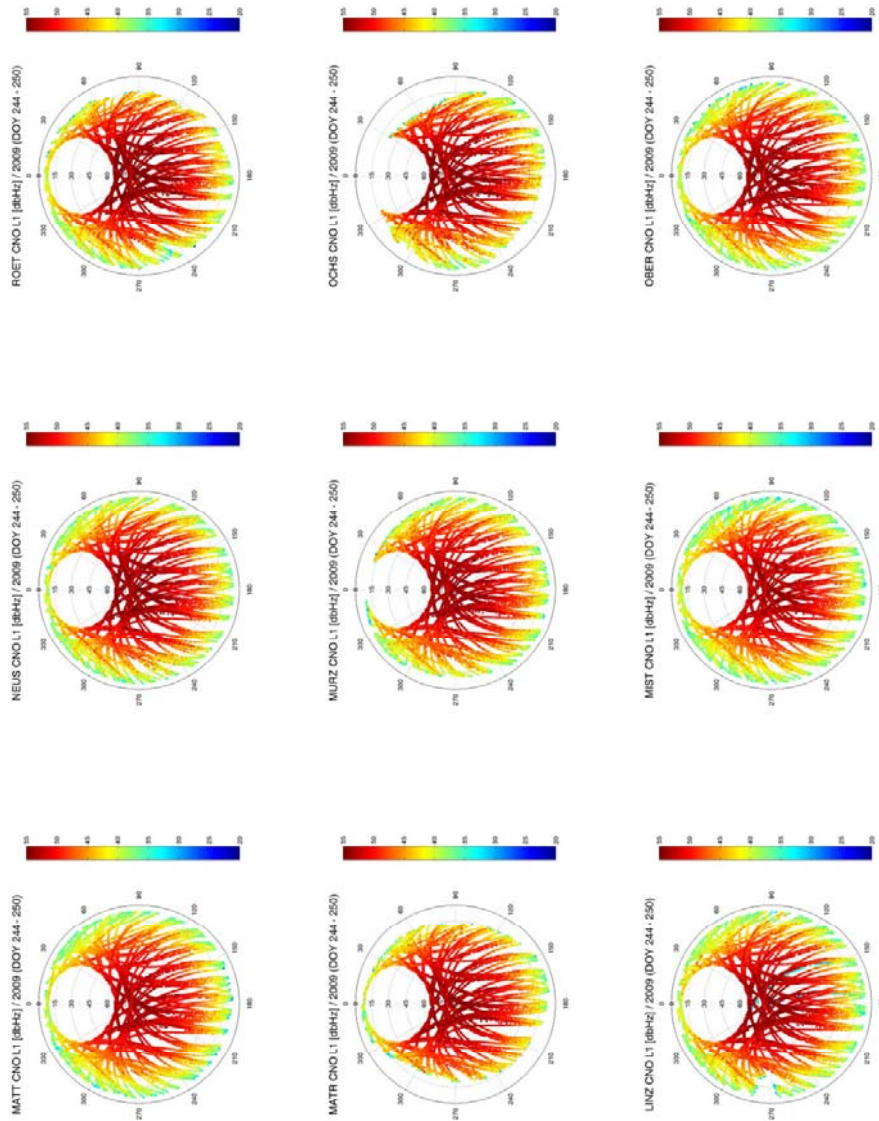


Abb. A.6: CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (3)

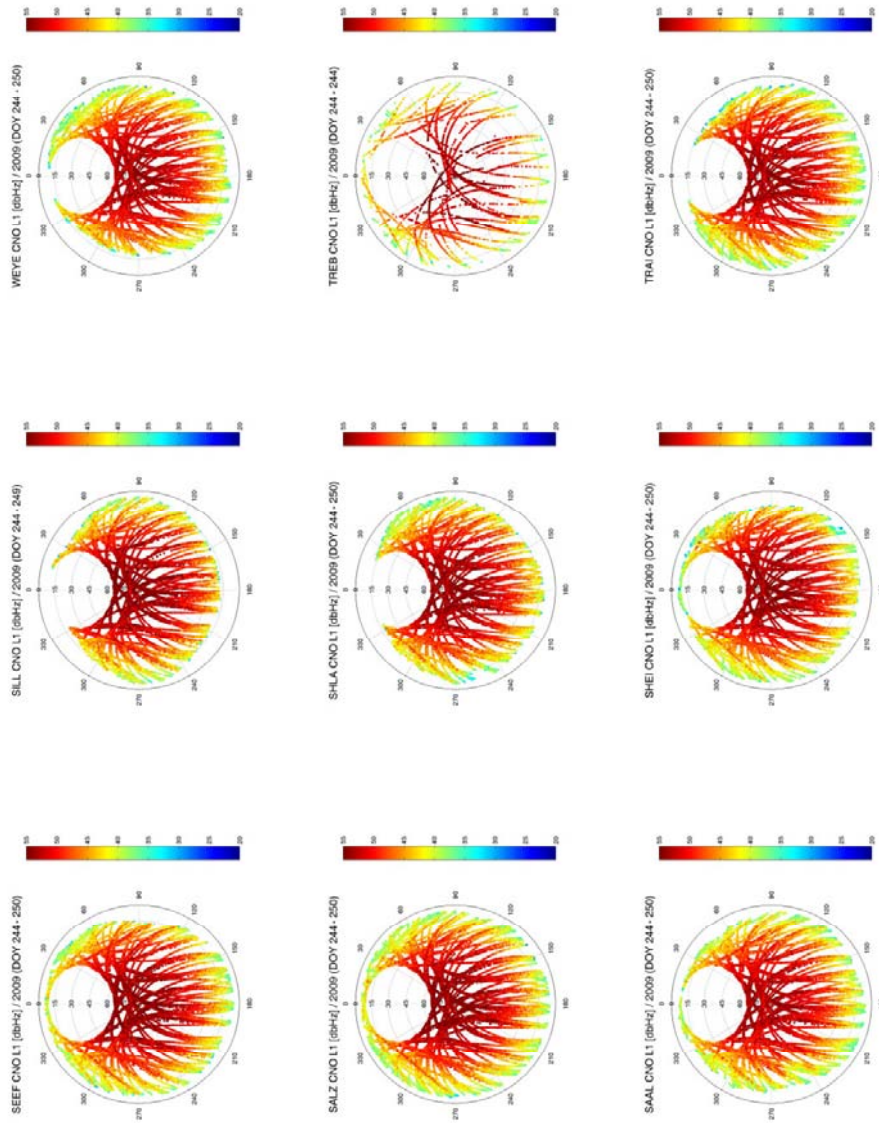


Abb. A.7: CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (4)

CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen

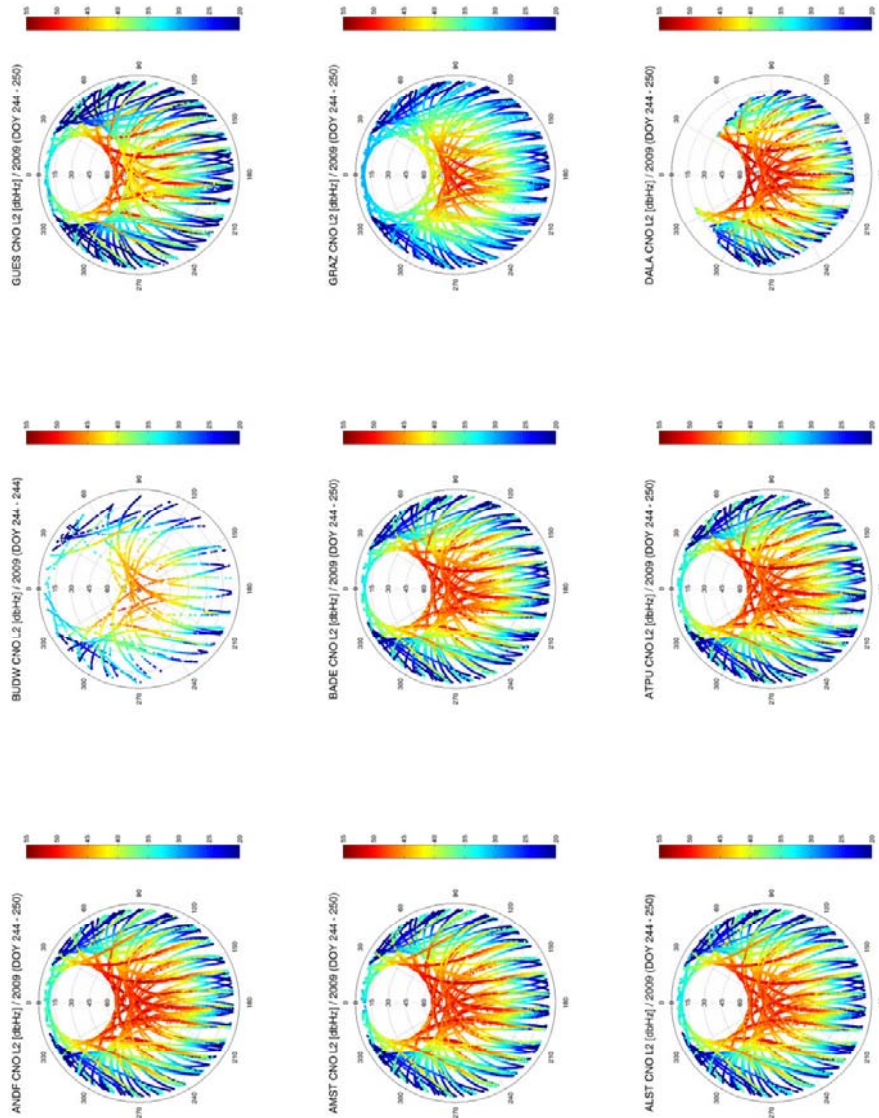


Abb. A.8: CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (1)

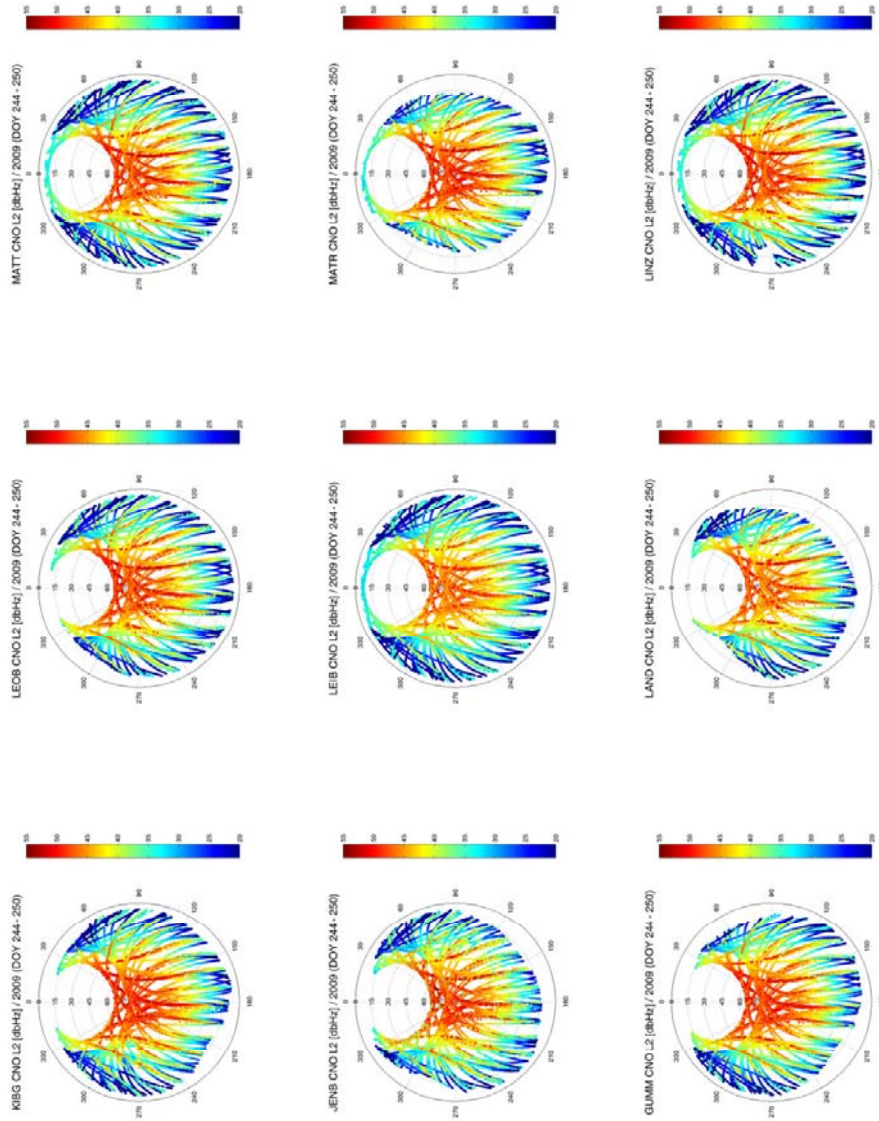


Abb. A.9: CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (2)

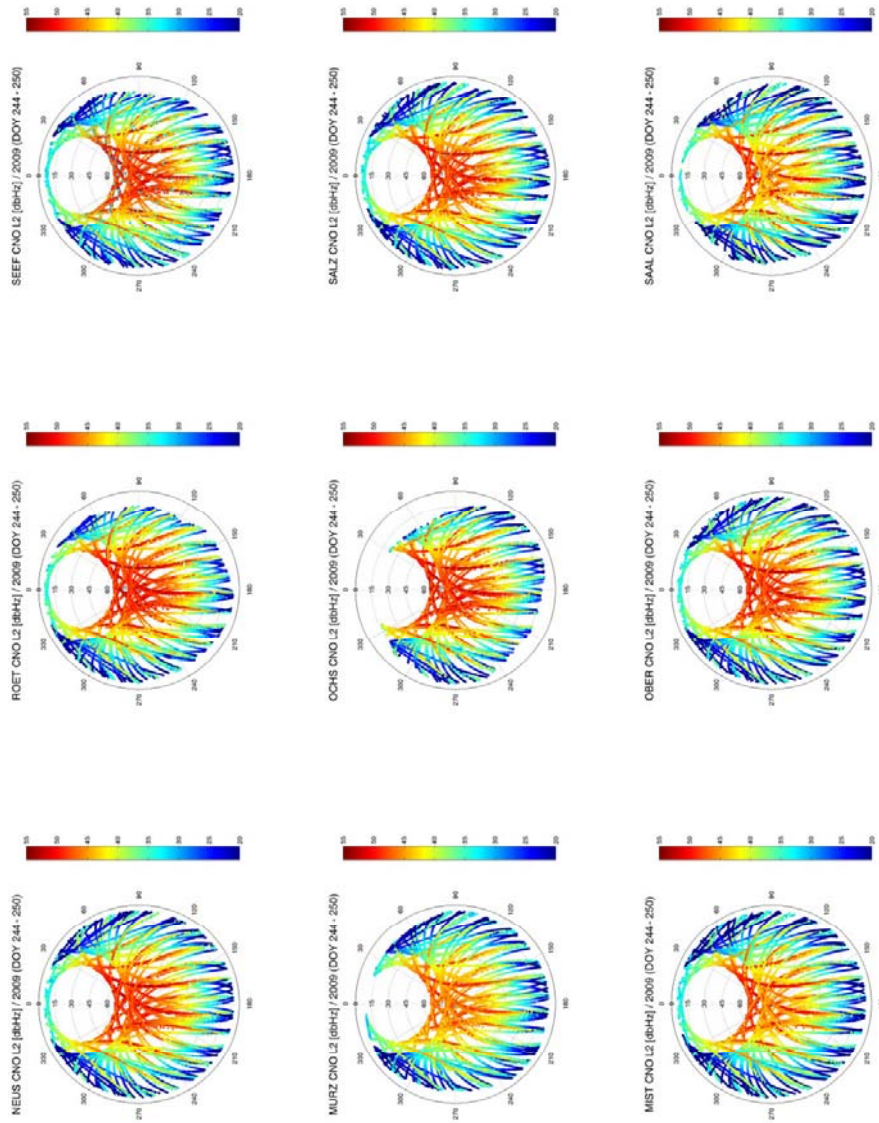


Abb. A.10: CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (3)

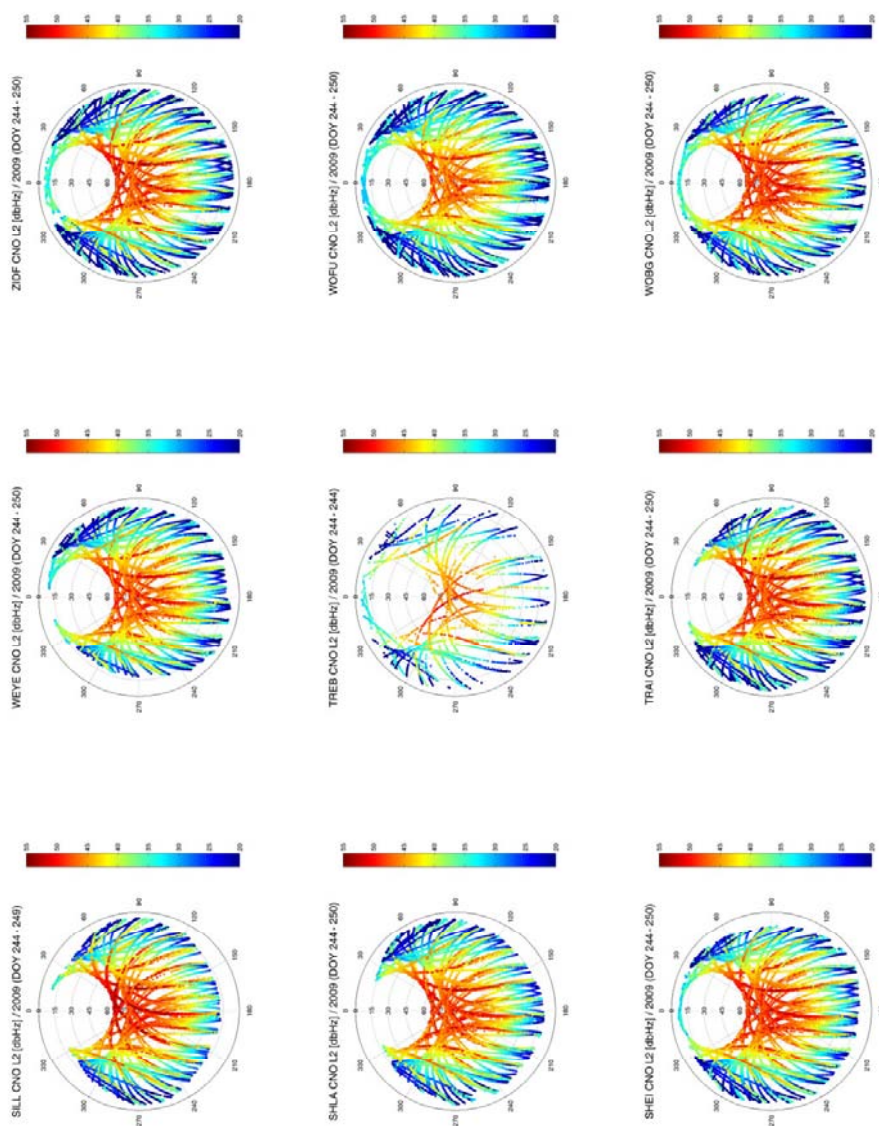


Abb. A.11: CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (4)

A.4 Residuen und Mehrwegeausbreitungen

Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen

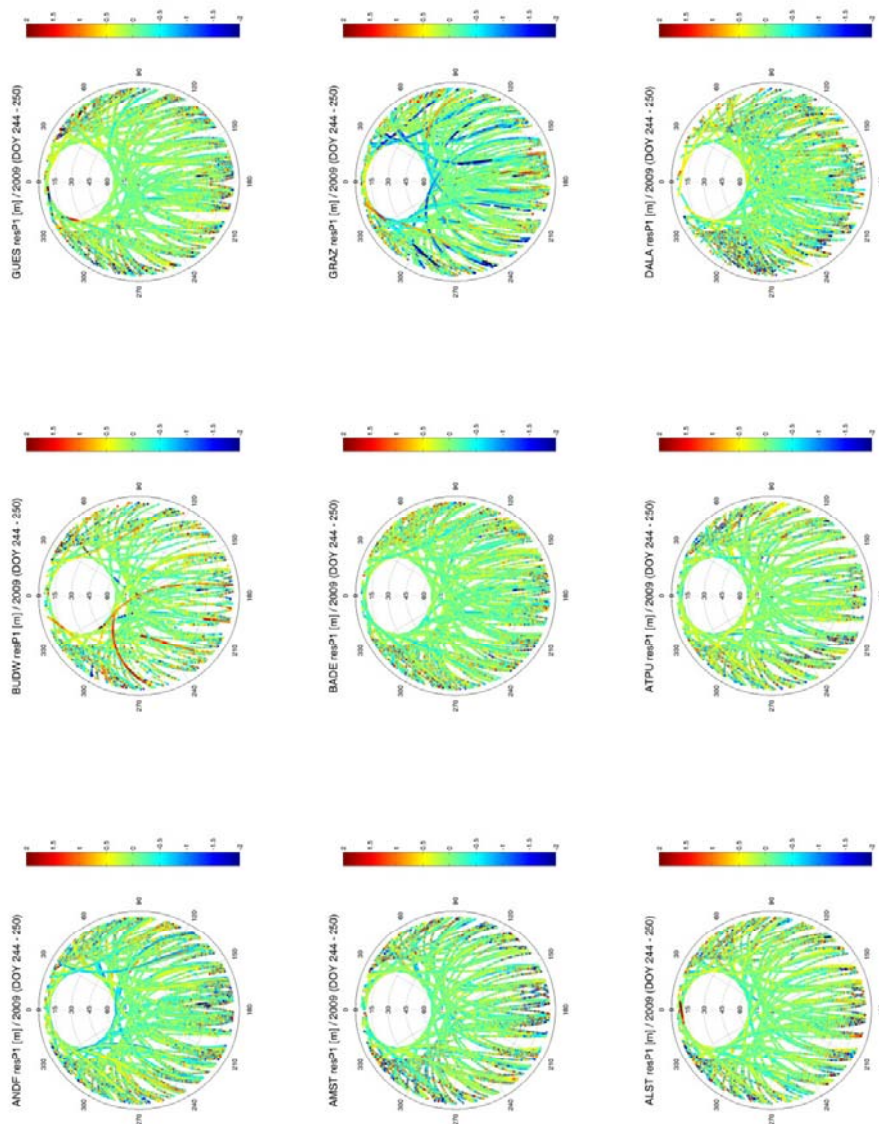


Abb. A.12: Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (1)

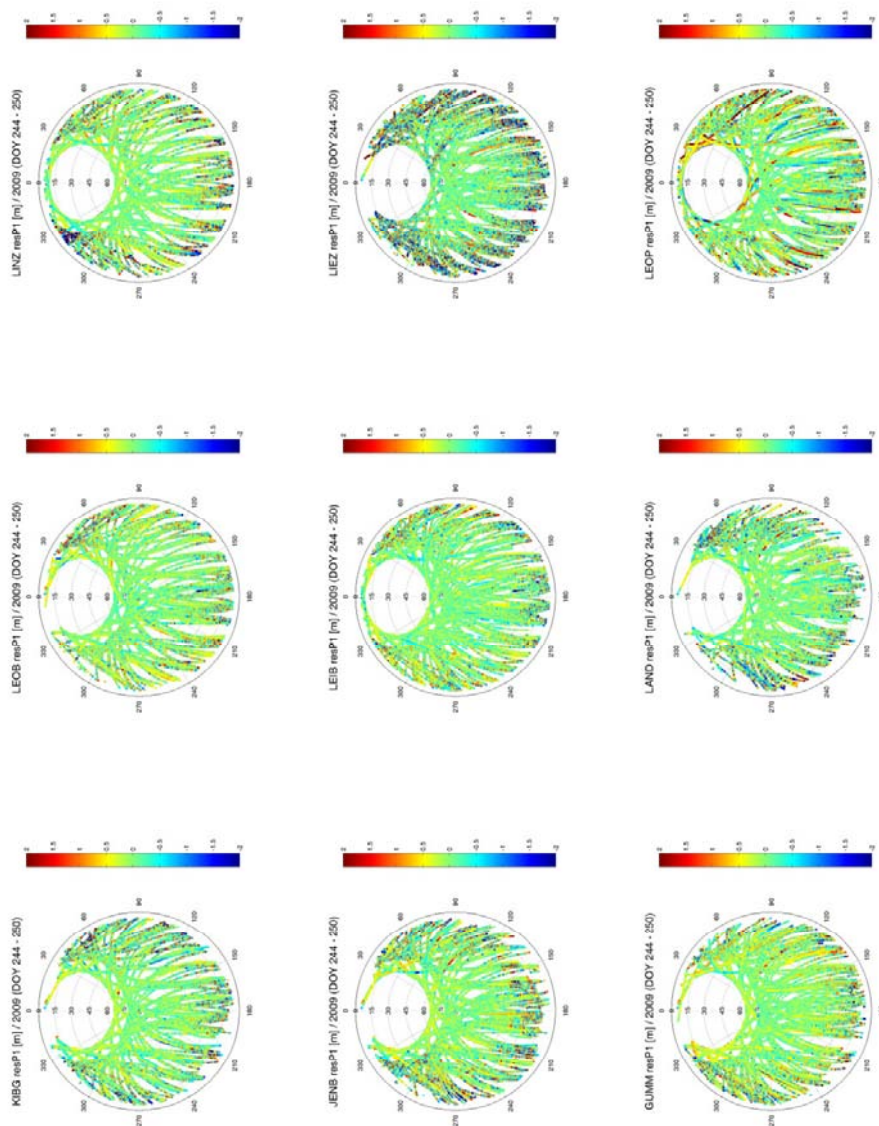


Abb. A.13: Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (2)

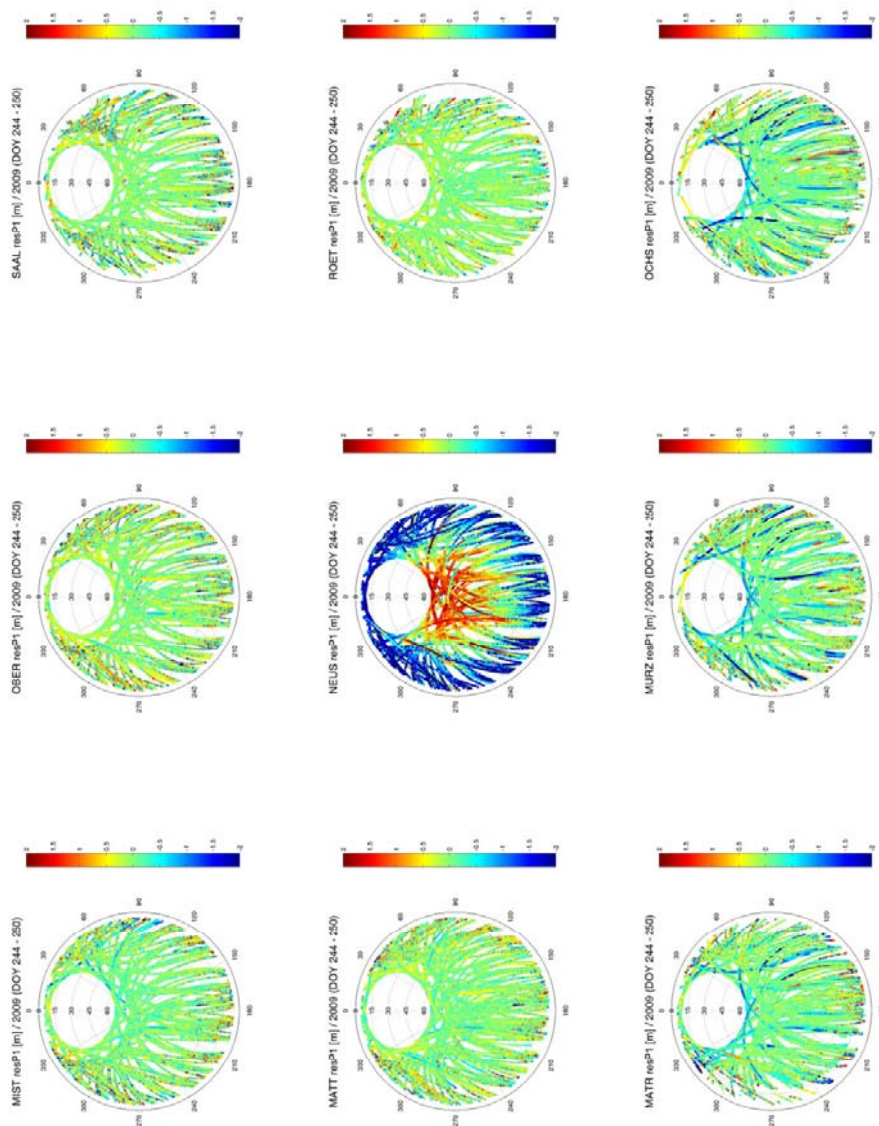


Abb. A.14: Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (3)

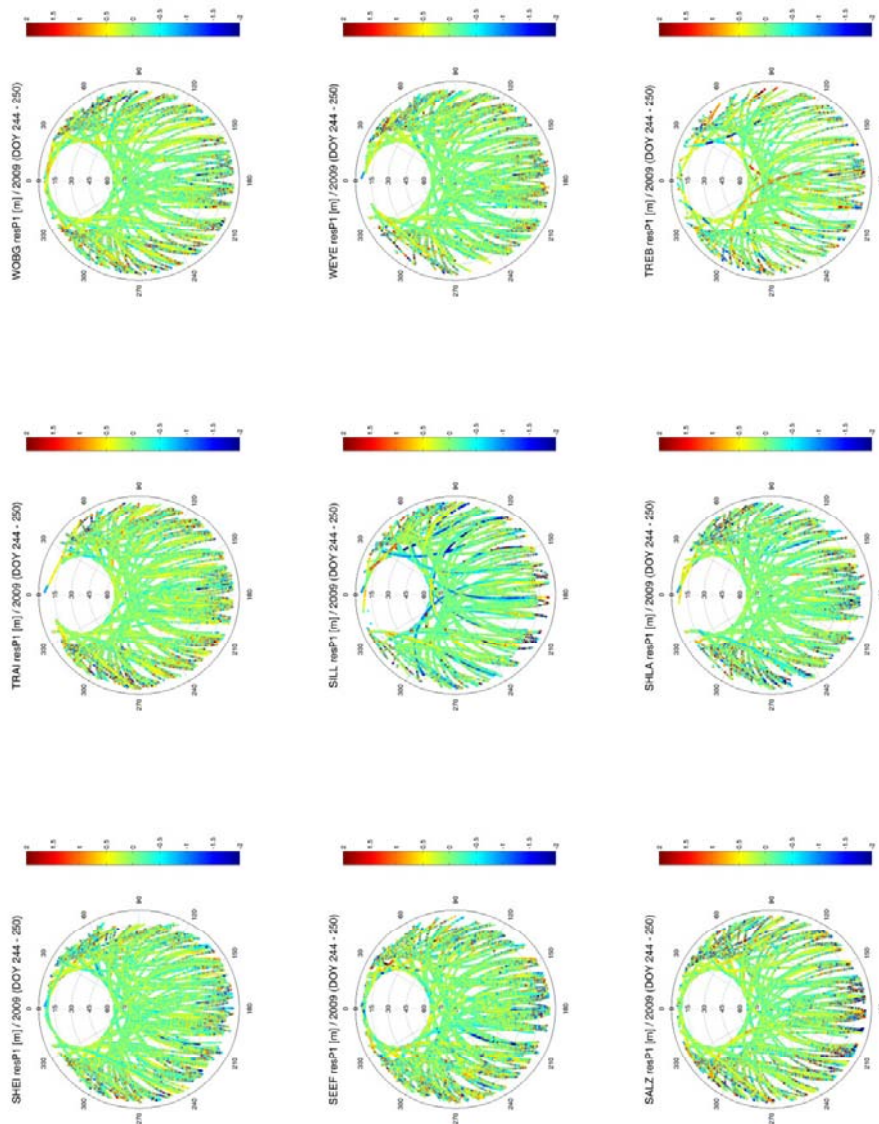


Abb. A.15: Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (4)

Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen

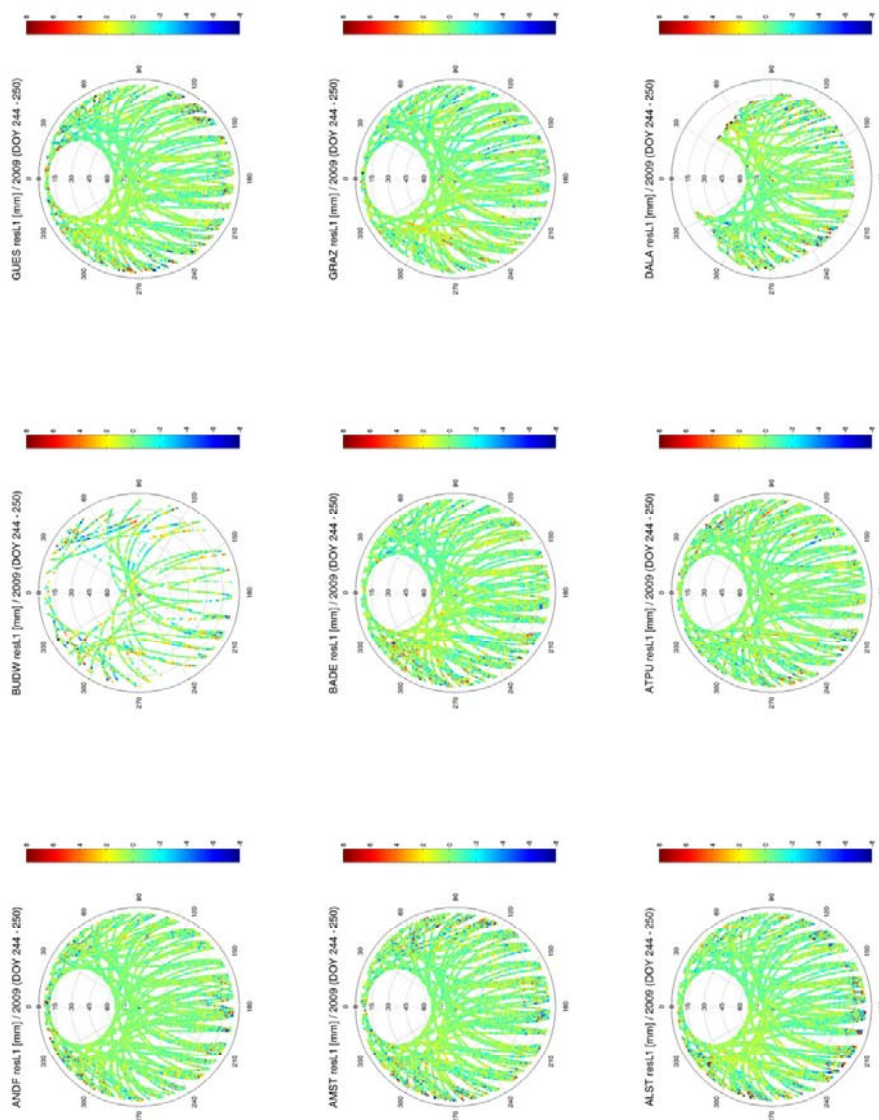


Abb. A.16: Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (1)

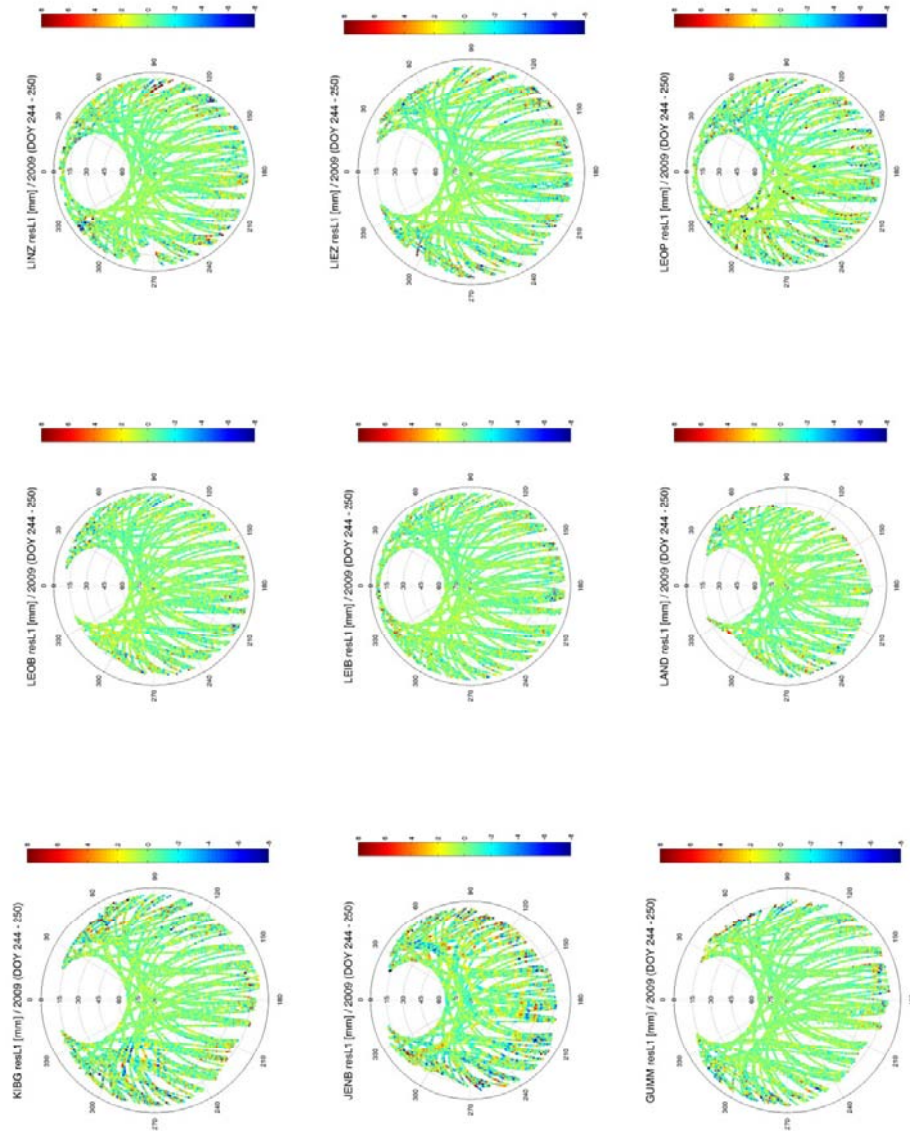


Abb. A.17: Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (2)

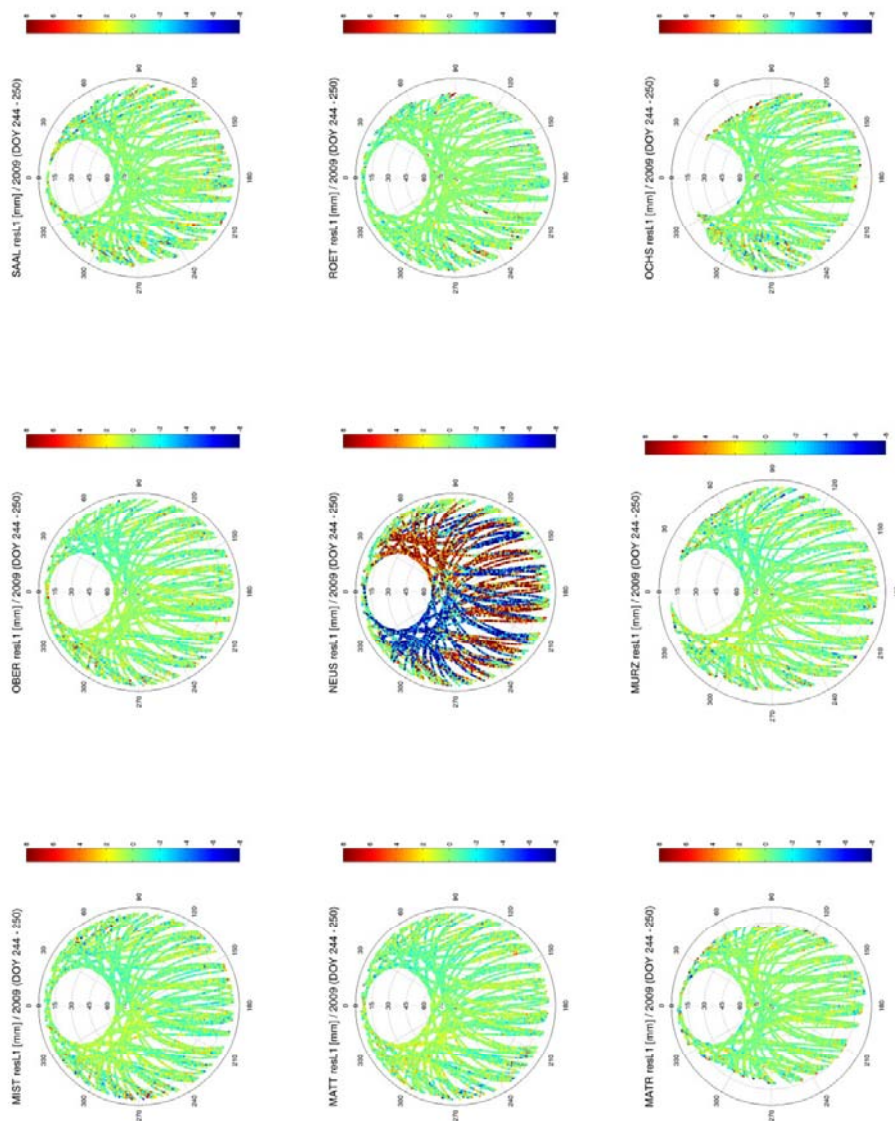


Abb. A.18: Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (3)

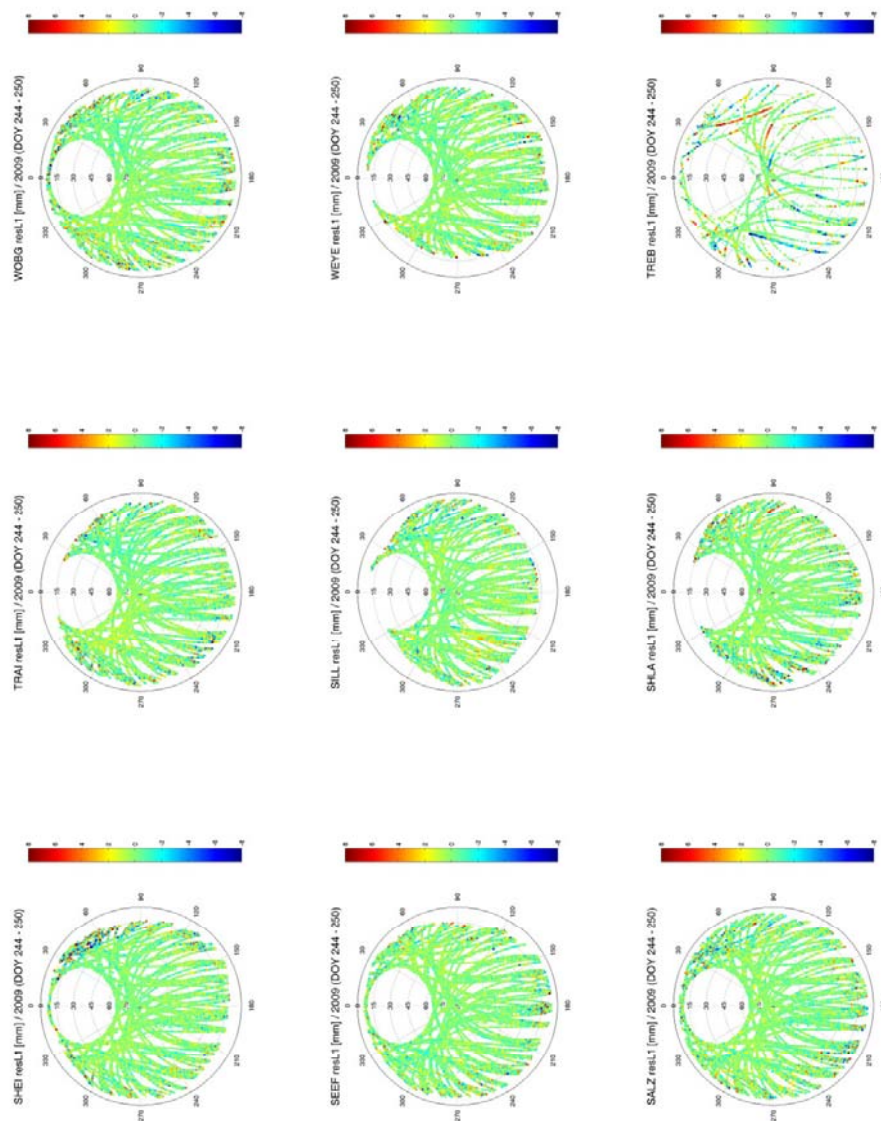


Abb. A.19: Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (4)

A.5 Flächenkorrekturparameter

Vergleich full-FKP und Model-FKP

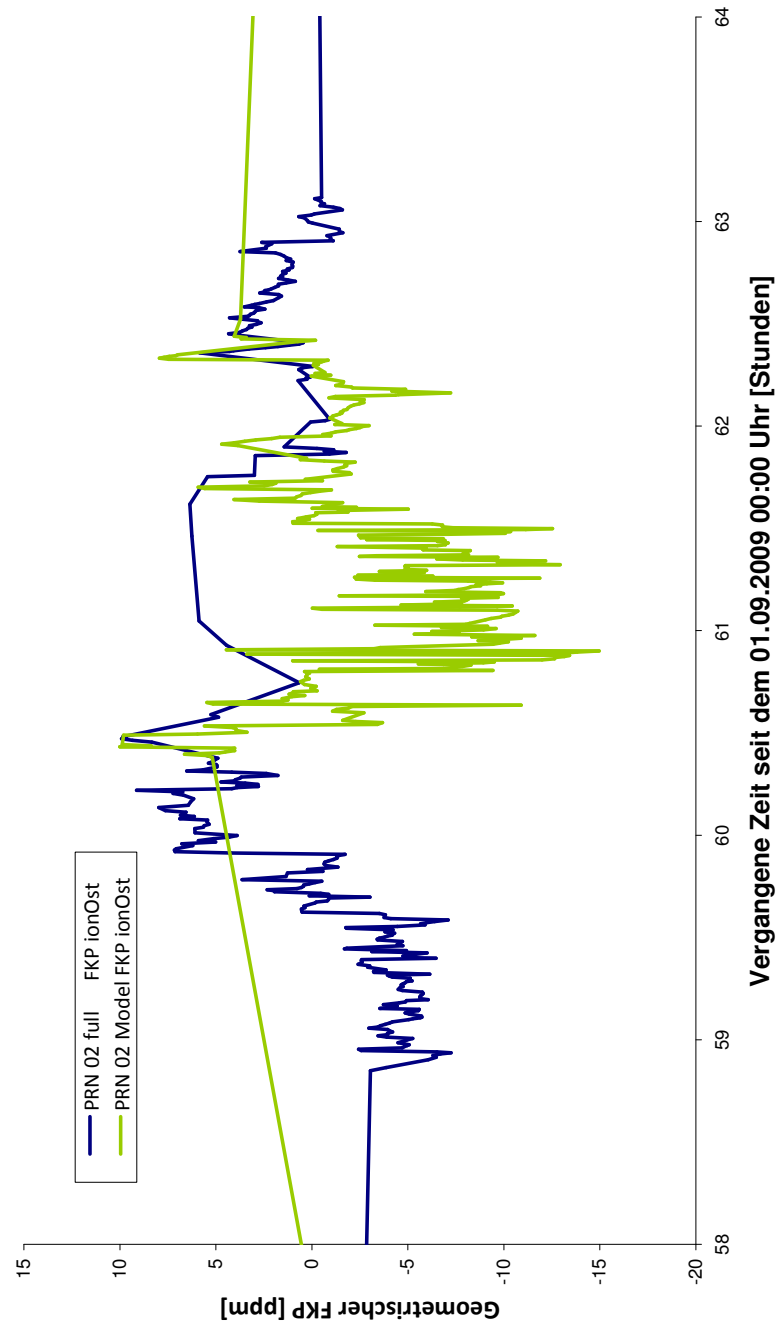


Abb. A.20: Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs (Stunde 58-64)

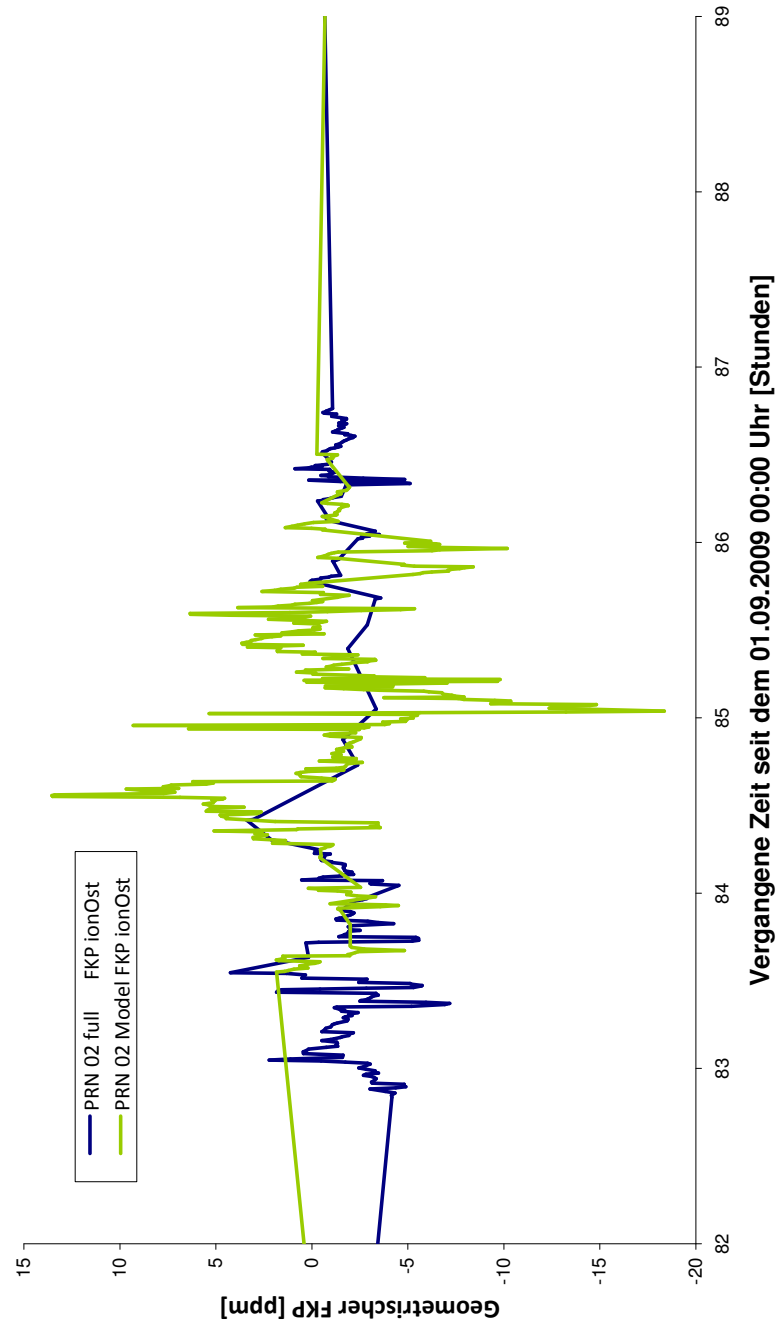


Abb. A.21: Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs (Stunde 82-89)

Mittelwerte und Standardabweichungen der FKP - Station Mattersburg

PRN	geo FKP Nord		geo FKP Ost		ion FKP Nord		ion FKP Ost	
	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw
02	-0.29	1.00	0.08	0.36	0.37	0.75	-0.05	0.61
03	-0.28	1.03	0.04	0.44	2.25	4.32	0.70	0.98
04	-0.24	1.00	0.07	0.44	0.41	1.25	0.01	0.69
05	0.02	1.12	0.16	0.46	0.24	0.82	0.02	0.68
07	-0.09	1.26	0.03	0.46	0.45	1.48	0.20	0.85
08	-0.07	0.99	-0.15	0.43	0.13	0.86	0.18	0.80
09	-0.04	0.85	0.06	0.32	0.38	0.74	-0.28	0.86
10	-0.13	0.90	0.06	0.44	0.29	1.38	0.07	0.68
11	-0.28	1.38	0.01	0.44	1.74	3.51	0.55	0.98
12	0.03	0.85	0.08	0.38	0.45	0.78	-0.28	0.76
13	-0.28	1.39	-0.02	0.42	0.47	1.64	0.10	0.88
14	-0.18	1.00	0.06	0.47	1.23	2.56	0.14	1.09
15	0.05	1.28	0.09	0.47	0.37	1.36	-0.18	1.03
16	-0.08	1.09	0.13	0.50	1.34	3.68	0.37	1.00
17	-0.28	1.56	0.08	0.45	0.62	1.80	0.17	1.09
18	-0.22	1.08	0.06	0.46	1.44	3.06	0.31	1.10
19	-0.09	1.15	0.06	0.50	2.15	4.26	0.64	0.92
20	-0.19	1.29	-0.04	0.45	1.34	2.80	0.36	0.95
21	-0.02	1.13	-0.01	0.51	1.50	3.71	0.47	1.04
22	-0.19	1.09	0.08	0.51	1.73	3.72	0.53	1.01
23	-0.02	1.57	-0.04	0.56	0.78	2.13	0.19	0.87
24	-0.27	1.14	0.08	0.40	0.77	2.12	0.08	0.67
26	-0.05	0.84	0.06	0.48	1.22	2.48	0.08	0.97
27	-0.07	0.81	0.05	0.30	0.30	0.82	-0.22	0.90
28	-0.11	1.00	0.08	0.46	0.61	1.70	0.27	0.87
29	-0.19	1.03	0.04	0.29	0.94	2.19	0.01	0.80
30	-0.11	0.87	0.08	0.41	0.68	1.10	-0.20	0.73
31	-0.36	1.31	0.06	0.50	0.81	1.64	0.02	0.64
32	-0.17	1.35	-0.02	0.47	1.61	3.31	0.51	0.98

Mittelwerte und Standardabweichungen der FKP - Station Ochenig Süd

PRN	geom FKP Nord		geom FKP Ost		ion FKP Nord		ion FKP Ost	
	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw
02	-0.10	0.54	-0.13	1.29	0.27	0.82	-0.73	4.00
03	-0.13	0.63	-0.27	1.75	0.08	0.98	0.16	5.51
04	-0.05	0.58	0.10	1.20	0.11	1.03	-1.04	4.20
05	0.03	0.66	-0.10	1.55	0.16	0.92	-0.10	4.07
07	0.04	0.60	0.03	1.33	-0.02	0.90	-0.45	5.07
08	-0.14	0.94	-0.65	2.26	-0.07	0.78	-0.25	4.29
09	-0.15	0.66	-0.23	1.31	0.20	1.02	-1.12	4.49
10	0.02	0.56	-0.24	1.35	0.12	0.99	-0.05	5.28
11	-0.29	0.61	-0.39	1.59	-0.33	1.09	-2.03	4.31
12	-0.08	0.67	-0.50	1.61	0.30	0.97	-0.41	4.60
13	-0.23	0.42	-0.21	1.09	-0.10	0.92	-1.27	4.87
14	0.03	0.69	-0.06	1.50	0.21	0.83	-0.76	4.42
15	-0.07	0.75	0.06	1.95	-0.04	1.05	-0.79	4.57
16	-0.06	0.60	-0.51	1.59	0.13	1.05	0.09	5.16
17	-0.07	0.54	0.01	1.44	-0.15	0.94	-1.40	5.73
18	0.09	0.66	0.06	1.63	0.24	0.79	0.10	3.92
19	-0.12	0.63	-0.24	1.81	-0.14	1.15	-0.60	6.03
20	-0.26	0.44	-0.51	1.21	-0.31	0.97	-2.57	6.12
21	-0.03	0.84	-0.76	1.76	0.38	0.95	0.88	5.20
22	0.12	0.92	0.17	1.90	0.01	0.89	-0.12	5.13
23	0.02	0.76	-0.51	1.33	-0.22	0.93	-1.32	4.75
24	-0.09	0.67	-0.25	2.00	0.34	0.80	0.26	4.34
26	0.04	0.62	0.08	1.41	0.15	0.78	-0.66	4.10
27	-0.14	0.55	-0.26	1.34	0.11	0.97	-0.66	4.25
28	-0.03	0.68	0.16	1.86	-0.01	0.84	-0.42	3.51
29	-0.18	0.64	-0.79	1.69	0.55	0.98	0.92	5.17
30	-0.13	0.62	-0.77	1.72	0.56	0.95	-0.12	5.06
31	-0.04	0.62	-0.25	1.60	0.23	0.91	-0.89	4.34
32	-0.21	0.47	-0.32	1.20	-0.27	0.80	-2.06	4.72

Literaturverzeichnis

- [1] EPOSA Webseite, Stand Oktober 2010
- [2] GEO++ Webseite, Stand Oktober 2010
- [3] G.Wübbena A.Bagge, Neuere Entwicklungen zu GNSS RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit Referenzstationsnetze und Multistations RTK Lösungen, 46. *DVW Seminar GPS Praxis und Trends, 1997*
- [4] G.Wübbena M.Schmitz A.Bagge, PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks, *Presented at the 18th International Technical Meeting, ION GNSS, 2005*
- [5] M.Rotacher B.Zebhauser, Einführung in GPS, *Tutorial zum 3. SAPOS-Symposium in München, 2000*
- [6] R.Weber C.Klug, GNSS-Permanentstationsnetze der Energieversorger zur Echtzeitpositionierung in Österreich, *Tagungsband des 5. SAPOS-Symposium, Frankfurt am Main, 2003*
- [7] E.Hoxhaj, Präzise Echtzeitpositionierung mit Hilfe von aktiven GNSS-Referenzstationsnetzen im verbauten Gebiet, *Dissertation, TU Wien, 2010*
- [8] F.Hinterberger, Automatisierte Berücksichtigung von Netzspannungen und Geoidundulationen in der RTK-Vermessung, *Diplomarbeit, TU Wien, 2010*
- [9] L.Wanninger S.Wallstab Freitag, Auswertung von GLONASS Traegerphasenbeobachtungen, *ZfV, 2007*
- [10] F.S.Scappuzzo, Phase Multipath Estimation for Global Positioning System (GPS) Using Signal-to-Noise-Ratio (SNR) Data, *Massachusetts Institute of Technology, 1997*

- [11] R.Weber G.Thaler, Überführung homogener GNSS-Punktbestimmungen in das System der österreichischen Landesvermessung, *Poster Österreichischer Geodätentag, 2009*
- [12] R.Weber M.Stättner C.Klug S.Fuchs J.Berndorfer, Untersuchung künftiger Marktchancen österreichischer GNSS-Service Provider im Umfeld globaler und kontinentaler Positions-Korrektur Services - Zwischenbericht
- [13] L.Wanninger, Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenzstationsnetze, *SAPOS Symposium 2002 in Hannover, 2002*
- [14] L.Wanninger, Präzise Positioning in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen, *Dissertation, TU Dresden, 2000*
- [15] R.Weber M.Opitz, GNSS-Echtzeitorbitkontrolle auf Basis Internet-transferierter (NTRIP) RTCM-Datenströme, *2005*
- [16] F.Takac O.Zelzer, The Relationship between Network RTK Solutions MAC; VRS, PRS, FKP and i-Max, *ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division Savannah, GA, 2008*
- [17] G.Seeber, Satellitengeodäsie, *Walter de Gruyter, 1989*
- [18] S.Willgalis, Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen, *Dissertation, Universität Hannover, 2005*
- [19] G.Möller R.Weber A.Karabatic X.Yan T.Wang, Estimation of near real-time tropospheric delays from a nationwide reference station network and their assimilation into weather forecast models, *Poster EGU, 2010*
- [20] W.Gurtner, RINEX - The Receiver Independent Exchange Format Version 3.00, *2007*

Abkürzungsverzeichnis

BEWAG	Burgenländische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft
CDMA	Code Division Multiple Access
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution of Precision
DOY	Day of Year
EPOSA	Echtzeit Positionierung Austria
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FKP	Flächenkorrekturparameter
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobil communications
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
IGLOS	International GLONASS Service
IGR	IGS Rapid Product
IGS	International GNSS Service
IGU	IGS Ultra Rapid Product
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
NMEA	National Marine Electronics Association
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
PCV	Phase Centre Variation
PDGPS	Precise Differential GPS
PRN	Pseudo Random Noise
PZ-90	Parametry Zemli 1990
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTK	Real Time Kinematic
SATVB	Satellitenvermessung Burgenland
TEPOS	T-Kom Service Echtzeitpositionierung
VRS	Virtual Reference Station
WEP	Wienstrom Echtzeit Positionierung
WGS 84	World Geodetic System 1984

Abbildungsverzeichnis

4.1	Verteilung der Referenzstationen: In <i>weiß</i> die 31 TEPOS Referenzstationen, in <i>blau</i> und <i>rot</i> die Stationen der Kooperationspartner BEWAG und WIENSTROM.	30
4.2	GNSS Antenne TPSCR3_GGD Choke Ring with Radome	31
4.3	GNWEB Benutzeroberfläche, EPOSA Stationsnetz	32
4.4	Residuen in Länge bezüglich dem mittleren Transformationsparametersatz	37
6.1	Vollständigkeit der RINEX-Daten	45
6.2	24 Stunden <i>tracking history</i> für die Station Allentsteig	48
6.3	skyplot für den <i>DOY 244</i> ; sichtbare GNSS-Satelliten an der Station Allentsteig	52
6.4	Elevationsabhängige Parameter eines beobachteten Satelliten	53
6.5	CN0-Muster der GPS und GLONASS L1-Signale	58
6.6	CN0-Muster der GPS und GLONASS L2-Signale	59
6.7	Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Leoben	64
6.8	Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Ochenig Süd	65
6.9	Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Rötenkogel	66
6.10	Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Graz	67
6.11	Koordinatendifferenzen zu Mittelwert und Zeitreihen der Standardabweichungen der Station Neusiedl/See	68
6.12	Residuen der L1-Code-Beobachtungen	70
6.13	Residuen der L1-Phasen-Beobachtungen	71
6.14	FKPs an der Station Ochenig Süd für den GPS-Satelliten PRN 02 über die Dauer eines Satellitendurchlaufes	72

6.15	FKPs an der Station Mattersburg für den GPS-Satelliten PRN 02 über die Dauer eines Satelliten-Durchlaufes	73
6.16	Station Ochenig Süd - Vergleich der berechneten und der modellierten geometrischen FKPs	74
6.17	Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs	75
6.18	FKPs an der Station Mattersburg für den GPS-Satelliten PRN 02 über den Zeitraum von fünf Tagen	76
A.1	RINEX GNSS OBS 2.11	81
A.2	GPS RINEX NAV 2.10	82
A.3	GLONASS RINEX NAV 2.10	83
A.4	CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (1)	84
A.5	CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (2)	85
A.6	CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (3)	86
A.7	CN0-Werte der L1-Signale aller EPOSA-Stationen (4)	87
A.8	CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (1)	88
A.9	CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (2)	89
A.10	CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (3)	90
A.11	CN0-Werte der L2-Signale aller EPOSA-Stationen (4)	91
A.12	Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (1)	92
A.13	Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (2)	93
A.14	Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (3)	94
A.15	Residuen der der Codemessungen aller EPOSA-Stationen (4)	95
A.16	Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (1) .	96
A.17	Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (2) .	97
A.18	Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (3) .	98
A.19	Residuen der der Trägerphasenmessungen aller EPOSA-Stationen (4) .	99
A.20	Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs (Stunde 58-64)	100
A.21	Station Mattersburg - Vergleich der berechneten und der modellierten ionosphärischen FKPs (Stunde 82-89)	101

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der GPS- und GLONASS Konstellation	3
2.2	Einfluss entfernungsabhängiger Fehler	7
2.3	Qualität der verfügbaren GPS- und GLONASS-Bahnen	10
2.4	Einfluss stationsabhängiger Fehler	12
3.1	Vergleich der verschiedenen Modelle der Fehlerparametrisierung	23
3.2	Versionen des RTCM-Standards	24
4.1	Mittlerer Transformationsparametersatz	37
4.3	Preisliste EPOSA, Stand 01.Oktober 2009	38
5.2	EPOSA Zustandsdaten	40
6.1	Anzahl der Epochen der gleichzeitig <i>tracked</i> und <i>fixed</i> Satelliten auf der Station Allentsteig	47
6.3	Mittelwert der <i>tracked</i> und <i>fixed</i> Satelliten für alle Stationen	50
6.4	Mittelwert aus der Anzahl <i>tracked</i> und <i>fixed</i> Satelliten für alle Stationen	51
6.5	Initialisierungszeit und dazugehöriger Elevationswinkel für GPS- und GLONASS-Satelliten	55
6.6	Frühzeitiger Abbruch der Mehrdeutigkeitslösung an der Station Allentsteig	56
6.7	ITRF2000 Koordinaten der EPOSA-Referenzstationen - Stand April 2010 (Werte genähert auf dm genau)	60
6.8	Offsets der stündlich geschätzten Stationskoordinaten zu den Referenzko- ordinaten und dazugehörige Standardabweichungen	61
6.9	Initialisierungszeit am Rover, HDOP und Anzahl der beobachteten Satelliten	77

L E B E N S L A U F

ANGABEN zur PERSON

Nachname, Vorname	Möller, Gregor
Adresse	Währinger Straße 26/2/12
E-Mail	gregor.moeller@gmx.at
Mobil	+43 (0) 699 / 81921524
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Geburtsdatum und -ort	28.01.1984 in Saalfeld/Saale

AUSBILDUNG

Zeitraum	09/1994 - 06/2002
Erworbene Qualifikation	Abitur
Bildungseinrichtung	Staatliches Heinrich-Böll-Gymnasium Saalfeld

Zeitraum	10/2003 - 09/2005
Erworbene Qualifikation	Vordiplom (Fachrichtung Geodäsie)
Bildungseinrichtung	Technische Universität Dresden

Zeitraum	10/2005 - 02/2008
Erworbene Qualifikation	B.Sc. (Fachrichtung Vermessung und Geoinformation)
Bildungseinrichtung	Technische Universität Wien

Zeitraum	03/2008 - 11/2010
Erworbene Qualifikation	Dipl.-Ing.* (Fachrichtung Geodäsie und Geophysik)
Bildungseinrichtung	Technische Universität Wien

* nach positivem Abschluss der Masterprüfung

BERUFSERFAHRUNG

Zeitraum	09/2005 - 10/2005
Tätigkeitsbereich	Softwaretests Scop++
Name und Adresse des Arbeitgebers	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung Technische Universität Wien
Zeitraum	05/2006 - 10/2006
Tätigkeitsbereich	Vermessungsgehilfe, RMGeo-Software Mitarbeiterschulung
Name und Adresse des Arbeitgebers	Vermessungsbüro Silwester Kauergasse 10/3 1150 Wien
Zeitraum	11/2006 - 03/2009
Tätigkeitsbereich	Vermessungsgehilfe, Lagepläne zeichnen mit AutoCAD
Name und Adresse des Arbeitgebers	ÖBB Infrastruktur Bau AG Laxenburger Straße 4, 1100 Wien
Zeitraum	07/2009 - 10/2010
Tätigkeitsbereich	Projektassistent in der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie Projekte: GNSS-MET Austria, ALPAACT
Name und Adresse des Arbeitgebers	Institut für Geodäsie und Geophysik Technische Universität Wien
Zeitraum	08/2010
Tätigkeitsbereich	ESA Sommer-Schule Alpbach Aufbau einer Satellitenmission zum besseren Verständnis des Klimawandels