



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**  
Vienna University of Technology

# DIPLOMARBEIT

## **Aufbau eines lokalen GNSS-Referenznetzes**

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation

Forschungsgruppe Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

A.o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber

Projektass. Dipl.-Ing.Fabian Hinterberger

durch

Anna Maria Altreiter BSc

Matr.Nr.: 0926874

Bräuhausgasse 48/63

1050 Wien

Wien, Februar 2015

Unterschrift

# Kurzfassung

Die relative satellitengestützte Positionierung mittels GNSS erlaubt heute Positionierungsgenauigkeiten im Zentimeterbereich in nahezu Echtzeit. Da die räumliche Korrelation von GNSS-Streckenmessfehlern ab Distanzen von über 15km zur nächsten Referenzstation deutlich abnimmt, wird durch Vernetzung von mehreren Referenzstationen eine regionale Fehlermodellierung durchgeführt, welche die Berechnung von cm-genauer Korrekturen über Distanzen von über 50km zwischen dem Rover und den nächstgelegenen Referenzstationen ermöglicht.

In dieser Arbeit wurden zwei Programmpakete (Testversionen von Spider (Leica Geosystems AG) und TopNET (Topcon Corporation)) an einem institutseigenen Server installiert und deren Funktionsweise bei der Verarbeitung von Echtmessdaten eines minimalen Referenzstationsnetzes (3 Stationen) getestet.

Nach der Einrichtung des Netzes wurde untersucht, wie einfach die beiden Programme zu bedienen sind, welche Parameter eingestellt werden können und ob sie fehlerfrei arbeiten. Da die installierte Version von TopNET nur die Beobachtungen der nächstgelegenen Referenzstationen versendet, konnten zwar nur wenige Einstellungen getroffen werden, das Programm war allerdings auch sehr einfach zu bedienen. Spider ist wesentlich komplexer konzipiert und erlaubte die Berechnung von Netzwerkkorrekturen.

In beiden Programmen wurden die Datenströme der Referenzstationen mit RTCM 3.1 eingebunden. Da es nicht gelang die an und für sich vorhandenen GLONASS-Beobachtungen in beide Programmpakete einzulesen, wurden alle Untersuchungen und Testmessungen nur mit GPS-Daten durchgeführt, um gleiche Bedingungen zu schaffen.

Bei den Testmessungen wurden auf der Terrasse der TU-Wien Positionierungen einerseits mit den von beiden Programmen gelieferten Korrekturströmen und andererseits mit den Korrekturdaten eines österreichweiten Positionierungsdienst (EPOSA) durchgeführt. Während in den Lagekoordinaten nur geringe Unterschiede zwischen den Korrekturdiensten und dem Referenzwert festgestellt werden konnten, zeigte die mit den selbst installierten Datenströmen bestimmte Höhenkomponente eine deutliche Abweichung von ca. 8 cm zum Sollwert. Diese systematische Abweichung in der Höhe konnte durch Eingabe einer Null-Antennenkalibrierung anstelle der bekannten Referenzantennenkalibrierung

weitgehend beseitigt werden.

Die ebenfalls untersuchte Mehrdeutigkeitsfixierung gelang mit dem Dienst von TopNET am schnellsten, was allerdings darauf zurückzuführen ist, dass keine Netzwerk-Korrekturen berechnet werden, sondern nur Beobachtungen versendet werden. Der EPOSA-Dienst und die eigene Spider-Installation berechnen und versenden jedoch Netzkorrekturen.

# Abstract

Nowadays relative satellite positioning with GNSS achieves an accuracy of a few centimetres in almost real time. Since the spatial-correlation of the GNSS-distance measurement error decreases for distances above 15 km, it is necessary to establish a regional error modelling. This model is realised through linking of reference-station observation data and allows for a cm-precise interpolation of range residuals, even if the distance between the rover and the next reference-station is more than 50km. This thesis tests the functionality and performance from two software-packages (test versions from Spider (Leica Geosystems AG) and TopNET (Topcon Corporation)), when processing real observation data of a small reference station network (3 stations).

Right after the setup of the network the two packages were analysed how easy they can be handled, which parameters can be set and if they operate faultless. Since the installed version of TopNET solely forwards observation data of the nearest reference station, just a view settings can taken. On the other hand, the handling of the software is quite easy. In comparison the Spider software is far more complex and allows the computation of network-corrections. Both, TopNET and Spider are able to receive and forward observations and correction data via RTCM 3.1. All tests were performed only with GPS-only data.

For the test measurements on the terrace of the TU-Wien, positioning was first conducted via the correction-streams provided by the two installed software-packages. For comparison, an Austrian-wide positioning-service (EPOSA) was used as well. The established plane coordinates exhibited almost no difference between the correction-services. On the other hand, the height-component established by means of correction data from the tested software installations deviated by almost 8 cm from the reference height. The reason for this systematic discrepancy in the height was finally uncovered as erroneous interpretation of the introduced antenna calibration. Finally, also the time to fix ambiguities has been investigated. The quickest fixing was offered by the TopNET software. This is due the fact that the Spider and EPOSA service have to decode and interpolate afore network corrections.

# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ao. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Robert Weber und Dipl.-Ing. Fabian Hinterberger, die mir bei dieser Arbeit jederzeit mit fachlichem Rat zur Seite standen.

Aber ohne die Unterstützung von meinem Freund Alexander wäre es wohl nie soweit gekommen, denn ohne ihn hätte ich den Schritt zum Studium nicht gewagt. Vielen Dank dafür und natürlich auch für die unzähligen Ratschläge, die mir das Studium erleichterten. Natürlich gebührt mein Dank auch meiner Familie und Freunden, die mich in all den Jahren meiner Ausbildung begleitet haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1. Beobachtungsgleichung und Fehlereinflüsse . . . . .	2
2.1.1. Satellitenuhrfehler . . . . .	4
2.1.2. Troposphärenfehler . . . . .	5
2.1.3. Ionosphärenfehler . . . . .	6
2.1.4. Bahnfehler . . . . .	9
2.1.5. Mehrwegeeffekte . . . . .	9
2.1.6. Antennenphasenzentrum . . . . .	10
2.1.7. Sonstige Fehlereinflüsse . . . . .	11
2.1.8. Satellitengeometrie . . . . .	11
2.2. Positionsbestimmung und Differenzbildung . . . . .	13
2.2.1. Absolute Positionierung . . . . .	14
2.2.2. Relative Positionierung . . . . .	14
2.2.3. Differentielles GPS . . . . .	15
2.3. Linearkombinationen . . . . .	16
2.3.1. Ionosphärenfreie Linearkombination . . . . .	17
2.3.2. Wide-Lane Linearkombination . . . . .	18
2.3.3. Narrow-Lane Linearkombination . . . . .	18
2.4. Mehrdeutigkeitslösung . . . . .	19
2.5. Referenzsysteme und Referenzrahmen . . . . .	20
2.5.1. Inertiale bzw. Quasi-inertiale Systeme . . . . .	20
2.5.2. Geozentrisches erdfestes System . . . . .	21
<b>3. GNSS Referenzstationsnetz</b>	<b>23</b>
3.1. Einleitung . . . . .	23
3.2. Systemkomponenten und Datenübertragungsformate . . . . .	24
3.2.1. RTCM SC-104 . . . . .	25

3.2.2.	NMEA-0183 . . . . .	26
3.3.	Vernetzungskonzepte . . . . .	26
3.3.1.	Flächenkorrekturparameter FKP . . . . .	27
3.3.2.	Virtuelle Referenzstation VRS . . . . .	27
3.3.3.	Master Auxiliary Concept MAC . . . . .	28
3.4.	Berechnungsschritte einer neuen Position mittels der VRS-Vernetzung . .	28
3.4.1.	Mehrdeutigkeitsfestlegung im Netz . . . . .	29
3.4.2.	Residuenberechnung . . . . .	29
3.4.3.	Berechnung der VRS-Beobachtung . . . . .	32
3.4.4.	Positionsberechnung des Empfängers . . . . .	32
<b>4.</b>	<b>Lokale Netzlösung mittels Leica Spider und Topcon TopNET</b>	<b>34</b>
4.1.	Verwendete Stationen und Datenströme . . . . .	34
4.2.	Verwendete Programme . . . . .	35
4.2.1.	Leica Geosystems AG, Spider . . . . .	35
4.2.2.	Topcon Corporation, TopNET . . . . .	39
4.2.3.	Reichweite der Korrekturen und gesendete Messages . . . . .	42
<b>5.</b>	<b>Vergleichsmessungen</b>	<b>43</b>
5.1.	Echtzeitpositionierung Austria EPOSA . . . . .	43
5.2.	Vergleichsmessung Ergebnisse . . . . .	43
5.2.1.	Messablauf und Datenaufbereitung . . . . .	43
5.2.2.	Beobachtungen mit Antennenkalibrierung . . . . .	47
5.2.3.	Beobachtungen mit Nullantenne . . . . .	58
5.2.4.	Fixierungszeiten der Mehrdeutigkeiten . . . . .	66
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>69</b>
<b>A.</b>	<b>Detailed connection Log - Spider</b>	<b>71</b>
<b>B.</b>	<b>Diagramme der Beobachtungen mit Antennenkalibrierung in den Punkten 2 und 3</b>	<b>73</b>
<b>C.</b>	<b>Diagramme der Beobachtungen ohne Antennenkalibrierung in den Punkten 1 und 4</b>	<b>81</b>

# 1. Einleitung

Die absolute Positionierung mit Hilfe von Globalen Navigationssatelliten Systemen (GNSS) gelingt heute mit einer Genauigkeit von einigen Metern. Für den Großteil der geodätischen Anwendungen reicht diese Genauigkeit allerdings nicht aus, und so nützt man relative Positionierungsmethoden (möglichst in Echtzeit). Die, für die relative Positionierung, benötigten Referenzstationen kann man vernetzen und so den Abdeckungsbereich erhöhen. Mit Hilfe der Vernetzung ist es möglich Korrekturen zu berechnen, die dem Nutzer gesendet werden und so die Positionierung präzisieren und beschleunigen. Es existieren bereits einige Dienste, die ein Referenzstationsnetz über ganz Österreich, oder zumindest Teilen davon, kostenpflichtig zur Verfügung stellen.

Seit einigen Jahren bieten (in den meisten Fällen) GNSS-Empfängerherstellerfirmen Vernetzungssoftware an, die es erlaubt, eigene bzw. fremde Beobachtungsdatenströme zu verarbeiten und zu verwalten. In dieser Arbeit wurden Datenströme von einem kooperierenden Anbieter genutzt, da der Aufwand zum Aufbau eigener Stationen zu hoch gewesen wäre. Um Netzwerkkorrekturen zu berechnen sind mindestens drei Stationen notwendig. Werden nur die rohen Beobachtungen von den Stationen an den Nutzer gesendet, reicht schon eine nahegelegene Station.

Es soll untersucht werden, wie einfach bzw. komplex die Installation eines solchen Netzes ist. Zudem war zu prüfen, welche Einstellungen der Nutzer treffen kann und welche Informationen bezüglich der Korrekturberechnung für den Nutzer zugänglich sind. Weiters wurden Testmessungen mit den selbst eingerichteten Diensten und einem schon bestehenden Dienst durchgeführt. Diese Messdaten wurden hinsichtlich der Genauigkeit der bestimmten Koordinaten eines Testfeldes und der Zeit bis zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten untersucht.

## 2. Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich Signale des GNSS Systems Global Positioning System (GPS) verwendet. Es wird hier nicht weiter auf den grundsätzlichen Aufbau dieses Systems eingegangen. Es sei in diesem Zusammenhang auf die schon zahlreich vorhandene Literatur verwiesen z.B. [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] od. [Kaplan and Hegarty, 2006]. In Kapitel 2.1 wird auf die Beobachtungsgleichungen und die Fehlereinflüsse, in Kapitel 2.2 auf die Positionsbestimmung und Differenzenbildung, in Kapitel 2.3 auf einzelne Beobachtungslinarkombinationen und in Kapitel 2.4 auf die Mehrdeutigkeitslösung eingegangen.

### 2.1. Beobachtungsgleichung und Fehlereinflüsse

Grundsätzlich benötigt man zur Positionierung den geometrischen Abstand  $\rho_R^S$  zwischen Empfänger und Satellit. Diese Distanz kann mittels Code- oder Trägerphasenmessung bestimmt werden. Bei der Codemessung wird die Strecke zwischen Satellit und Empfänger gemessen, man erhält somit ein eindeutiges Ergebnis. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist jedoch mit etwa 1 ‰ der Chiplänge begrenzt. Bei einer Chiplänge von 297m beim C/A- Code ergibt das eine Genauigkeit von ungefähr 3 dm.

Bei der Trägerphasenmessung wird die Differenz der Phasen zwischen dem empfangenen Signal und einem Referenzsignal im Empfänger beobachtet. Es wird daher nie die gesamte Strecke zwischen Empfänger und Sender gemessen. Das Messrauschen dieses Verfahrens beträgt 1% der Trägerwellenlänge und liegt somit im Millimeterbereich. Zur Erreichung dieser hohen Genauigkeiten in der Streckenmessung ist aber die Festsetzung der Mehrdeutigkeit notwendig.

Trägerphasenbeobachtungen können auf allen angemessenen Trägerfrequenzen ( z.B. GPS L1, L2, L5) gewonnen werden. Die Codes sind diesen Trägerwellen aufmoduliert. In den folgenden Formeln wird mit dem Index  $i$  angedeutet, wenn der jeweilige Term abhängig von der Frequenz ist.

Das Signal wird durch unterschiedliche Fehlereinflüsse, die sich unter anderem durch die Ausbreitung in der Atmosphäre ergeben, beeinflusst. In den Gleichungen (2.1) und (2.2)

sind diese Einflüsse gemeinsam mit der geometrischen Distanz  $\rho_R^S$  auf der rechten Seite und der Messwert links aufgelistet.

$$P_{R,i}^S = \rho_R^S + c * \delta t_R - c * \delta t^S + \delta Tr_R^S + \delta Ion_{R,i}^S + \delta Mul_{R,i}^S + \delta Orb_R^S + \delta Rel_R^S + \delta Ant_{R,i}^S + \epsilon_{R,i}^S \quad (2.1)$$

$$L_{R,i}^k = \rho_R^S + c * \delta t_R - c * \delta t^S + \delta Tr_R^S - \delta Ion_{R,i}^S + \delta Mul_{R,i}^S + \delta Orb_R^S + \delta Rel_R^S + \delta Ant_{R,i}^S + \lambda_i * (N_{i,R}^S + \alpha_R + \alpha^S) + \epsilon_{R,i}^S \quad (2.2)$$

mit

$\rho_R^S$	= geometrische Distanz zwischen Rover und Satellit [m]
$c * \delta t_R$	= Empfängeruhrfehler [m]
$c * \delta t^S$	= Satellitenuhrfehler [m]
$\delta Tr_R^S$	= Fehler wegen troposphärischer Refraktion [m]
$\delta Ion_{R,i}^S$	= Fehler wegen ionosphärischer Refraktion, abhängig von Frequenz [m]
$\delta Mul_{R,i}^S$	= Mehrwegausbreitungsfehler (Multipath), abhängig von der Frquenz [m]
$\delta Orb_R^S$	= Orbitfehler [m]
$\delta Rel_R^S$	= relativistische Effekte [m]
$\delta Ant_{R,i}^S$	= Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m]
$\lambda_i$	= Wellenlänge [m]
$N_{i,R}^S$	= Mehrdeutigkeit (ganzzahlig) [Phasenzyklen]
$\alpha_R$	= Phasenkorrekturen im Empfänger [Phasenzyklen]
$\alpha^S$	= Phasenkorrekturen im Satellit [Phasenzyklen]
$\epsilon_{R,i}^S$	= Messrauschen und Restfehler [m]

Die ganzzahlige Mehrdeutigkeit  $N_{i,R}^S$  gibt an, wie oft das Signal auf der Strecke zwischen Satellit und Empfänger eine ganze Phase durchlaufen hat. Sie lässt sich in der Berechnung nicht von den reellen Anfangsphasen im Empfänger bzw. Satellit trennen. Es wird daher die reelle Variable  $B_{i,R}^S$  eingeführt, siehe Formel (2.3).

$$B_{i,R}^S = N_{i,R}^S + \alpha_R + \alpha^S \quad (2.3)$$

Im Folgenden wird auf die einzelnen Fehlereinflüsse genauer eingegangen. Es wird zudem erklärt, wie sie die Messung beeinträchtigen bzw. wie man sie eliminieren bzw. verringern

kann.

### 2.1.1. Satellitenuhrfehler

Trotz der Verwendung von hoch stabilen Atomuhren in den GNSS-Satelliten kommt es zu einer Abweichung von der GPS-Zeit (der Referenzzeit) im Nanosekundenbereich. Zur Berechnung dieser Abweichung erhält der Empfänger mit der Navigationsnachricht drei Koeffizienten eines Polynoms 2. Grades (Formel (2.4)).

Trotz dieser Korrektur bleibt ein Restfehler erhalten, der größer wird, je älter die Parameter sind, die mitgesendet werden. Nach 24 Stunden kann der Fehler eine Größe von 1-4m erreichen. Dies ist auch der Hauptgrund, weshalb mehrmals am Tag neue Navigationsnachrichten für jeden Satelliten ausgesandt werden. Diese Abweichung kann jedoch bei einer Beobachtungsdifferenzbildung (siehe Kapitel 2.2.2) eliminiert werden [Kaplan and Hegarty, 2006].

$$\delta t^S = a_{f0} + a_{f1} * (t - t_{OC}) + a_{f2} * (t - t_{OC})^2 + \Delta t_r \quad (2.4)$$

- $a_{f0}$  = Uhrbias [s]
- $a_{f1}$  = Uhrdrift [s/s]
- $a_{f2}$  = Frequenzdrift [s/s<sup>2</sup>]
- $t_{OC}$  = Referenzzeit der aktuellen Parameter [s]
- $t$  = aktuelle Uhrzeit [s]
- $\Delta t_r$  = Korrektur wegen relativistischer Effekte [s]

Mit der Korrektur der Satellitenuhr werden auch die relativistischen Effekte korrigiert, dies geschieht mit dem Term  $\Delta t_r$  [Wübbena, 1991]. Der allgemeine Effekt tritt auf, da die Uhr des Satelliten einem anderem Gravitationspotential als die Uhr auf der Erdoberfläche ausgesetzt ist. Durch die unterschiedliche Geschwindigkeiten der Sende- bzw. Empfangsantenne, kommt es zu weiteren relativistischen Effekten (spezielle Relativitätstheorie).

Die Frequenz der Satellitenuhr wird um  $4.57 * 10^{-3}$  Hz verringert, um so die beiden Effekte zu berücksichtigen. Der Nutzer auf der Erdoberfläche beobachtet nach der Korrektur der Aussendefrequenz ein Signal mit 10.23 MHz.

Da sich der Satellit auf einer elliptischen Umlaufbahn befindet, ist eine weitere Korrektur notwendig. Im Apogäum ist die Geschwindigkeit geringer und das Gravitationspotential ist geringer, die Uhr läuft daher etwas schneller als im Perigäum. Der Effekt lässt sich nach [Kaplan and Hegarty, 2006] mit Formel (2.5) beglichen. Sie muss noch mit der Lichtgeschwindigkeit multipliziert werden um die Auswirkung in Meter zu erhalten.

$$\Delta t_r = F * e * \sqrt{a} * \sin E \quad (2.5)$$

$$F = \frac{-2\sqrt{\mu}}{c^2} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} F &= -4.443 * 10^{-10} \left[ \frac{s}{\sqrt{m}} \right] \\ \mu &= GM_E = 3,986005 * 10^{14} \left[ \frac{m^3}{s^2} \right] \\ G &= \text{Gravitationskonstante} \left[ \frac{m^3}{kg * s^2} \right] \\ M_E &= \text{Masse der Erde} [kg] \\ e &= \text{Bahnexzentrizität} [-] \\ a &= \text{große Halbachse} [m] \\ E &= \text{exzentrische Anomalie} [-] \end{aligned}$$

Die Parameter  $e$ ,  $\sqrt{a}$  und  $E$  werden in der Navigationsnachricht mitgeschickt.  $F$  ist eine Konstante und kann mit Formel (2.6) berechnet werden.

Wird der Effekt nicht korrigiert, kann es zu Fehlern größer als 10 m in der Distanzmessung kommen. Das Signal wird zudem durch den relativistischen Ausbreitungseffekt verlangsamt, jedoch entsteht dadurch nur ein maximaler Fehler von 19 mm für eine Einzelbeobachtung bzw.  $10^{-9}$  der Stationsentfernung bei relativer Positionierung. Dieser Effekt kann daher weitgehend vernachlässigt werden.

Durch die Rotation der Erde muss noch der sogenannte „Sagnac-Effekt“ berücksichtigt werden. In einem Inertialsystem breitet sich das Signal zwischen Satellit und Empfänger entlang einer Geraden aus, im erdfesten Koordinatensystem kommt es jedoch zu einer Krümmung des Signalweges. Der Fehler kann bis zu 30 m ausmachen, Verfahren zur Korrektur sind in [Kaplan and Hegarty, 2006] nachzulesen.

### 2.1.2. Troposphärenfehler

Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre, welche von der Erdoberfläche bis zur Tropopause in der Höhe von etwa 10 km reicht. Von 10 km bis etwa 40 km befindet sich die Stratosphäre. Zur Berechnung der Laufzeitverzögerung, die durch diese beiden Schichten verursacht wird, werden beide Schichten gemeinsam modelliert und mit Troposphäre bezeichnet. Dieser Fehlereinfluss ist für elektromagnetische Wellen im Bereich von 100MHz bis 15Ghz nicht dispersiv, das heißt, alle Frequenzen in diesem Bereich werden im selben Ausmaß beeinflusst. Der verursachte Fehler kann in Zenitrichtung bis

zu 2.4m betragen und steigt bei einer Elevation von 5° auf ca. 25m. [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

Berechnen lässt sich der troposphärische Fehler  $\delta Tr_R^S$  mittels Formel (2.7).

$$\delta Tr_R^S = 10^{-6} \int N_d^{Tr} ds_0 + 10^{-6} \int N_w^{Tr} ds_0 \quad (2.7)$$

$N_d^{Tr}$  = Brechungzahl des trockenen Anteils [-]

$N_w^{Tr}$  = Brechungzahl des feuchten Anteils [-]

$ds_0$  = geometrische Distanz zwischen Rover und Satellit [m]

Auf den trockenen Anteil entfallen 90% der gesamten Verzögerung. Dieser variiert nur sehr gering und lässt sich daher gut modellieren. Der feuchte Anteil beträgt zwar nur 10%, jedoch gelingt die Modellierung nur sehr schlecht. Grund dafür ist die starke räumliche und zeitliche Veränderung des Wasserdampfgehaltes in den untersten Atmosphärenschichten. Für die Berechnung der Verzögerung existieren viele unterschiedliche Ansätze z.B. Hopfield oder Saastamoinen. Die Parameter der Modelle sind meist der Luftdruck P, die Temperatur T und der Wasserdampfdruck e. Diese Werte können entweder aus Standardmodellen kalkuliert werden oder man erhält sie durch direkte Messung.

Mittels dieser Modelle ist die Verzögerung in Zenitrichtung gegeben. Um den Streckenfehler in Richtung des Satelliten zu erhalten, ist es notwendig eine Mappingfunktion anzubringen. Da sich der feuchte Anteil nur bis in eine Höhe von 10 km konzentriert, werden unterschiedliche Mappingfunktionen für den trockenen und feuchten Anteil angewandt (Formel (2.8)).

Bringt man die Modelle an die Messungen an, verbleiben noch Restfehler, die sich mit Hilfe der Differenzenbildung von Beobachtungen verringern lassen und linear zwischen den Stationen interpoliert werden können [Wanninger, 2000].

$$\delta Tr_R^S(z) = m_{tr,d}(z) * \delta Tr_{R,d}^S(z=0) + m_{tr,w}(z) * \delta Tr_{R,w}^S(z=0) \quad (2.8)$$

$Tr_{R,d}^S$  und  $Tr_{R,w}^S$  = trockener bzw. feuchter Anteil der Verzögerung [m]

$m_{tr,d}$  und  $m_{tr,w}$  = Mappingfunktion für trockenen bzw. feuchten Anteil

$z$  = Zenitdistanz des Satelliten [°]

### 2.1.3. Ionosphärenfehler

Die Ionosphäre befindet sich in einer Höhe von ca. 50 bis 1000 km. Die Refraktion in dieser Schicht wird durch freie Elektronen ausgelöst, deren Dichte in unterschiedlichen

Schichten der Ionosphäre verschiedene Größen annimmt. Die Ionosphäre ist dispersiv, das heißt unterschiedliche Frequenzen werden auch anders beeinflusst. Weiters unterscheidet sich der Einfluss auf die Code- bzw. Phasenmessung um das Vorzeichen aufgrund der unterschiedlichen Gruppen- bzw. Phasengeschwindigkeit. [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Der Elektronengehalt ist abhängig von der geografischen Breite und Höhe der Station, von der Tageszeit (Maximum nach dem Sonnenhöchststand) sowie von der Jahreszeit. Auch der 11-jährige Sonnenzyklus ist im Elektronengehalt sichtbar. Die Schicht mit dem größten Elektronengehalt ist die F2-Schicht, die sich zwischen 350 und 450 km befindet. Der ionosphärische Fehler  $\delta Ion_{R,i}^S$  lässt sich mit Beziehung (2.9) berechnen.

$$\delta Ion_{R,i}^S = \pm \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \quad (2.9)$$

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2.10)$$

- $N_e$  = Elektronendichte [Elektronen/ $m^3$ ]
- $ds_0$  = geometrische Distanz zwischen Rover und Satellit [m]
- TEC = Total electron content in Signalrichtung

Das Integral  $\int N_e ds_0$  kann im Allgemeinen nicht einfach ausgewertet werden. Man entnimmt daher den TEC sogenannten Ionosphärenmodellen. Die Einheit TEC entspricht  $10^{16}$  Elektronen/ $m^3$ . Ein Ionosphärenmodell ist zum Beispiel das Global Ionosphere Model (GIM), ein sogenanntes Single-Layer-Modell (siehe Abbildung 2.1). Bei diesem Konzept wird der Elektronengehalt der gesamten Ionosphäre in einer Schicht zusammengefasst. Diese liegt in einer Höhe von etwa 400 km, der Höhe der maximalen Elektronendichte. Dem Nutzer wird ein Raster mit den VTEC (vertical total electron content)-Werten übermittelt und er kann für seine Position den VTEC-Wert interpolieren. Es ist, ebenso wie bei der Troposphäre, eine Mappingfunktion notwendig, um den VTEC in Richtung der Signaleinfallrichtung zu projizieren. Dazu nutzt der Empfänger zum Beispiel die Gleichungen (2.11) und (2.12) und bringt die so ermittelten Verzögerungen an die Beobachtung an.

Die Abweichung erreicht typischerweise bei geringer ionosphärischer Aktivität in vertikaler Richtung einige Meter und bei niedriger Elevation bis zu 25 m. [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

$$\delta Ion_{R,i}^S = \pm \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} VTEC \quad (2.11)$$

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + h_m} \sin z \quad (2.12)$$

- $z$  = Zenitwinkel am Beobachtungsort [°]
- $z'$  = Zenitwinkel am Schnittpunkt der Gerade Satellit-Empfänger  
mit dem Ionosphärischem Layer [°] (Ionospheric Pierce Point, IPP)
- $h_m$  = Höhe des Ionosphärischen Layers [m]
- $R_e$  = Erdradius [m]

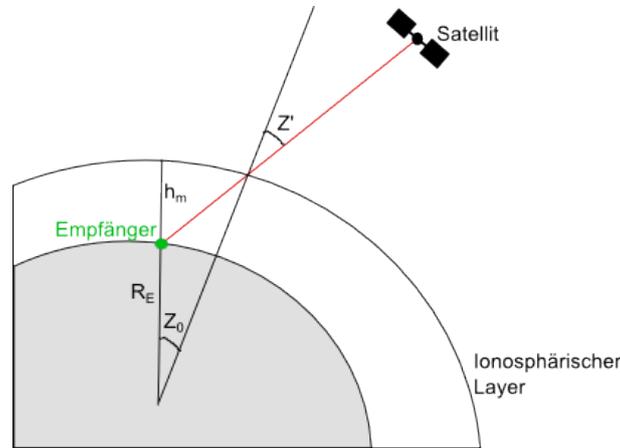


Abbildung 2.1.: Single-Layer-Modell der Ionosphäre nach [Hofmann-Wellenhop et al., 2008].

Die Auflösung von globalen Modellen ist jedoch gering, kleinräumige ionosphärische Störungen werden daher nicht abgebildet. Eine andere Möglichkeit um den ionosphärischen Einfluss zu verringern, bzw. zu entfernen, ist eine ionosphärenfreie Linearkombination mit den Beobachtungen auf zwei unterschiedlichen Frequenzen zu bilden (Kapitel 2.3). Damit nutzt man das dispersive Verhalten dieser Schicht. Jedoch benötigt man hierzu einen Zweifrequenzempfänger und durch die Bildung der Linearkombination der Beobachtungen wird das Beobachtungsrauschen erhöht.

In der Praxis nutzt man die Ionosphärenmodelle, wenn man nur eine angemessene Frequenz zur Verfügung hat. Ansonsten berechnet man die ionosphärenfreie Linearkombination. Um die Mehrdeutigkeiten auf den Grundfrequenzen zu fixieren, wird die ionosphärenfreie Linearkombination mit der Wide-Lane Linearkombination kombiniert (siehe Kapitel 2.3). Eine andere Option zur Verringerung des ionosphärischen Einflusses liegt in der Differenzbildung (siehe Kapitel 2.2.2). Bei der relativen GNSS-Positionierung

wird der verbleibende Fehler linear interpoliert und so an die Beobachtungen angebracht. Kleinräumige ionosphärische Störungen mit einer Wellenlänge geringer als der Stationsabstand der GNSS-Beobachtungspunkte können selbst mit der relativen Messung nicht detektiert und korrigiert werden. [Wanninger, 2000]

### 2.1.4. Bahnfehler

Die Satellitenbahnen werden mit der Navigationsnachricht (Broadcast Orbits) übermittelt. Sie weisen eine Genauigkeit von ungefähr 1 m auf. Vom IGS (International GNSS Service) werden noch genauere Bahnen zur Verfügung gestellt. Die genauesten Bahnen erhält man nach 12-18 Tagen. Sie werden als Final Orbits bezeichnet und haben eine Genauigkeit von ca. 2.5 cm. Genauere Informationen zu den verschiedenen Bahndaten sind auf der Homepage des IGS (<http://igs.org>) zu finden.

Für die Auswirkung des Orbitfehlers auf eine Basislinie gilt die Faustformel von Bauersima 1983:

$$\frac{|\vec{dl}|}{l} = \frac{|d\vec{O}|}{R} \quad (2.13)$$

$|\vec{dl}|$  = Basislinienfehler [m]

$l$  = Basislinienlänge [m]

$|d\vec{O}|$  = Orbitfehler [m]

$R$  = mittlere Entfernung zwischen Stationen und Satellit [m]

### 2.1.5. Mehrwegeeffekte

Bei der Signalausbreitung kommt es zu Reflexionen oder Beugungen und so kommen Signale auch auf indirektem Weg zum Empfänger (Abbildung 2.2). Diese indirekten Signale haben eine längere Laufzeit und eine andere Polarisation als direkte Signale, die ohne Störungen der Ausbreitungsrichtung von der Antenne registriert werden. Dieser Effekt beeinflusst die Codemessung stärker als die Phasenmessung und ist vor allem bei kurzen Beobachtungszeiten ein Problem.

Bei der Codemessung kann der Fehler bis zu 150 m erreichen, das ist die halbe Chiplänge des C/A-Codes. Der Einfluss auf die Phasenmessung kann maximal 1/4 der Wellenlänge betragen, was in etwa 5cm entspricht. Dieser maximale Fehler wird erreicht, wenn die Phase durch Mehrwegeeffekte um 180° verschoben wird.

Die Größe des Fehlers ist a priori schwer abzuschätzen. Im schlimmsten Fall kann er die korrekte Festsetzung der Mehrdeutigkeit verhindern.

Der Fehler lässt sich schwer mathematisch beschreiben, da er von vielen verschiedenen

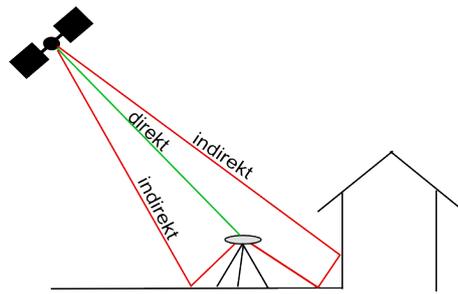


Abbildung 2.2.: Direktes und indirekte Signalausbreitung

Einflussfaktoren abhängt. Es gibt drei Ansatzpunkte um ihn zu verringern. Zuerst sollte der Standpunkt der Messung so gewählt werden, dass Mehrwegeeffekte möglichst nicht auftreten können. Außerdem gibt es auch Antennen, die diesen Effekt verringern z.B. mit Hilfe einer Choke-Ring Antenne [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Eine weitere Reduktion kann bei der Signalverarbeitung bzw. bei der Weiterverarbeitung der Messgrößen erreicht werden. Da der Mehrwegeeffekt einen großen Einfluss auf die Beobachtung haben kann, gibt es viele Ansätze die sich mit diesem Problem beschäftigen.

### 2.1.6. Antennenphasenzentrum

Das geometrische und elektrische Phasenzentrum einer Antenne unterscheiden sich abhängig von Elevation und Azimut des eintreffenden Signals. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, hat jede Einfallsrichtung ein anderes Phasenzentrum. Diese werden gemittelt und als mittleres elektrisches Antennenphasenzentrum ausgewiesen. Dieser Unterschied kann bis zu einige Zentimeter ausmachen und muss daher kalibriert werden. Für Antennen der gleichen Bauart bleibt der Fehler gleich.[Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

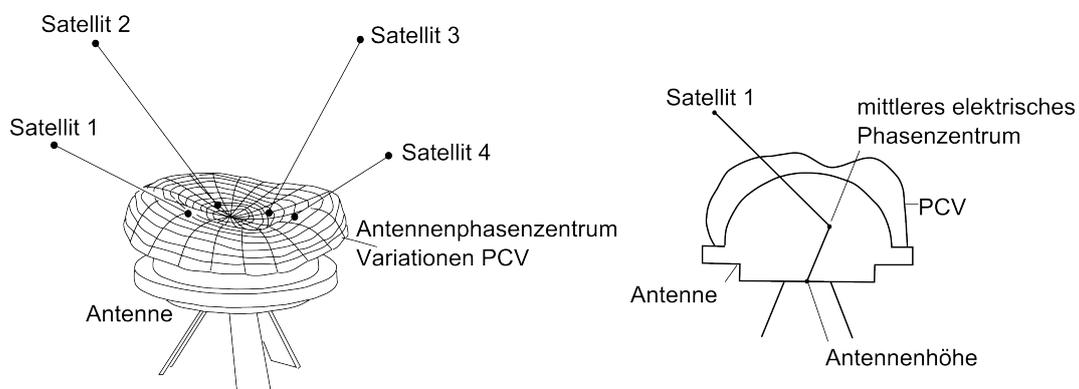


Abbildung 2.3.: Abhängigkeit des Antennenphasenzentrums vom Einfallswinkel des Signals und mittleres elektrisches Phasenzentrum (nach [Hofmann-Wellenhof et al., 2008])

Die Kalibrierung kann entweder relativ, das heißt im Feld bezogen auf eine Referenzantenne, oder absolut in einer anechoic chamber (nicht reflektierende Kalibrierkammer) geschehen. Bei Stationen eines Netzwerks ist es ausreichend, wenn die Antennen relativ kalibriert sind. Wichtig ist nur, dass es eine Kalibrierung gibt, da in einem Netz üblicherweise unterschiedliche Antennentypen verwendet werden [Wanninger, 2000].

### 2.1.7. Sonstige Fehlereinflüsse

Zu den übrigen Abweichungen zählt unter anderem das Messrauschen. Typischerweise beträgt der Fehler 1 % bis wenige ‰ der Wellenlänge, das ergibt im Falle der Trägerphasenmessung ca. 1-2 mm.

Bei der Ausbreitung des Signals wird es von Hindernissen und der Atmosphäre unkorreliert gestört, es entsteht sogenanntes Rauschen. Der Empfänger muss aus diesem Rauschen das Codesignal extrahieren. Das gelingt umso besser, je größer das Signal-Rauschverhältnis ist.

Eine weitere Beeinträchtigung der Daten, die nur bei der Trägerphasenmessung auftaucht, sind sogenannte „Cycle Slips“. Während der Empfänger einen Satelliten beobachtet und die Phase der Trägerwelle  $2\pi$  überschreitet, wird ein Zähler um eins erhöht. Die Anfangsmehrdeutigkeit während der Beobachtung bleibt dadurch gleich, obwohl sich die Entfernung ändert. Bei der Berechnung der gesamten Strecke zwischen Satellit und Empfänger wird die Anfangsmehrdeutigkeit plus dem internen Zählerstand und das Phasenreststück mit der Wellenlänge multipliziert. Kommt es jedoch zu einer Unterbrechung des Signals, wird der Zähler neu initialisiert, und ein Cycle Slip entsteht. Mit einem Cycle Slip wird der Unterschied zwischen der gelösten Mehrdeutigkeit vor der Unterbrechung und der Mehrdeutigkeit danach bezeichnet. In Abbildung 2.4 ist die Auswirkung für das Signal zu sehen. Gründe für einen Cycle-Slip können eine Sichtunterbrechung, ein schlechtes Signal-to-Noise Verhältnis oder ein Fehler in der Software sein [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Vor der Verarbeitung der Daten ist es notwendig diese Signalsprünge zu detektieren und zu korrigieren.

### 2.1.8. Satellitengeometrie

Die Positionsgenauigkeit der Koordinatenbestimmung hängt nicht nur von der Genauigkeit der Beobachtungen, sondern auch von der räumlichen Verteilung der beobachteten Satelliten ab. In Gleichung (2.14) wird dieser Zusammenhang gezeigt.

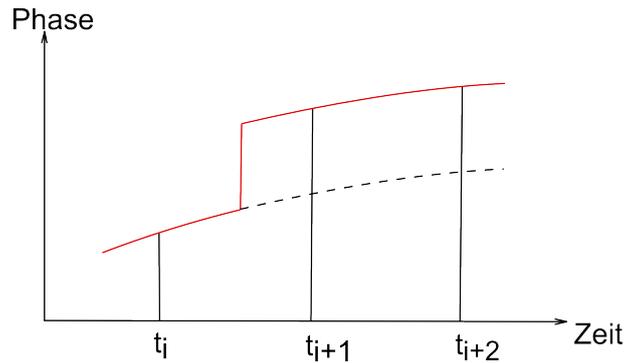


Abbildung 2.4.: Schematische Darstellung eines Cycle Slip [Hofmann-Wellenhop et al., 2008]

$$\sigma = \sigma_B * DOP \quad (2.14)$$

- $\sigma$  = Standardabweichung der Parameter [m]
- $\sigma_B$  = Standardabweichung der Beobachtung [m]
- $DOP$  = Dilution of Precision [-]

Mit dem Dilution of Precision (DOP)-Wert wird die Geometrie der Satelliten in Relation zum Empfänger beschrieben. Wenn er unter 3 liegt, ist die Konstellation sehr günstig. Dieser Wert ändert sich mit der Zeit, da sich Empfänger und Satelliten relativ zueinander bewegen. Der DOP-Wert ist unabhängig von Beobachtungen und kann daher auch a priori berechnet werden. Dazu wird die Kofaktor-Matrix aus der genäherten Netzgeometrie der GNSS-Beobachtungen benötigt. Diese lässt sich mit Formel (2.15) berechnen.

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{yx} & q_{zx} & q_{tx} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{zy} & q_{ty} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{tz} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

- $Q_{xx}$  = Kofaktormatrix [-]
- $A$  = Designmatrix, enthält die Einheitsvektoren von Empfänger zum Satellit [m]
- $P$  = Gewichtsmatrix [-]

Die DOP- Werte lassen sich dann aus der Wurzel der Spur der  $Q_{xx}$  Matrix berechnen. Der allgemeinste Fall, der Geometric Dilution of Precision (GDOP) ist somit mit Formel (2.16) auszuwerten.

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} \quad (2.16)$$

Der für die Positionierungsgenauigkeit wichtigere Position Dilution of Precision (PDOP) wird mit Formel (2.17) berechnet.

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} \quad (2.17)$$

Im Falle einer Auswertung der Koordinaten in einem topozentrischem System, muss man die Kofaktormatrix  $Q_{xx}$  mittels Rotationsmatrizen in das topozentrische System drehen (siehe Formel (2.18)).

$$Q_{LH} = R * Q_{xx} * R^T \quad (2.18)$$

- $Q_{LH}$  = Kofaktormatrix im topozentrischem System [m]
- $Q_{xx}$  = Kofaktormatrix im geozentrischen System [m]
- $R$  = Rotationsmatrix [-]

Nach der Rotation hat die Kofaktormatrix die Einträge laut Gleichung (2.19). Der PDOP lässt sich wieder aus der Wurzel der Spur der  $Q_{LH}$  berechnen. Mittels Formel (2.20) lässt sich der Horizontal Dilution of Precision (HDOP) (in den Lagekoordinaten) und mit Formel (2.21) der Vertical Dilution of Precision (VDOP) (in vertikaler Richtung) berechnen.

$$Q_{LH} = \begin{pmatrix} q_{nn} & \dots & & \\ \vdots & q_{ee} & & \\ & & & q_{hh} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$$HDOP = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}} \quad (2.20)$$

$$VDOP = \sqrt{q_{hh}} \quad (2.21)$$

## 2.2. Positionsbestimmung und Differenzbildung

Für die Positionierung eines Empfängers ist einerseits zu entscheiden ob man diese mit Code- oder Trägerphasenmessung vornimmt, und andererseits welche Positionierungsmethode man nutzt. Man unterscheidet zwischen absoluter und relativer Positionierung, die im Folgenden kurz erklärt werden.

### 2.2.1. Absolute Positionierung

Absolute Positionierung bedeutet, dass man mit den gemessenen Pseudostrecken und einer geeigneten Navigationsnachricht die Position des Rovers berechnen kann. Bei dieser Art der Positionsbestimmung über einen 4-dimensionalen Kugelschnitt erhält man unter Nutzung der Broadcast Navigationsnachricht jedoch eine maximale Genauigkeit von ca. 5m, die oft für geodätische Aufgaben zu gering ist [Willgalis, 2005].

### 2.2.2. Relative Positionierung

Bei dieser Positionierungsart nutzt man eine andere Station mit bekannten Koordinaten (Referenzstation) zur Bestimmung des gewünschten Punktes. Für die relative Messung ist eine Differenzbildung der Beobachtungen zwischen dem Rover und der Referenzstation notwendig [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Ausgang dieser Differenzbildung sind vereinfachte Beobachtungsgleichungen. Diese erhält man, wenn man in den Beobachtungsgleichungen (2.1) oder (2.2) die gut modellierbaren Fehler vorwegnimmt. Aufgrund der schlechten Modellierbarkeit des Mehrwegeeffektes wird dieser in den Restfehlerterm eingebunden. Man erhält dann Gleichung (2.22), die auch Zerodifferenz genannt wird.

$$L_{R,i}^S = \rho_R^S + c * \delta t_R - c * \delta t^S + \delta Orb_R^S + \delta Tr_R^S - \delta Ion_{R,i}^S + \lambda_i(N_{i,R}^S + \alpha_R + \alpha^S) + \epsilon_{R,i}^S \quad (2.22)$$

#### Einfachdifferenzen

Bildet man die Differenz der Beobachtungen von zwei Stationen, die simultan einen Satelliten beobachten, spricht man von Einfachdifferenz. Ausgehend von der vereinfachten Beobachtungsgleichung (2.22) kann man die Differenz der Observations  $\Delta L_{RQ,i}^S$  von zwei unterschiedlichen Stationen R und Q bilden. (Formel (2.23))

$$\Delta L_{RQ,i}^S = \Delta \rho_{RQ}^S + c * \Delta \delta t_{RQ} + \Delta \delta Tr_{RQ}^S - \Delta \delta Ion_{RQ,i}^S + \Delta \delta Orb_{RQ}^S + \lambda_i(\Delta N_{i,RQ}^S + \alpha_R) + \Delta \epsilon_{RQ,i}^S \quad (2.23)$$

Bei diesem Schritt wird der Satellitenuhrfehler und die Phasenkorrektur (siehe Formel (2.3)) des Satelliten eliminiert, sowie der ionosphärische und troposphärische Einfluss verringert.

Eine weitere Möglichkeit Einfachdifferenzen zu bilden ist, die Beobachtung von einer Station zu zwei Satelliten S und T zu subtrahieren. (Formel (2.24)). Diese Variante wird zur Berechnung der Beobachtung der virtuellen Referenzstation für das VRS- Konzept

benötigt (Kapitel 3.4.3).

$$\Delta L_{R,i}^{ST} = \Delta \rho_R^{ST} - c * \Delta \delta t^{ST} + \Delta \delta Tr_R^{ST} - \Delta \delta Ion_{R,i}^{ST} + \Delta \delta Orb_R^{ST} + \lambda_i (\Delta N_{i,R}^{ST} + \alpha^S) + \Delta \epsilon_{RQ,i}^S \quad (2.24)$$

### Doppeldifferenzen

Beobachten zwei Stationen simultan zwei Satelliten (siehe Abbildung 2.5), kann eine Doppeldifferenz gebildet werden. Ausgehend von den Einfachdifferenzen, die entweder mit Formel (2.23) oder (2.24) berechnet wurden, bildet man durch Subtrahieren eine Doppeldifferenz  $\nabla \Delta L_{RQ,i}^{ST}$  (siehe Gleichung (2.25)).

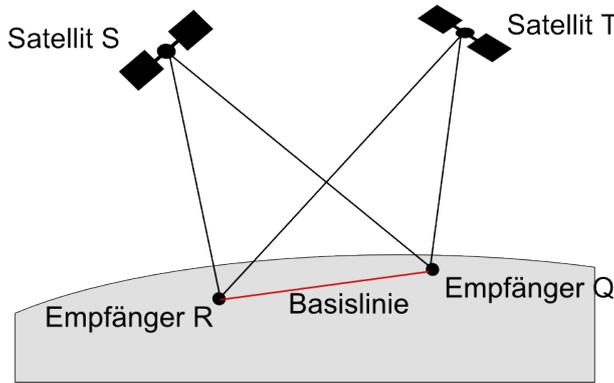


Abbildung 2.5.: Doppeldifferenzbildung von Beobachtungen

$$\begin{aligned} \nabla \Delta L_{RQ,i}^{ST} &= \Delta L_{RQ}^S - \Delta L_{RQ}^T = \Delta L_R^{ST} - \Delta L_Q^{ST} = \\ &= \nabla \Delta \rho_{RQ}^{ST} + \nabla \Delta \delta Tr_{RQ}^{ST} - \nabla \Delta \delta Ion_{RQ,i}^{ST} + \nabla \Delta \delta Orb_{RQ}^{ST} + \lambda_i \nabla \Delta N_{i,RQ}^{ST} + \nabla \Delta \epsilon_{RQ,i}^{ST} \end{aligned} \quad (2.25)$$

In (2.25) fällt der Empfängeruhrfehler und die Phasenkorrektur des Empfängers heraus. Entsprechend Formel (2.3), stellt man fest, dass die eingeführte Variable  $\nabla \Delta B_{i,RQ}^{ST}$  nun gleich der Mehrdeutigkeit  $\nabla \Delta N_{i,RQ}^{ST}$  und damit ganzzahlig ist. Bei der Doppeldifferenzbeobachtung erhält man die Koordinaten des Rovers über eine Basislinienbestimmung.

### 2.2.3. Differentielles GPS

Bei der differentiellen GPS- Positionierung handelt es sich um ein relatives Verfahren, das die Korrekturdaten in Echtzeit sendet [Willgalis, 2005]. Dazu sind zwei Stationen die

simultan beobachten notwendig. Von der Referenzstation sind die Koordinaten bekannt. Die Referenzstation sendet an den Rover Beobachtungen bzw. Korrekturen (Abbildung 2.6).

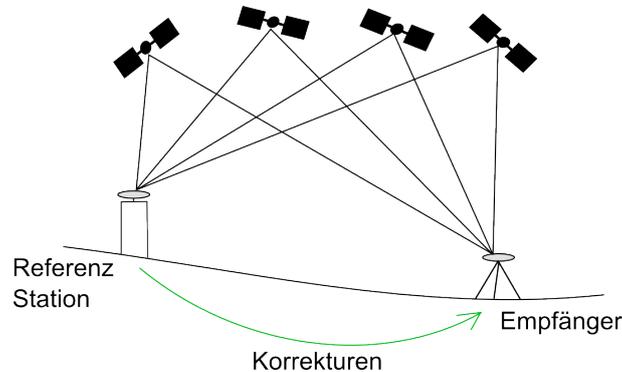


Abbildung 2.6.: Prinzip von Differentiellem GPS nach [Seeber, 2003]

Dieses Prinzip wurde zuerst für Code-Messungen entwickelt und später auch für die Trägerphasenmessung verwendet. Das Phasendifferenzverfahren ist unter präzises differentielles Verfahren (PDGPS) oder Real Time Kinematic (RTK) bekannt ist.

Die Reichweite ist bei dem RTK-Verfahren begrenzt. Schon nach einigen Zehnerkilometern besteht die hohe Korrelation der entfernungsabhängigen Fehler nicht mehr. Die Reichweite kann jedoch durch Vernetzung mehrerer Referenzstationen und damit möglicher regionaler Fehlermodellierung vergrößert werden. Dieses Verfahren wird in Kapitel 3 näher beschrieben.

## 2.3. Linearkombinationen

Hat man Beobachtungen eines Zweifrequenzempfängers zur Verfügung, kann man Kombinationen von Code- bzw. Phasemessungen bilden, die hinsichtlich Wellenlänge, Einfluss der Atmosphäre und Messrauschen bessere Eigenschaften als die Originalsignale aufweisen. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten die Messungen zu kombinieren. Grundsätzlich kann man Phasen- mit Phasemessung, Code- mit Codemessung und Phasen- mit Codemessung verbinden [Wanninger, 2000]. Dies geschieht formal entsprechend der Beziehung (2.26).

$$L_{n,m} = nL_1 + mL_2 \quad (2.26)$$

$n, m$  = Koeffizienten mit denen die Beobachtungen multipliziert werden [-]

$L_1, L_2$  = Beobachtungen auf den Frequenzen 1 und 2

In [Wübbena, 1991] werden einige Kriterien beschrieben, die für die Auswahl von geeigneten Koeffizienten  $n, m$  hilfreich sind. Als erstes Kriterium wird angeführt, dass die Koeffizienten, wenn möglich, auf ganze Zahlen festgelegt werden sollen, damit die Mehrdeutigkeit der Linearkombination auch ganzzahlig ist. (Formel (2.27))

$$N_{n,m} = n * N_1 + m * N_2 \quad (2.27)$$

$N_1, N_2$  = Mehrdeutigkeiten auf den Frequenzen 1 und 2 [-]

Weiters sollte die Wellenlänge der Linearkombination möglichst groß sein, damit die Mehrdeutigkeitsfestlegung besser gelingt. Die Wellenlänge lässt sich mit Formel (2.28) berechnen.

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{nf_1 + mf_2} \quad (2.28)$$

$c$  = Lichtgeschwindigkeit  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

$f_1, f_2$  = Frequenz 1 und 2  $\left[ \frac{1}{s} \right]$

Zusätzlich sollte der Einfluss der Ionosphäre auf die Linearkombination den Einfluss auf die Originalbeobachtung nicht übersteigen und das Messrauschen sollte möglichst wenig verstärkt werden [Wanninger, 2000].

Im Folgenden werden einige Linearkombinationen für die Phasenmessung vorgestellt, die bei der Mehrdeutigkeitslösung von Vorteil sind. Als Quellen dazu dienen [Wienholz, 2003] und [Leinen, 1997].

### 2.3.1. Ionosphärenfreie Linearkombination

Da sich die Ionosphäre bezüglich Mikrowellen wie ein dispersives Medium verhält, ist es möglich derer Einfluss auf das Messergebnis durch Kombination von Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen (Formel (2.29)) erheblich zu verringern.

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (2.29)$$

Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, sind die Mehrdeutigkeiten ohne Differenzbildung reell, erst nach einer Doppeldifferenzbildung (Kapitel 2.2) werden sie ganzzahlig. Ver-

nachlässigt man in Formel (2.25) noch die atmosphärischen Einflüsse und bildet eine Kombination der Messungen nach (2.29) so erhält man Gleichung (2.30).

$$\nabla\Delta L_{3,RQ}^{ST} = \nabla\Delta\rho_{3,RQ}^{ST} + \nabla\Delta C_{3,RQ}^{ST} \quad (2.30)$$

mit

$$\nabla\Delta C_{3,RQ}^{ST} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 \nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST} - f_2^2 \lambda_2 \nabla\Delta N_{2,RQ}^{ST}) \quad (2.31)$$

Es gelingt nicht den Term  $\nabla\Delta C_{3,RQ}^{ST}$  ganzzahlig festzulegen (Formel (2.31)). Zur Parameterbestimmung mit Hilfe der ionosphärenfreien Linearkombination sind entweder lange Beobachtungszeiten oder bekannte ( $\nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST} - \nabla\Delta N_{2,RQ}^{ST}$ ) notwendig. Zur deren Festlegung kann man weitere Kombinationen nutzen.

### 2.3.2. Wide-Lane Linearkombination

Diese Linearkombination (Formel (2.32)) zeichnet sich durch ihre große Wellenlänge (etwa 86cm bei GPS L1 und L2) aus. Dies führt zu einer höheren Wahrscheinlichkeit, dass die Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST}$  richtig gelöst wird. Der Nachteil ist jedoch ein erhöhtes Messrauschen.

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (2.32)$$

Berechnet man wieder die Doppeldifferenz, vernachlässigt die troposphärische und ionosphärische Verzögerung, und setzt in Formel (2.32) ein, erhält man die Gleichung (2.33).

$$\nabla\Delta L_{5,RQ}^{ST} = \nabla\Delta\rho_{5,RQ}^{ST} + \frac{c}{f_1 - f_2} (\nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST}) \quad (2.33)$$

mit

$$\nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST} = (\nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST} - \nabla\Delta N_{2,RQ}^{ST}) \quad (2.34)$$

### 2.3.3. Narrow-Lane Linearkombination

Man kann nun die gelöste Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST}$  aus (2.33) und den Zusammenhang der Mehrdeutigkeiten aus (2.34) nutzen und die ionosphärenfreie Linearkombination bilden. Man setzt zuerst (2.34) in Gleichung (2.31) ein und erhält (2.35).

$$\nabla\Delta C_{3,RQ}^{ST} = c \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} \nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST} + \frac{c}{f_1 + f_2} \nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST} \quad (2.35)$$

Da  $\nabla\Delta C_{3,RQ}^{ST}$  und  $\nabla\Delta N_{5,RQ}^{ST}$  bekannt sind, lässt sich nach geeigneter Umformung, die Gleichung für  $\nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST}$  lösen. Diese Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST}$  wird Narrow-Lane Mehrdeutigkeit genannt, da der Term  $\frac{c}{f_1 + f_2}$  einer Wellenlänge von etwa 11 cm entspricht. Hat man  $\nabla\Delta N_{1,RQ}^{ST}$  fixiert, kann mit Formel (2.34) auch  $\nabla\Delta N_{2,RQ}^{ST}$  gelöst werden.

## 2.4. Mehrdeutigkeitslösung

Bei der Trägerphasenmessung wird nur das Phasenreststück gemessen. Der Empfänger zählt die Phasenzyklen mit. Die Anzahl der ganzen Phasennulldurchgänge, die das Signal zwischen Satellit und Empfänger zurücklegt, ist jedoch eine Unbekannte und muss in der Auswertung bestimmt werden. Diesen Schritt nennt man Mehrdeutigkeitsfestlegung bzw. Ambiguitätsfestlegung.

Zu Beginn einer Auswertung wird die Ambiguität mitgeschätzt und das Ergebnis ist eine reelle sogenannte „Float“ Lösung. Zur genauen Positionierung ist jedoch die Festsetzung der Mehrdeutigkeit auf eine ganze Zahl notwendig, diese Lösung wird „Fixed“ genannt. In Abbildung 2.7 wird die Positionierungsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Mehrdeutigkeitslösung dargestellt. Ausgang der Berechnung ist eine ca. 19km lange Basislinie. Man erkennt gut, dass nach der Festsetzung der Ambiguität auf einen ganzzahligen Wert (nach ca. 20sec) die Positionsgenauigkeit sprunghaft besser wird. Mit reellen Ambiguitäten würde man diese Genauigkeit auch nach 15 min Beobachtungszeit nicht erreichen [Leinen, 1997].

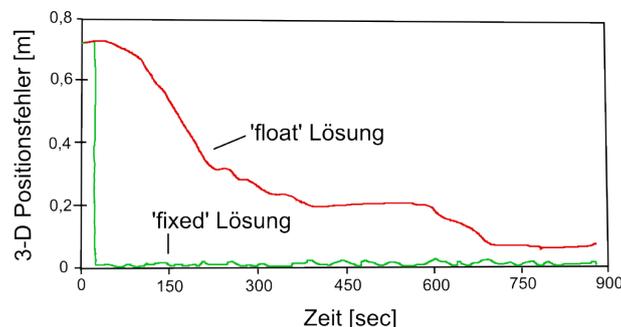


Abbildung 2.7.: Vergleich der Positionierungsfehler zwischen 'fixed' und 'float' Lösung der Mehrdeutigkeiten [Leinen, 1997]

Für die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten gibt es viele verschiedene Lösungsalgorithmen,

eine genaue Erklärung von einigen ist zum Beispiel in [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] zu finden. Grundsätzlich besteht der Algorithmus aus drei Schritten, die im Folgenden, angelehnt an [Hofmann-Wellenhof et al., 2008], kurz erklärt werden.

Zu Beginn soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es notwendig ist, die Berechnung auf Doppeldifferenzniveau durchzuführen, da nur dort die Mehrdeutigkeiten ganzzahlig sind und so eine „Fixed“ Lösung sinnvoll ist.

Der erste Schritt besteht in der Berechnung von möglichen ganzzahligen Mehrdeutigkeitskombinationen, die vom Algorithmus in Betracht gezogen werden sollen. Diese Kombinationen können zum Beispiel für jede Doppeldifferenzbeobachtung zu einem Satellitenpaar berechnet werden. Für Zweifrequenzbeobachtungen können zur Berechnung der möglichen Ambiguitäten Linearkombinationen genutzt werden. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, erhält man z.B mit einer ionosphärenfreien Linearkombinationen eine Mehrdeutigkeit, die sehr gering von der Ionosphäre beeinflusst ist, und so möglichst nahe am wahren Wert liegt. Diese Kombinationen und dazugehörigen Standardabweichungen bilden den sogenannten „Search Space“. Der wahre Integerwert der Mehrdeutigkeit sollte in diesem Bereich liegen und der Suchraum aus Gründen der Recheneffizienz möglichst klein sein. Der zweite Schritt ist die Festlegung des wahren Integerwertes, dazu wird häufig die Methode der kleinsten Quadrate genutzt. Anschließend wird noch eine Validierung der festgesetzten Mehrdeutigkeiten durchgeführt.

Aufgrund von unkorrigierten Fehlereinflüssen wie atmosphärische Verzögerung oder Multipath, kann es vorkommen, dass die Festlegung nicht gelingt [Wanninger, 2000].

## 2.5. Referenzsysteme und Referenzrahmen

Die eingemessenen Punktkoordinaten werden relativ zu einem Bezugssystem festgelegt. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen Referenzrahmen und Referenzsystemen. Das Referenzsystem ist die theoretische Grundlage. Hier wird der Ursprung des Systems, die Lage der Achsen, der Maßstab und weitere zugrunde liegende Modelle definiert. Der Referenzrahmen ist die praktische Realisierung des Referenzsystems. Dies geschieht durch Vorgabe von Koordinaten und Bewegungsvektoren von z.B Sternen oder Stationen an der Erdoberfläche.

### 2.5.1. Inertiale bzw. Quasi-inertiale Systeme

In einem Inertialsystem sind die Newton'schen Trägheitsgesetze uneingeschränkt gültig Voraussetzung dafür ist, dass das System raumfest ist und nicht rotiert. Der „Internatio-

nal Earth Rotation and Reference Systems Service IERS" definierte 1998 das „International Celestial Reference System ICRS“, das durch den „International Celestial Reference Frame ICRF“ realisiert wird. Der Ursprung dieses Systems liegt im Baryzentrum des Sonnensystems und die Achsenrichtungen ergeben sich aus der Beobachtung von Quasaren. Legt man den Ursprung des Systems in den Erdmittelpunkt spricht man von einem Quasi-inertialen System, da es sich um die Sonne bewegt und so Beschleunigungskräfte entstehen. Die Achsen sind jedoch parallel zu jenen des ICRS/ICRF [Seeber, 2003].

### 2.5.2. Geozentrisches erdfestes System

Der Ursprung dieses Systems liegt ebenfalls im Erdschwerpunkt. Die z-Achse ist durch die mittlere Position der Erdrotationsachse gegeben. Die x-Achse zeigt laut Definition in die Richtung des Meridians von Greenwich. Realisiert wird dieses System durch Referenzpunkte an der Erdoberfläche. Daraus ergibt sich, dass dieses Referenzsystem mit der Erde mitrotiert.

Ein Beispiel ist etwa das „International Terrestrial Reference System ITRS“ bzw. die dazugehörige Realisierung ITRF. Der ITRF basiert auf permanenten Beobachtungen von etwa 300 Referenzstationen. Zum Einsatz kommt eine Vielzahl an geodätischen Beobachtungsverfahren wie etwa „Satellite Laser Ranging SLR“, „Lunar Laser Ranging LLR“, „Very Long Baseline Interferometry VLBI“, „Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite DORIS“ und GNSS. Durch die Plattentektonik kommt es zur Verschiebung der Stationen und so sind die Realisierungen nur zu einer bestimmten Epoche gültig. Die aktuellste Realisierung ist der ITRF2008. Zusätzlich zu den Koordinaten der Stationen, werden auch die Geschwindigkeiten in Meter pro Jahr angegeben. Benötigt man die aktuellen Koordinaten einer Station, muss man die Verschiebung der Station seit der Referenzepoche der aktuellen Realisierung mittels dieser Geschwindigkeiten berechnen. Die Koordinaten ändern sich somit gleichförmig.

Um einen fixen Referenzrahmen zu schaffen, wurde in Europa der „European Terrestrial Reference System 1989 ETRS89“ eingeführt. Als Ausgang wurde der ITRF1989 genommen. Zur Epoche 1989.0 stimmen ITRF und ETRF Koordinaten überein und driften seitdem konstant mit der Geschwindigkeit der eurasischen Platte voneinander ab. [Uren and Price, 2006]

Ein weiteres geozentrisches erdfestes System ist das „World Geodetic System 1984 WGS84“. Es wurde vom U.S. Department of Defense entwickelt und ist das Bezugssystem für GPS. Diesem zugeordnet ist ein Ellipsoid, das durch die Parameter große Hauptachse  $a$ , Abplattung  $f$ , Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation  $\omega$  und der Gravitationskonstante  $GM$

festgelegt wird. Die Differenz der Koordinaten von ITRF und WGS84 wird möglichst gering gehalten (im cm-Bereich) [Seeber, 2003].

Zwischen den verschiedenen geozentrischen, erdfesten Systemen, aber auch regionalen geodätischen Daten, können Ortsvektoren mittels einer 7-Parameter-Transformation (Formel 2.36) umgerechnet werden.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m * R_{(\omega_x, \omega_y, \omega_z)} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

$X, Y, Z$  = Koordinaten im Zielkoordinatensystem [m]

$X_0, Y_0, Z_0$  = Verschiebung [m]

$m$  = Maßstab [-]

$R_{(\omega_x, \omega_y, \omega_z)}$  = Rotationsmatrix mit drei Drehwinkel [-]

$x, y, z$  = Koordinaten im Ausgangskordinatensystem [m]

Führt man wie in Kapitel 2.2.2 kurz erklärt, eine Einzelpunktbestimmung durch erhält man die Koordinaten im Koordinatensystem des Satellitensystems, im Falle von GPS im WGS84. Nutzt man die relative Positionierung (Kapitel 2.2.2) zur Festlegung der Position erhält man die Koordinaten des gemessenen Punktes im Koordinatenrahmen der Referenzstationen.

# 3. GNSS Referenzstationsnetz

## 3.1. Einleitung

Analog zu Kapitel 2.2.3 ist es möglich, die Streckenrestfehler zu verringern, in dem man die relative Positionierung zur Punktbestimmung nutzt. Für die Trägerphasenmessung ist jedoch die Reichweite einer solchen Referenzstation auf wenige Kilometer beschränkt. [Raquet and Lachapelle, 2001] geben sogar eine maximale Entfernung des Empfängers von der Referenzstation mit 10 km an. Beschränkt wird dies vor allem durch Fehlereinflüsse von Atmosphäre, die mit dem Abstand zur Referenzstation immer mehr dekorrelieren und dadurch die Mehrdeutigkeitsfestlegung verhindern.

Durch Vernetzung von Referenzstationen kann die abgedeckte Fläche erweitert werden und so der Empfänger auch z.B. 40-80 km von der nächsten Referenzstation entfernt stehen. Dies gelingt durch großräumige Modellierung der dispersiven Streckenfehler in Echtzeit auf Basis der Netzbeobachtungen. Die Genauigkeit der Position beträgt trotzdem noch etwa  $\pm 1$  cm in der Lagekoordinate und  $\pm 3$ cm in der Höhe. Ein Beispiel (Abbildung 3.1) von [Raquet and Lachapelle, 2001] zeigt dies sehr gut.

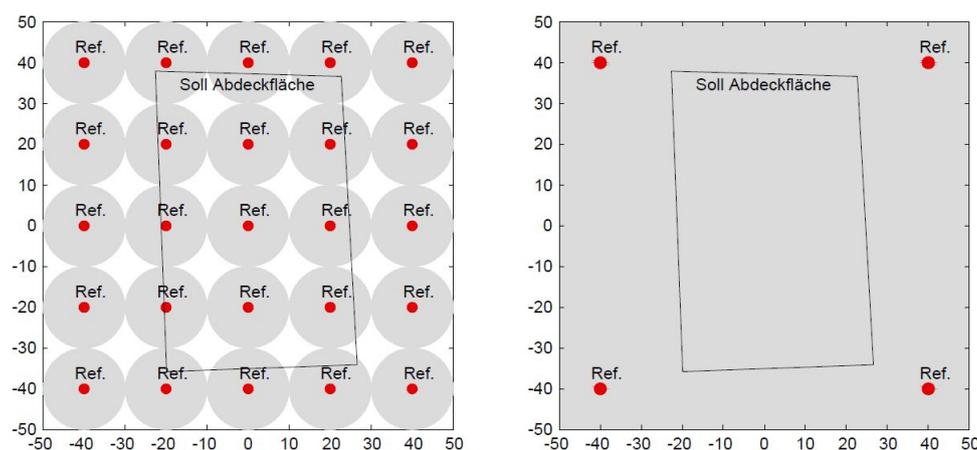


Abbildung 3.1.: Vergleich zwischen Abdeckung mit unabhängigen und vernetzten Referenzstationen [Raquet and Lachapelle, 2001]

Für Codemessungen gibt es die Vernetzung von Referenzstationen schon längere Zeit, diese ist jedoch in der Genauigkeit durch das Coderauschen eingeschränkt. [Rizos and Han, 2003]

Um auch mit Trägerphasenmessungen ein Referenzstationsnetz aufzubauen und dieses in Echtzeit verwenden zu können, war es notwendig einen Algorithmus zu entwickeln, der die Mehrdeutigkeiten sozusagen „on-the-fly“ lösen kann. Dies gelang zum Beispiel [Wübbena et al., 1996], damit wurde der Grundstein für RTK-Netze gelegt.

## 3.2. Systemkomponenten und Datenübertragungsformate

Für ein Referenzstationsnetz werden zumindest drei aktive Stationen benötigt, welche die aufgezeichneten Beobachtungen in Echtzeit an einen Netzwerk-Server, der sogenannten Master-Control Station, übertragen. (Abbildung 3.2)

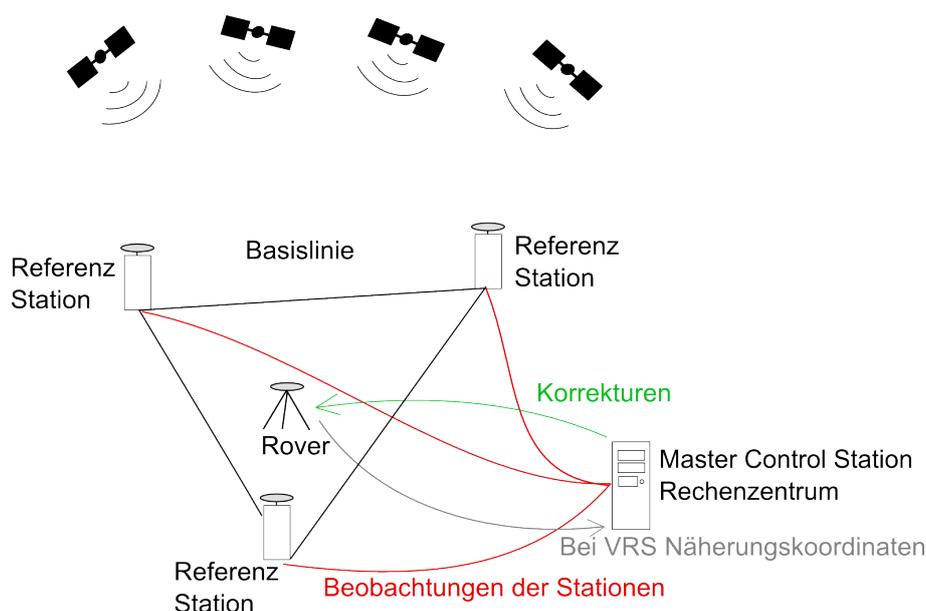


Abbildung 3.2.: Systemkomponenten eines Referenzstationsnetzes

In der Master-Conrol Station werden unter anderem die in Kapitel 3.4 erläuterten Berechnungsschritte durchgeführt und die Korrekturdaten an den Nutzer, der sich innerhalb des Netzes befinden soll, gesendet. Zur Übertragung der Daten wird das Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)-Format SC-104 verwendet (siehe Kapitel 3.2.1). Wird das Vernetzungskonzept „Virtuelle Referenzstation“ (siehe Kapitel 3.3.2) ge-

nutzt, ist es notwendig, dass die Näherungskoordinaten des Empfängers übertragen werden. Dazu wird das Standardformat National Marine Electronics Association (NMEA) (siehe Kapitel 3.2.2) verwendet.

### 3.2.1. RTCM SC-104

Der US Coast Guard strebte Anfang der 80- Jahre eine Verbesserung der Navigation für küstennahe Gewässer an und beauftragte dazu die Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) ein Standard-Format zu entwickeln, mit dem Korrekturdaten für differentielle GPS-Anwendungen übertragen werden können. Dies wurde vom Ausschuss für Differentielles GPS (Special Committee SC-104) durchgeführt und Version 1.0 1985 veröffentlicht. Im Laufe der Jahre kam es zu vielfältigen Neuerungen und Verbesserungen, welche bis hin zur Version 3.2 führten, die 2013 veröffentlicht wurde. Die genaue Entwicklung kann z.B. in [Willgalis, 2005] nachgelesen werden.

In dieser Arbeit wird das Format 3.1 genutzt. Eine wesentliche Neuerung dieser RTCM 3.x-Version ist, dass es die Übertragung von Transformationsparametern zwischen dem Koordiantensystem des GNSS-Netzes, z.B. ITRS, und dem Landeskoordinatensystem ermöglicht. In der Praxis wird jedoch noch häufig Version 2.3 genutzt.

In dieser Arbeit werden nur die in Tabelle 3.1 aufgezählten Messages-Typen genutzt, die Bedeutung der anderen Messages ist in [RTCM., 2013] nachzulesen.

Tabelle 3.1.: RTCM-Messages [RTCM., 2013]

Message Typ	Beschreibung
1004	GPS L1/L2 Beobachtung
1006	Stationskoordinaten mit Antennenhöhe
1007	Antennenbeschreibung
1008	Antennenbeschreibung und Seriennummer
1012	GLONASS L1/L2 Beobachtung
1013	System Parameter
1029	Unicode Text String für zusätzliche Informationen
1032	Stationskoordinaten (bei VRS der echten Referenzstation)
1033	Antennen und Receiver Beschreibung

### 3.2.2. NMEA-0183

Dieses Datenaustauschformat wurde 1983 von der US National Marine Electronics Association (NMEA) entwickelt. Es ist mittlerweile ein Standard zum Austausch von Daten zwischen GNSS- Empfängern und Rechnern, wobei die aktuelle Version 3.01 im Jänner 2002 publiziert wurde.

NMEA sind ASCII-basierte Datensätze bestehend aus maximal 82 Zeichen. Sie beginnen mit einem \$-Zeichen, gefolgt von der Geräte-ID, der Datensatz-ID und den Datenfeldern, wobei einzelne Felder mit einem Komma getrennt werden. Für die Anwendung zur Übertragung von GNSS-Daten gibt es vier unterschiedliche Geräte ID's, die das jeweilige Navigationssystem kennzeichnen z.B. GP für GPS. Bei den Datensatz-ID's gibt es etwa 50 ID's, wobei hauptsächlich nur fünf davon für GNSS-Aufgaben genutzt werden. Diese sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

Tabelle 3.2.: NMEA-Datensätze für GNSS-Aufgaben [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

ID	Datensatzinhalt
ALM	Almanach Daten
GGA	fixierte Positions Daten (Zeit, ellipsoidische Koordinaten, Anzahl der sichtbaren Satelliten, DOP-Werte, Qualität und Höhe über Geoid)
GLL	reduzierte fixierte Daten (Zeit, Latitude, Longitude, Status)
GSA	Aktive Satelliten inklusive deren DOP-Werte
GSV	sichtbare Satelliten mit Azimut, Elevation, Signal-to-Noise Ratio für jeden Satelliten
VTG	Navigationsdaten (Kurs über Grund, Geschwindigkeit über Grund)

### 3.3. Vernetzungskonzepte

Es gibt drei unterschiedliche Konzepte, welche Parameter genutzt werden um die Korrekturen eines Referenzstationsnetzes dem Nutzer zu übermitteln. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Art der Vernetzung keine Auswirkung auf die erreichbare Genauigkeit hat. In Abbildung 3.3 sind die wesentlichen Arbeitsschritte, die zur Positionierung in einem Referenzstationsnetz notwendig sind, abgebildet [Willgalis, 2005].

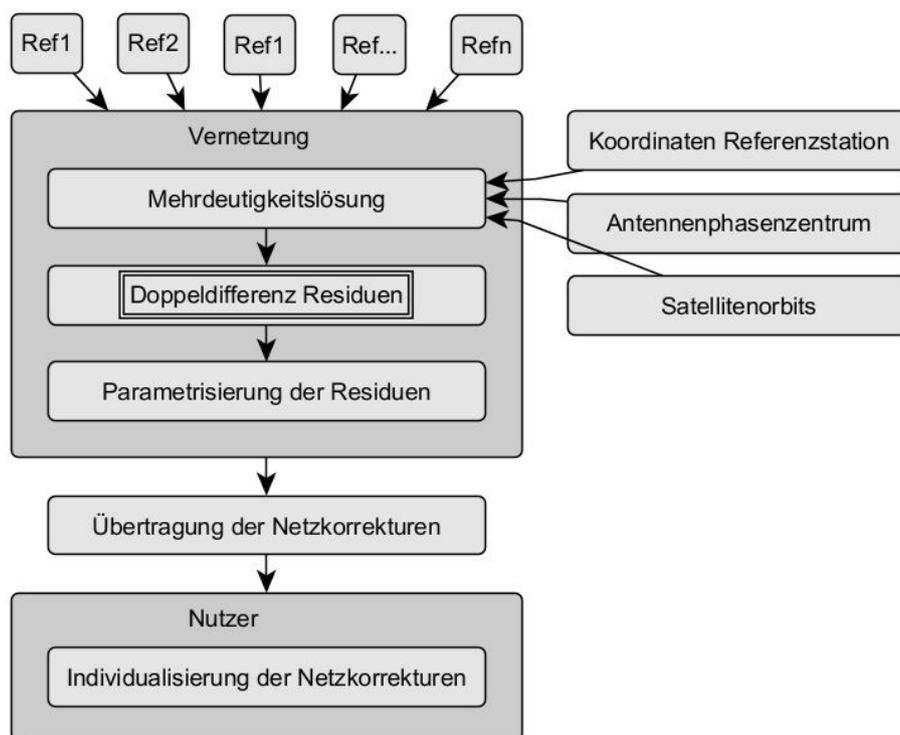


Abbildung 3.3.: Arbeitsschritte in einem Referenzstationsnetz [Willgalis, 2005]

### 3.3.1. Flächenkorrekturparameter FKP

Die Flächenkorrekturparameter waren das erste Konzept zur Vernetzung von Referenzstationen und Übertragung von Korrekturen. Die Streckenresiduen werden mit einem Flächenpolynom interpoliert und die Parameter dieses Polynoms werden an den Nutzer übertragen. Daraus ergibt sich der Name Flächenkorrekturparameter.

Gesendet werden die Parameter der Fläche in Nord-Süd sowie West-Ost Richtung, welche wiederum in einen dispersiven und nicht-dispersiven Anteil aufgeteilt werden. Die vier Größen beziehen sich jeweils auf ein Satellitenpaar. Es ist daher notwendig für jedes weitere Paar die passenden FKP zu übermitteln. Zusätzlich wird die Beobachtung der nächstgelegenen Referenzstation an den Empfänger gesendet. Dieser kann sich mit der erhaltenen Information und seiner näherungsweise bekannten Position in die Fläche interpolieren und die so erhaltenen Korrekturen an seine Beobachtung anbringen. Es werden somit die Streckenmessungen korrigiert. [Willgalis, 2005]

### 3.3.2. Virtuelle Referenzstation VRS

Das Prinzip der virtuellen Referenzstation beruht auf der Tatsache, dass bei der Doppeldifferenzbildung die entfernungsabhängigen Fehler (Ionosphäre, Troposphäre und Bahn-

fehler) geringer werden, je kürzer die Basislinie zwischen den Stationen ist. Aus diesem Grund werden für die Näherungskoodinaten, die vom Empfänger an die Master Control Station geschickt werden, virtuelle Stationsbeobachtungen an dieser Stelle berechnet. Die „Beobachtungen“ dieser VRS werden an den Rover gesendet, der dann mittels Doppeldifferenzbildung seine eigene Position berechnet. Bei diesem Berechnungsschritt können die entfernungsabhängigen Fehler vernachlässigt werden, da die Basislinie sehr kurz ist. Der Abstand zwischen virtueller Referenzstation und Rover kann, je nach Anbieter des Referenzstationsnetzes, zwischen wenigen Metern und Kilometern liegen [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

Eine detaillierte Beschreibung der notwendigen Berechnungsschritte wird in Kapitel 3.4 gezeigt.

### **3.3.3. Master Auxiliary Concept MAC**

Dieses Konzept wurde von [Euler et al., 2001] entwickelt. Grund dafür war zum einen weniger Daten an den Empfänger übertragen zu müssen und zum anderen die Möglichkeit, das Interpolationsmodell vom Nutzer selbst bestimmen zu lassen.

Für diese Methode ist es notwendig eine Masterstation und Auxiliarys im Netz zu bestimmen. Die Messdaten der insgesamt mindestens drei Stationen werden auf ein Mehrdeutigkeitsniveau gebracht und die Streckenresiduen berechnet. Dem Nutzer werden die Koordinaten und die Korrekturen der Masterstation gesendet. Von den Auxiliary-Stationen erhält der Empfänger jeweils den Koordinatenunterschied zur Masterstation und Korrekturen zu den Phasenstreckenbeobachtungen der Masterstation. Der Nutzer kann mit dieser Information selbst ein Interpolationsmodell wählen und damit die Korrekturen für den eigenen Standpunkt berechnen und diese an seine Beobachtung anbringen.

## **3.4. Berechnungsschritte einer neuen Position mittels der VRS-Vernetzung**

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, wird bei dem VRS Vernetzungskonzept mit NMEA eine genäherte Position des Empfängers an das Rechenzentrum geschickt und dort die „Beobachtung“ für diese fiktive Station berechnet. Der Empfänger bildet dann die Doppeldifferenz zu der virtuellen Station und löst die Positionierungsaufgabe. Die einzelnen Berechnungsschritte werden in den jeweiligen Unterkapiteln erklärt.

### 3.4.1. Mehrdeutigkeitsfestlegung im Netz

Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung in Stationsnetzen wird durch die mm-genau bekannten Stationskoordinaten vereinfacht. Zusätzlich zu den Koordinaten sind auch die Antennenphasenzentren der Referenzantennen genau bekannt, und die Mehrwegeeffekte werden durch die Aufstellung möglichst verringert. Mit dem Festsetzen der Mehrdeutigkeit in einem Netz beginnt man bei der kürzesten Basislinie, da dort die entfernungsabhängigen Fehler am wenigsten Einfluss haben. Ausgehend von der ersten gelösten Ambiguität werden auch die der restlichen Basislinien gelöst. Das Ergebnis ist ein Netz, bei dem sich alle Doppel-Differenz- Mehrdeutigkeiten auf dasselbe Niveau beziehen. Ein Fehlermodell kann man nur für Stationspaare mit gelöster Mehrdeutigkeit bilden, es wird daher eine möglichst hohe Rate an gelösten Ambiguitäten angestrebt [Wanninger, 2000].

### 3.4.2. Residuenberechnung

Nach der Festlegung der Mehrdeutigkeiten kann mit der Berechnung der Korrekturen begonnen werden. Dieses Kapitel ist [Wanninger, 2000] und [Wei et al., 2006] entnommen. Zunächst berechnet man mit Formel (3.1) die Residuen  $\nabla\Delta r$ . Man subtrahiert dabei die berechnete geometrische Doppeldifferenzdistanz zwischen Empfänger und Satellit  $\nabla\Delta\rho_{RQ}^{ST}$  und der gelösten Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_i$  von der tatsächlichen Beobachtung  $\nabla\Delta L_{RQ,i}^{ST}$ . Zur Vereinfachung der Notation werden diese Doppeldifferenzresiduen im Folgenden mit  $V_{RQ,i}^{ST}$  (für Verbesserung) bezeichnet.

$$\begin{aligned} V_{RQ,i}^{ST} &= \nabla\Delta r = \nabla\Delta L_{RQ,i}^{ST} - (\nabla\Delta\rho_{RQ}^{ST} + \nabla\Delta N_i) * \lambda_i \\ &= -\nabla\Delta\delta Ion_{RQ,i}^{ST} + \nabla\Delta\delta Tr_{RQ}^{ST} + \nabla\Delta\delta Orb_{RQ}^{ST} + \epsilon_{f,\nabla\Delta L} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Wie man sehen kann, verbleiben Anteile der troposphärischen Refraktion, Bahnfehler, ionosphärische Fehler und den übrigen Abweichungen. Es besteht daher die Möglichkeit die Fehler in dispersive und nicht dispersive Anteile aufzuteilen und diese separat an den Nutzer zu übermitteln (siehe Vernetzungskonzept FKP 3.3.1).

In [Wanninger, 2000] wird gezeigt, dass sich die drei Fehlereinflüsse zwischen den Stationen linear interpolieren lassen, ohne dass zu große Restfehler entstehen. Ausgenommen davon sind kleinräumige ionosphärische Störungen, die nicht detektiert und somit korrigiert werden können.

Um den Fehler an der Stelle des Empfängers zu berechnen, ist eine Interpolation notwendig. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, wie zum Beispiel Linear Combination Model (LCM), Linear Interpolation Method (LIM), Low-order Surface Model (LSM) oder Least-

Squares Collocation (LSC). Die Methoden LCM, LIM und LSM werden in [Wei et al., 2006] und LSC in [Raquet, 1998] genauer vorgestellt. Die erreichbare Genauigkeit ist für die verschiedenen Methoden gleich.

### Linear Interpolation Method LIM

Die gesuchten Residuen an der Empfängerposition lassen sich in dieser Methode mit Formel (3.2) berechnen.

$$V_{RQ,i} \approx \begin{pmatrix} \Delta X_{EM} & \Delta Y_{EM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$\Delta X_{EM}$  und  $\Delta Y_{EM}$  = Koordinatendifferenz zwischen Empfänger  $E$   
und Masterstation  $M$  [m]

$a$  und  $b$  = unbekannte Koeffizienten

Um  $a$  und  $b$  zu erhalten werden die bekannten Verbesserungen aller Referenzstationen  $R$  genutzt.

$$\begin{pmatrix} V_{1M} \\ V_{2M} \\ \vdots \\ V_{RM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{1M} & \Delta Y_{1M} \\ \Delta X_{1M} & \Delta Y_{1M} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{RM} & \Delta Y_{RM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Es werden mindesten drei Stationen benötigt, damit  $a$  und  $b$  berechnet werden können. Der Grund ist, das immer nur Verbesserungen relativ zur Masterstation berechnet werden. Sind es mehr Stationen, werden sie über eine Ausgleichung der kleinsten Quadrate bestimmt (Formel (3.4)).

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T V \quad (3.4)$$

$$A = \begin{pmatrix} \Delta X_{1M} & \Delta Y_{1M} \\ \Delta X_{1M} & \Delta Y_{1M} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{RM} & \Delta Y_{RM} \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} V_{1M} \\ V_{2M} \\ \vdots \\ V_{RM} \end{pmatrix}$$

Die so berechneten Koeffizienten  $a$  und  $b$  werden in Formel (3.2) eingesetzt und man erhält die Streckenverbesserung an der Position des Empfängers bzw. im Falle der Virtuellen Referenzstation an der Stelle der VRS.  $a$  und  $b$  werden getrennt für dispersiv und nicht-

dispersive Korrekturanteile berechnet.

### Least-Square Collocation LSC

Eine zweite Möglichkeit zur Berechnung der Verbesserung am Standpunkt der Virtuellen Referenzstation ist mittels der Least-Square Collocation. Die Verbesserung kann mit Hilfe der Formel (3.5) berechnet werden.

$$l_{V_E} = C_{l_{V_E}, l_{V_R}} (C_{l_{V_R}})^{-1} l_{V_R} \quad (3.5)$$

$l_{V_E}$  = Vektor mit allen Doppeldifferenzverbesserungen zwischen dem Empfänger und den Referenzstationen [m]

$C_{l_{V_E}, l_{V_R}}$  = Kreuzkovarianzmatrix der Verbesserungen zw. Rover und Referenzstation

$C_{l_{V_R}}$  = Kovarianzmatrix der Verbesserungen zw. den Referenzstationen

$l_{V_R}$  = Vektor mit allen Doppeldifferenzverbesserungen zwischen den Referenzstationen [m]

Die gesuchten Kovarianzmatrizen sind Teilmatrizen der Kovarianzmatrix  $C_{l_V}$  zu finden. Berechnet wird diese mit Formel (3.6).  $E$  ist der Erwartungswert.

$$C_{l_V} = E[(l_V - E[l_V])(l_V - E[l_V])^T] \quad (3.6)$$

$$l_V = \begin{pmatrix} l_{V_R} \\ l_{V_E} \end{pmatrix}$$

$C_{l_V}$  hat folgenden Aufbau

$$\begin{pmatrix} C_{l_{V_R}} & C_{l_{V_E}, l_{V_R}} \\ C_{l_{V_E}, l_{V_R}} & C_{l_{V_E}} \end{pmatrix}$$

In [Raquet, 1998] wird diese Methode sehr genau beschrieben. Dort wird auch gezeigt wie man die „Kovarianz-Funktion“ erstellt, mit deren Hilfe man die Einträge in die Kovarianzmatrix, abhängig von der Position des Empfängers bzw. der Referenzantenne berechnet. Die Einträge in der Kovarianzmatrix variieren mit der Zeit abhängig von der Aktivität der Ionosphäre bzw. Troposphäre.

### 3.4.3. Berechnung der VRS-Beobachtung

Die folgenden Kapitel 3.4.3 und 3.4.4 halten sich an [Wei et al., 2006].

Der Empfänger benötigt zur Doppeldifferenzbildung mit den virtuellen Referenzstationsdaten, die Einfachdifferenz (Kapitel 2.2.2) dieser Station  $\Delta L_V^{ST}$  zu den identen Satelliten, zu denen auch der Empfänger eine Stationseinfachdifferenz bilden kann. Es ist daher notwendig diese Einfachdifferenz dem Rover zu senden. Im Folgenden sind Beobachtungen für die virtuelle Station mit  $V$  und für die Masterreferenzstation mit  $M$  gekennzeichnet. Zuerst werden mit den exakt bekannten Koordinaten der Referenzstation und der virtuellen Station die geometrische Distanz  $\rho_M$  und  $\rho_V$  zu den Satelliten S und T, deren Bahnen ebenso bekannt sind, berechnet.

Für die Berechnung der benötigten Einzeldifferenz  $\Delta L_V^{ST}$  bilden wir die Doppeldifferenz zwischen der virtuellen und reellen Masterreferenzstation. (Formel (3.7)).

$$\nabla \Delta L_{MV}^{ST} = (L_V^{ST} - L_M^{ST}) = \nabla \Delta \rho_{MV}^{ST} + V_{MV}^{ST} + \lambda \nabla \Delta N_{MV}^{ST} \quad (3.7)$$

$\nabla \Delta \rho_{MV}^{ST}$  wird mit Formel (3.8) berechnet und  $V_{MV}^{ST}$  kann für die Position der virtuellen Station nach Kapitel 3.4.2 interpoliert werden.

$$\nabla \Delta \rho_{MV}^{ST} = (\rho_V^T - \rho_M^T) - (\rho_V^S - \rho_M^S) \quad (3.8)$$

Nach dem Lösen der Mehrdeutigkeit kann durch Umformen der Gleichung (3.7) die Einzeldifferenz  $\Delta L_V^{ST}$  berechnet werden, da ja  $L_M^{ST}$  bereits aus den Beobachtungen an der Masterstation bekannt ist.

### 3.4.4. Positionsberechnung des Empfängers

Zur Positionsbestimmung des Empfängers wird wiederum eine Doppeldifferenz zwischen virtueller Referenzstation und Empfänger gebildet (Gleichung (3.9)).

$$\nabla \Delta L_{EV}^{ST} = \nabla \Delta \rho_{EV}^{ST} + \nabla \Delta \delta Tr_{EV}^{ST} - \nabla \Delta \delta Ion_{EV}^{ST} + \nabla \Delta \delta Orb_{EV}^{ST} + \lambda \nabla \Delta N_{EV}^{ST} \quad (3.9)$$

Die räumliche Distanz zwischen Empfänger  $E$  und virtueller Station ist gering, da die virtuelle Station auf den Koordinaten der Näherungslösung „steht“, und so können die troposphärische und ionosphärische Verzögerung sowie der Einfluss des Orbitfehler vernachlässigt werden. Man erhält somit Formel (3.10).

$$\nabla \Delta L_{EV}^{ST} = \Delta L_E^{ST} - \Delta L_V^{ST} = \nabla \Delta \rho_{EV}^{ST} + \lambda \nabla \Delta N_{EV}^{ST} \quad (3.10)$$

$\Delta L_V^{ST}$  wurde dem Empfänger mittels RTCM SC-104 Message übermittelt.  $\Delta L_E^{ST}$  wird durch die Beobachtung am Rover berechnet. Nach dem Festsetzen der Ambiguität  $\nabla \Delta N_{EV}^{ST}$  kann  $\nabla \Delta \rho_{EV}^{ST}$  gelöst und damit die Position des Rovers berechnet werden.

# 4. Lokale Netzlösung mittels Leica Spider und Topcon TopNET

## 4.1. Verwendete Stationen und Datenströme

Für den Aufbau des Referenzstationsnetzes wurden Datenströme verwendet, die von der Firma Echtzeitpositionierung Austria (EPOSA) zur Verfügung gestellt wurden. Es wurden damit Beobachtungen genutzt, die auch von einem kommerziell operierenden österreichweiten Dienstleister verwendet werden. Ziel war es, ein Netz zu installieren, das den Raum Wien abdeckt. Es wurden deshalb die Stationen Leopoldau, Baden und Pama gewählt. In Abbildung 4.1 ist die Verteilung der Stationen zu sehen und in Tabelle 4.1 sind die ellipsoidischen Koordinaten, sowie weitere Details zu den Stationen aufgelistet.

Die Beobachtungsdaten wurden mittels dem Format RTCM 3.1 an die TU Wien übertragen. Zusätzlich zu den rohen Datenströmen wurden auch noch die Antennenkalibrierungen zur Verfügung gestellt. Dies geschah mittels eines .atx Files, das später in die untersuchten Programme eingelesen werden konnte.

Tabelle 4.1.: Koordinaten (im Bezugsrahmen ITRF2000, Epoche 1997.0) und zusätzliche Informationen der verwendeten Referenzstationen

Name	Receiver Typ	Antennen Typ	ellipsoidische Koordinaten		
			Nord [°]	Ost[°]	Höhe [m]
Baden	TPS GB-3	TPSCR3_GGD_1	48,00093855	16,24761502	281,724
Leopoldau	TPS GB-3	TPSCR3_GGD_1	48,27192894	16,41985485	222,549
Pama	TPS GB-1000	TPSCR3_GGD_1	48,03943718	17,02617263	185,674

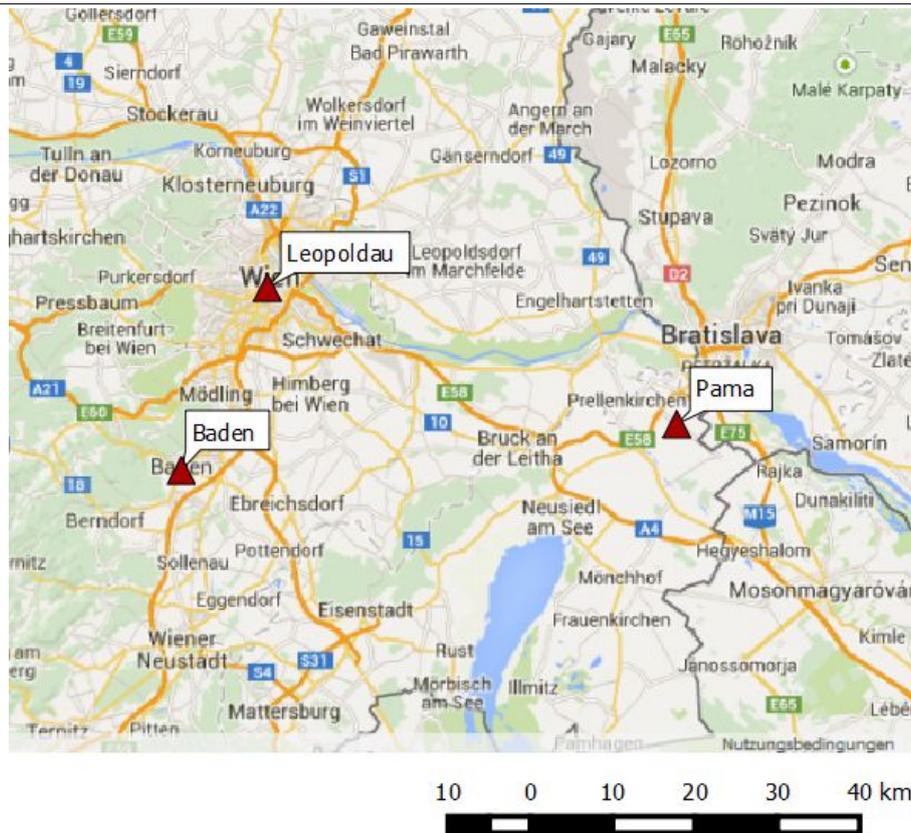


Abbildung 4.1.: Übersicht der verwendeten Stationen

## 4.2. Verwendete Programme

### 4.2.1. Leica Geosystems AG, Spider

Das Programm der Firma Leica Geosystems AG wurde in der Version 4.2 zur Verfügung gestellt. Dieses Programm bietet die Möglichkeit, ein vollständiges Referenzstationsnetz aufzubauen und somit Korrekturen an den Nutzer zu senden. Es wäre auch möglich, nur die Beobachtungen der nächsten Referenzstation zu senden, also keine Vernetzung der Stationen zu berechnen.

Es gibt die Möglichkeit alle drei Vernetzungskonzepte, die in Kapitel 3.3 gezeigt wurden, anzuwenden. Weiters kann mit dem Programm eine Nutzerverwaltung durchgeführt werden, um so mehreren Personen den Zugang zu diesem Dienst zu ermöglichen.

## Einrichtung des Netzes

Der erste Schritt zur Erstellung eines Referenzstationsnetzes mit Spider ist die Einrichtung eines sogenannten Side und eines Network Servers. Auf dem Side Server werden die einzelnen Ströme und alle sonstigen Informationen zu den Stationen gespeichert. Der Network Server übernimmt diese Daten vom Side Server und berechnet damit das gewünschte Netz bzw. die Korrekturen und versendet diese.

Sind die Server eingerichtet, werden mittels RTCM 3.1 die Echtzeitströme der verwendeten Referenzstationen eingebunden. Diese Ströme werden vom Ntrip-Server von EPOSA mittels Benutzername und Passwort bezogen. Nach der erfolgreichen Verbindung mit der Station, sollten die sichtbaren GPS und GLONASS-Satelliten in einem Skyplot sichtbar sein. Wie man in Abbildung 4.2 sehen kann, sind aber nur GPS-Satelliten abgebildet. Es gelang aber nicht GLONASS-Daten einzulesen. Dieses Problem konnte bei allen eingebundenen Stationen beobachtet werden. Trotz längerer Fehlersuche und Kontakt mit dem Support der Firma Leica, konnte dieses Problem nicht behoben werden. Es soll aber hervorgehoben werden, dass das Einbinden der Stationen mit der gleichen Version von Spider bei einem Mitarbeiter von Leica auf deren Computer einwandfrei funktioniert hat. Es wird ein ungelöstes Zugriffsrechtproblem bei der TU Wien Installation vermutet.

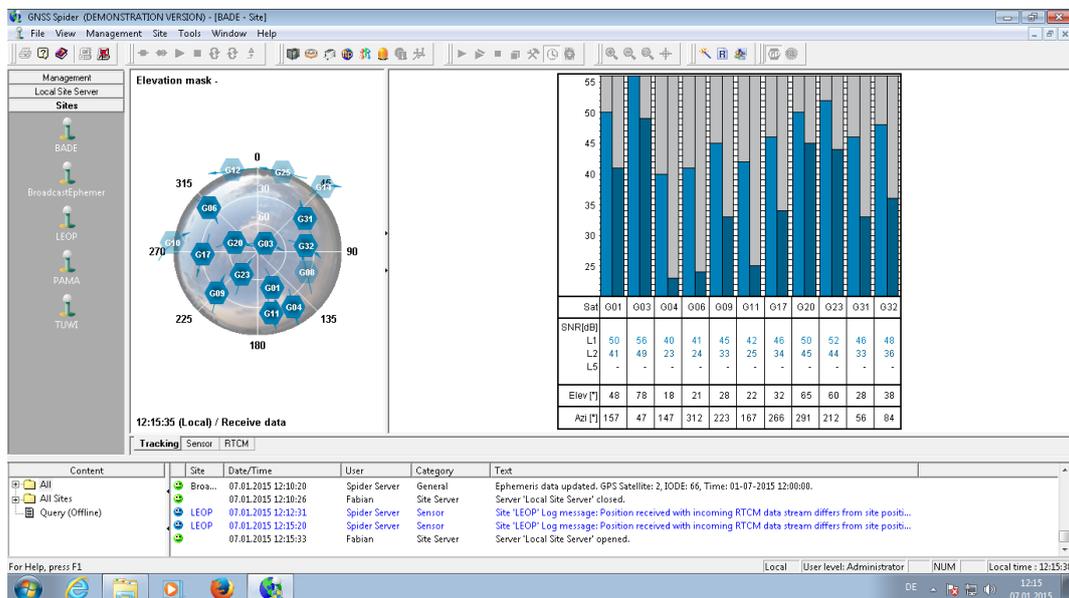


Abbildung 4.2.: Screenshot vom Side-Server, mit eingebundener Station, die nur GPS-Satelliten trackt

Da es sich bei den genutzten Datenströmen um passive Stationen handelt, mussten die Navigationsnachrichten über eine weitere externe Quelle eingebunden werden. Passive

Station bedeutet, dass die Beobachtungsdaten nicht direkt von der Antenne zum Programm gesendet werden, sondern zum Beispiel über eine RTCM Message übertragen werden. Die Übertragung mittels eines Standardformats war jedenfalls zu wählen, da an den Referenzstationen für Spider Empfänger eines Fremdherstellers installiert waren. Die Broadcast-Ephemeriden wurden von dem Ntrip-Caster products.igs-ip.net mit dem Mountpoint RTCM3EPH bezogen und wie die anderen Stationen eingebunden. Die Koordinaten der „Station“ wurden willkürlich gewählt, da dies keine Auswirkungen hat.

Sind die Referenzstationen erfolgreich mit dem Programm verbunden, werden auf dem Network-Server sogenannte Cluster und Cells definiert. Im Manual von Spider werden Cluster als eine Gruppe von Stationen, die auf einem Mehrdeutigkeitsniveau liegen, definiert. Programmintern werden die Netzberechnungen auf sogenannten Clusterservern ausgeführt. Hat ein Netzwerk mehrere Cluster, besitzt es somit auch mehrere Clusterserver. Im Falle dieser Arbeit sollen nur drei Stationen vernetzt werden und diese bilden auch einen Cluster. Innerhalb dieser Cluster werden noch Cells gebildet, diese sollten aus 3-10 Stationen bestehen. In den Cells wird auch eine Masterstation bestimmt, die bei VRS und MAC zu Beginn die Masterstation ist, im Laufe der Berechnung aber durch die nächste Station zum Rover ersetzt wird.

Es werden noch zusätzlich Produkte benötigt um das Netz aufzubauen. Dies sind zum einen Präzise Ephemeriden und zum anderen VTEC-Maps (Siehe Kapitel 2.1.3). Beide werden mittels eines FTP-Servers bezogen.

Sind alle Einstellungen getroffen und Produkte abrufbar, kann der RTK Dienst eingerichtet werden. In dieser Arbeit wird das VRS Konzept (Kapitel 3.3.2 bzw. 3.4) mit der RTCM Version 3.1 genutzt. Zusätzlich zu der Vernetzungsart kann man unter anderem einstellen:

- Maximale Distanz zur nächsten Station, um noch Korrekturen zu senden
- genutztes Satellitensystem
- Ziel Koordinatensystem
- Ntrip Router Setting: IP-Adresse, Portnummer und Mountpoint

Sind alle Einstellung getroffen, kann der Dienst gestartet werden und das Programm beginnt mit der Fixierung der Mehrdeutigkeiten, wie in Kapitel 2.4 beschrieben. Als minimale Elevation bei der das Signal des Satelliten noch genutzt wird, wurde  $10^\circ$  eingestellt. Es gibt keine Möglichkeiten, mehr über die interne Mehrdeutigkeitsfestlegung oder Korrekturberechnung zu erfahren. Nach dem Start des Dienstes dauert es wenige Minuten bis

alle Ambiguitäten fixiert sind und Korrekturen gesendet werden können. In Abbildung 4.3 sieht man einen Screenshot des Programmes mit fixierten Mehrdeutigkeiten.

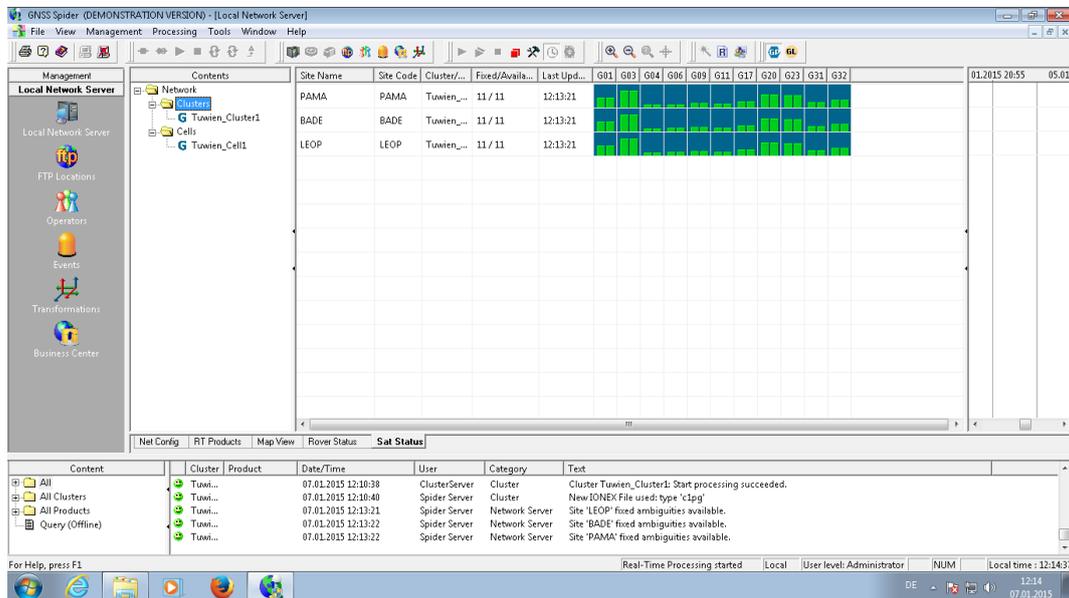


Abbildung 4.3.: Screenshot vom Network-Server mit fixierten Mehrdeutigkeiten

Der letzte Schritt ist das Anlegen eines Nutzers, mit dem man sich in das Netz einwählen kann. Dafür muss man ein weiteres Programm von Leica mit dem Namen „Spider Business Center“ starten. Hier kann man einstellen, welcher Nutzer zu welchen Diensten Zugang hat. Man kann so dem Benutzer auf bestimmte Regionen begrenzt Korrekturen senden, in dem man nur einen Zugang zu einem bestimmten Cluster erlaubt. Weiters kann man einstellen, ob der Dienst kostenpflichtig ist und ob er nur für einen begrenzten Zeitraum zugänglich ist.

Mit dem so erstellten Nutzernamen kann man sich in das Netz einwählen. Eine in Spider verfügbare digitale Karte zeigt genähert die Position des eingewählten Empfängers und die Lage der, für die betreffenden „Cell“ gewählten, Masterstation (siehe Abbildung 4.4).

## Protokolle

Bei dem Programm Spider ist es möglich mehrere Protokolle mitzuschreiben. Für den Side-Server kann man zwischen einem Eventlog oder einer Receiver Independent Exchange Format (RINEX)-Beobachtungsdatei wählen. Im Eventlog werden Meldungen wie zum Beispiel die Aktualisierung eines IONEX-Files oder der Abruf Präziser Ephemeriden mitgespeichert. Die Erstellung eines RINEX-Beobachtungsfiles aus dem RTCM 3.1 Binärdatenstrom kann für alle eingebundenen Stationen angefordert werden.



Abbildung 4.4.: Screenshot vom Spider, der das erstellte Netz mit einem eingewählten Nutzer zeigt

Für den Network-Server kann man drei unterschiedliche Protokolle erstellen lassen.

- General connection log
- Detailed connection log
- NMEA log

In dem General connection log wird mitgeschrieben, wann sich ein Nutzer wie lange in den den Dienst einwählt. Weiters werden noch die Koordinaten des Standpunktes des Empfängers gespeichert.

Das Detailed connection log ist ein ausführlicher Bericht jeder Verbindung mit dem Dienst. Zusätzlich zu den Informationen im General connection log erfährt man z.B. wann die NMEA-Messages eingegangen sind, wie lange die Berechnung der Korrektur dauert, wie viele Satelliten dazu genutzt werden usw. In Anhang A ist ein derartiges Log-File dargestellt. Es wird für jede neue Verbindung des Nutzers mit dem Dienst ein neues Log-File angelegt.

In dem NMEA-Log werden alle einkommenden NMEA-Messages gespeichert.

#### 4.2.2. Topcon Corporation, TopNET

Das Programm steht in der Version 9.5 als Testversion zur Verfügung. Es können damit bis zu vier Referenzstationen eingebunden werden, jedoch wird keine Vernetzung der

Stationen berechnet, sondern es werden dem Nutzer die Beobachtungen der nächsten Station gesendet. In diesem Programm ist ebenfalls eine Nutzerverwaltung integriert.

### **Einrichtung des Netzes**

Auch in diesem Programm muss ein Server konfiguriert werden, der alle Aufgaben übernimmt. Die RTCM-Ströme werden, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, mittels Ntrip eingebunden. Beim Einbinden sind keine Probleme aufgetreten und es werden GPS und GLONASS-Daten empfangen bzw. verarbeitet. Ebenso wie bei Leica Spider ist es notwendig dem Programm Broadcast Ephemeriden zur Verfügung zu stellen. Anders als bei Spider, kann kein Strom der nur die Navigationsnachricht überträgt, eingebunden werden. Für dieses Programm wurde deshalb der Topcon Receiver auf dem Dach der TU Wien genutzt. Dieser kann direkt, also ohne Übertragung über einen Server, verbunden werden. Die Beobachtungsdaten werden an das Programm in einem proprietären Format übertragen. Das Netz besteht somit aus drei passiven Stationen (Baden, Leopoldau und Pama) und einer aktiven Antenne (TU Wien).

Es müssen außer den Datenströmen keine weiteren Daten bereit gestellt werden. Es ist nicht möglich ein externes Antennenkalibrierungsfile einzulesen. Man kann zwar einstellen, mit welcher Antennenart die Station ausgerüstet ist, jedoch ist die Kalibrierung dann vorgegeben.

Es werden keine Präzisen Ephemeriden, ionosphärischen Modelle usw. benötigt, da die Software keine Berechnung durchführt, sondern nur die Beobachtungen weitersendet. Ein Screenshot inklusive einer Graphik der eingebundenen Referenzstationen ist in Abbildung 4.5 zu sehen.

Die Erstellung des Dienstes ist sehr unkompliziert, da man nur unterscheiden kann, ob man den Dienst für Trägerphasen- oder Codebeobachtungen anbieten möchte. Es werden, wie schon erwähnt, keine Netzfehlermodelle berechnet, sondern nur die Code- bzw. Trägerphasenbeobachtungen der nächsten Station gesendet. Die IP-Adresse, Port und Mountpoint der Beobachtungsdatenströme sind vorab einzustellen. Es gibt außerdem noch die Möglichkeit festzulegen

- Wie viele GPS- und GLONASS-Satelliten eine Station mindestens anmessen muss
- Wie weit die berechnete Position der Station aus den Beobachtungen vom eingestellten Wert entfernt sein kann

Wird in einem Fall der eingestellte Grenzwert überschritten, werden keine Beobachtungen dieser Referenzstation an den Nutzer gesendet. Weiters ist wählbar, ob die Beobachtungen

## KAPITEL 4. LOKALE NETZLÖSUNG MITTELS LEICA SPIDER UND TOPCON TOPNET

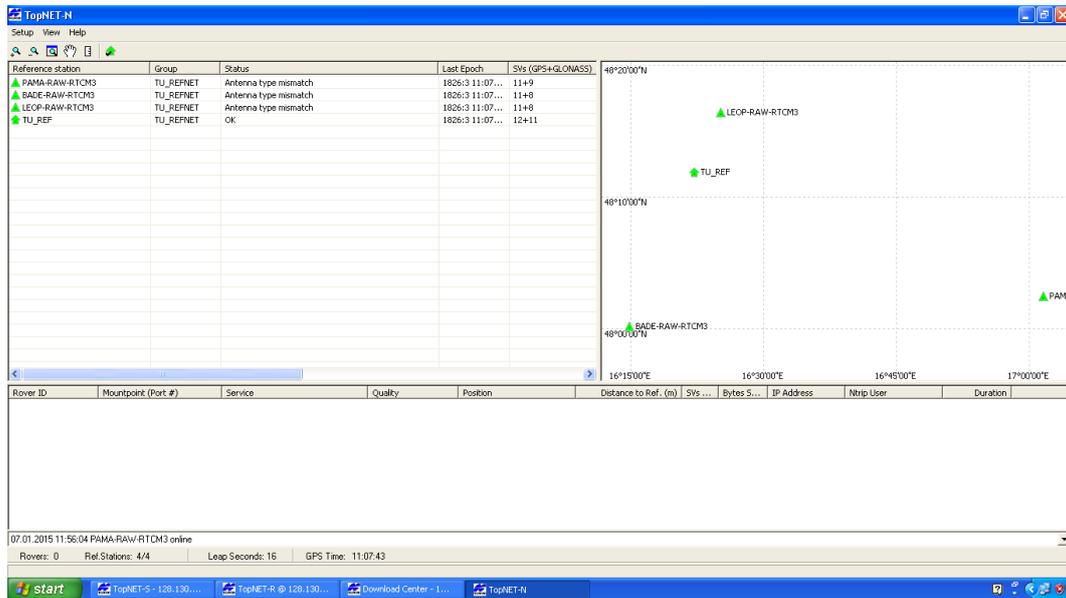


Abbildung 4.5.: Screenshot von TopNET mit eingebundenen Referenzstationen

von der nächsten oder von einer bestimmten, fix vorgegebenen Station gesendet werden. Das Anlegen eines neuen Nutzers ist ebenfalls einfach. Man kann einen Benutzernamen und den zur Verfügung gestellten Dienst bestimmen. In Abbildung 4.6 ist das Referenzstationsnetz mit eingewähltem Nutzer zu sehen.



Abbildung 4.6.: Screenshot von TopNET mit eingebundenen Referenzstationen und eingewähltem Nutzer (roter Punkt)

## Protokolle

Im Programm TopNet können unterschiedliche Protokolle mitgeschrieben werden. Zur Auswahl stehen unter anderem:

- Log files, die von der Anwendung erstellt wurden
- Daten, die an den Rover gesendet wurden
- NMEA-Files
- Daten der Referenzstation

Die Protokolle werden im .rtcm3 Format gespeichert und es stand für diese Arbeit kein Programm zur Verfügung, das diese Dateien in ASCII umwandeln kann. Es war daher nicht möglich, den Inhalt der Files zu analysieren.

### 4.2.3. Reichweite der Korrekturen und gesendete Messages

Mit dem Programm GNSS Surfer wurde ein Nutzer simuliert. Damit ist es möglich sich mit dem Dienst zu verbinden und eine fiktive Position des Rovers als NMEA Nachricht an den Rechner zu senden. Weiters kann das Programm auch die empfangenen RTCM Messages mitschreiben. Dieser Test soll einerseits zeigen, bis zu welcher Entfernung von der Station Korrekturen gesendet werden und andererseits welche Messagetypen ankommen.

Spider sendet Korrekturen an den Nutzer solange der sich innerhalb des Netzes (bezogen auf die Dreiecksseiten) befindet. Gesendet werden die RTCM Messages 1004, 1006, 1008, 1013, 1032 und 1033.

Bei dem Programm TopNet gibt es keine Begrenzung wie weit die Beobachtungsdaten der nächsten Referenzstation gesendet werden. Übertragen werden die RTCM Messages 1004, 1005, 1007, 1012 und 1033. Im Kapitel 3.2.1 wird kurz auf den Inhalt dieser Messages eingegangen, Informationen zum genauen Aufbau sind in [RTCM., 2013] nachzulesen.

## 5. Vergleichsmessungen

Für die Vergleichsmessungen wurden Punkte mit den selbst eingerichteten Vernetzungssoftwares Spider und TopNET und einem bestehendem Dienst (EPOSA) mittels RTK eingemessen. Die Aufnahmen wurden mit dem Receiver G-3 von Topcon ausgeführt.

### 5.1. Echtzeitpositionierung Austria EPOSA

EPOSA wurde 2009 als Kooperation der Firmen BEWAG (der heutigen Energie Burgenland AG), der Wien Energie Stromnetz GmbH (der heutigen Wiener Netze GmbH) und der ÖBB-IKT gegründet. Das Netz besteht aktuell aus 39 Referenzstationen die sich über ganz Österreich erstrecken. In Abbildung 5.1 ist eine Österreichkarte mit den von EPOSA betriebenen Referenzstationen zu sehen.

Die Firma EPOSA nutzt eine Softwarelösung der Firma Geo++. Angeboten werden für registrierte und zahlende Kunden Korrekturen für DGPS und RTK, die in RTCM 2.3 bzw. 3.1 ausgesendet werden. Weiters können zusätzlich zu den Korrekturen Transformationsparameter für die Umrechnung zwischen ITRF und dem Landessystem gesendet werden. Aufgrund der teilweisen hohen Netzspannungen in Österreich können auch Residuenraster zur Korrektur der homogenen ITRF-Koordinaten auf Landeskoordinaten empfangen werden. Genauere Informationen zu EPOSA sind in [Möller, 2010] nachzulesen.

In dieser Arbeit wurde ein Dienst gewählt der mittels VRS-Konzept arbeitet. Die Übertragung erfolgte mit RTCM 3.1 und es wurde keine Transformation ins lokale Koordinatensystem vorgenommen.

### 5.2. Vergleichsmessung Ergebnisse

#### 5.2.1. Messablauf und Datenaufbereitung

Die Vergleichsmessungen wurden auf der Terrasse des neuen Elektrotechnischen Instituts der Technischen Universität Wien durchgeführt. Dort befinden sich vier markierte Punkte (Nägel), die mittels einer statischen Messung im Sommer 2014 eingemessen wur-

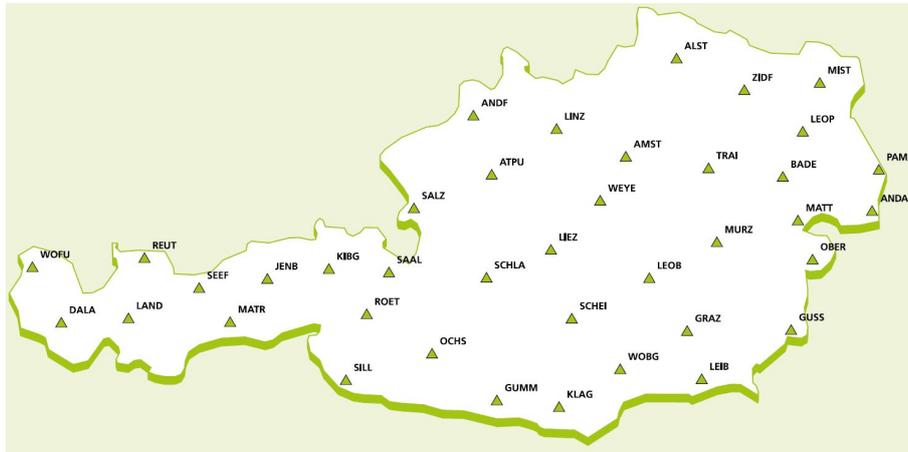


Abbildung 5.1.: Referenzstationsnetz von Eposa (www.eposa.at)

den. In Abbildung 5.2 ist eine schematische Skizze dieser Messpunkte und in Abbildung 5.3 eine Aufstellung der GNSS-Antenne auf einem dieser Punkte zu sehen. Durch die Gebäudemauer im Osten sind die Messpunkte von einer Abschattung betroffen (zu sehen in den Bildern 5.2 und 5.3). Für diese Arbeit wurden alle vier Punkte genutzt, wobei auf Punkt 1 und 4 jeweils 60 Beobachtungen und auf Punkte 2 und 3 jeweils 10 Beobachtungen gemacht wurden. Zur Positionsbestimmung wurden nur GPS Beobachtungen herangezogen, da mit Spider keine GLONASS Korrekturen versendet werden können und sonst die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen nicht gegeben wäre.

Wie schon in Kapitel 4.2.1 festgehalten, werden für das Programm Spider die Beobachtungen der Stationen Leopoldau, Pama und Baden zur Referenznetzberechnung herangezogen. In TopNET sind ebenfalls die Stationen Leopoldau, Pama und Baden eingebunden. Zusätzlich wurde noch die Referenzantenne der TU Wien genutzt.

Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurde für Topcon eingestellt, dass nur Beobachtungen der Station Leopoldau an den Nutzer gesendet werden dürfen.

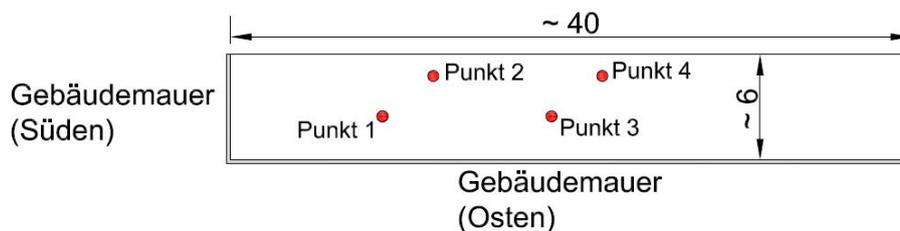


Abbildung 5.2.: Schematische Skizze der Messpunkte auf der Terrasse der TU Wien

Es wurde an den Tagen 9.12, 12.12, 15.12.2014 und 13.1.2015 gemessen. An den ersten



Abbildung 5.3.: Aufstellung auf Punkt 3 auf der Terrasse, Blickrichtung Süden

beiden Tagen wurden auf den Punkten 1 und 4 jeweils 15 Positionsbestimmungen mit den drei Diensten durchgeführt. Am dritten Tag wurden jeweils 10 Messungen mit den drei Diensten auf den Punkten 1, 2, 3 und 4 beobachtet.

Es zeigte sich, dass bei den, mit Spider und TopNET bestimmten, Koordinaten in der Höhenkomponente ein systematischer Fehler auftritt. Es wurden deshalb am 13.1 nochmals 20 Beobachtungen an den Punkten 1 und 4 mit den drei Diensten durchgeführt. Jedoch wurde zuvor bei TopNET und Spider die Antennenkalibrierung auf eine GNSS-Nullantenne gesetzt (siehe Kapitel 5.2.3).

Bei den Messungen wurden die Koordinaten, die DOP-Werte und die Zeit zwischen Aufbau der Verbindung und Mehrdeutigkeitsfestlegung aufgezeichnet. Die Auswertung der Fixierungszeiten wird in Kapitel 5.2.4 diskutiert. Nach der Speicherung der Position erfolgte jeweils eine Trennung vom Dienst und ein Zurücksetzen der Mehrdeutigkeitslösung. Durch diesen Messablauf wurde versucht die Korrelation durch bereits fixierte Mehrdeutigkeiten zwischen den einzelnen Messungen möglichst gering zu halten. Es wurde jedoch nur einmal pro Standort aufgestellt. Nach 5 Aufnahmen wurde der Dienst gewechselt, um eine möglichst ähnliche Satellitengeometrie zu gewährleisten.

Bevor eine statistische Aussage über die gesammelten Daten getroffen werden konnte, wurde ein Ausreißertest durchgeführt. Dazu ist es zuerst notwendig zu testen, ob die Daten normalverteilt sind. Dies geschieht mit einem  $\chi^2$ -Test für Verteilungen mit geschätzten

Parametern [Casparly and K., 2007]. Bei den Punkten 2 und 3, an denen nur 10 Beobachtungen gemacht wurden, ist eine statistische Aussage generell schwierig.

Nicht normalverteilt sind für EPOSA in Punkt 1 die Höhe, für Spider in Punkt 1 die Länge und für TopNET die Höhe in Punkt 1 und alle Koordinatenkomponenten in Punkt 4.

Für die normalverteilten Daten kann ein Ausreißertest durchgeführt werden. Es wird dafür zuerst die Testgröße  $S$  laut Formel (5.1) berechnet.

$$S = \frac{x_{max} - \bar{x}}{\sigma} \tag{5.1}$$

- $S$  = Testgröße
- $x_{max}$  = Maximaler Wert
- $\bar{x}$  = Mittelwert
- $\sigma$  = Standardabweichung

Man vergleicht die Testgröße  $S$  dann mit einem Schwellenwert. Dieser Schwellenwert wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % überschritten. In der Tabelle 5.1 sind die für diese Arbeit genutzten Schwellenwerte aufgeführt. Sie wurden aus [Casparly and K., 2007] entnommen.

Tabelle 5.1.: Schwellenwerte für Ausreißer mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 %

Anzahl der Messwerte	10	20	40	100
Schwellenwerte	2.56	2.80	3.01	3.29

Um Ausreißer in nicht normalverteilten Daten zu finden, wurde mit der Ungleichung von Tschebyscheff gearbeitet. Mit der Gleichung (5.2) werden Vertrauensintervalle festgelegt.  $k$  wird so gewählt, dass der Term auf der rechten Seite die Wahrscheinlichkeit ergibt, mit der der Punkt kein Ausreißer ist. Wie auch beim Ausreißertest soll dieser Wert 95 % sein und somit ergibt sich für  $k = 4.47$ . Das Besondere an der Ungleichung von Tschebyscheff ist, dass man die Verteilung der Daten nicht kennen muss, da sie auf alle Verteilungen anwendbar ist.

$$P(\bar{x} - k * \sigma \leq x \leq \bar{x} + k * \sigma) \geq 1 - \frac{1}{k^2} \tag{5.2}$$

Die detektierten Ausreißer wurden entfernt und mit den verbliebenen Messwerten der Mittelwert und die Standardabweichung der Abweichungen berechnet. Die jeweils gefundenen Ausreißer sind in den Kapiteln der einzelnen Dienste aufgelistet. Diese Abweichun-

gen werden mittels Soll- minus Ist-Koordinate berechnet. Die Sollkoordinate ist die Referenzkoordinate die mittels absoluter Positionierung bestimmt wurde. Die Ist-Koordinate ist der Wert, der mittels der RTK-Beobachtung gemessen wurde.

In den Diagrammen wurden alle Beobachtungen zusammengefasst. Das bedeutet für die Diagramme in Kapitel 5.2.2, dass die ersten 15 Messungen am Tag 1, die Messungen 16-30 am Tag 2 und die Messungen 31-40 am Tag 3 gemessen wurden.

### 5.2.2. Beobachtungen mit Antennenkalibrierung

Die Messungen am 9, 12 und 15. Dezember wurden mit eingelesener Antennenkalibrierung durchgeführt. Die Kalibrierungsfiles wurden ebenfalls von EPOSA zur Verfügung gestellt. Nach den ersten beiden Messtagen zeigte sich, dass bei der Positionsbestimmung mittels den Programmen Spider und TopNET im Punkt 4 die Höhe um 7- 9 cm und bei EPOSA der Mittelwert um nur etwa 1 cm von der Sollkoordinate abweicht. In Punkt 1 betrug dagegen die Abweichung bei EPOSA +3 cm und bei den anderen beiden Diensten -3 cm.

Um Festzustellen, ob es sich bei diesen Abweichungen in der Höhe um systematische Fehler handelt, wurden am dritten Messtag auch an den Punkten 2 und 3 Beobachtungen durchgeführt. Durch diese Messungen zeigte sich, dass die Referenzkoordinate des Punktes 1 schlecht bestimmt war. Diese wurde mit einer erneuten absoluten Positionierung neu berechnet und in den folgenden Auswertungen wird nur noch die aktuelle, besser bestimmte Koordinate des Punktes 1 für Vergleiche herangezogen.

Des Weiteren konnte durch die Messungen an allen vier Punkten verdeutlicht werden, dass die, über die eingerichteten Spider und TopNET Dienste, bestimmten Positionen von einer systematischen Höhenabweichung beeinflusst werden.

### EPOSA

Die Daten, die mit dem Dienst von EPOSA aufgenommen wurden, beinhalteten keinen Ausreißer. In Tabelle 5.2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen Soll- und Ist-Koordinate der Beobachtungen für jeden Punkt aufgelistet. Die maximale Abweichung in der Lage ist mit -1,5 cm die Längskomponente des Punktes 2. Generell ist der Mittelwert der Abweichungen sehr niedrig, das liegt aber auch an der Anzahl der Messungen. Auch die maximale Standardabweichung für die Lage ist in der Längskomponente zu beobachten und liegt bei maximal  $\pm 1.2$  cm bei Punkt 1.

Die maximale Abweichung in der Höhe beträgt -2.7 cm von Punkt 1. Die Höhe hat

mit einer Standardabweichung von maximal  $\pm 1.9$  cm auch die größte Streuung. Alle Koordinatendifferenzen liegen in dem für RTK-Messungen zu erwartendem Rahmen.

Tabelle 5.2.: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate für die gemessenen Punkte mit EPOSA

	Punkt 1			Punkt 2		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	-0,2	0	-2.7	-0.9	-1.5	0.1
Standardab.	0.9	1.2	1.6	0.2	0.2	0.6
	Punkt 3			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	-0.3	-0.5	-0.5	-1.1	-0.4	-1.3
Standardab.	0.8	1.1	0.7	0.6	1.1	1.9

Die Punkte 2 und 3 verhalten sich für alle drei Dienste ähnlich zu 1 und 4 und wurden daher in Anhang B verschoben. In Abbildung 5.4 sind die Abweichungen von den Sollkoordinaten für Punkt 1 dargestellt und in Abbildung 5.5 für Punkt 4. In diesen Diagrammen sowie auch in den Diagrammen 5.6 und 5.7 (Abweichungen für die Software Spider) und 5.8 und 5.9 (Abweichungen für TopNET) ist der gemessenen DOP-Wert als grau hinterlegte Fläche eingezeichnet. Da der DOP-Wert bei keiner Messung über 3,5 steigt, und daher immer eine gute Geometrie gegeben ist, ist keine Abhängigkeit der Abweichungen von diesem Wert sichtbar. Ausnahme bildet eine Messsequenz mit TopNET, bei der die Erhöhung der Abweichung mit einem schlechten DOP-Wert sehr schön zu sehen ist (Abbildung 5.9).

In all diesen Diagrammen werden der Mittelwert und das Band der Standardabweichungen dargestellt. In den Diagrammen aller Dienste kann man eine negative Korrelation von Höhe zu Länge und Breite erkennen. Besonders gut kann man das zum Beispiel in der Abbildung 5.5 bei Messung 27 oder in 5.8 bei Messung 24 sehen. Bei der RTK-Messung werden die Koordinaten zuerst im Referenzrahmen der Stationen berechnet (in diesem Fall ITRF Epoche 2000) und dann in ein topozentrisches Koordinatensystem transformiert. Aufgrund der geografischen Lage Österreichs und somit auch des Messgebietes, ist die y-Koordinate gegenüber der x- bzw. z-Koordinate klein. Bei der Transformation hängt somit die Breite und die Höhe hauptsächlich von der x- bzw. z-Komponente ab. Ist z schlecht bestimmt und z.B. zu groß, ist auch die Höhe zu groß, jedoch die Breite zu klein. Daher sind die Abweichungen der beiden Komponenten oft negativ korreliert.

Man erkennt außerdem an vielen Stellen, dass sich die Breiten- und Längskomponente ähnlich zueinander bewegen, wie zum Beispiel in Abbildung 5.5 bei der Messung 27. Dies deutet auf eine schlecht bestimmte x-Komponente hin.

Einen Sprung der Höhenkomponente um 8.9 cm zwischen den Messungen 24-27 sieht man in 5.5. Die Ursache lässt sich allerdings aus den aufgezeichneten Daten nicht nachvollziehen.

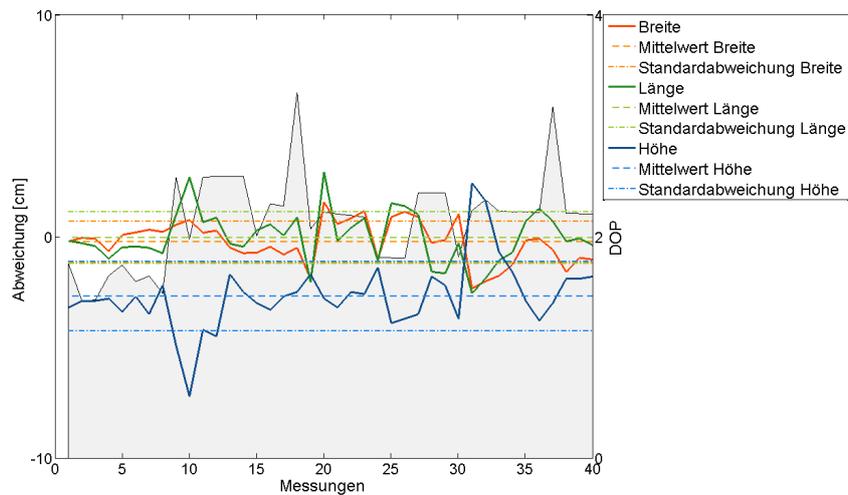


Abbildung 5.4.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 1

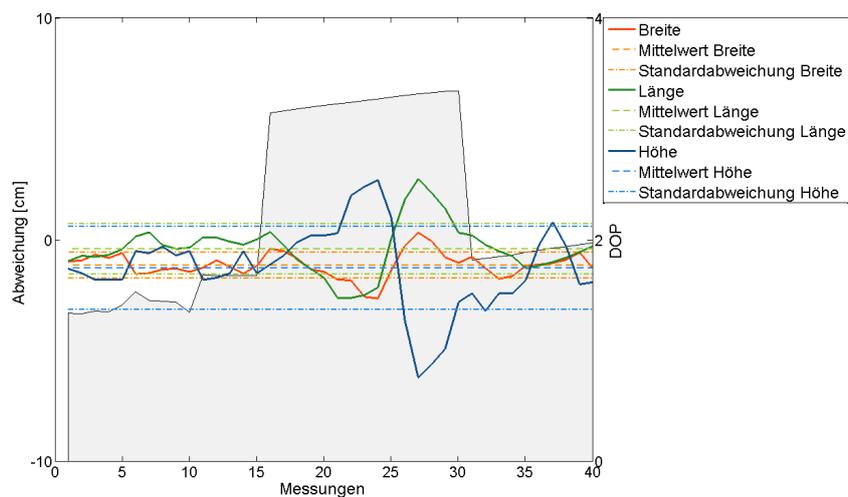


Abbildung 5.5.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 4

## Spider

Bei den Messungen mit Hilfe der von Spider erstellten Korrekturdaten konnten 3 Ausreißer detektiert werden. Bei Punkt 3 war in zwei aufeinanderfolgenden Messungen die Höhe über dem zulässigen Grenzwert und in Punkt 4 wurde der Grenzwert der Breite einmal überschritten. Wie schon am Beginn dieses Kapitels erwähnt, ist die Höhe mit einer durchschnittlichen Abweichung von 7-9 cm auffällig (siehe Tabelle 5.3). Die Standardabweichung ist mit maximal 1 cm besser als die von EPOSA und TopNET. Die Breite und Länge haben eine durchschnittliche Abweichung vom Sollwert von unter 1 cm. Sie liegen damit im Bereich der Abweichungen von EPOSA.

Tabelle 5.3.: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate für die gemessenen Punkte mit Spider

	Punkt 1			Punkt 2		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	0.3	0.1	-9.9	-0.4	-0.4	-7.4
Standardab.	0.7	0.7	1.0	0.2	0.2	0.5
	Punkt 3			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	-0.9	-0.2	-8.5	-0.6	0.0	-9.4
Standardab.	0.2	0.7	0.5	0.3	0.4	0.8

In den Diagrammen 5.6 und 5.7 sind die Beobachtungen an den Punkten 1 und 4 dargestellt. Anders als in den meisten anderen Diagrammen, kann man in Abbildung 5.7 nicht erkennen, dass sich die Höhe in einer Abhängigkeit von der Breite verhält. In Abbildung 5.6 ist dieses Verhalten jedoch wieder ersichtlich.

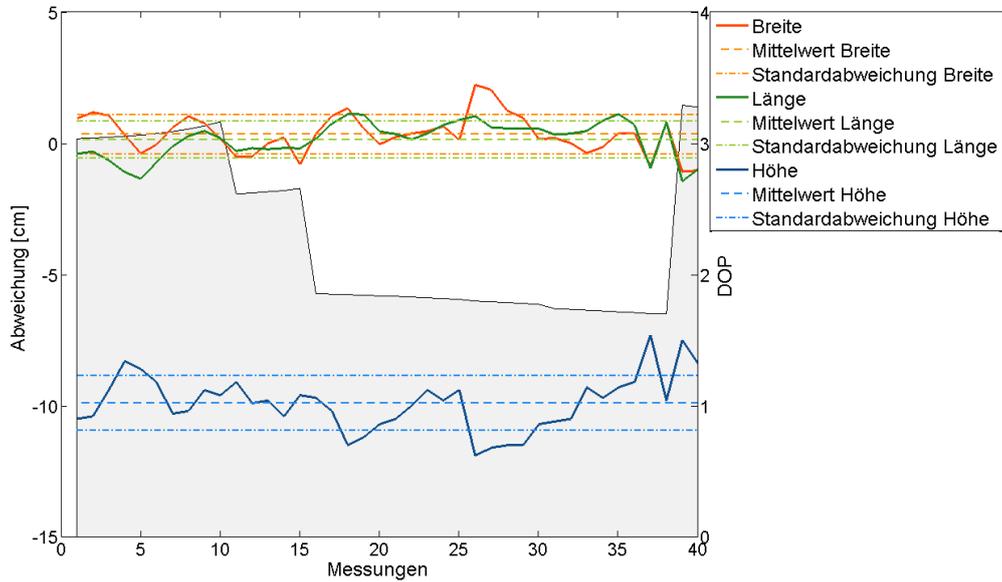


Abbildung 5.6.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 1

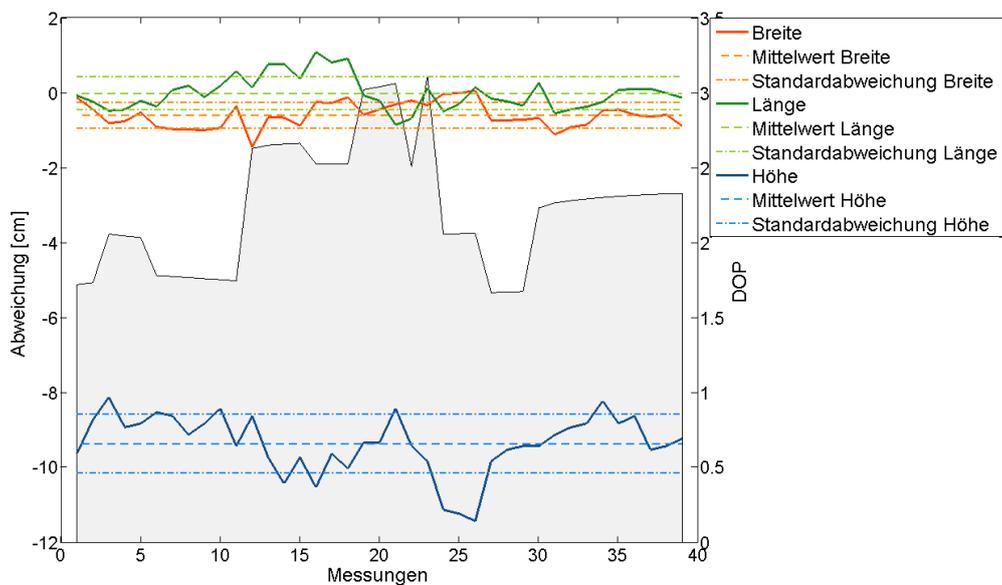


Abbildung 5.7.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 4

### TopNET

In Tabelle 5.4 sind der Mittelwert und Standardabweichung der Beobachtungen mit TopNET aufgelistet. Bei den Messungen konnten keine Ausreißer detektiert werden. Wie schon bei Spider ist die mittlere Abweichung in der Höhe mit bis zu 9 cm sehr groß. Auch die Abweichungen in der Breite betragen bis zu 2.5 cm und sind damit um das Doppelte größer als bei EPOSA und Spider. Dies deutet wiederum auf eine schlecht bestimmte z-Komponente hin. In der Längenkomponekte sind hingegen die Abweichungen im Bereich der beiden anderen Dienste. Auch die Standardabweichung ist außer im Punkt 2 größer als 1 cm, und damit höher als bei EPOSA und Spider. Die maximale Streuung ist in Punkt 4 in der Höhenkomponente sichtbar.

Tabelle 5.4.: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate für die gemessenen Punkte mit TopNET

	Punkt 1			Punkt 2		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	-0.8	-0.9	-9.7	-2.5	-1.6	-7.2
Standardab.	1.4	1.5	1.6	0.6	0.4	1
	Punkt 3			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	1.6	-0.4	-9.1	-2.5	-0.4	-6.9
Standardab.	1.1	1.2	1.4	1.0	1.0	3.1

In den Diagrammen 5.8 und 5.9 sind die Messreihen an den Punkten 1 und 4 zu sehen. Im Diagramm 5.9 sieht man den Grund für die große Standardabweichung in der Höhe dieser Messreihe. Ab Messung 25 steigt die Abweichung kontinuierlich. Durch diesen langsamen Anstieg werden die Werte auch nicht als Ausreißer eingestuft. Die 31. Messungen wurde an einem anderen Tag gemessen, darum der rasante Abfall der Abweichung. Der Grund für dieses Verhalten lässt sich mit einem schlechteren DOP-Wert erklären. In Abbildung 5.9 ist ab Messung 24 ein Sprung in den DOP-Werten ersichtlich, die Erklärung hierfür ist, dass zwischen Messung 23 und 24 mit den anderen Diensten gemessen wurde. Man kann gut erkennen, dass die Höhenkomponente während der Messungen eine immer größer Abweichung erhält.

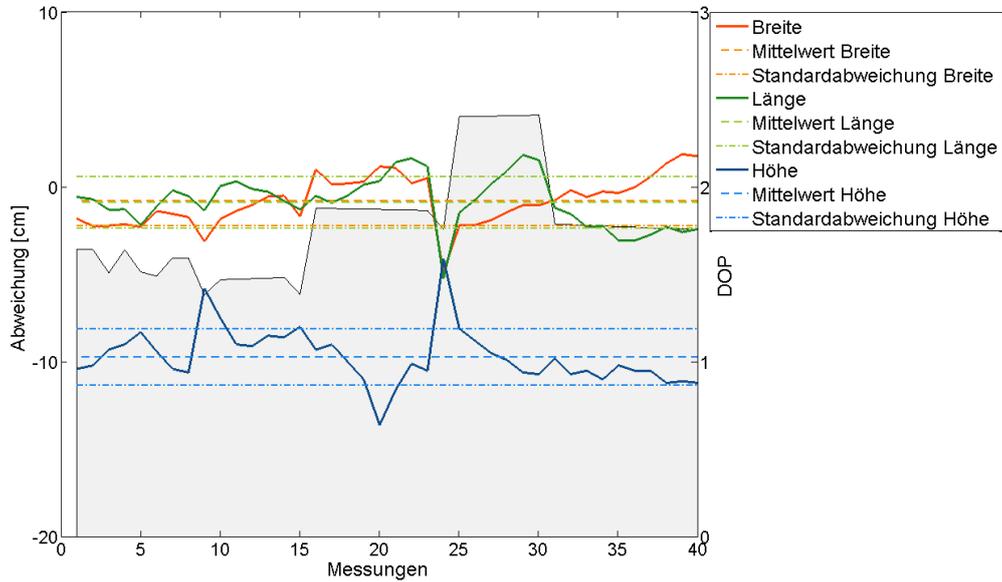


Abbildung 5.8.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 1

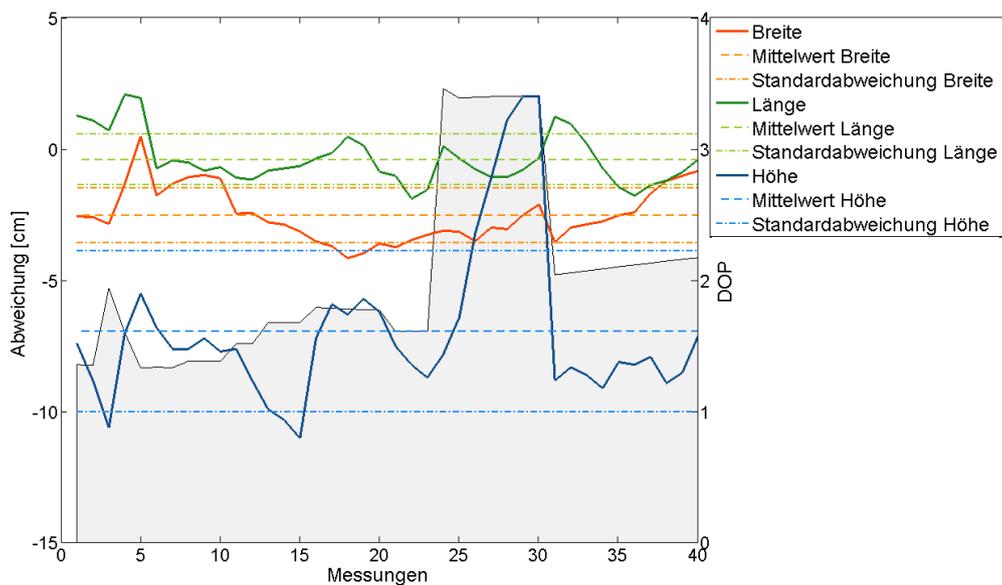


Abbildung 5.9.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 4

**Punkt 1**

In den Diagrammen 5.10 bis 5.12 werden die Abweichungen vom Referenzwert der Breite, Länge und der Höhe der einzelnen Dienste im Punkt 1 miteinander verglichen. Das Diagramm 5.10 zeigt in rot die Abweichungen der Breite für EPOSA (in Abbildung 5.4 ebenfalls die rote Kurve). In grün werden die Abweichungen der Breite basierend auf Spider-Korrekturen gezeigt (Abbildung 5.6) und in blau die Abweichungen mit TopNET. In den Diagrammen soll der Unterschied im Mittelwert und die Streuung der einzelnen Dienste grafisch dargestellt werden. Bei allen Koordinatenkomponenten erkennt man, dass EPOSA die genauesten Ergebnisse liefert, da der Mittelwert der Abweichungen am geringsten ist. In der Breite sind die Abweichungen von Spider und TopNET ungefähr gleich groß, wohingegen in der Länge Spider näher am Sollwert liegt. Wie auch in Punkt 4 (Kapitel 5.2.2) sieht man im Diagramm 5.12, dass die Abweichungen in der Höhe für die getesteten Programmpakete groß ist.

In den folgenden Diagrammen erkennt man zudem besser als im Diagramm 5.8, die bei TopNET aufgetretenen größeren Abweichungen in der Messung 24.

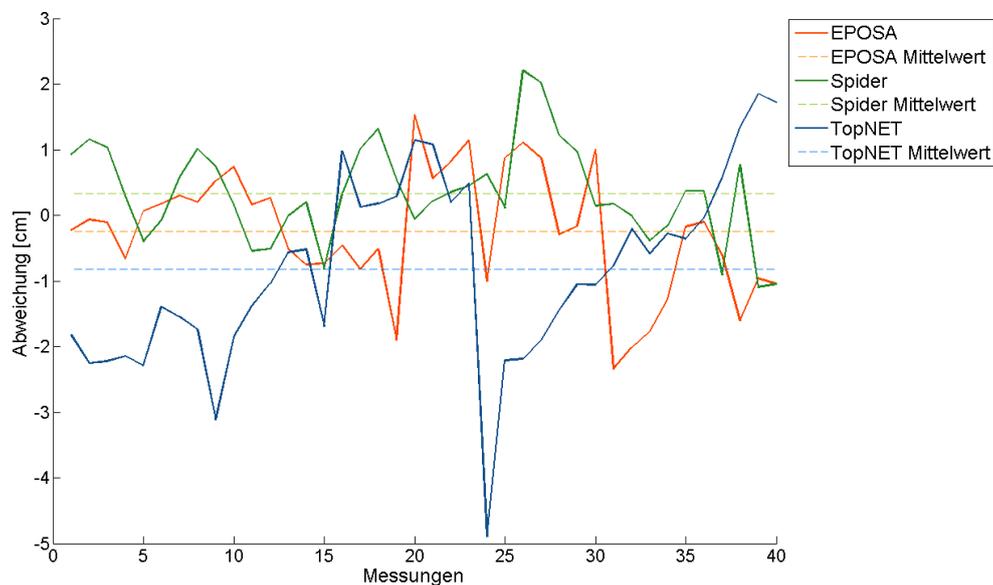


Abbildung 5.10.: Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 1

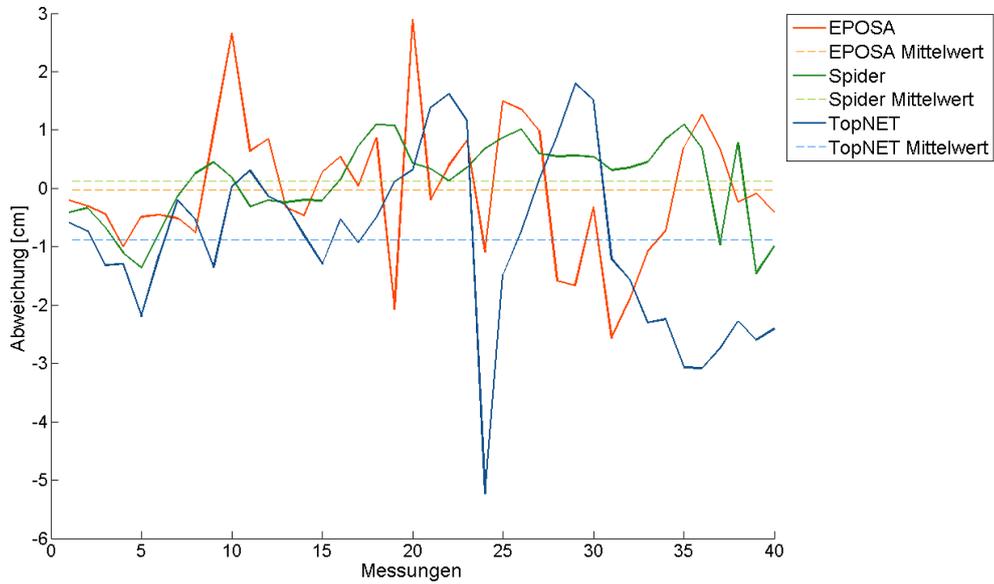


Abbildung 5.11.: Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 1

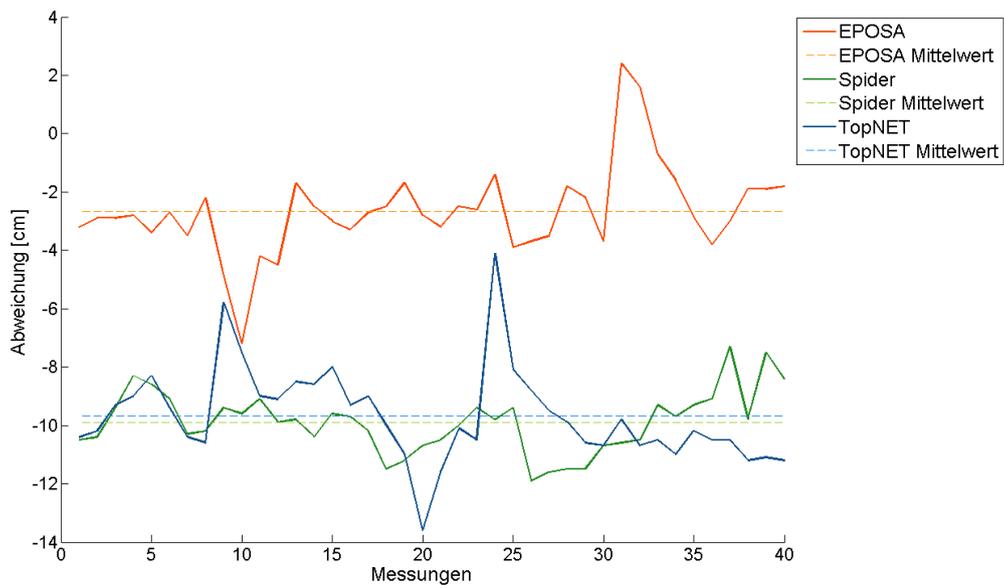


Abbildung 5.12.: Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 1

**Punkt 4**

In den Diagrammen 5.13 bis 5.15 werden die Abweichungen der Breite, Länge und der Höhe der einzelnen Dienste im Punkt 4 miteinander verglichen.

In der Breite erkennt man, dass TopNET wesentlich größere Abweichungen aufweist, außerdem variieren die Abweichungen sehr stark. Im Gegensatz dazu liegen die Abweichungen in der Längskomponente sehr knapp beieinander. Der Mittelwert von EPOSA und TopNET überschneidet sich, daher ist in Diagramm 5.14 der Mittelwert von EPOSA nicht dargestellt. Man stellt fest, dass die Messwerte von EPOSA etwas mehr variieren.

In Diagramm 5.15 sieht man, dass die Programme Spider und TopNET einen Offset in der Höhe aufweisen. Durch den schon zuvor erwähnten Sprung in der Höhe liegt der Mittelwert von den TopNET Messungen aber näher am Sollwert.

Bei allen drei Lagekomponenten sieht man, dass die Streuung der Leica Spider Positionierung, am geringsten ist.

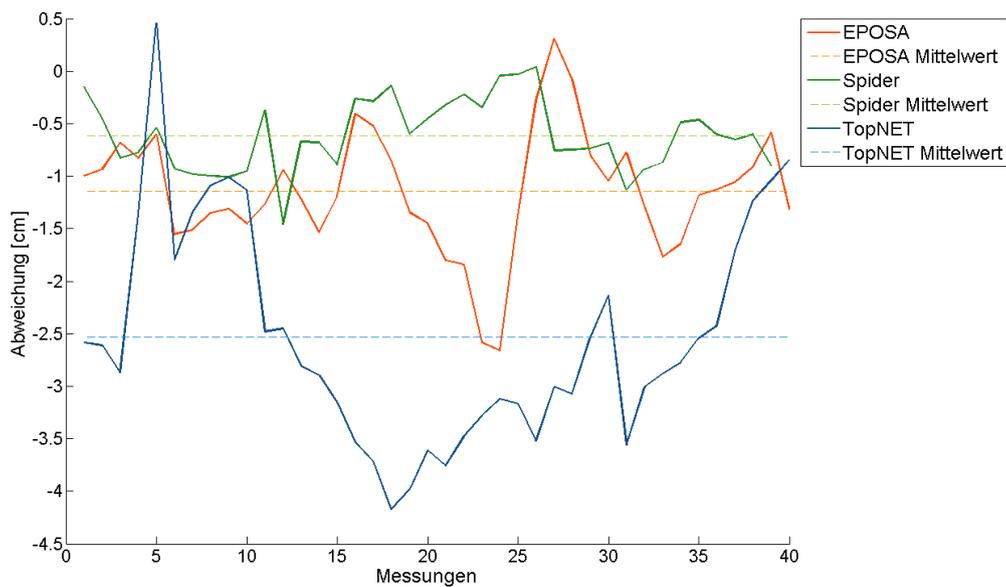


Abbildung 5.13.: Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 4

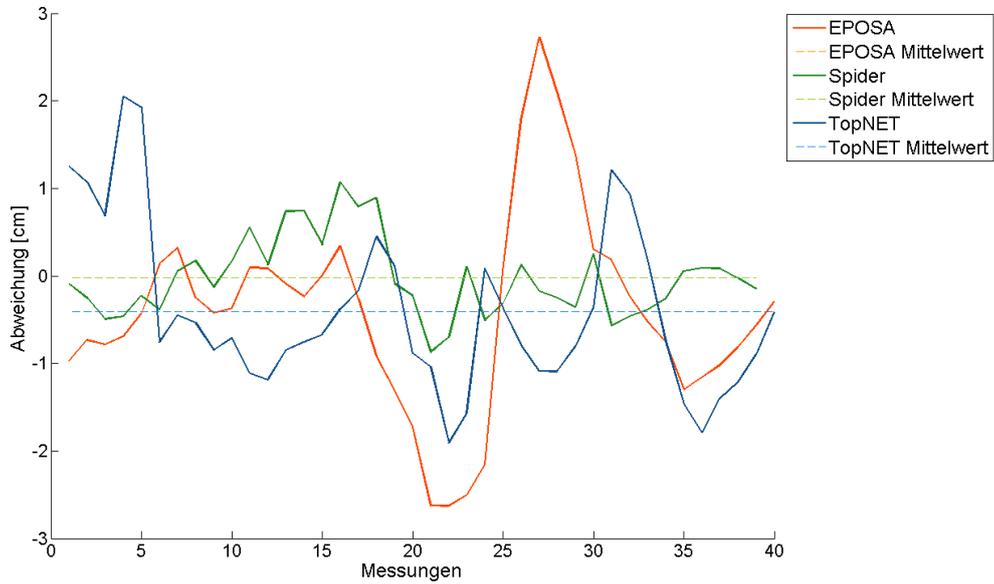


Abbildung 5.14.: Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 4

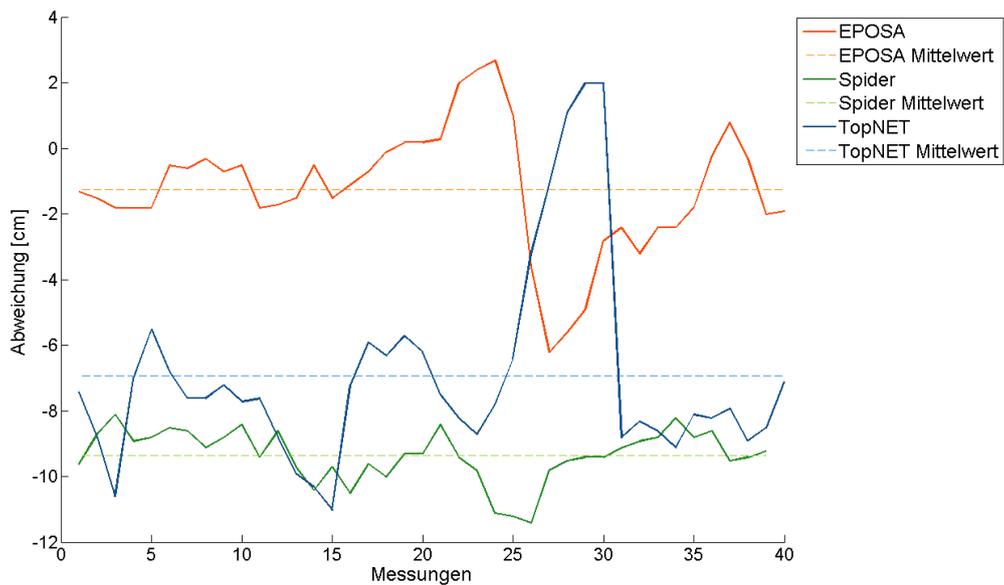


Abbildung 5.15.: Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 4

### 5.2.3. Beobachtungen mit Nullantenne

Wie in Kapitel 5.2.2 erwähnt, ist der Mittelwert der Abweichungen von der Sollkoordinate in der Höhe mit etwa 9 cm für die selbst eingerichteten Dienste zu groß. Die Vermutung liegt nahe, dass es mit der Antennenkalibrierung Probleme gibt. Wie schon in Kapitel 4.2.1 erklärt, kann man in Spider die Antennenkalibrierungsfiles für die Referenzstationen einlesen. In TopNET (Kapitel 4.2.2) kann man nur aus den verfügbaren Antennen auswählen und es werden dann die voreingestellten Werte übernommen.

Um zu testen, ob eine falsche Antennenkalibrierung der Auslöser der Höhenfehler ist, wurde bei allen Referenzstationen und in beiden Programmen eine sogenannte „Nullantenne“ eingestellt.

Nach der Änderung der Antennenkalibrierung wurden erneut Messungen mit allen drei Diensten an den Punkten 1 und 4 durchgeführt. Die Diagramme der Messreihen unterscheiden sich in ihrem Verhalten nicht wesentlich von denen der Messungen mit eingestellter Antennenkalibrierung (Kapitel 5.2.2), außer dass die Mittelwerte der Abweichungen sich deutlich den Sollwerten annähern. Die Diagramme sind in Anhang C zu finden.

### Abweichungen mit und ohne Antennenkalibrierung

#### Spider

In der Tabelle 5.5 sind die Werte der Antennenkalibrierungen der verwendeten Stationen aufgelistet. Abhängig von der Frequenz werden unterschiedliche Korrekturen angebracht. In Tabelle 5.6 ist eine Auflistung der Mittelwerte und Standardabweichung für die einzelnen Koordinatenkomponenten in den Punkten 1 und 4. Betrachtet man die Höhe, sieht man, dass die mittlere Abweichung nun bei ca. -2.3 cm ist. Vergleicht man diese Werte mit denen in Tabelle 5.3 erhält man Tabelle 5.7.

Tabelle 5.5.: Kalibrierungen der verwendeten Stationsantennen

	Frequenz 1			Frequenz 2		
	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Baden	-0.27	-0.30	64.66	0.75	-0.35	96.99
Leopoldau	0.13	0.00	66.70	1.15	0.06	96.49
Pama	-0.27	-0.21	61.86	0.80	0.79	96.33

In dieser ist die Differenz zwischen den mittleren Abweichungen der Koordinaten von

Tabelle 5.6.: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate für die gemessenen Punkte mit Spider

	Punkt 1			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	0.1	0.3	-2.5	-0.3	0.1	-2.1
Standardab.	0.5	0.3	0.9	1.1	0.8	1.3

den Beobachtungen mit und ohne Antennenkalibrierung eingetragen. Man sieht, dass die Differenz in Länge und Breite sehr gering ist, was auch mit der Antennenkalibrierung (Tabelle 5.5) gut zusammenpasst. Es werden also bei Spider die Antennenkalibrierungen angebracht, jedoch verschlechtert sich dadurch die Genauigkeit der gemessenen Punkte.

Tabelle 5.7.: Differenz der Abweichungen der Messungen mit und ohne Antennenkalibrierung für Spider

	Punkt 1			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Differenz	0	0	-7.4	-0.1	-0.3	-7.3

In den Diagrammen 5.16 und 5.17 werden die Messreihen mit und ohne Antennenkalibrierung im Punkt 1 dargestellt. Für den Punkt 4 gelten die Diagramme 5.18 und 5.19. Man erkennt bei beiden Punkten, dass sich die Abweichungen der Länge und Breite nur minimal unterscheiden. In der Höhe kann allerdings eine deutliche Verbesserung registriert werden, wie schon in der Tabelle 5.6 gezeigt.

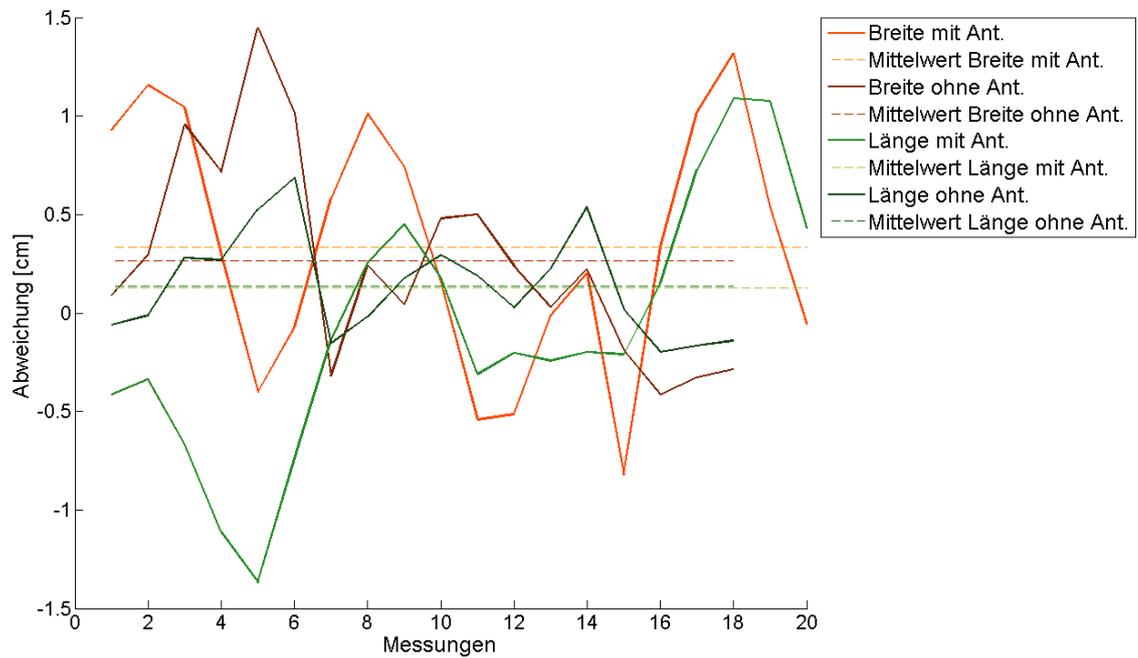


Abbildung 5.16.: Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm Spider im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung)

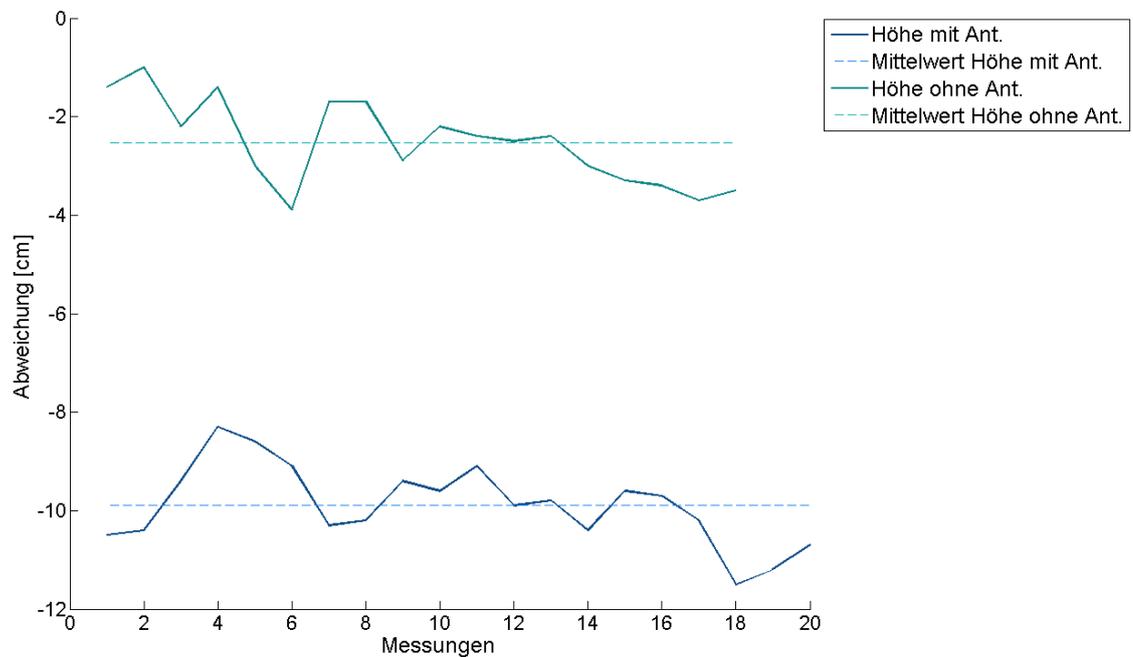


Abbildung 5.17.: Abweichungen der Höhenkomponente (Programm Spider im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung)

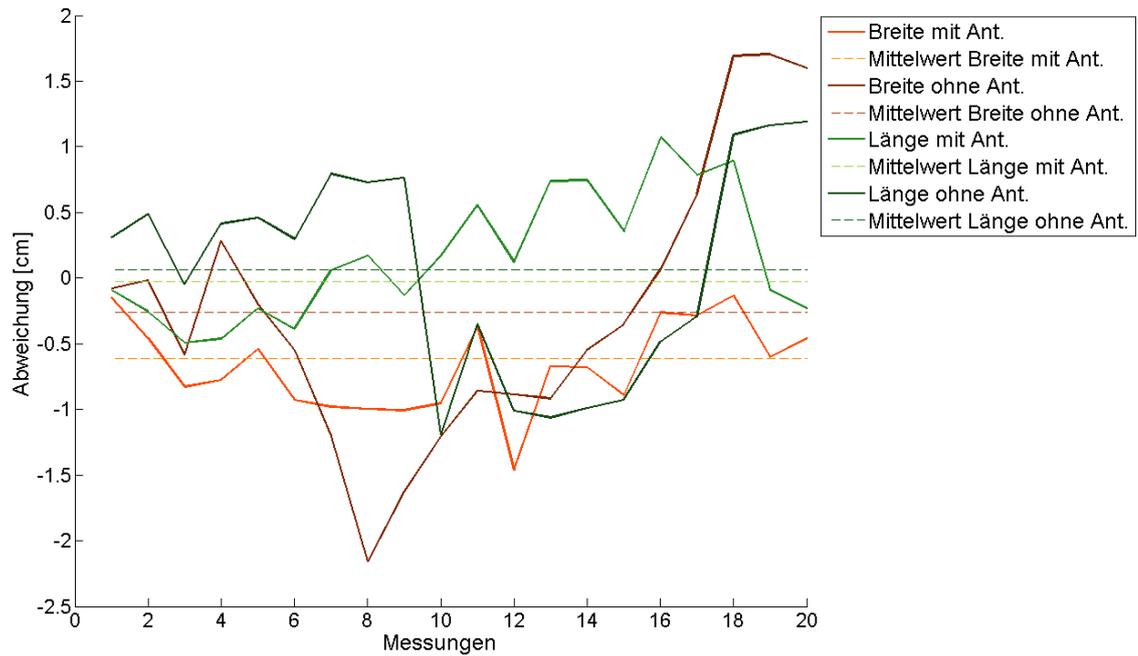


Abbildung 5.18.: Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm Spider im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung)

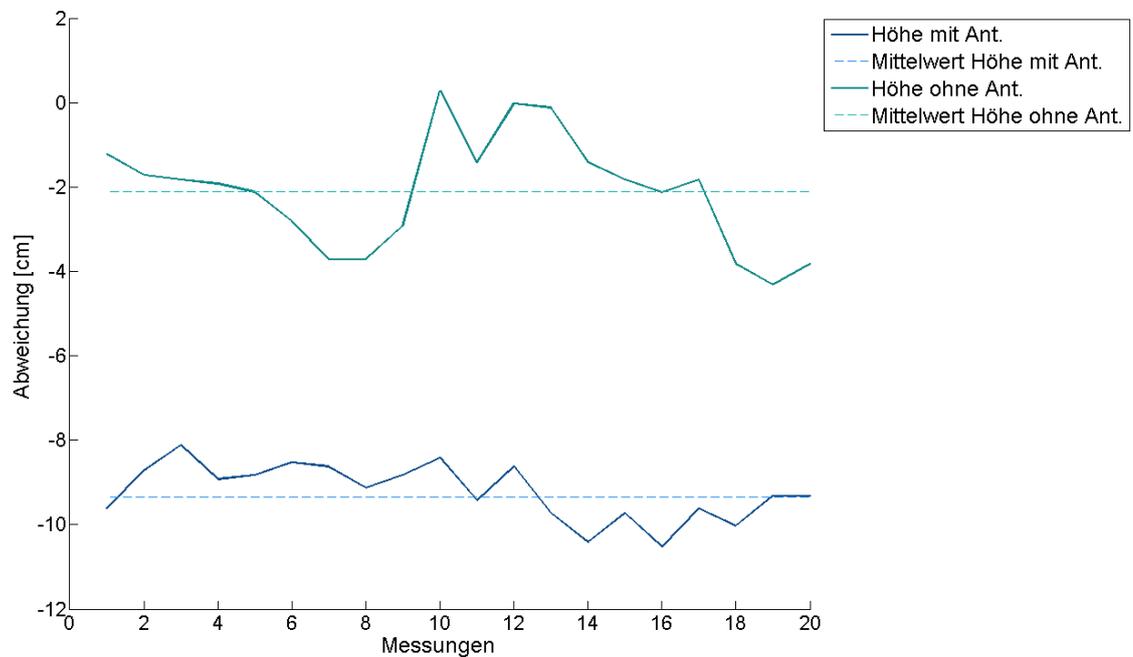


Abbildung 5.19.: Abweichungen Höhenkomponente (Programm Spider im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung)

## TopNET

Wie schon in Kapitel 4.2.2 erwähnt, wurde im Programm TopNET bei allen Stationen dieselbe Antennenkalibrierung verwendet. Die Werte der Kalibrierung sind in Tabelle 5.8 aufgelistet. Die Korrektur in der Höhe ist in derselben Größenordnung, wie in den Antennenkalibrierungsfiles, die in Spider eingelesen wurden (Tabelle 5.5).

In Tabelle 5.9 sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate aufgelistet. Man sieht, dass im Gegensatz zu Spider auch die Längskomponente Fehler von ca. -2.7 cm aufweist. Dies ist auf die geringere Anzahl an Messungen, im Gegensatz zu den Messungen mit Antennenkalibrierung, zurückzuführen. Diese Abweichung liegt jedoch im Bereich der RTK-Genauigkeiten.

Tabelle 5.8.: Kalibrierung der verwendeten Stationsantennen

Frequenz 1			Frequenz 2		
Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
-0.34	-0.14	63.68	0.46	0.24	96.75

Tabelle 5.9.: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Koordinate für die gemessenen Punkte mit TopNET

	Punkt 1			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Mittelwert	-1.3	-2.4	-2.8	-0.9	-3.4	-2.3
Standardab.	0.4	0.8	0.8	1.2	0.6	2.5

In der Tabelle 5.10 sind die Differenzen der Mittelwerte der Abweichungen für die Messungen mit und ohne Antennenkalibrierung aufgelistet. Wie auch schon im Programm Spider sind die Abweichungen in der Höhe etwa so groß wie die Antennenkalibrierung (siehe Tabelle 5.8). Die Höhe in Punkt 4 hat auch schon bei den Messungen mit Antennenkalibrierung eine geringere Abweichung als die in Punkt 1.

In den Diagrammen 5.20 bis 5.23 sind die Abweichungen mit und ohne Antennenkalibrierung grafisch dargestellt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Abweichung in der Höhe in beiden Programmen geringer ist, wenn man die Antennenkalibrierung weglässt. Der Grund konnte nach längerer Fehlersuche in den eingebundenen Beobachtungsdatenströmen gefunden

Tabelle 5.10.: Differenz der Abweichungen der Messungen mit und ohne Antennenkalibrierung für TopNET

	Punkt 1			Punkt 4		
	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [cm]	Höhe [cm]
Differenz	0.4	1.6	-6.9	0.5	0.9	-4.6

werden. Diese werden nicht, wie erwartet, als Rohdaten gesendet. In einem Zwischenschritt wurden an die Beobachtungen schon die Antennenkalibrierung angebracht. Es ist daher notwendig, bei der Einrichtung des Netzes für die Antennenkalibrierungen der Referenzstationen eine „Nullantenne“ zu setzen. In zukünftigen Arbeiten ist es daher wichtig, darauf zu achten welche Korrekturen an die eingebundenen Datenströme angebracht wurden.

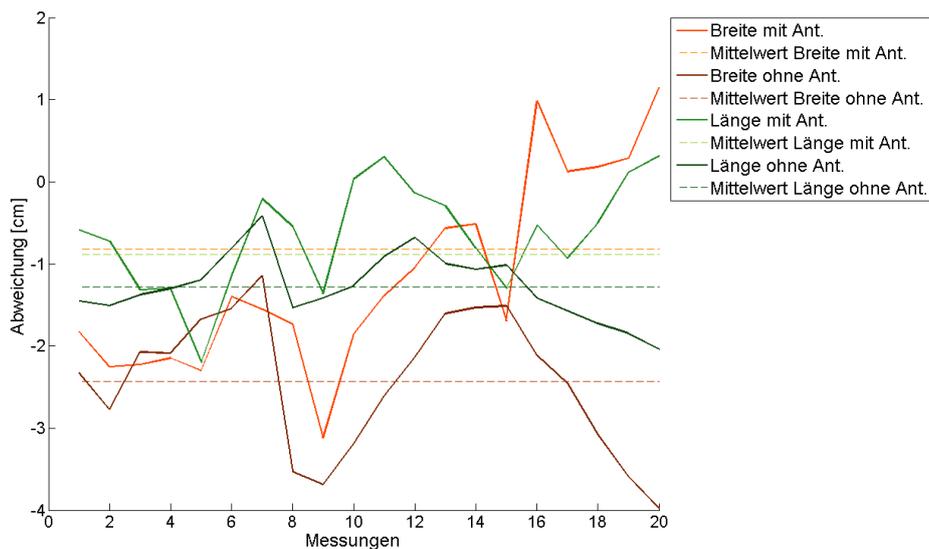


Abbildung 5.20.: Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm TopNET im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung)

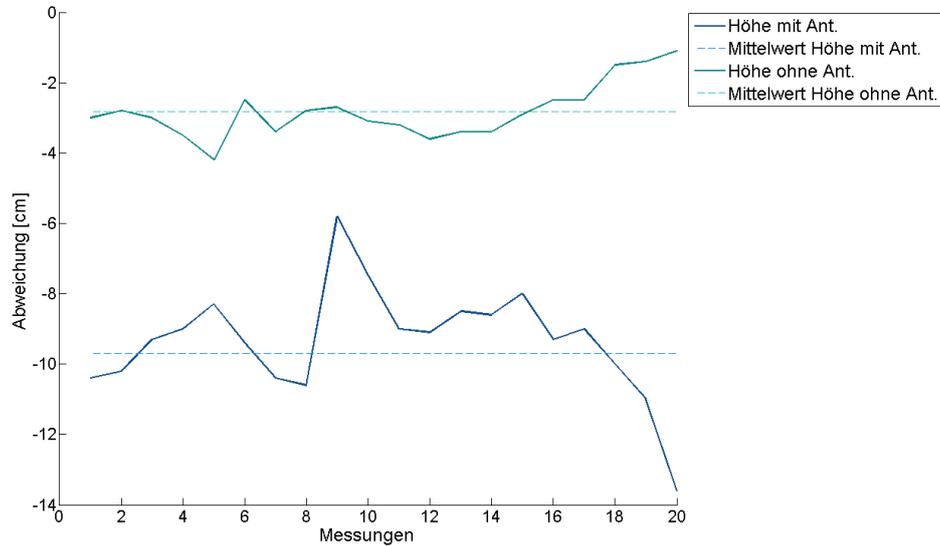


Abbildung 5.21.: Abweichungen der Höhenkomponente (Programm TopNET im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung)

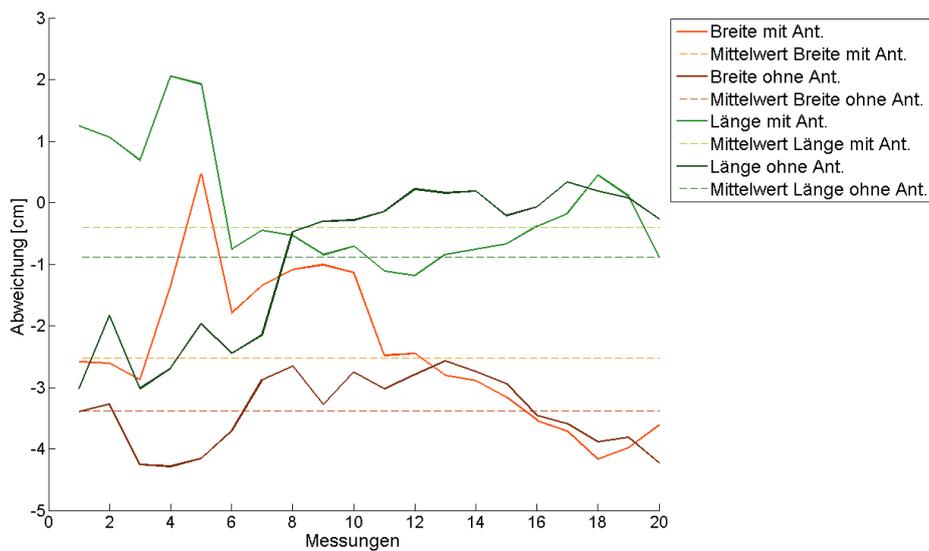


Abbildung 5.22.: Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm TopNET im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung)

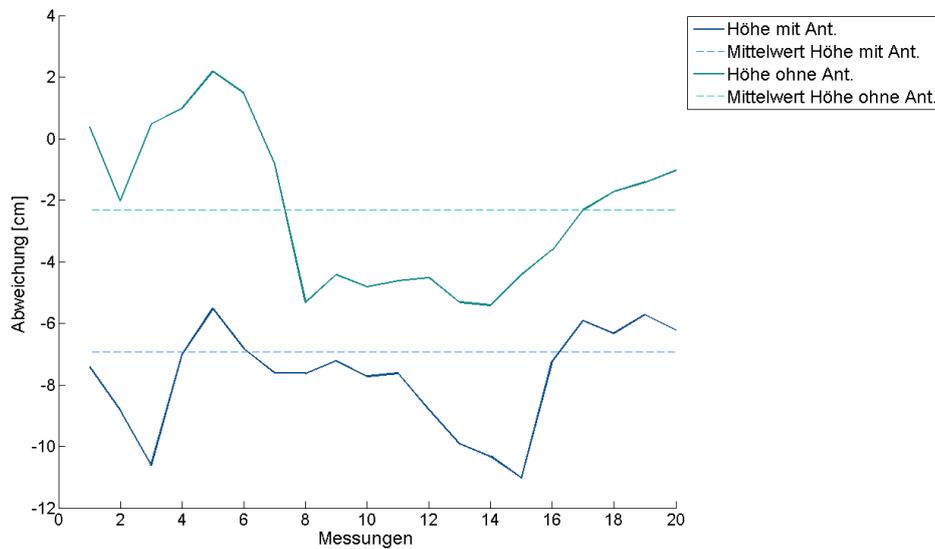


Abbildung 5.23.: Abweichungen der Höhenkomponente (Programm TopNET im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung)

### Abweichungen vor und nach ITRF-Umstellung EPOSA

Für den Dienst EPOSA wurde mit 1. Jänner 2015 ein neuer Koordinatenrahmen mit veränderter Bezugsepoche als Grundlage eingeführt. Zuvor bezogen sich die Koordinaten auf den ITRF2000 zur Epoche 1997.0. Nach dem 1. Jänner 2015 beziehen sich EPOSA-Koordinaten auf den ITRF2008 zur Epoche 2010.0. Da eine Messung am 13. Jänner durchgeführt wurde, mussten die Koordinaten in die alte Epoche transformiert werden. Dies geschieht indem man einen Korrekturvektor addiert. Dieser Vektor ist genähert in Tabelle 5.11 ersichtlich. Bringt man den Korrekturvektor an, sind keine signifikanten Abweichungen zwischen den Messungen im Jahr 2014 und 2015 zu beobachten.

Tabelle 5.11.: genäherter Korrekturvektor zwischen ITRF2008 (Epoche 2010.0) und ITRF200 (Epoche 1997.0)

kartesische Koordinaten		
x [cm]	y [cm]	z [cm]
22	-24	-14

### 5.2.4. Fixierungszeiten der Mehrdeutigkeiten

Wie schon in Kapitel 5.2.1 beschrieben, wurde die Zeit zwischen erfolgreicher Verbindung mit dem Dienst und gelungener Fixierung der Mehrdeutigkeit händisch mitgestoppt.

#### EPOSA

Die Fixierungszeiten des Dienstes von EPOSA sind im Diagramm 5.24 grafisch dargestellt. Die Datenreihe ist normalverteilt und enthält einen Ausreißer, der die anderen Werte um ein vielfaches übersteigt. Grund dafür könnten Mehrwegeffekte sein. Der Mittelwert der Messdaten ist 10,5 sec mit einer Standardabweichung von 2,8 sec.

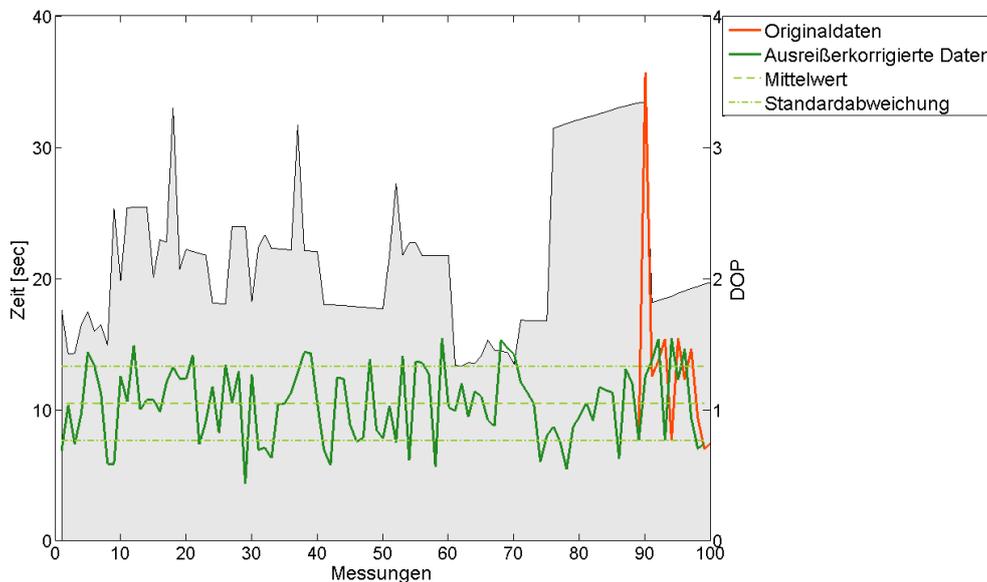


Abbildung 5.24.: Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit EPOSA

#### Spider

Die Messreihe ist in Abbildung 5.25 zu sehen. Da der Test auf Normalverteilung negativ ausgefallen ist, wurden mittels der Ungleichung von Tschebyscheff vier Ausreißer detektiert und entfernt. Der Mittelwert beträgt 13,1 sec mit einer Standardabweichung von 4.2 sec.

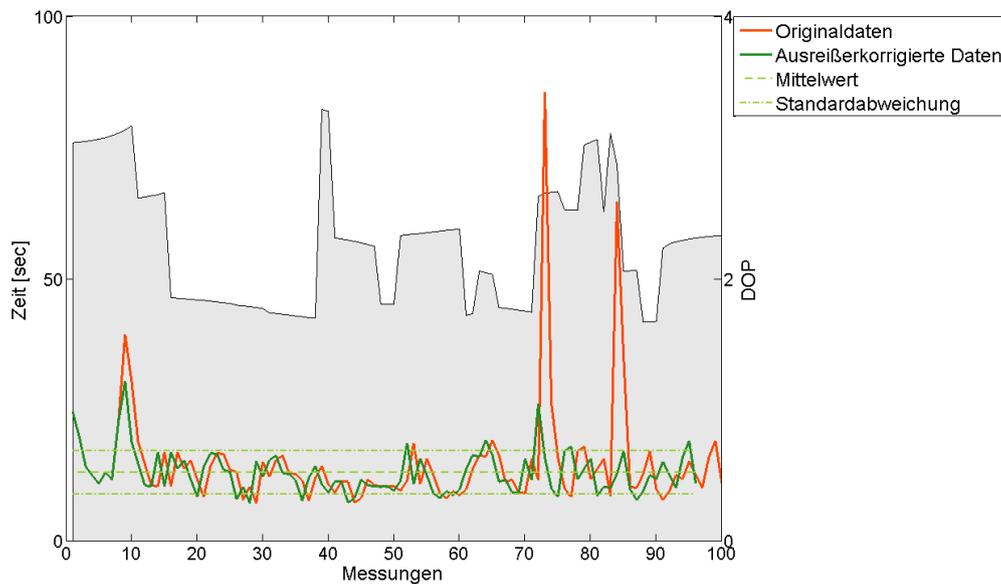


Abbildung 5.25.: Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit Spider

### TopNET

Diese Datenreihe ist ebenfalls nicht normalverteilt und es wurden beim Ausreißertest keine signifikant erhöhten Werte detektiert. Zur Messung allgemein ist zu sagen, dass die Fixierungszeit sehr schnell war. Die Fixierung geschah so rasch, dass schon beim Starten des Programmes zur Punktaufnahme auf dem Feldrechner eine Fixierung vorlag. Es konnte somit nicht ermittelt werden, wie schnell die Fixierung wirklich geschieht. Dies ist aber nicht überraschend, da in TopNET keine Netzkorrekturen berechnet werden. In Abbildung 5.26 ist die Datenreihe zu sehen. Sie hat einen Mittelwert von 2.9 sec und eine Standardabweichung von 0.4 sec.

### Vergleich der drei Dienste

Im Diagramm 5.27 ist der Vergleich der drei Dienste zu sehen. Man kann deutlich erkennen, dass mit TopNET die Positionierung um etwa  $2/3$  schneller war, als bei den beiden anderen. Auch die Streuung der Messwerte ist viel geringer, dies liegt jedoch wie oben schon erwähnt, an der Messkonstellation.

Die Mittelwert der Fixierungszeiten von Eposa und Spider unterscheiden sich nur um 3 sec. Spider hat allerdings eine höhere Streuung der Messwerte. Mit allen drei Diensten gelang die Fixierung unter den, am Messdach herrschenden geometrischen Voraussetzungen, sehr schnell.

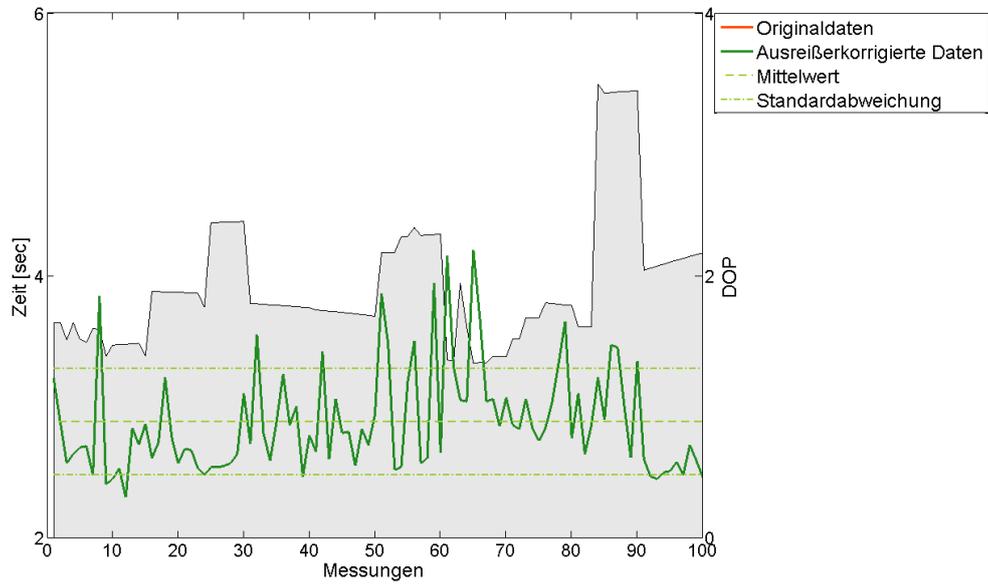


Abbildung 5.26.: Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit TopNET

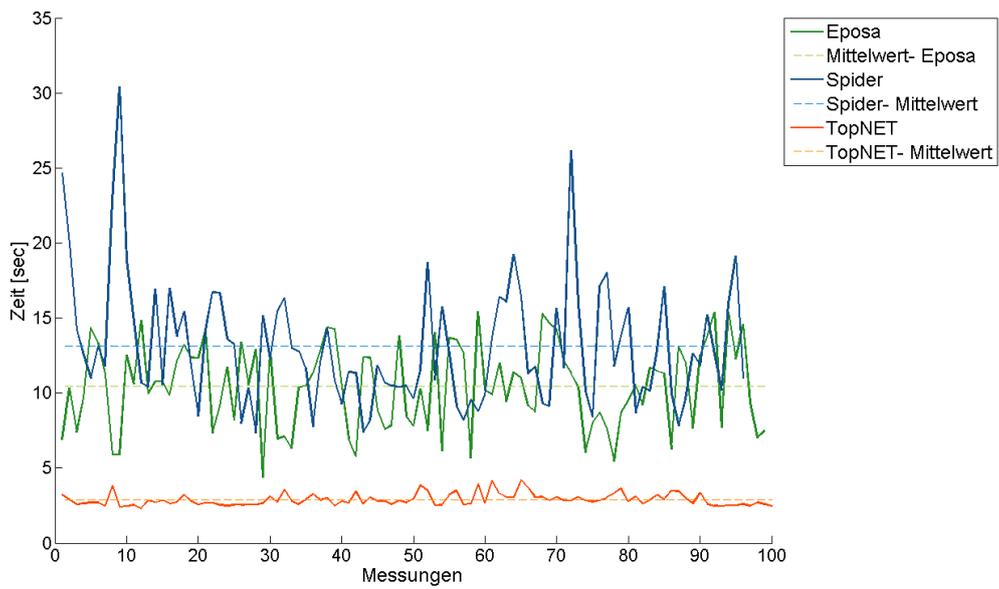


Abbildung 5.27.: Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung

## 6. Zusammenfassung

Im Folgenden werden kurz die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zusammengefasst.

Mit dem Programm Spider (Leica Geosystems AG) werden Referenzstationen vernetzt und die damit berechneten Korrekturen an einen Nutzer gesendet. Die Struktur und Bedienung des Programms sind relativ komplex, jedoch kann man für das eingerichtete Netz viele Parameter bestimmen und es so nach den eigenen Anforderungen gestalten.

Das Programm TopNET (Topcon Corporation) dagegen versendet in der genutzten Test-Version nur die Beobachtungen der nächstgelegenen Referenzstation, es wird also keine Vernetzung berechnet. Der Aufbau ist deshalb auch sehr einfach gestaltet und es können nur wenige Einstellungen getroffen werden.

Bei den Testmessungen mit einem bestehenden, österreichweiten Dienst (EPOSA) zeigte sich, dass alle drei Varianten in den Lagekoordinaten Genauigkeiten in dem für RTK zu erwartendem Bereich lieferten. Die Positionsbestimmung gelang mit dem Dienst von TopNET am schnellsten, dies liegt jedoch daran, dass keine Netzwerk-Korrekturen berechnet werden. Die Satellitengeometrie war bei den Testmessungen durchwegs sehr gut. Es zeigte sich jedoch, dass mit einer Verschlechterung des DOP-Wertes auch vor allem die Genauigkeit der bestimmten Höhen-Koordinate abnahm.

Im Zuge der Arbeit traten bei den Höhen-Koordinaten, die mit Hilfe der installierten Netz-Programme berechnet wurden, Abweichungen von etwa 8 cm auf. Nach längerer Fehlersuche wurde festgestellt, dass die eingebundenen Datenströme nicht, wie erwartet, Rohdaten sind, sondern die Antennenkalibrierung schon vorab angebracht war. Bei der Einrichtung der Netze wurden die Daten nochmals mit der Antennenkalibrierung korrigiert und so entstand die Abweichung in der Höhe. Zur Korrektur wurde als Antennenkalibrierung eine „Nullantenne“ definiert und damit lagen auch die Abweichungen der Höhe in dem zu erwartendem Bereich.

In künftigen Arbeiten sollten noch die folgenden Fragen weiter untersucht werden:

- Welche Positionierungsgenauigkeit ist bei Nutzung eines individuell installierten Referenznetzes z.B. für lokale Überwachungsaufgaben mit den hier untersuchten

Softwarenetzlösungen zu erreichen?

- Welche Genauigkeiten werden bei einer Aufstellung des Rovers in verschiedenen Positionen innerhalb der lokalen Netzmasche erreicht?
- Wie verhalten sich die Fixierungszeiten bei schlechter Satellitengeometrie ?

# A. Detailed connection Log - Spider



Spider v4.2.1 - TUEigen

## Real Time Connection Log

### General Information

User-ID:	Tuwien
Rover user name:	Universität Technische
Organization:	-
Server time setting:	Local time (UTC +1h)
Client host:	178.115.133.222:7259
Connection started at:	2014-12-15 10:21:03
Start sending corrections at:	2014-12-15 10:21:07
Connection ended at:	2014-12-15 10:21:50
Duration of connection:	00:00:47 [H:M:S]
First reference station used / distance to station:	LEOP - 3 / 9.268 km
Last reference station used / distance to station:	LEOP - 3 / 9.268 km

### Real Time Product Settings

Product name:	TUEigen
Type:	Automatic cells
Site/Cell/Rover Name/Company:	-
Send real time message to:	NTRIP-Client
Connection settings:	-
Authentication:	Ntrip
Maximum distance to provide corrections:	100.0 km
Check for nearest site/cell:	-
Fallback when network is not available:	-
Fallback when rover-master distance is shorter:	- m
Re-check if rover moves more than:	-
Message type:	Virtual RS RTCM 3.x (Extended)
Target Coordinate System:	WGS84 ( ID 1 )
Satellite system:	GPS
Send NULLANTENNA:	Yes

ANHANG A. DETAILED CONNECTION LOG - SPIDER

---

**Connection History**

Time	Event	Real time product state	Rover user state
2014-12-15 10:21:03	Connection started		
2014-12-15 10:21:06	NMEA received		SPS; 10 SV; HDOP 1.0 48° 11' 44.8149" N; 16° 22' 8.8471" E; 237.2363 m;
2014-12-15 10:21:06	User authenticated		
2014-12-15 10:21:07	Start sending corrections	Virtual RS RTCM 3.x (Extended); fixed: 0 SV (G/R: 0/0); LEOP - 3 BADE-1;PAMA-0	
2014-12-15 10:21:11	Reference state changed	Virtual RS RTCM 3.x (Extended); fixed: 10 SV (G/R: 10/0); LEOP - 3	
2014-12-15 10:21:16	Rover state changed		RTK fixed; 10 SV; HDOP 1.0 48° 11' 44.8095" N; 16° 22' 8.8379" E; 244.5815 m;
2014-12-15 10:21:26	Reference state changed	Virtual RS RTCM 3.x (Extended); fixed: 9 SV (G/R: 9/0); LEOP - 3	
2014-12-15 10:21:36	Rover state changed		RTK fixed; 9 SV; HDOP 1.1 48° 11' 44.8121" N; 16° 22' 8.8417" E; 240.9200 m;
2014-12-15 10:21:50	Connection terminated by rover user		

## **B. Diagramme der Beobachtungen mit Antennenkalibrierung in den Punkten 2 und 3**

EPOSA

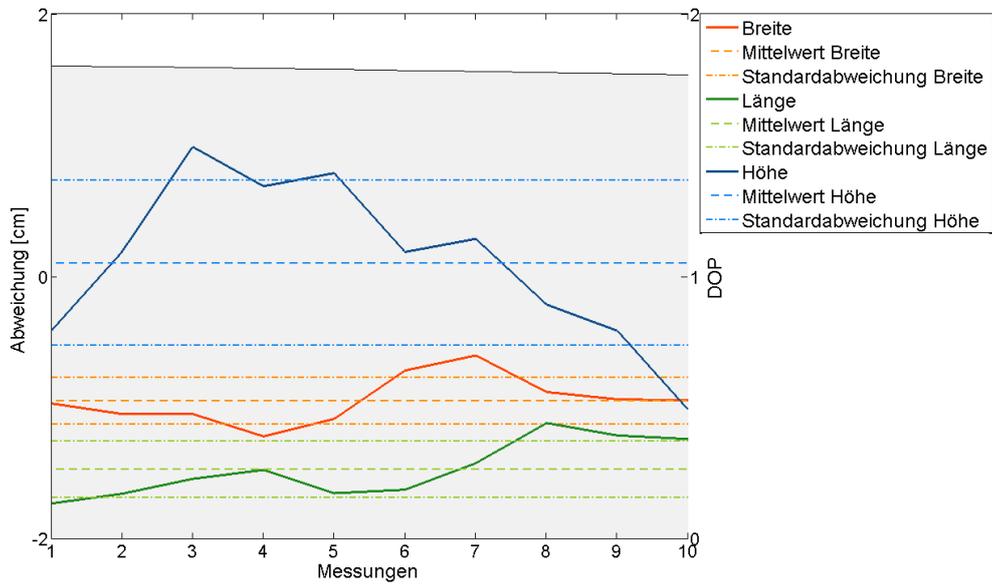


Abbildung B.1.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 2

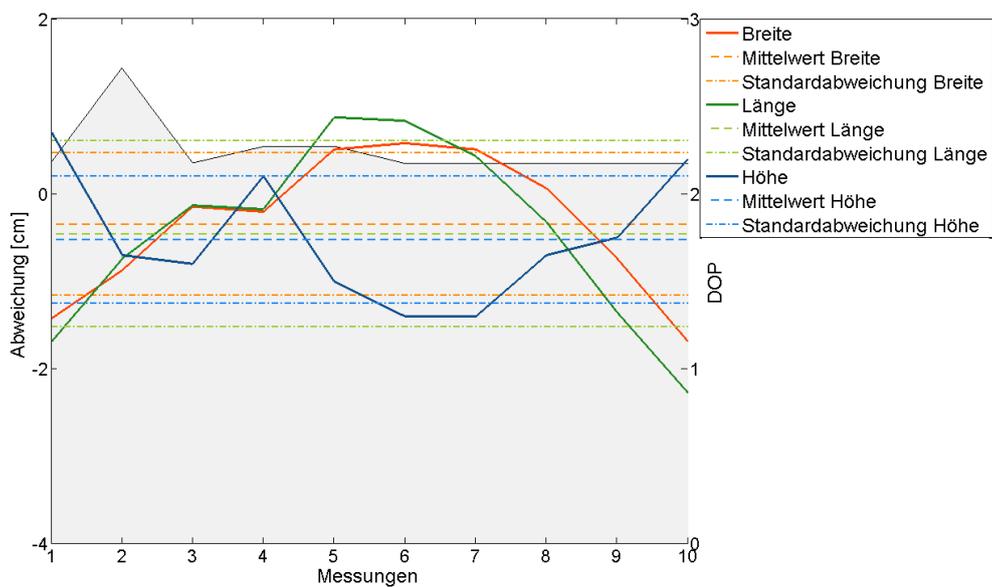


Abbildung B.2.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 3

Spider

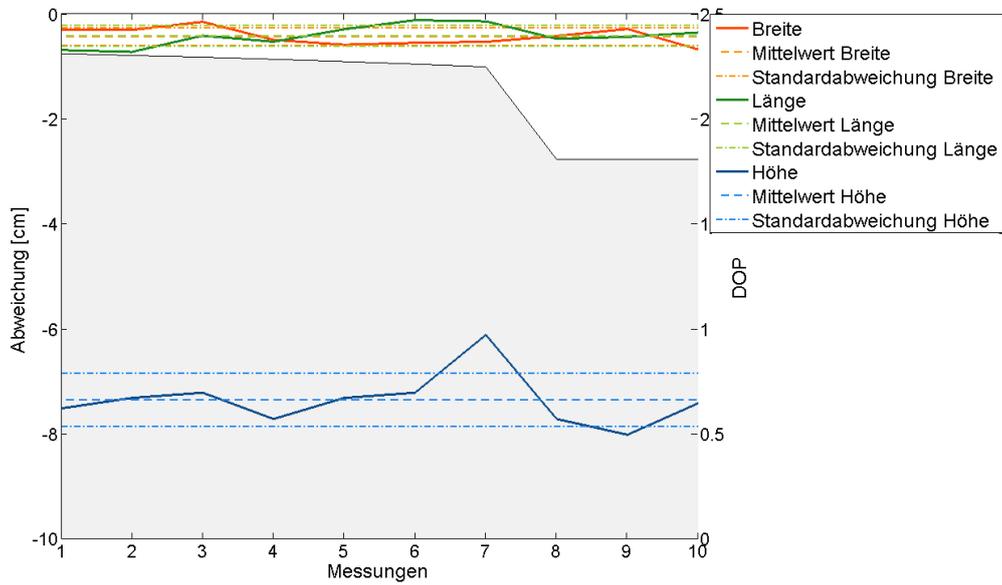


Abbildung B.3.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 2

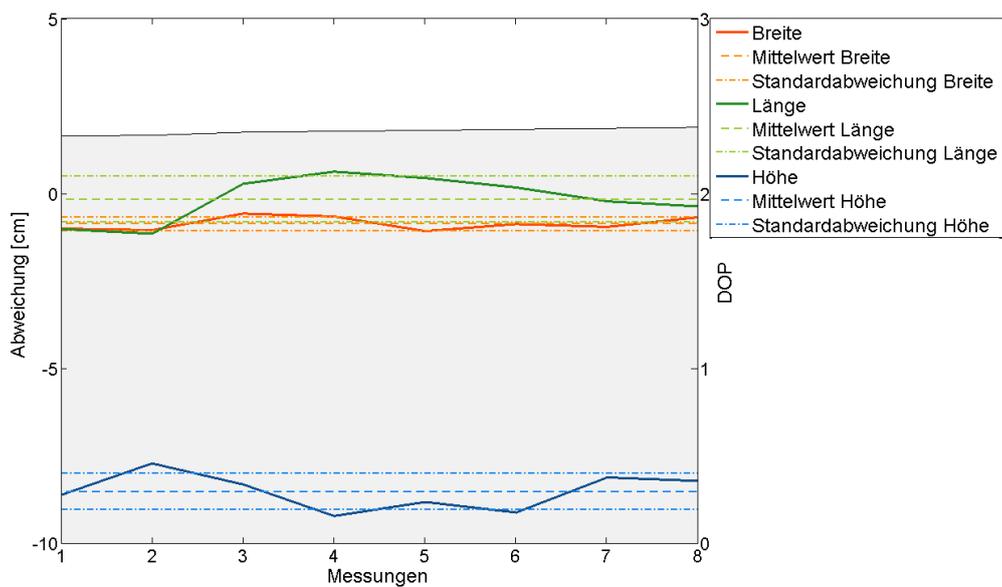


Abbildung B.4.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 3

TopNET

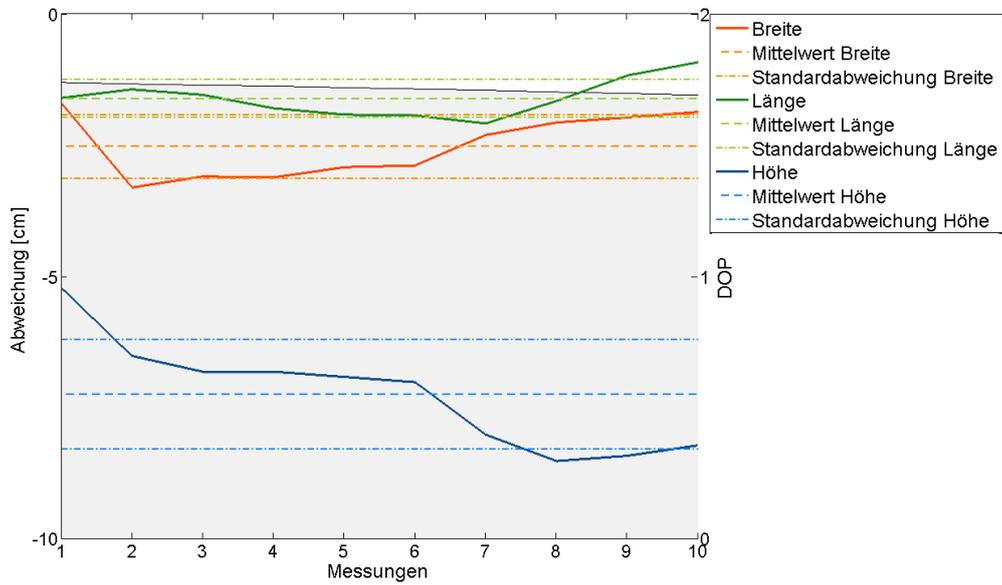


Abbildung B.5.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 2

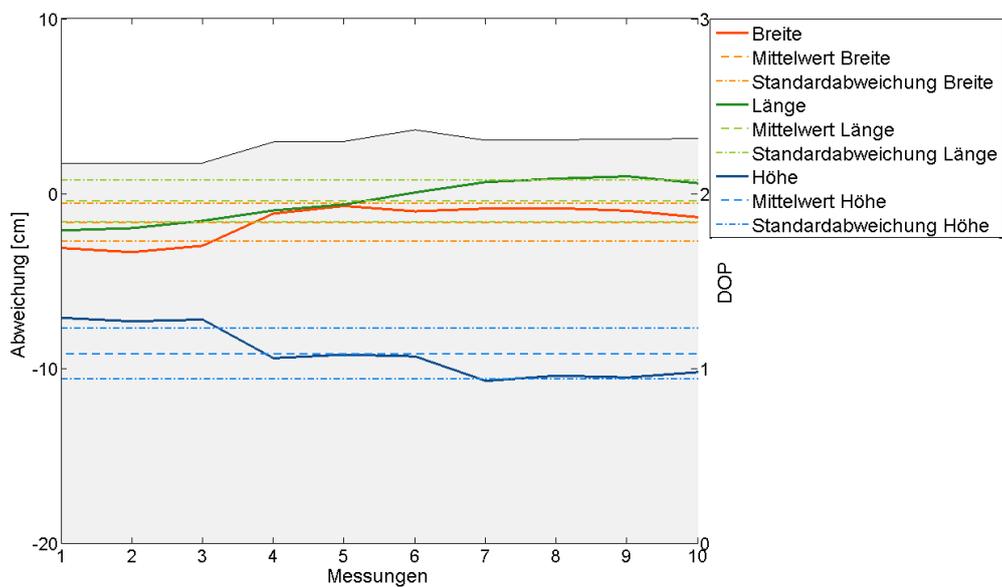


Abbildung B.6.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 3

ANHANG B. DIAGRAMME DER BEOBACHTUNGEN MIT ANTENNENKALIBRIERUNG IN DEN PUNKTEN 2 UND 3

Punkt 2

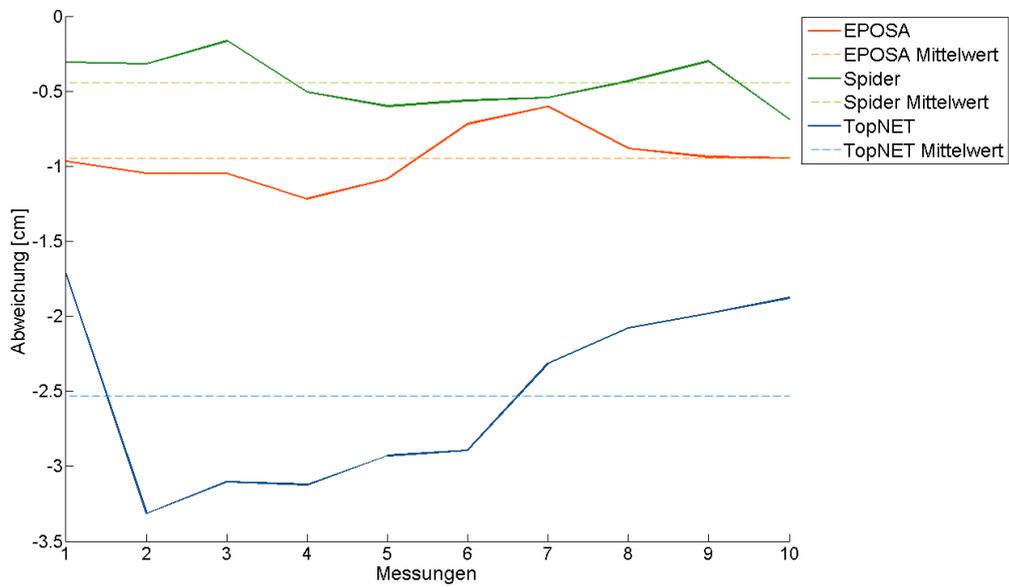


Abbildung B.7.: Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 2

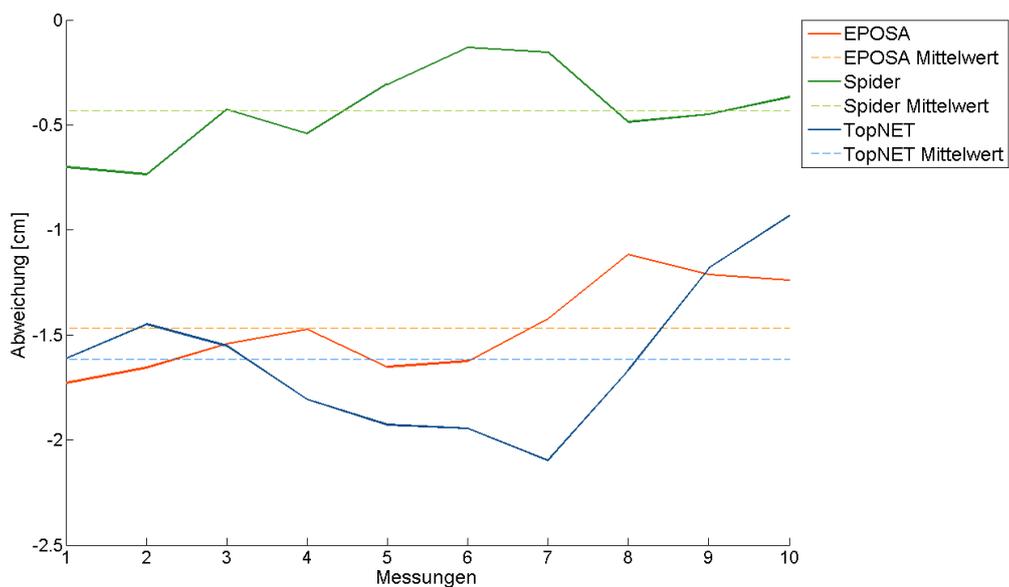


Abbildung B.8.: Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 2

ANHANG B. DIAGRAMME DER BEOBACHTUNGEN MIT  
ANTENNENKALIBRIERUNG IN DEN PUNKTEN 2 UND 3

---

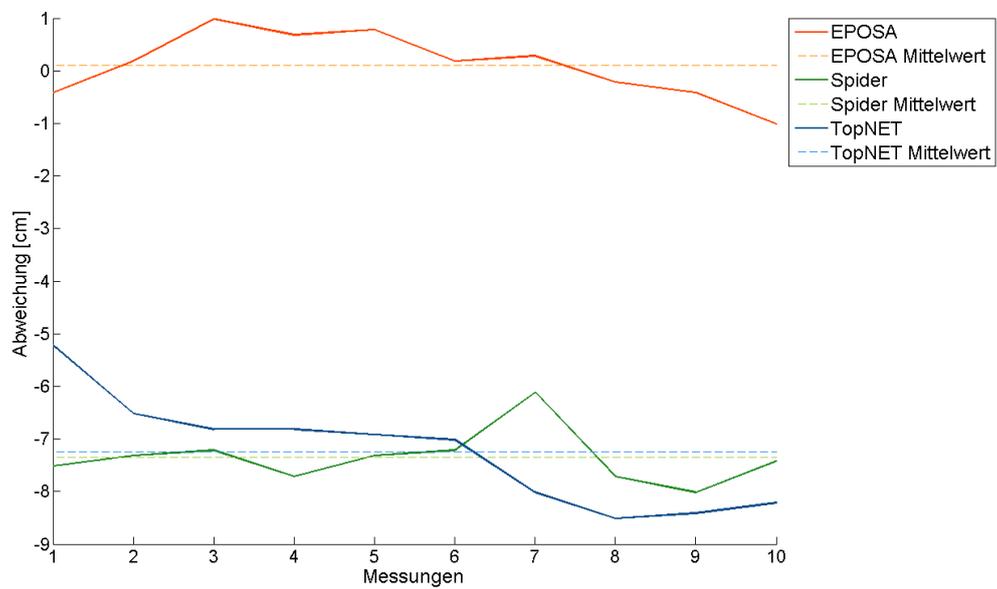


Abbildung B.9.: Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 2

**Punkt 3**

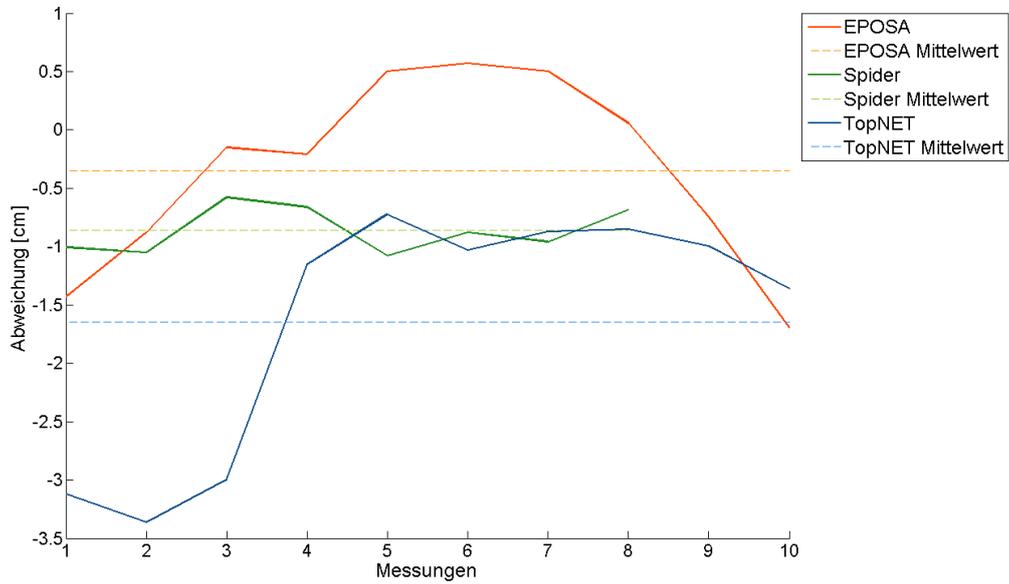


Abbildung B.10.: Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 3

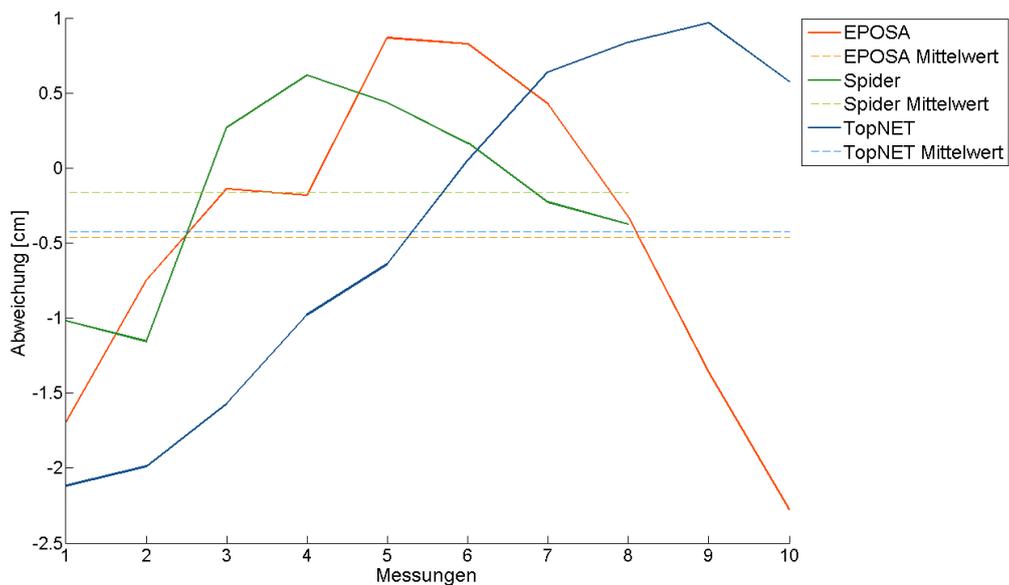


Abbildung B.11.: Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 3

ANHANG B. DIAGRAMME DER BEOBACHTUNGEN MIT  
ANTENNENKALIBRIERUNG IN DEN PUNKTEN 2 UND 3

---

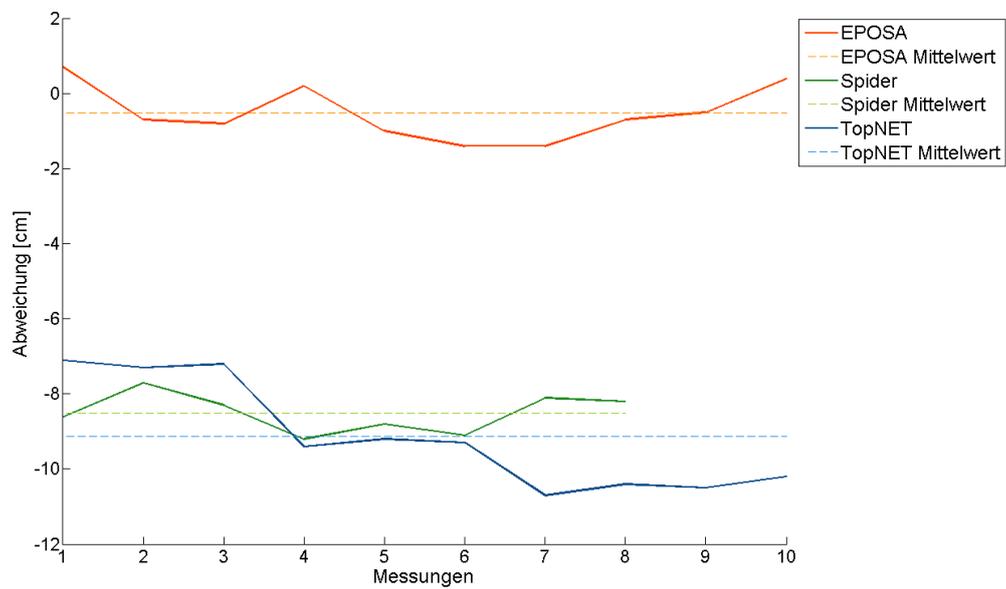


Abbildung B.12.: Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 3

## **C. Diagramme der Beobachtungen ohne Antennenkalibrierung in den Punkten 1 und 4**

ANHANG C. DIAGRAMME DER BEOBACHTUNGEN OHNE  
ANTENNENKALIBRIERUNG IN DEN PUNKTEN 1 UND 4

**EPOSA**

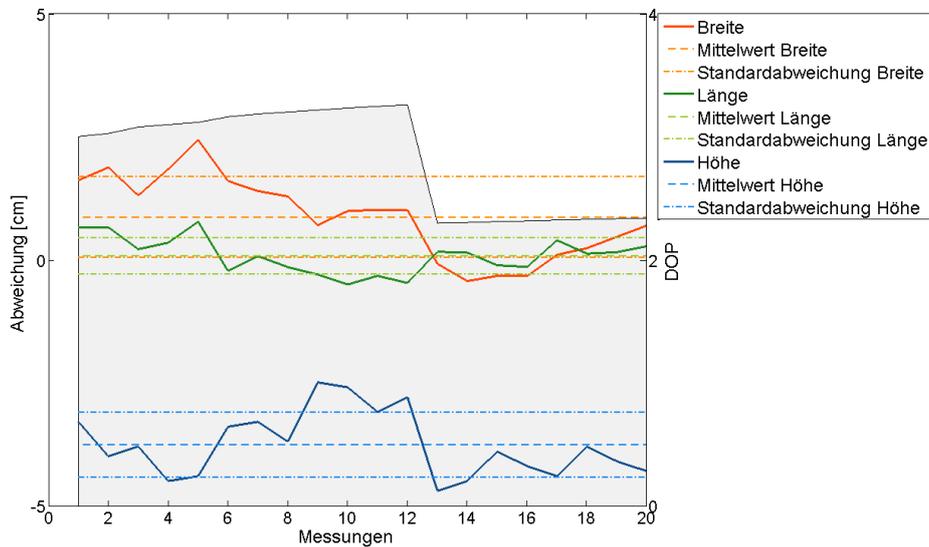


Abbildung C.1.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 1 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

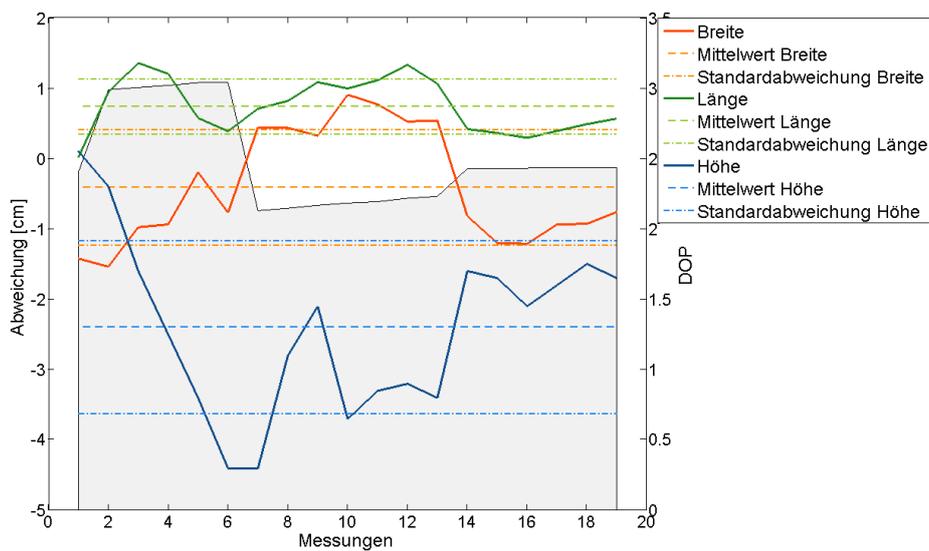


Abbildung C.2.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 4 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

ANHANG C. DIAGRAMME DER BEOBACHTUNGEN OHNE ANTENNENKALIBRIERUNG IN DEN PUNKTEN 1 UND 4

Spider

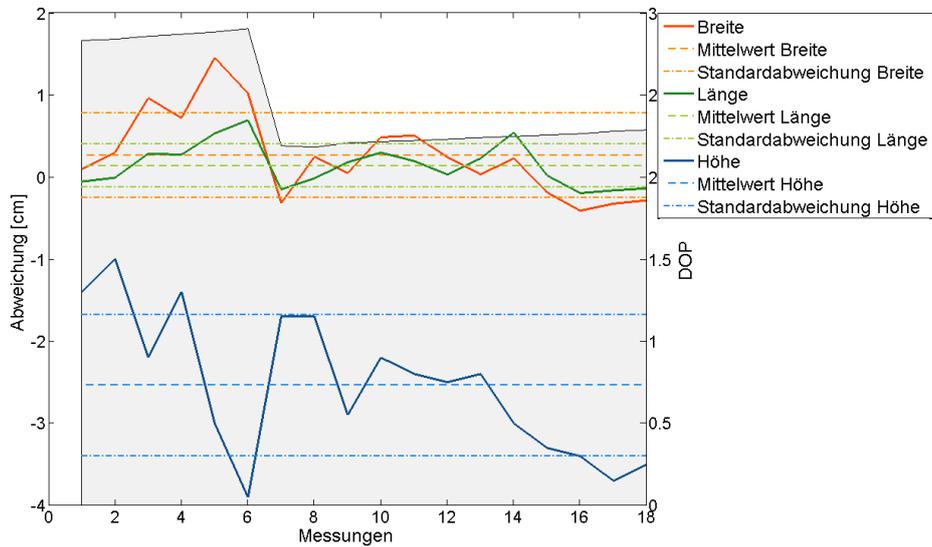


Abbildung C.3.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für Spider im Punkt 1 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

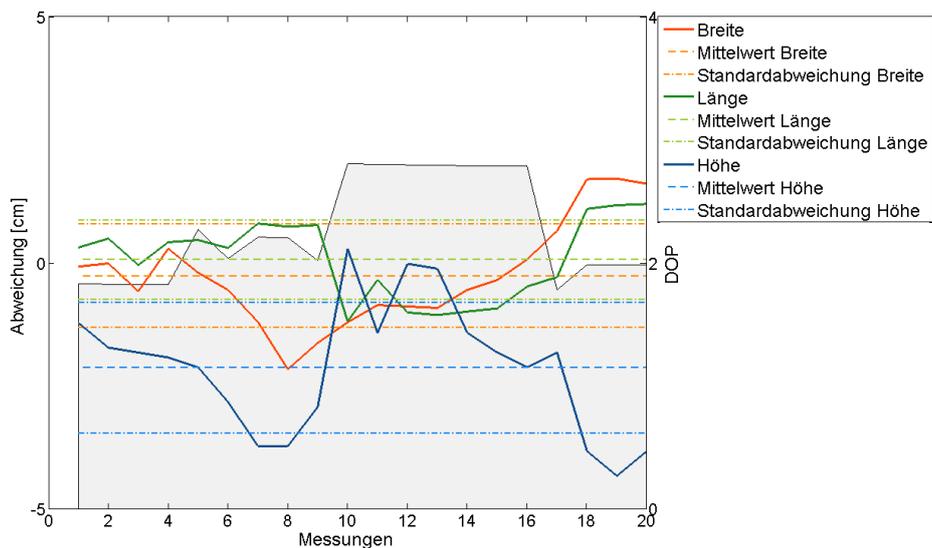


Abbildung C.4.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für Spider im Punkt 4 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

TopNET

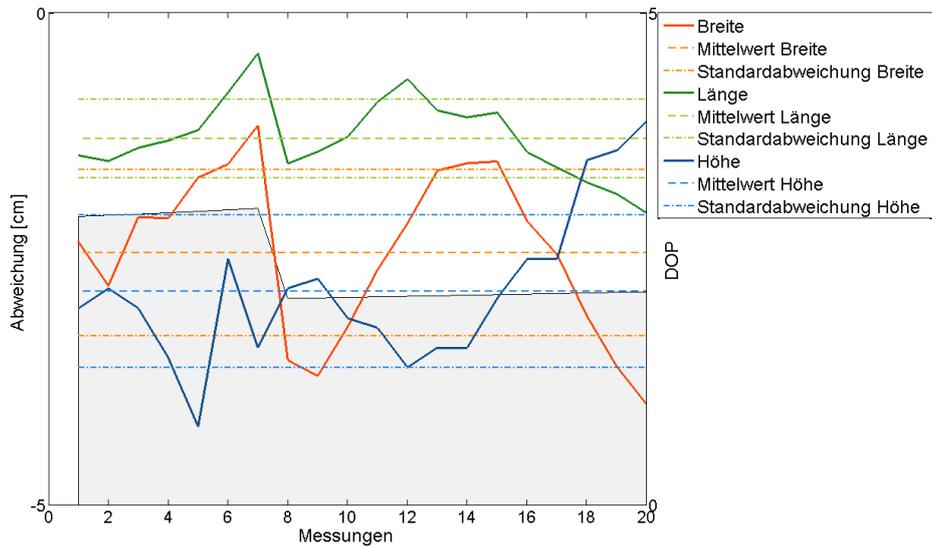


Abbildung C.5.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für TopNET im Punkt 1 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

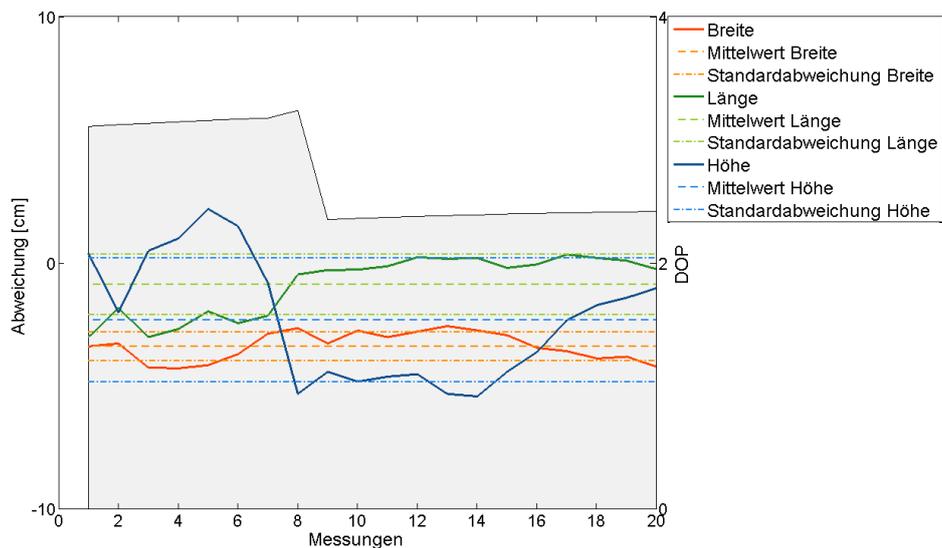


Abbildung C.6.: Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für TopNET im Punkt 4 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung

# Literaturverzeichnis

- Caspary, W. and K., W. (2007). *Auswertung von Messdaten, Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Euler, H.-J., Keenan, R., Zebhauser, B., and Wübbena, G. (2001). Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, pages 379–391, Salt Lake City, Utah.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E. (2008). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. SpringerWienNewYork.
- Kaplan, E. D. and Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS: principles and applications*. Artech House, 2 edition.
- Leinen, S. (1997). *Hochpräzise Positionierung über große Entfernungen und in Echtzeit mit dem Global Positioning System*. PhD thesis, Technische Hochschule Darmstadt.
- Möller, G. (2010). Analyse des GNSS-Referenzstationsnetzes EPOSA. Master's thesis, Technische Universität Wien.
- Raquet, J. (1998). *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*. PhD thesis, University of Calgary.
- Raquet, J. and Lachapelle, G. (2001). RTK Positioning with Multiple Reference Stations. *GPS World*, 12(4):48–53.
- Rizos, C. and Han, S. (2003). Reference Station Network Based RTK-Systems - Concepts and Progress. *Wuhan University Journal of Nature Sciences*, 8(2B):566–574.
- RTCM., S. C. N. . (2013). *RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3*. Radio Technical Commission for Maritime Services, 1611 N. Kent St., Suite 605 Arlington, Virginia 22209-2143, USA.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, 2nd edition.

- Uren, J. and Price, W. F. (2006). *Surveying for engineers*. Palgrave Macmillan, 4th edition.
- Wanninger, L. (2000). *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. PhD thesis, Technische Universität Dresden.
- Wübbena, G. (1991). *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. PhD thesis, Universität Hannover.
- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., B. V., and Hankemeier, P. (1996). Reducing distance dependent errors for real-time precise DGPS applications by establishing reference station networks. In *9th Int. Tech. Meeting of the Satellite Div. of the U.S. Institute of Navigation*, pages 1845–1852, Kansas City, Missouri.
- Wei, E., Chai, H., and An, Z. (2006). VRS Virtual Observations Generation Algorithm. *Journal of Global Positioning Systems*, 5(1-2):76–81.
- Wienholz, K. (2003). *Zur Bestimmung der GPS-Phasenmehrdeutigkeiten in großräumigen Netzen*. PhD thesis, Technische Universität Berlin.
- Willgalis, S. (2005). *Beiträge zur präzise Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen*. PhD thesis, Universität Hannover.

# Abkürzungsverzeichnis

<b>GNSS</b>	Globalen Navigationssatelliten System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GLONASS</b>	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
<b>TEC</b>	Total Electron Content
<b>GIM</b>	Global Ionosphere Model
<b>VTEC</b>	Vertical Total Electron Content
<b>PDGPS</b>	präzises differentielles Verfahren
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>RTCM</b>	Radio Technical Commission for Maritime Services
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association
<b>VRS</b>	Virtuelle Referenzstation
<b>MAC</b>	Master Auxiliary Concept
<b>FKP</b>	Flächenkorrekturparameter
<b>LCM</b>	Linear Combination Model
<b>LIM</b>	Linear Interpolation Method
<b>LSM</b>	Low-order Surface Model
<b>LSC</b>	Least-Squares Collocation
<b>DOP</b>	Dilution of Precision
<b>GDOP</b>	Geometric Dilution of Precision

<b>PDOP</b>	Position Dilution of Precision
<b>HDOP</b>	Horizontal Dilution of Precision
<b>VDOP</b>	Vertical Dilution of Precision
<b>IERS</b>	International Earth Rotation and Reference Systems Service
<b>ICRS</b>	International Celestial Reference System
<b>ICRF</b>	International Celestial Reference Frame
<b>ITRS</b>	International Terrestrial Reference System
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>SLR</b>	Satellite Laser Ranging
<b>LLR</b>	Lunar Laser Ranging
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry
<b>DORIS</b>	Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite
<b>ETRS</b>	European Terrestrial Reference System
<b>ETRF</b>	European Terrestrial Reference Frame
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984
<b>EPOSA</b>	Echtzeitpositionierung Austria
<b>RINEX</b>	Receiver Independent Exchange Format

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Single-Layer-Modell der Ionosphäre nach [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].	8
2.2. Direktes und indirekte Signalausbreitung . . . . .	10
2.3. Abhängigkeit des Antennenphasenzentrums vom Einfallswinkel des Signals und mittleres elektrisches Phasenzentrum (nach [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]) . . . . .	10
2.4. Schematische Darstellung eines Cycle Slip [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]	12
2.5. Doppeldifferenzbildung von Beobachtungen . . . . .	15
2.6. Prinzip von Differentiellem GPS nach [Seeber, 2003] . . . . .	16
2.7. Vergleich der Positionierungsfehler zwischen 'fixed' und 'float' Lösung der Mehrdeutigkeiten [Leinen, 1997] . . . . .	19
3.1. Vergleich zwischen Abdeckung mit unabhängigen und vernetzten Referenzstationen [Raquet and Lachapelle, 2001] . . . . .	23
3.2. Systemkomponenten eines Referenzstationsnetzes . . . . .	24
3.3. Arbeitsschritte in einem Referenzstationsnetz [Willgalis, 2005] . . . . .	27
4.1. Übersicht der verwendeten Stationen . . . . .	35
4.2. Screenshot vom Side-Server, mit eingebundener Station, die nur GPS-Satelliten trackt . . . . .	36
4.3. Screenshot vom Network-Server mit fixierten Mehrdeutigkeiten . . . . .	38
4.4. Screenshot vom Spider, der das erstellte Netz mit einem ausgewählten Nutzer zeigt . . . . .	39
4.5. Screenshot von TopNET mit eingebundenen Referenzstationen . . . . .	41
4.6. Screenshot von TopNET mit eingebundenen Referenzstationen und ausgewähltem Nutzer (roter Punkt) . . . . .	41
5.1. Referenzstationsnetz von Eposa (www.eposa.at) . . . . .	44
5.2. Schematische Skizze der Messpunkte auf der Terrasse der TU Wien . . . . .	44
5.3. Aufstellung auf Punkt 3 auf der Terrasse, Blickrichtung Süden . . . . .	45

5.4. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 1 . . . . .	49
5.5. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 4 . . . . .	49
5.6. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 1 . . . . .	51
5.7. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 4 . . . . .	51
5.8. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 1 . . . . .	53
5.9. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 4 . . . . .	53
5.10. Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 1	54
5.11. Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 1	55
5.12. Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 1 . . . . .	55
5.13. Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 4	56
5.14. Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 4	57
5.15. Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 4 . . . . .	57
5.16. Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm Spider im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . .	60
5.17. Abweichungen der Höhenkomponente (Programm Spider im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . . . .	60
5.18. Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm Spider im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . .	61
5.19. Abweichungen Höhenkomponente (Programm Spider im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . . . .	61
5.20. Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm TopNET im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung) . .	63
5.21. Abweichungen der Höhenkomponente (Programm TopNET im Punkt 1 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . . . .	64
5.22. Abweichungen der Koordinatenkomponenten in Nord- und Ostrichtung (Programm TopNET im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung) . .	64
5.23. Abweichungen der Höhenkomponente (Programm TopNET im Punkt 4 mit und ohne Antennenkalibrierung) . . . . .	65

5.24. Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit EPOSA . . . . .	66
5.25. Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit Spider . . . . .	67
5.26. Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung mit TopNET . . . . .	68
5.27. Vergleich der Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfestlegung . . . . .	68
B.1. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 2 . . . . .	74
B.2. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 3 . . . . .	74
B.3. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 2 . . . . .	75
B.4. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm Spider im Punkt 3 . . . . .	75
B.5. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 2 . . . . .	76
B.6. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für das Programm TopNET im Punkt 3 . . . . .	76
B.7. Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 2	77
B.8. Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 2	77
B.9. Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 2 . . . . .	78
B.10. Vergleich der Abweichung in der Breite für die getesteten Dienste im Punkt 3	79
B.11. Vergleich der Abweichung in der Länge für die getesteten Dienste im Punkt 3	79
B.12. Vergleich der Abweichungen in der Höhe für die getesteten Dienste im Punkt 3 . . . . .	80
C.1. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 1 ohne eingeleseener Antennenkalibrierung . . . . .	82
C.2. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für EPOSA im Punkt 4 ohne eingeleseener Antennenkalibrierung . . . . .	82
C.3. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für Spider im Punkt 1 ohne eingeleseener Antennenkalibrierung . . . . .	83

C.4. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für Spider im Punkt 4 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung . . . . .	83
C.5. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für TopNET im Punkt 1 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung . . . . .	84
C.6. Abweichung der Koordinatenkomponenten in Nord-, und Ostrichtung sowie in der Höhe für TopNET im Punkt 4 ohne eingeleiteter Antennenkalibrierung . . . . .	84

# Tabellenverzeichnis

3.1. RTCM-Messages [RTCM., 2013] . . . . .	25
3.2. NMEA-Datensätze für GNSS-Aufgaben [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]	26
4.1. Koordinaten (im Bezugsrahmen ITRF2000, Epoche 1997.0) und zusätzliche Informationen der verwendeten Referenzstationen . . . . .	34
5.1. Schwellenwerte für Ausreißer mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % . . . .	46
5.2. Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist- Koordinate für die gemessenen Punkte mit EPOSA . . . . .	48
5.3. Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist- Koordinate für die gemessenen Punkte mit Spider . . . . .	50
5.4. Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist- Koordinate für die gemessenen Punkte mit TopNET . . . . .	52
5.5. Kalibrierungen der verwendeten Stationsantennen . . . . .	58
5.6. Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist- Koordinate für die gemessenen Punkte mit Spider . . . . .	59
5.7. Differenz der Abweichungen der Messungen mit und ohne Antennenkali- brierung für Spider . . . . .	59
5.8. Kalibrierung der verwendeten Stationsantennen . . . . .	62
5.9. Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen Soll- und Ist- Koordinate für die gemessenen Punkte mit TopNET . . . . .	62
5.10. Differenz der Abweichungen der Messungen mit und ohne Antennenkali- brierung für TopNET . . . . .	63
5.11. genäherter Korrekturvektor zwischen ITRF2008 (Epoche 2010.0) und ITRF200 (Epoche 1997.0) . . . . .	65