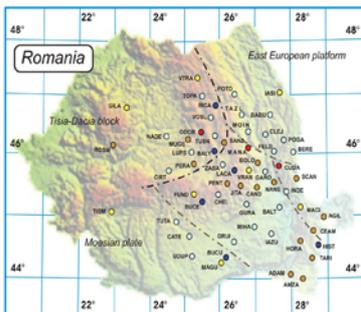


Andreas Knöpfler  
Michael Mayer  
Andre Nuckelt  
Bernhard Heck  
Günter Schmitt



Untersuchungen zum  
**Einfluss von Antennen-**  
kalibrierwerten auf die  
**Prozessierung regionaler**  
**GPS-Netze**





Andreas Knöpfler, Michael Mayer, Andre Nuckelt, Bernhard Heck,  
Günter Schmitt

**Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf  
die Prozessierung regionaler GPS-Netze**

Universität Karlsruhe (TH)

Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik

2007,1

# **Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze**

von

Andreas Knöpfler

Michael Mayer

Andre Nuckelt

Bernhard Heck

Günter Schmitt



---

universitätsverlag karlsruhe

## Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
[www.uvka.de](http://www.uvka.de)



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz  
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2007

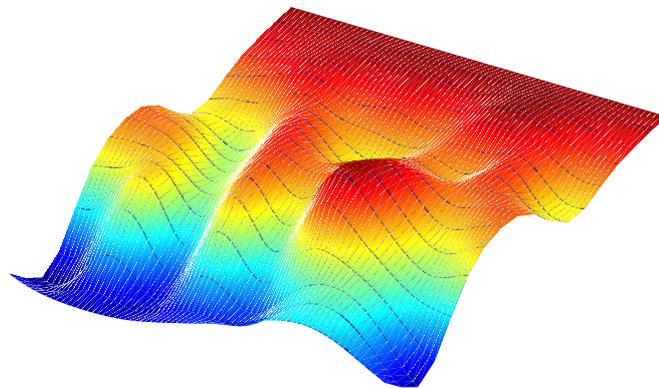
ISSN: 1612-9733

ISBN: 978-3-86644-110-1





# Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze



**Interner Bericht**

am Geodätischen Institut  
der Universität Karlsruhe (TH)

A. Knöpfler, M. Mayer, A. Nuckelt, B. Heck, G. Schmitt



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Allgemeines zum GPS-Antennenmodell</b>	<b>4</b>
2.1	Phasenzentrum, Phasenzentrumsvariationen . . . . .	4
2.2	Beobachtungsgleichungen . . . . .	6
2.3	Kalibrierverfahren . . . . .	9
2.3.1	Absolute Kalibrierung . . . . .	9
2.3.2	Relative Kalibrierung . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Hardware und Kalibrierungsverfahren</b>	<b>14</b>
3.1	GPS-Instrumentarium . . . . .	14
3.2	Drehvorrichtung . . . . .	15
3.3	Aufbau auf dem Messdach . . . . .	16
3.4	Ablauf der Messungen . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Bestimmung von Kalibrierwerten</b>	<b>20</b>
4.1	Ablauf einer Auswertung . . . . .	20
4.2	Datenformate . . . . .	22
4.2.1	NGS und altes IGS-Format . . . . .	23
4.2.2	<i>Geo++</i> -Format . . . . .	23
4.2.3	ANTEX-Format . . . . .	24
4.2.4	PZO-Format . . . . .	25
4.2.5	Vektorformat . . . . .	26
4.3	Umrechnung der Datenformate . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Auswertung der Kalibrierung</b>	<b>28</b>
5.1	Vergleich der Phasenzentrumsoffsets . . . . .	28
5.1.1	Absolute Kalibrierung . . . . .	28
5.1.2	Relative Kalibrierung . . . . .	30
5.2	Vergleich der rein elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen . . . . .	32
5.2.1	Absolute Kalibrierung . . . . .	32
5.2.2	Relative Kalibrierung . . . . .	34
5.3	Vergleich der azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen . . . . .	36
5.3.1	Absolute Kalibrierung . . . . .	36
5.3.2	Relative Kalibrierung . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Kurzbeschreibung des SFB 461</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>GPS-Auswertung unter Verwendung der <i>Bernese GPS Software</i></b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Analyse der GPS-Auswertung</b>	<b>53</b>
8.1	GPS-Netz . . . . .	53
8.2	Koordinatenübersicht . . . . .	55
8.3	Vergleich der Lage-Residuen . . . . .	56
8.4	Vergleich der Höhen-Residuen . . . . .	59
8.5	Vergleich der gelösten Ambiguities . . . . .	65
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	<b>68</b>
9.1	GPS-Antennenkalibrierung . . . . .	68
9.2	Auswertung mit der <i>Bernese GPS Software</i> . . . . .	69

<b>Literatur</b>	<b>72</b>
<b>A Anhang</b>	<b>74</b>
A.1 Daten-DVD (kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden) . . . . .	74
A.2 Tabellen . . . . .	74
A.3 Bilder . . . . .	81

# 1 Einleitung

Die Aufgabe dieser Arbeit besteht darin, die auf vier Stationen des Netzes des Sonderforschungsbereich 461 (SFB 461) eingesetzten Antennen im Kalibrierfeld des GIK (Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)) absolut und relativ zu kalibrieren und diese Werte zu analysieren. Anschließend erfolgt eine Auswertung des GPS-Netzes unter Verwendung der *Bernese GPS Software (BS)* [Rothacher and Mervart, 2001] in unterschiedlichen Versionen und die Analyse der hierbei erzielten Resultate. Schließlich soll aus den Erkenntnissen der Datenanalyse eine Empfehlung für zukünftige Auswertungen von GPS-Netzen im SFB 461 ausgesprochen werden.

Es ist allgemein bekannt, dass bei der Auswertung von GPS-Netzen höchster Genauigkeiten die Verwendung von Kalibrierwerten für die verwendeten GPS-Empfangsantennen<sup>1</sup> unabdingbar ist.

Kalibrierwerte sind zunächst die Positionen des elektrischen Phasenzentrums bzgl. eines geometrischen Referenzpunkts; das elektrische Phasenzentrum ist richtungsabhängig. Zur Vereinfachung werden die Kalibrierwerte zerlegt in die Werte des festen Phasenzentrumsoffsets (PZO) und die richtungsabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PZV). Die PZO hängen von der Definition des entsprechenden Bezugspunkts ab; ist dieser als Mittelwert definiert, so hängt dieser ab von der eingeführten Minimalelevation.

Bei den bisherigen Auswertungen im SFB 461 [SFB 461, 2004] wurden vom NGS-NOAA (kurz: NGS, National Geodetic Survey of the National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>) publizierte, antennenspezifische Kalibrierwerte verwendet. Diese bestehen aus dem Phasenzentrumsoffset und elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums ab einer Elevation von 10°. Um den gestiegenen Genauigkeitsanforderungen gerecht zu werden, muss das Empfangsverhalten der einzelnen Antennen in die Auswertung integriert werden. Weiterhin ist es für eine zuverlässigere Schätzung der Höhen der einzelnen Punkte notwendig, niedrigere Elevationsmasken einzusetzen. Hierzu werden ebenso Kalibrierwerte für horizontnahe Elevationen benötigt.

Das zweite Kapitel dient zur Erläuterung der Grundbegriffe und Grundlagen im Kontext der GPS-Antennenkalibrierung. Ebenso wird auf die unterschiedlichen Arten der Kalibrierung eingegangen. Im Anschluss daran erfolgt im dritten Kapitel eine Beschreibung der zur Kalibrierung eingesetzten Hardware und des Messaufbaus im Antennenkalibrierfeld auf dem Messdach des GIK. Ebenso wird der Ablauf einer Messung exemplarisch dargestellt.

Das folgende Kapitel widmet sich der zur Auswertung eingesetzten Software *WaSoft/Kalib* [anl, 2004b]. Zusätzlich sind hier die unterschiedlichen Datenformate der Kalibrierdaten und deren Umrechnung ineinander erläutert. Daran schließt sich das umfangreichste Kapitel 5 der Analyse der Ergebnisse der GPS-Antennenkalibrierung an. Dabei wird getrennt nach absoluten und relativen Kalibrierwerten auf die Phasenzentrumsoffsets, die elevationsabhängigen und abschließend auf die azimuth- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen eingegangen.

Anschließend erfolgt eine kurze Beschreibung des SFB 461, da die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zunächst hier angewandt und weiter untersucht werden sollen. Darauf folgt das kurze Kapitel 7 in welchem die zur Auswertung des GPS-Netzes in den unterschiedlichen Versionen eingesetzte *BS* beschrieben wird.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Versionen der Netzberechnung gegenübergestellt. Das letzte Kapitel dient der Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und der Erarbeitung einer Empfehlung für die zukünftige Anwendung von Kalibrierwerten für GPS-Antennen in der GPS-Netzauswertung des SFB 461.

---

<sup>1</sup>Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Begrifflichkeit „Antenne“ gleichbedeutend mit „Empfangsantenne“ verwendet

## 2 Allgemeines zum GPS-Antennenmodell

In diesem Kapitel werden die in der GPS-Antennenkalibrierung verwendeten Grundbegriffe eingeführt und die zu Grunde gelegten mathematischen Hintergründe erläutert. Zudem wird auf die unterschiedlichen Arten der Kalibrierung eingegangen.

### 2.1 Phasenzentrum, Phasenzentrumsvariationen

Jede Messung, die mit einer GPS-Ausrüstung durchgeführt wird, bezieht sich primär auf das elektrische Phasenzentrum der verwendeten Antenne. Dieses ist somit Bezugspunkt jeder ermittelten Koordinate.

Das einfachste Modell hierfür ist die sog. „ideale“ Antenne. Diese Antenne zeichnet sich durch ein punktförmiges Antennenphasenzentrum, in dem die Signale in Form einer radialsymmetrischen Kugelwelle eintreffen, also nicht durch antennenspezifische Fehler verfälscht sind, aus. Um das Phasenzentrum (PZ) einer GPS-Antenne definieren zu können, wird in erster Linie davon ausgegangen, dass sich alle gemessenen Trägerphasen in einem Punkt der Antenne treffen. Dieser Punkt heißt Antennenphasenzentrum (APZ). Da es nicht möglich ist, diesen Punkt mechanisch festzulegen um die Antenne zentrieren zu können, wird in der Praxis ein mechanischer Referenzpunkt (ARP = Antennenreferenzpunkt) verwendet. Sämtliche äußeren Zentrierelemente, insbesondere die Antennenhöhe, werden auf diesen Punkt bezogen. Der International GNSS Service (IGS) definiert diesen Punkt folgendermaßen: Der ARP befindet sich immer auf der Unterseite der Antenne in der Mitte der Zentrierachse (siehe Bilder 2-1a und 2-1b) [Görres, 2001].

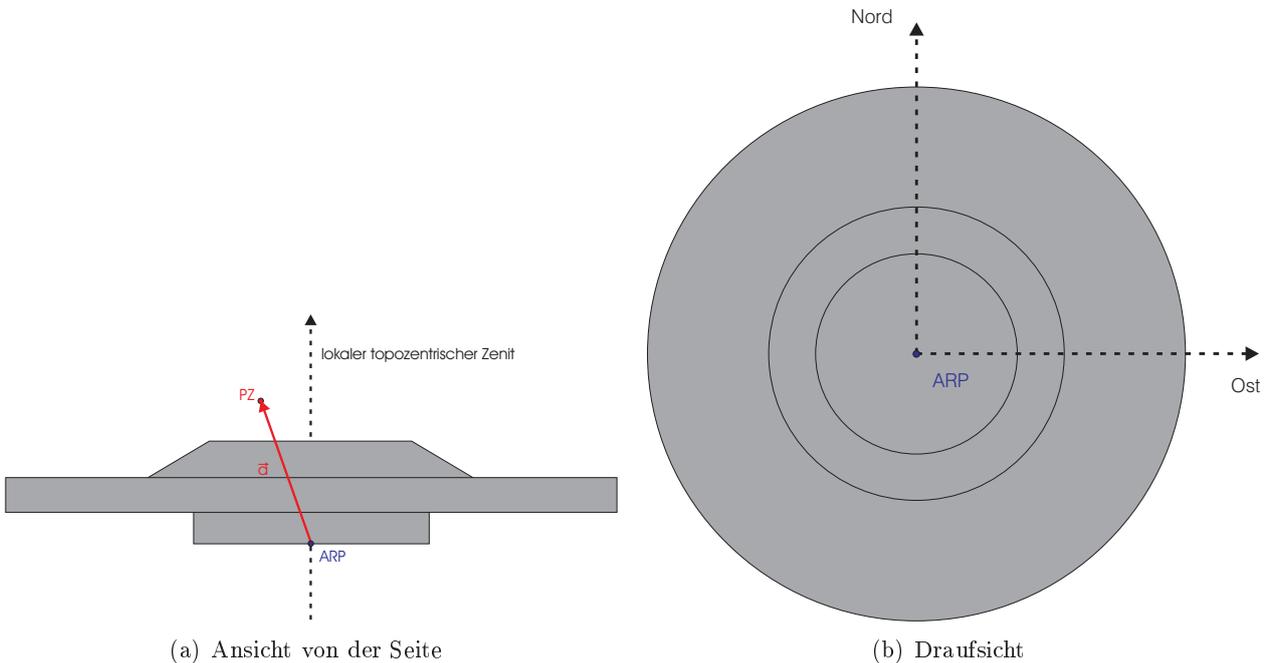


Bild 2-1: Definition des Phasenzentrums einer GPS-Antenne

Der PZO wird demnach vom Raumvektor  $\vec{a}$  im festen Koordinatensystem der Antenne beschrieben, welcher vom ARP zum PZ zeigt. Der Ursprung des „Antennensystems“ liegt im ARP, die x-Achse zeigt nach Norden, die y-Achse nach Osten und die z-Achse in Richtung des lokalen topozentrischen Zenits. Er gibt somit den Koordinatenunterschied zwischen Phasenzentrum und Referenzpunkt an. Die drei Komponenten dieses Vektors ( $a_x, a_y, a_z$ ) werden bei der Kalibrierung getrennt für die beiden Trägerphasen L1 (mit  $f_1 = 1575.42$  MHz) und L2 (mit  $f_2 = 1227.6$  MHz) ermittelt. x beschreibt dabei

die Komponente in Nordrichtung (Northing), y die Komponente in Ostrichtung (Easting) und z den Höhenversatz (Up) [Görres, 2001].

Die Modellierung einer realen Antenne hingegen ist weit schwieriger. Es entstehen Phasenfehler, die durch die elektromagnetischen Eigenschaften der einzelnen Bauteile der GPS-Antenne bedingt sind [Görres, 2001].

Zur Definition des nicht-konstanten Offsets ist die im Folgenden beschriebene Vorstellung hilfreich. Die Fläche, die für einen kleinen Raumbereich von allen Punkten einer Phase gebildet wird, ist eine Kugelschale. Das Phasenzentrum wird demnach vom Kugelmittelpunkt gebildet. Sind die eintreffenden Signale jedoch Einflüssen unterworfen und weichen von der symmetrischen Form einer Kugelschale ab, kann das Phasenzentrum nicht mehr als Kugelmittelpunkt angesehen werden und es wird eine erweiterte Modellierung notwendig. Diese ist jedoch von der Richtung, aus der die Signale in der Antenne eintreffen, abhängig [Geiger, 1988].

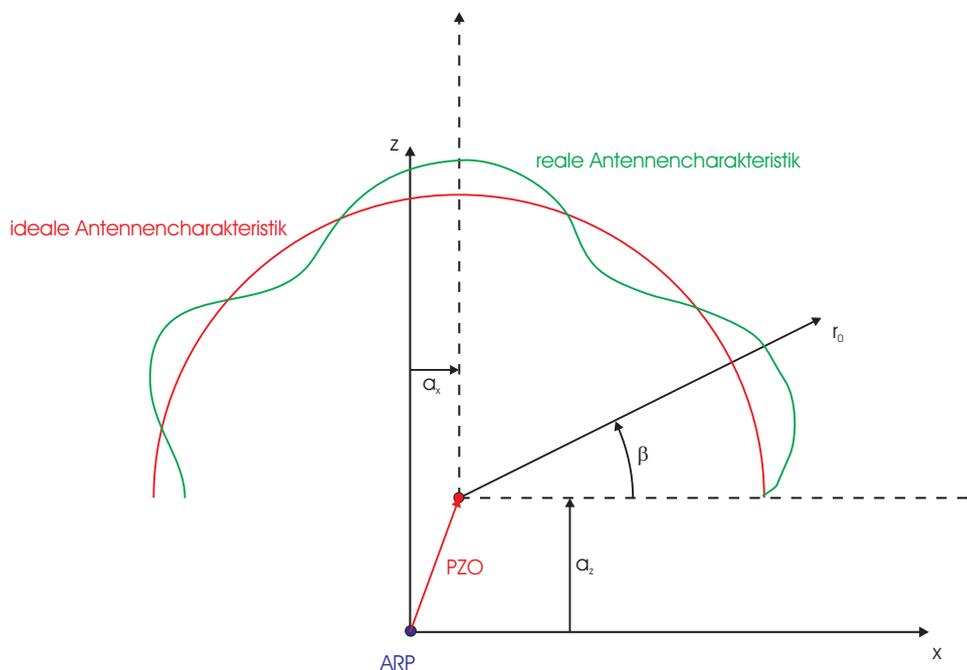


Bild 2-2: PZO und PZV

Beschrieben werden kann dies durch Formel (2-1) im metrischen Maß.

$$dr(\alpha, \beta) = \vec{a} \cdot \vec{r}_0 + \lambda \cdot d\varphi(\alpha, \beta) \quad (2-1)$$

$\vec{a}$  stellt hierbei den Vektor des PZO im antennenfesten System dar,  $\vec{r}_0$  beschreibt den Raumvektor (Einheitsvektor) in Richtung Satellit,  $d\varphi(\alpha, \beta)$  gibt die richtungsabhängigen PZV und  $\lambda$  die Trägerwellenlänge des beobachteten Signals an. Parameter des in Gleichung (2-1) dargestellten Modells sind die drei Komponenten des Vektors  $\vec{a}$  und die von der Elevation  $\beta$  und dem Azimut  $\alpha$  abhängigen Phasenfehler  $d\varphi$  [Campbell et al., 2004].

Das mittlere Antennenphasenzentrum kann durch den Mittelpunkt einer ausgleichenden Kugelkappe, welche über alle empfangenen Richtungen gebildet wird, beschrieben werden. Die dominierenden Variationen sind hierbei die elevationsabhängigen. Es treten zwar bei den meisten Antennen auch Variationen in Abhängigkeit des Azimuts auf, welche aber in der Regel deutlich kleiner sind (siehe Bilder 2-3a und 2-3b aus [Görres, 2001]).

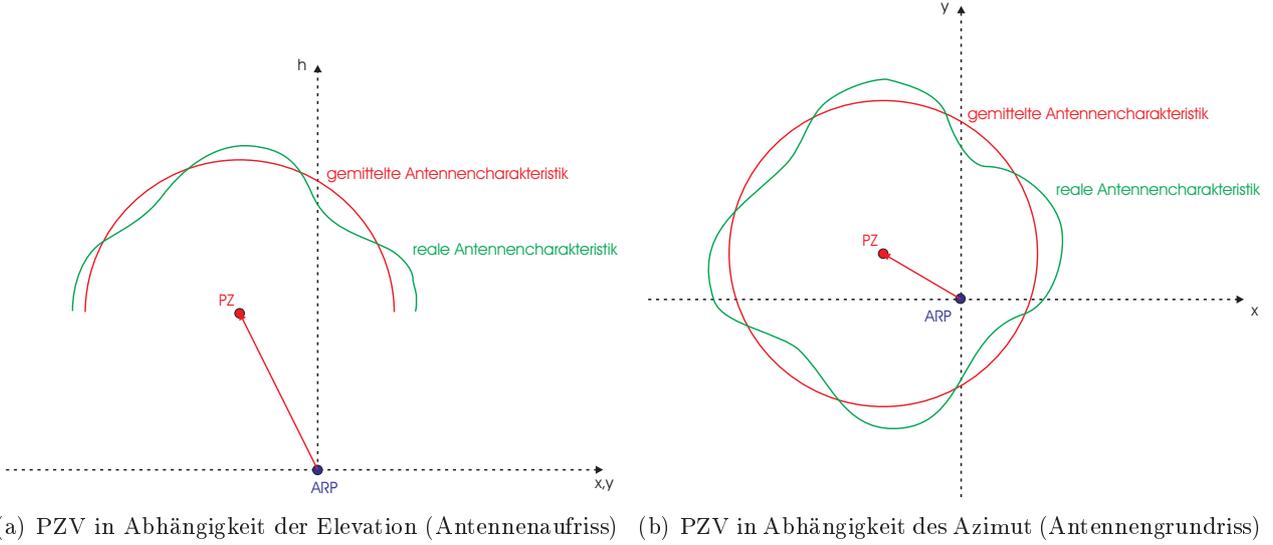


Bild 2-3: Darstellung der PZV

Die Auswertung bzw. Bestimmung der Korrekturen erfolgt normalerweise zweistufig. Zunächst wird die Lage des mittleren Phasenzentrums, der sogenannte Phasenzentrumsoffset relativ zum Referenzpunkt der Antenne bestimmt. Im zweiten Schritt wird anschließend der Korrekturterm, welcher von der Elevation und dem Azimut des eintreffenden Signals abhängt, bestimmt. Dies erfolgt meist durch die mathematische Beschreibung mit einem Polynom oder der Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen. Dabei hängt die Bestimmung des Phasenzentrums von der verwendeten Elevationsmaske und der Auswertestrategie ab. Eine Änderung derselben schlägt sich hauptsächlich in der Höhenkomponente des Korrekturvektors nieder, während die Lagekomponenten weitgehend unbeeinflusst bleiben.

## 2.2 Beobachtungsgleichungen

Eine Grundlage der Kalibrierung bilden die Beobachtungsgleichungen der Code- und Phasenmessung. In Gleichung (2-2) ist die Beobachtungsgleichung für Code- und in Gleichung (2-3) für Phasenbeobachtungen dargestellt (metrisches Maß) [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

$$C_{a,f}^i = R_a^i + c_0 \cdot [\delta t_a + h_{a,f,C} - \delta t^i - h_{f,C}^i] + I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,C}^i + A_{a,f,C}^i + \epsilon_{a,f,C}^i \quad (2-2)$$

$$\Phi_{a,f}^i = R_a^i + c_0 \cdot [\delta t_a + h_{a,f,\Phi} - \delta t^i - h_{f,\Phi}^i] - I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,\Phi}^i + A_{a,f,\Phi}^i + \lambda_f \cdot N_{a,f}^i + \epsilon_{a,f,\Phi}^i \quad (2-3)$$

mit

$$R_a^i = \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| \quad (2-4)$$

Die verwendeten Indizes  $C$  (Code) und  $\Phi$  (Phase) zeigen hierbei Abhängigkeiten von der Art der beobachteten Größe an. In nachfolgender Auflistung ist die Bedeutung der einzelnen Variablen aufgeführt:

$C_a^i$	Codemessung [m]
$\Phi_a^i$	Phasenmessung [m]

$R_a^i$	Entfernung Satellit i - Station a [m] nach Gleichung (2-4)
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [m/s]
$\delta t_a$	Empfängeruhrfehler [s]
$h_a$	instrumentelle Signalverzögerungen im Empfänger [s]
$\delta t^i$	Satellitenuhrfehler [s]
$h^i$	instrumentelle Signalverzögerungen im Satelliten [s]
$I_a^i$	Laufzeitfehler aufgrund ionosphärischer Refraktion [m]
$T_a^i$	Laufzeitfehler aufgrund troposphärischer Refraktion [m]
$O_a^i$	Orbitfehler [m]
$M_a^i$	Mehrwegeausbreitungsfehler [m]
$A_a^i$	Exzentrizität des Antennenphasenzentrums [m]
$\epsilon_a^i$	zufällige Messfehler [m]
$\lambda$	Wellenlänge [m]
$N_a^i$	Phasenmehrdeutigkeit [-]
$\vec{X}_a, \vec{X}^i$	Ortsvektoren der Station a und Satelliten i, beschrieben in globalen kartesischen Koordinaten X, Y, Z [m]

$R_a^i$  gibt die Raumstrecke zwischen der Position des Satelliten i beim Aussendezeitpunkt des Signals und der Position der GPS-Station a zum Zeitpunkt des Signalempfangs unter Vernachlässigung relativistischer Effekte an. Die Orbitfehler  $O_a^i$  müssen bei der Berechnung des Positionsvektors des Satelliten ( $\vec{X}^i$ ) berücksichtigt werden, da die dazu verwendeten Satellitenorbits nicht fehlerfrei sind. Der Uhrfehler  $\delta t_a$  sowie die instrumentenbedingten Laufzeitverzögerungen im Empfänger  $h_{a,f}$  lassen sich bei der Berechnung der Position nicht eindeutig voneinander trennen, so dass diese Fehlereinflüsse zusammen als „Uhrfehler“ bestimmt werden. Weitere wichtige Unbekannte sind die Koordinaten der Station  $\vec{X}_a$  [Wanninger, 2000].

Bei der Auswertung von Relativbeobachtungen werden die Differenzen zwischen den simultanen Beobachtungen von zwei Stationen a und b und jeweils einem Satelliten i gebildet. Dies wird in den folgenden Formeln durch den  $\Delta$ -Operator dargestellt.

In Formel (2-5) sind die Empfängereinfachdifferenzen für die Code- und in Gleichung (2-6) für die Phasenmessungen dargestellt.

$$\begin{aligned} \Delta C_{ab,f}^i &= C_b^i - C_a^i \\ &= \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,C}] + \Delta I_{ab,f}^i + \Delta T_{ab}^i + \Delta O_{ab}^i + \Delta M_{ab,f,C}^i + \Delta A_{ab,f,C}^i \\ &\quad + K_{ab}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta C}^i \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{ab,f}^i &= \Phi_b^i - \Phi_a^i \\ &= \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,\Phi}] - \Delta I_{ab,f}^i + \Delta T_{ab}^i + \Delta O_{ab}^i + \Delta M_{ab,f,\Phi}^i + \Delta A_{ab,f,\Phi}^i \\ &\quad + \lambda_f \cdot \Delta N_{ab,f}^i + K_{ab}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta \Phi}^i \end{aligned} \quad (2-6)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta R_{ab}^i &= R_b^i - R_a^i \\ &= \left| \vec{X}^i - \vec{X}_b \right| - \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| \\ &= \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a - \Delta \vec{X}_{ab} \right| - \left| \vec{X}^i - \vec{X}_a \right| \end{aligned} \quad (2-7)$$

Weiter werden in den obigen Formeln folgende Variablen verwendet:

$K_{ab}^i$	Auswirkungen der Einführung von fehlerbehafteten Absolutkoordinaten für die Station a [m]
$\Delta\vec{X}_{ab}$	Basislinienvektor zwischen den beiden Stationen [m]

Bei der Bildung dieser Einfachdifferenzen zwischen den beiden Stationen fallen sowohl der Satellitenuhrfehler als auch die instrumentellen Signalverzögerungen heraus. Die Orbitfehler haben keinen Einfluss [Seeber, 1989] und die Einflüsse der Refraktion werden verringert [Wanninger, 2000].

Bestimmt werden als primäre Unbekannte die Summe aus der Differenz der Empfängeruhrfehler und der Differenz der instrumentellen Verzögerungen sowie der Vektor der Basislinie  $\vec{X}_{ab}$ . Um von der relativen Basislinie zwischen den beiden Stationen auf die Koordinaten übergehen zu können, muss ein Endpunkt absolut bekannt sein. Dies kann bspw. durch den Ortsvektor  $\vec{X}_a$  des Punktes a geschehen. Da dieser mit Fehlern behaftet sein kann, wird der Fehlerterm  $K_{ab}^i$  eingeführt.

Für kurze Distanzen zwischen den beiden Stationen (5-10 m), wie sie zum Beispiel bei der GPS-Antennenkalibrierung verwendet werden, kann von vernachlässigbar kleinen Unterschieden ionosphärischer und troposphärischer Refraktion ausgegangen werden. Ebenso sind keine Einflüsse der Bahninformationen in diesen Beobachtungsgrößen vorhanden. Wenn nun zusätzlich von einer guten Absolutposition der Basislinie im Raum und gleich ausgerichteten, baugleichen GPS-Empfangsantennen ausgegangen werden kann, lassen sich diese Gleichungen vereinfachen (siehe Formeln (2-8) und (2-9)).

Vereinfachungen für kurze Basislinien:

$$\Delta C_{ab,f}^i = \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta\delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,C}] + \Delta M_{ab,f,C}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta C}^i \quad (2-8)$$

$$\Delta\Phi_{ab,f}^i = \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta\delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,\Phi}] + \Delta M_{ab,f,\Phi}^i + \lambda_f \cdot \Delta N_{ab,f}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta\Phi}^i \quad (2-9)$$

Nach Bildung dieser Einfachdifferenzen verbleiben also noch die Mehrwegeinflüsse und das auftretende Messrauschen als Hauptfehlereinflüsse. Diese lassen sich durch lange Beobachtungszeiten i.d.R. effizient verringern [Wanninger, 2000].

Je nach Linearkombination der originären Phasenmessungen lässt sich der Mehrdeutigkeitsterm  $N_a^i$  nicht mehr durch eine ganze Zahl ausdrücken. Erst durch die Bildung der sogenannten Doppeldifferenzen lässt sich Ganzzahligkeit herstellen. Doppeldifferenzen ergeben sich aus der Differenz zweier Einfachdifferenzen. In Gleichung (2-10) wird diese durch den Nabla-Operator  $\nabla$  ausgedrückt.

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\Phi_{ab,f}^{ij} &= \Delta\Phi_{ab}^j - \Delta\Phi_{ab}^i \\ &= \nabla\Delta R_{ab}^{ij} - \nabla\Delta I_{ab,f}^{ij} + \nabla\Delta T_{ab}^{ij} + \nabla\Delta O_{ab}^{ij} + \nabla\Delta M_{ab,f,\Phi}^{ij} + \nabla\Delta A_{ab,f,\Phi}^{ij} \\ &\quad + \lambda_f \cdot \nabla\Delta N_{ab,f}^{ij} + \nabla K_{ab}^{ij} + \epsilon_{ab,f,\nabla\Delta\Phi}^{ij} \end{aligned} \quad (2-10)$$

Für kurze Basislinien lässt sich diese Gleichung weiter vereinfachen:

$$\nabla\Delta\Phi_{ab,f}^{ij} = \nabla\Delta R_{ab}^{ij} + \nabla\Delta M_{ab,f,\Phi}^{ij} + \lambda_f \cdot \nabla\Delta N_{ab,f}^{ij} + \epsilon_{ab,f,\nabla\Delta\Phi}^{ij} \quad (2-11)$$

Durch diesen Rechenschritt werden sowohl der Empfängeruhrfehler als auch die instrumentellen Verzögerungen eliminiert. Als primäre Unbekannte verbleibt noch der Basislinienvektor  $\Delta\vec{X}_{ab}$  im Term  $\nabla\Delta R_{ab}^{ij}$  [Wanninger, 2000].

Somit können bei der Kalibrierung durch die Wahl kurzer Basislinien viele Fehlerquellen eliminiert bzw. stark verringert werden. Dadurch ist es möglich, die auftretenden Unterschiede in der Position der zu kalibrierenden Einheit Empfänger und Antenne auf die Antennen selbst zurückzuführen.

## 2.3 Kalibrierverfahren

Die Verfahren, die zur Bestimmung der Kalibrierparameter von GPS-Antennen eingesetzt werden, können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- absolute Kalibrierung: Bestimmung der Korrekturwerte unabhängig von einer Referenzantenne
- relative Kalibrierung: Bestimmung der relativen Unterschiede zu einer Referenzantenne.

Das erstgenannte Verfahren kann noch weiter separiert werden in Labor- und Feldverfahren, wohingegen relative Verfahren ausschließlich den im Folgenden erläuterten Feldverfahren zuzuordnen sind.

### 2.3.1 Absolute Kalibrierung

Laborverfahren:

Bei diesem Verfahren wird die Ausrüstung in einem sog. mikrowellentoten Raum mit Hilfe künstlicher Satellitensignale kalibriert. Ziel dieses Verfahrens ist es, für einzelne Antennen sehr genaue, ortsunabhängige Korrekturwerte zu bestimmen. Diese sollen aus den absoluten mittleren Offsets und den entsprechenden azimut- und elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums bestehen. Die zu prüfende Antenne wird hierbei durch Drehen und Kippen relativ zu einem feststehenden Sender bewegt, der künstliche Satellitensignale abstrahlt. Hieraus können Unterschiede des Phasenzentrums zu einer Kugelschale in Abhängigkeit des eingestellten Elevationswinkels aus Phasendifferenzen abgeleitet werden. Aufgrund des Messaufbaus können die Beobachtungen gleichmäßig über die gesamte Antenne verteilt werden, was bei in mittleren nördlichen Breiten durchgeführten Feldmessungen mit nur einer Antennenausrichtung aufgrund des sog. Nordlochs eher schwierig zu realisieren ist.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist jedoch, dass es einen sehr aufwändigen Messaufbau erfordert. Zum einen muss der Punkt, um den die zu kalibrierende Antenne bewegt wird, sehr präzise gegenüber dem Antennenreferenzpunkt eingemessen werden. Zum anderen ist es notwendig, die verwendete Kalibrierkammer sehr gut gegen Mikrowellenreststrahlung abzuschirmen. Außerdem ist die ganze Prozedur sehr anfällig bezüglich Unregelmäßigkeiten im Versuchsaufbau [Breuer et al., 1995, Schupler and Clark, 1991].

Feldverfahren:

Zum Tragen kommt hierbei die Tatsache, dass sich nach einem siderischen Tag (= ein Sterntag = 23 Stunden, 56 Minuten 4,09 Sekunden) die Konstellation der um die Erde kreisenden GPS-Satelliten nahezu wiederholt. Durch Bildung von siderischen Differenzen (= Differenzen der Beobachtungen an zwei aufeinanderfolgenden Sterntagen) können Mehrwegeeffekte, die durch die Geometrie der Umgebung des Testfelds bedingt sind, in großem Maße eliminiert werden. Hierzu dürfen sich aber die reflektiven Eigenschaften der Flächen (Gebäude, Wiesen, ...) gegenüber dem Vortag nicht geändert haben. Weitere Fehlereinflüsse, wie Uhrfehler oder atmosphärische Störungen, können durch Bildung von Doppeldifferenzen der siderischen Differenzen eliminiert werden.

In den folgenden Formeln bedeuten  $i$  Station,  $j$  Satellit und die einzelnen Variablen:

$a$	Subvektor der Designmatrix
$x$	gekürzte Stationskoordinaten [m]
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [m/s]
$dt$	Empfängeruhrfehler [s]
$dT$	Satellitenuhrfehler [s]
$N$	Mehrdeutigkeitsterm
$\lambda$	Wellenlänge [m]
$d_{ION}$	Fehlerterm für die Ionosphäre
$d_{TROP}$	Fehlerterm für die Troposphäre
$d_{MP}$	Fehlerterm für Mehrwegeeffekte
$d_{PZV}$	Fehlerterm für Phasenzentrumsvariationen
$\epsilon_\Phi$	Phasenrauschen
$\delta^{SID}$	siderische Tagesdifferenz

Gleichung (2-12) zeigt eine vereinfachte linearisierte Beobachtungsgleichung  $l_{\Phi_i^j}[m]$  für das Phasensignal.

$$l_{\Phi_i^j} = a_i^j \cdot x_i + c_0 \cdot (dt_i - dT^j) - \lambda \cdot N_i^j - d_{ION_i^j} + d_{TROP_i^j} + d_{MP_i^j} + d_{PZV_i^j} + \epsilon_\Phi \quad (2-12)$$

Durch die Bildung siderischer Tagesdifferenzen fallen sowohl der Mehrwegeeinfluss als auch der Einfluss der Phasenzentrumsvariationen heraus. Ebenso entfällt die gesamte geometrische Information.

$$\begin{aligned} \delta^{SID} l_{\Phi_i^j} &= c_0 \cdot (\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION_i^j} \\ &\quad + \delta^{SID} d_{TROP_i^j} + \delta^{SID} \epsilon_\Phi \end{aligned} \quad (2-13)$$

Mit diesen Differenzen können wiederum doppelte Differenzen gebildet werden. Dadurch lassen sich die Uhrfehler sowie atmosphärische Einflüsse eliminieren. Ebenso werden die anfallenden Mehrdeutigkeiten korrekt bestimmt.

$$\nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{i,k}^{j,l}} = -\lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla \Delta \delta^{SID} \epsilon_\Phi \quad (2-14)$$

Um absolute PZV und PZO bestimmen zu können, wird die zu kalibrierende Antenne an einem der beiden Messtage gedreht und gekippt, während die andere unverändert bleibt. Bei dieser Messkonfiguration werden die Differenzen der PZV zwischen dem unveränderten und gekippten/gedrehten Aufbau der zu prüfenden Antenne ( $\delta_{PZV_i}^{\alpha_0, z_0^j} - \delta_{PZV_i}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)^j}$ ) wieder als beobachtete Größen in die siderische Differenz eingeführt.

$$\begin{aligned} \delta^{SID} l_{\Phi_i^j} &= c_0 \cdot (\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION_i^j} \\ &\quad + \delta^{SID} d_{TROP_i^j} + \delta_{PZV_i}^{\alpha_0, z_0^j} - \delta_{PZV_i}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)^j} + \delta^{SID} \epsilon_\Phi \end{aligned} \quad (2-15)$$

Mit dieser, um die Beobachtungsgrößen zur Bestimmung der gesuchten PZV des Prüflings erweiterten Gleichung, können wieder Doppeldifferenzen gebildet werden. Der Term  $\nabla \Delta d_{PZV}$  beschreibt hierbei nur die Variationen des Phasenzentrums (in diesem Fall: Differenzen zwischen Orientierungen) einer Antenne. Die zweite Antenne spielt dabei keine Rolle, da deren Orientierung an beiden Tagen identisch war und somit die Differenzen der Orientierungen, also die Differenz der PZV, Null ergeben. Beobachtet wird in diesem Fall bei der Bestimmung absoluter Kalibrierwerte also die Differenz der PZV von zwei unterschiedlichen Orientierungen einer Antenne gegenüber identischer Satelliten.

$$\nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{i,k}^{j,l}} = -\lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla \Delta d_{PZV_i}^{(\alpha_0, z_0), (\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)^j} + \nabla \Delta \delta^{SID} \epsilon_\Phi \quad (2-16)$$

Trotz der Berechnung der Basislinie, der Bildung verschiedener Differenzen und der Nutzung einer relativen Beobachtungsgröße ( $\Delta d_{PZV}$ ) sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass dieses Verfahren aufgrund der Unabhängigkeit von einer Referenzantenne als absolut zu bezeichnen ist. Die PZV der zu kalibrierenden Antenne lassen sich vollkommen unabhängig von der Referenzantenne bestimmen. Als zweite Antenne können verschiedene eingesetzt werden, ohne am Kalibrierergebnis etwas zu verändern [Menge and Seeber, 1999].

Da beim absoluten Feldverfahren die zu kalibrierende Antenne mit Hilfe eines computergesteuerten Roboterarms gedreht und gekippt wird, ist es möglich, die Signalerfassung unabhängig von der Konstellation der GPS-Satelliten über den gesamten Elevations- und Azimutbereich der Antenne zu verteilen. Dazu ist ein Messprogramm notwendig, welches den Roboterarm so steuert, dass die Beobachtungen über den gesamten Antennenhorizont verteilt werden. In Bild 2-4 ist der am Institut für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover entwickelte Kalibrierroboter zu sehen.



Bild 2-4: Kalibrierroboter (Aufnahme: Jaime Freiberger Jr.)

Die Berechnung der Werte für den Offset des mittleren Phasenzentrums und die Variationen desselben wird hier gleichzeitig vorgenommen. Als mathematisches Modell kommen Kugelfunktionen zum Einsatz, bei denen die Offsets in den Koeffizienten ersten Grades enthalten sind. Außerdem ist es möglich, den PZO durch einen Vergleich der Soll- zu Istposition zu erhalten [Gesellschaft zur Förderung der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, 1998].

Für das absolute Verfahren der Roboterkalibrierung sind aktuelle Trends bekannt, bei denen die Antenne von Epoche zu Epoche abwechselnd in normaler Lage gehalten bzw. verschwenkt wird. Hierbei wird ausgenutzt, dass sich Mehrwegeeffekte i.d.R. nur langsam ändern, deshalb kann bei diesem Verfahren für die jeweils nächste Epoche die Mehrwegsituation vorhergesagt werden. Durch Nutzung von sog. Triple-Differenzen (Zeitdifferenzen aufeinanderfolgender Doppeldifferenzen), welche frei von Mehrwegeinflüssen sind, lassen sich absolute PZO und PZV bestimmen [Wübbena et al., 2000]. Der Zeitaufwand für die absolute Kalibrierung einer Antenne beträgt bei diesem Verfahren etwa vier Stunden, was einen enormen Zeitgewinn gegenüber 48h-Messungen (zweimal 24h zur Bildung siderischer Differenzen) erbringt.

### 2.3.2 Relative Kalibrierung

Dieses Kalibrierungsprinzip beruht darauf, eine Basislinie des Testfeldes zu beobachten, die koordinatenmäßig bekannt ist. Von Vorteil hierbei ist, dass die erforderlichen Messungen bei normalem, nicht gekippten Aufbau der Antenne erfolgen [Frevert et al., 2003], und ohne künstliche Signale auskommen.

Bei diesem Verfahren werden im Normalfall der mittlere Offset (PZO) sowie die Variationen des Phasenzentrums (PZV) relativ zu einer Referenzantenne bestimmt. Bei den PZV werden i.d.R. nur die von der Elevation abhängigen Korrekturwerte berechnet, ohne eine Abhängigkeit der azimuthalen Richtung zu berücksichtigen [Mayer, 2002].

Wie auch beim absoluten Feldverfahren gilt hier die Annahme, dass alle äußeren Einflussfaktoren, wie bspw. Einflüsse der Atmosphäre oder der Satellitenbahnen aufgrund des recht geringen Abstands zwischen der zu kalibrierenden und der Bezugsantenne so klein sind, dass sie nahezu verschwinden. Damit ist es auch hier möglich, das Antennenmodell unbeeinflusst von atmosphärischen Einflüssen oder Bahnfehlern zu schätzen. Ebenso fallen die Mehrwegeeffekte durch Langzeitbeobachtungen weitgehend heraus.

Die absolute Lage der zu kalibrierenden Antenne muss a priori nicht exakt bekannt sein, da sich diese durch Beobachtungen mit mehreren azimuthalen Antennenausrichtungen fehlerfrei bestimmen lässt. Nur der Höhenunterschied der zwei Antennen muss im Vorfeld durch ein hinreichend genaues Verfahren (bspw. Nivellement) festgelegt werden [Wanninger and Böhme, 1999].

Die Berechnung des dreidimensionalen Raumvektors zwischen dem Antennenreferenzpunkt und dem mittleren Phasenzentrum erfolgt bei der relativen Kalibrierung i.d.R. getrennt von den Variationen des Phasenzentrums. Für den Lageoffset werden dabei absolute Werte geschätzt, während der Höhenoffset relativ zur verwendeten Referenzantenne bestimmt wird. Bei der Auswertung wird der berechnete Höhenunterschied mit dem durch Nivellement bestimmten  $\Delta H$  verglichen. Die so berechnete Differenz stellt die Höhenkomponente  $a_z$  des Vektors  $\vec{a}$  aus Formel (2-1) dar. Die Bestimmung eines absoluten Höhenoffsets ließe sich nur durch Verkippen der Antenne realisieren.

Phasenzentrumsvariationen, die von Elevation und Azimut abhängig sind, lassen sich mit der relativen Kalibrierung auch nur in Relation zur Referenzantenne ermitteln. Mit Hilfe dieser Kalibrierungsart ist es auch möglich, absolute Verbesserungen der zu prüfenden Antenne zu bestimmen. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen von absoluten Kalibrierwerten für die Referenzantenne [Frevert et al., 2003].

Ein Problem, welches bei der Durchführung von relativen Kalibrierungen auftritt, ist die Behandlung der Fehler der Referenzantenne. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten:

1. absolute Kalibrierung im Vorfeld

2. Festlegung eines definierten z.B. „fehlerfreien“ Antennentyps.

Der zweite Fall wird vom IGS und NGS durch die Einführung eines Antennentyps, der per Definition als fehlerfrei gilt, verwirklicht. Hierbei kommen Antennen des Typs „Dorne Margolin T“ zum Einsatz. Bei Antennen dieses Typs gelten für die Trägerphasen L1 und L2 folgende Festlegungen [Mayer, 2002]:

- $PZV \equiv 0$
- $PZO_{N,E} \equiv 0$
- $PZO_{H,L1} \equiv 110.0mm$ ,  $PZO_{H,L2} \equiv 128.0mm$

In dieser Arbeit wird als Referenzantenne die Antenne der SAPOS<sup>®</sup>-Station KARL verwendet, welche auf dem Messdach des GIK installiert ist. Auf dieser Station kommt eine Antenne des o.g. Typs der Firma Trimble (TRM29659.00) zum Einsatz. Für selbige Antenne liegen absolute Kalibrierwerte (Datei: 181798.ant) der Firma Geo++ (<http://www.geopp.de>) vor, die bei der Bestimmung der absoluten Korrekturwerte der zu kalibrierenden Antennen eingesetzt wurden. Für die Relativkalibrierung wurden für KARL die Relativwerte des NGS für diesen Antennentyp verwendet. An dieser Stelle soll der Inhalt der Datei (arefzkali.apc) mit den relativen Kalibrierungsdaten für KARL (R: TRM29659.00) und den „Dummy“-Werten für die zu kalibrierende Antenne (K: LEIAT502) beispielhaft aufgeführt werden:

ANTENNA ID	DESCRIPTION									DATA SOURCE (# OF TESTS) YR/MO/DY	
	[north]	[ east]	[ up ]								AVE = # in average
	[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]	L1 Offset (mm)
	[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[ 5]	[ 0]		L1 Phase at
	[north]	[ east]	[ up ]								Elevation (mm)
	[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]	L2 Offset (mm)
	[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[ 5]	[ 0]		L2 Phase at
											Elevation (mm)

R: TRM29659.00

```

0.0      0.0      110.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0      0.0      128.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

```

K: LEIAT502

```

0.0      0.0      0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0      0.0      0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

```

Da bei der Feldkalibrierung die Originalsignale der GPS-Satelliten verwendet werden, entsteht aufgrund der GPS-Satellitenbahnen in mittleren nördlichen Breiten das sog. Nordloch, d.h. im Bereich nördlich einer GPS-Antenne können keine Signale empfangen werden. Um die Beobachtungen trotzdem über die gesamte Antenne verteilen zu können, ist es notwendig die Antenne zu drehen. Durch das Drehen besteht somit die Möglichkeit, neben den Offsets des mittleren Phasenzentrums auch Variationen zu bestimmen, die vom Azimut der Satellitensignale abhängen.

### 3 Hardware und Kalibrierungsverfahren

In diesem Kapitel soll die in dieser Arbeit verwendete Hardware aufgeführt sowie der Ablauf und Aufbau der Messungen beschrieben werden.

#### 3.1 GPS-Instrumentarium

Um Kalibrierungsmessungen für GPS durchführen zu können, sind geodätische GPS-Empfänger notwendig. Für die Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit getätigt wurden, waren Geräte der Firma *Leica* im Einsatz. Der Empfänger *Leica SR530* ist ein geodätischer Echtzeit-Zweifrequenzempfänger, der für L1 und L2 jeweils über zwölf Kanäle verfügt. Auf L1 kann empfangen werden: Trägerphase, C/A-Code und der P1-Code. Mit L2 sind möglich: Trägerphase und P2-Code. Um den Empfänger bedienen zu können, kam ein Terminal *TR500* zum Einsatz. Die Rohdaten wurden auf auswechselbare PC-Karten (PCMCIA) gespeichert [lei, 2002].

Es wurden vorwiegend jene kalibriert, welche auch bei den Messungen im SFB 461 in Rumänien eingesetzt wurden. Hierbei handelt es sich um den Typ *Leica AT502*. Außerdem wurde eine neue Antenne des Typs *Leica AX1202* kalibriert.



Bild 3-1: GPS-Antenne *AT502* auf Drehvorrichtung

Als Referenzantenne wurde die vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) betriebene GPS-Station KARL verwendet, die auf dem Messdach des GIK installiert ist. Sie ist Bestandteil verschiedener Netze: BWREF<sup>2</sup>, GREF<sup>3</sup>, EUREF<sup>4</sup> und SAPOS<sup>5</sup>. Als Empfänger wird hier ein *Trimble 4000SSi* verwendet. Die Antenne ist vom Typ „Dorne Margolin T“ der Firma *Trimble (TRM29659.00)*.

<sup>2</sup>Baden-Württembergisches Referenznetz

<sup>3</sup>German GPS Reference Network

<sup>4</sup>European Reference Frame

<sup>5</sup>Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

Für sie liegen absolute Kalibrierwerte der Firma *Geo++* vor. Als relative Kalibrierwerte können die des NGS eingeführt werden, die für die meisten auf dem Markt zu findenden GPS-Antennen im Internet zur Verfügung gestellt werden (<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>).

### 3.2 Drehvorrichtung

Relative Kalibrierungen liefern zuverlässige und genaue Ergebnisse, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind: Erstens sollten lange Beobachtungszeiten (mindestens 24 Stunden) gewählt werden und zweitens muss die Antenne, deren Parameter bestimmt werden sollen, gedreht werden, um die Beobachtungen über den gesamten Antennenhorizont zu verteilen. Im klassischen Anwendungsfall bedeutet dies eine komplette Woche Arbeit, wenn vier azimutale Ausrichtungen gewünscht sind, da die Antenne jeweils nach 24 Stunden Beobachtungszeit um 100 gon gedreht wird. Darin liegt das Problem dieses Kalibrierverfahrens, es ist zwar kostengünstig, aber recht zeitaufwändig. Im Gegensatz dazu sind die absoluten Verfahren zwar schnell, dafür aber sehr teuer.

An der Technischen Universität Dresden wurde deshalb nach einem kostengünstigen System gesucht, welches eine Beschleunigung der relativen Kalibrierung erlaubt, ohne allerdings an Genauigkeit einzubüßen [Frevert et al., 2003]. Somit entstand das sog. „DrehRumBum“-System, welches im Folgenden näher erläutert werden soll.

Der Grundgedanke, der hinter dieser Entwicklung steckt, ist die Beobachtungszeit von vier Tagen à 24 Stunden auf einen Tag mit einer 24-stündigen Beobachtungssession zu verkürzen. Innerhalb dieses einen Tages müssen dann Messungen für alle gewünschten azimutalen Ausrichtungen getätigt werden. Der Trick hierbei ist, die Aufzeichnungsrate von 60 Sekunden auf 15 Sekunden herunterzusetzen und die Antenne in der Zeit zwischen den einzelnen Messungen jeweils in die gewünschte azimutale Richtung zu drehen. Somit liegt nach einem Beobachtungstag je ein Satz von Daten für jede der vier azimutalen Ausrichtungen mit einer Datenrate von 60 Sekunden vor.

Vor Beginn der Entwicklung wurden die zu erzielenden Anforderungen formuliert. Dabei war es u.a. wichtig ein System zu entwickeln, welches autonom arbeiten und Fehler eigenständig erkennen und an den Nutzer übermitteln konnte. Des Weiteren sollte die Entwicklung mobil sein, um sie an verschiedenen Orten einsetzen zu können und sich zudem noch kostengünstig fertigen lassen. Mit diesen Vorgaben wurde in Dresden ein System entwickelt, welches aus folgenden Komponenten besteht:

- mechanische Drehvorrichtung, welche in einem *Zeiss*-Dreifuß zentriert und horizontalisiert werden kann
- Steuerung des Schrittmotors mit einer mikroprozessorgestützten Schaltung inklusive Firmware
- Steuerungssoftware mit benutzerfreundlicher Oberfläche.

Die mechanische Drehvorrichtung ersetzt den sonst notwendigen Antennenträger. Sie besteht aus einem Zapfen, der in einem *Zeiss*-Dreifuß befestigt werden kann, und einem dazu verdrehbaren Aufsatz mit passendem Gewinde zur Aufnahme der GPS-Antennen. Zur automatischen Drehung ist am Unterteil ein leistungsfähiger Schrittmotor angebracht, mit dem auch schwere Antennen (z.B. Choke-Ring) bewegt werden können. Am Oberbau ist ein Zahnkranz befestigt, welcher in das Ritzel des Motors greift. Ebenso ist ein magnetischer Kontakt installiert, welcher zur Kontrolle der Drehbewegung verwendet wird. Die Anschlussleitungen führen zu einer Steuerungsbox. Zum Schutz gegen die Witterung ist am Drehkranz eine Plastikhaube befestigt, die sich mitdreht.

An der Steuerungseinheit befinden sich Anschlüsse für die Leitungen zum mechanischen Teil, für die Energieversorgung aus dem Stromnetz und eine Buchse zur Verbindung mit der seriellen RS232-Schnittstelle des Steuerungscomputers. Im gleichen Gehäuse ist ebenfalls die auf einem bestehenden

Mikrocontroller aufbauende Steuerelektronik eingebaut. Sie empfängt Steuersignale des PCs und wandelt sie in Befehle zum Antrieb des Motors um.

In Bild 3-2 ist eine der Drehvorrichtungen mit einem Teil des notwendigen Zubehörs abgebildet. Links oben ist die Steuerungseinheit mit Verbindungskabel zur Drehvorrichtung, links unten das Netzteil zu erkennen. In der Mitte befindet sich die eigentliche Drehvorrichtung mit Wetterschutzhaube, auf der rechten Seite der Messingadapter für die Messpfeiler, ein *Zeiss*-Dreifuß sowie eine für die Horizontierung notwendige Wasserwaage.

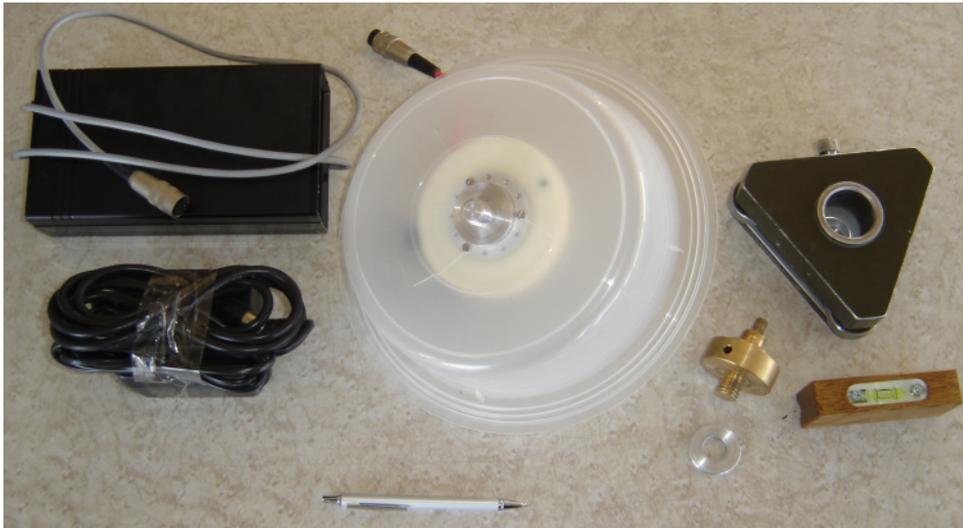


Bild 3-2: „DrehRumBum“ mit Zubehör

Um das ganze System komfortabel bedienen zu können, wurde die Software *AAKDD* mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt. Sie übernimmt die eigentliche Steuerung. Hauptaufgabe ist die zeitliche Synchronisation der Aufzeichnung der GPS-Signale im Empfänger mit der Rotation der Antennendrehung. Ein wichtiger Punkt, der hierbei realisiert wurde, ist die Möglichkeit zur Synchronisation der Systemzeit des PCs mit einem Zeitserver. Bspw. kann diese über eine Internetverbindung zum Server der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) (<http://www.ptb.de>) erfolgen. Hintergrund ist die Übereinstimmung der GPS-Zeit mit der vom Computer verwendete Zeit. Die Antennendrehung soll immer genau zwischen zwei Signalaufzeichnungen erfolgen, welche zu den Sekunden 0, 15, 30 und 45 der GPS-Zeit erfolgen. Damit soll eine mögliche Zeitverschiebung und ein eventuell daraus resultierendes Aufzeichnen der Daten während einer Drehung vermieden werden. Die Drehabfolge ist: Nord - Süd - West - Ost [Frevert et al., 2003].

Vom GIK wurden zwei der Dresdener Drehsysteme erworben (Seriennummern 04 und 05), die im Rahmen dieser Arbeit und einer Kooperation mit der Universidade Federal do Paraná (UFPR) in Curitiba/Brasilien erstmalig in Karlsruhe eingesetzt wurden.

### 3.3 Aufbau auf dem Messdach

Da die Kalibrierung auf zwei Pfeilern des GIK-Messdachs durchgeführt wurde, können unterschiedliche äußere Einflüsse auf die Messungen von vornherein nicht ausgeschlossen werden. Im Jahr 2003 hat Frau Christina Franco de Lacerda am GIK ihre Diplomarbeit angefertigt, wobei Sie sich mit dem Einfluss von sog. „Multipath-Effekten“ auf GPS-Code- und Phasenmessungen befasste. Dabei untersuchte sie u.a. den Mehrwegeeinfluss an den vier Pfeilern des GIK-Messdaches. Als Ergebnis ließ sich damals feststellen, dass die Auswirkungen auf die Pfeiler HPF1 und NPF1 größer sind als auf die beiden im

Rahmen dieser Arbeit zur Kalibrierung verwendeten Pfeilern HPF2 und NPF2. Zwischen den beiden letztgenannten waren lediglich geringfügige Unterschiede feststellbar, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Kalibrierungen, die auf diesen durchgeführt wurden, nahezu die selben Ergebnisse liefern [de Lacerda, 2003]. Bild 3-3 zeigt die Anordnung der Pfeiler auf dem Messdach.

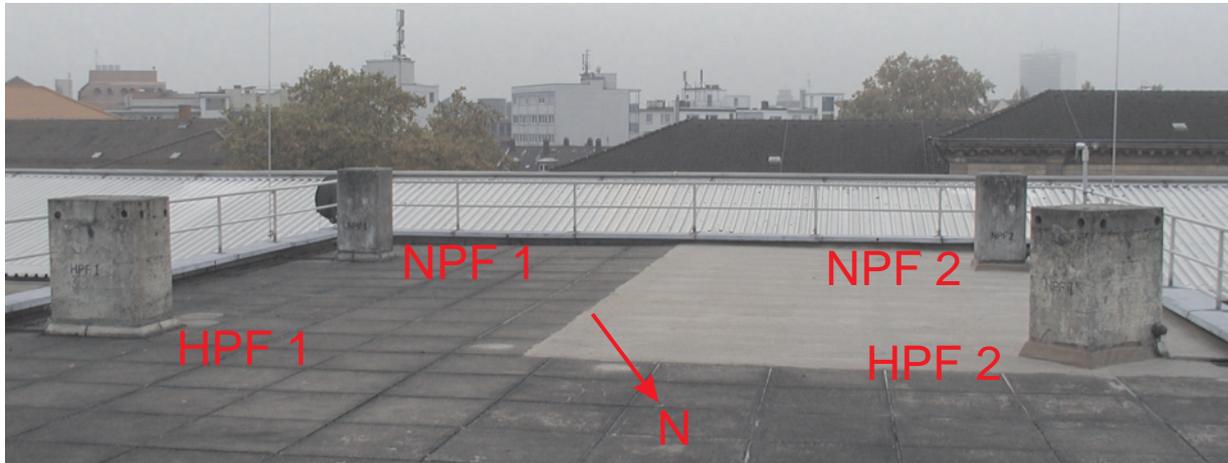


Bild 3-3: Anordnung der Pfeiler auf dem Messdach

Um das Drehsystem auf den Pfeilern montieren zu können, wurden von der institutseigenen Metallwerkstatt spezielle Messingadapter gefertigt. Diese können mit dem Gewinde an der Unterseite direkt in die auf den Pfeilern einbetonierte Zwangszentrierungen geschraubt werden und mit dem Gewindestück auf der Oberseite einen Dreifuß aufnehmen. Mit dem Dreifuß und einer kleinen Wasserwaage kann das System horizontalisiert werden. Neben dem Pfeiler wurde eine Alu-Box aufgestellt. Hierin wurden die Steuerungseinheit, der GPS-Empfänger und die Stromversorgung zum Schutz gegen die Witterung untergebracht. Da ein direkter Anschluss des *Leica*-GPS-Empfängers an das Stromnetz nicht möglich war, musste dieser indirekt über das Ladegerät und die Batterie mit Energie versorgt werden. Die Steuerungseinheit und somit auch die Dreheinrichtung wurden direkt über das Stromnetz gespeist.

Ein sehr wichtiger Punkt ist in diesem Zusammenhang die sehr genaue Bestimmung des Höhenunterschieds zwischen dem Antennenreferenzpunkt der Referenzantenne und der Auflagefläche des ARP der zu kalibrierenden Antenne auf dem „DrehRumBum“. Hierzu wurde eine Nivellierausrüstung, bestehend aus einem *Zeiss DiNi10* mit Stativ, sowie einer 2 m und einer 1 m Invarband-Code-Latte, verwendet. Bild 3-4 zeigt eine schematische Darstellung der Bestimmung der Höhenunterschiede.

Da die verwendete Referenzantenne KARL Teil einer permanent betriebenen Station ist, war es nicht möglich, die Antenne kurz abzunehmen, um mit der Nivellierlatte auf der Auflagefläche aufzuhalten. Lösung dieses Problems war, vorsichtig von unten die auf dem Kopf stehende Nivellierlatte an die Unterseite des Choke-Rings zu halten und mit inversem Ablesemodus des Nivelliers die Ableseung zu tätigen. Um diese aufwändige Arbeit nicht bei jedem Kalibriervorgang durchführen zu müssen, wurde der Höhenunterschied ( $\Delta h$ ) zwischen der Unterseite des Choke-Rings und einem in der Nähe von KARL angebrachten Höhenbolzen bestimmt. Dies wurde mehrfach an unterschiedlichen Stellen der Antennenunterseite durchgeführt (siehe Tab. 3-1). Korrigiert werden musste dieser Wert letztendlich noch um den konstanten Offset ( $d$ ) zwischen der Unterseite des Choke-Rings und dem eigentlichen Antennenreferenzpunkt der Referenzantenne (0.0350 m). Der endgültige Höhenunterschied wurde nach Formel (3-1) zu 2.3353 m festgelegt. Fortan wurde bei jeder Kalibrierung nur noch der Höhenunterschied zwischen Höhenbolzen und dem ARP der zu kalibrierenden Antennen ermittelt.

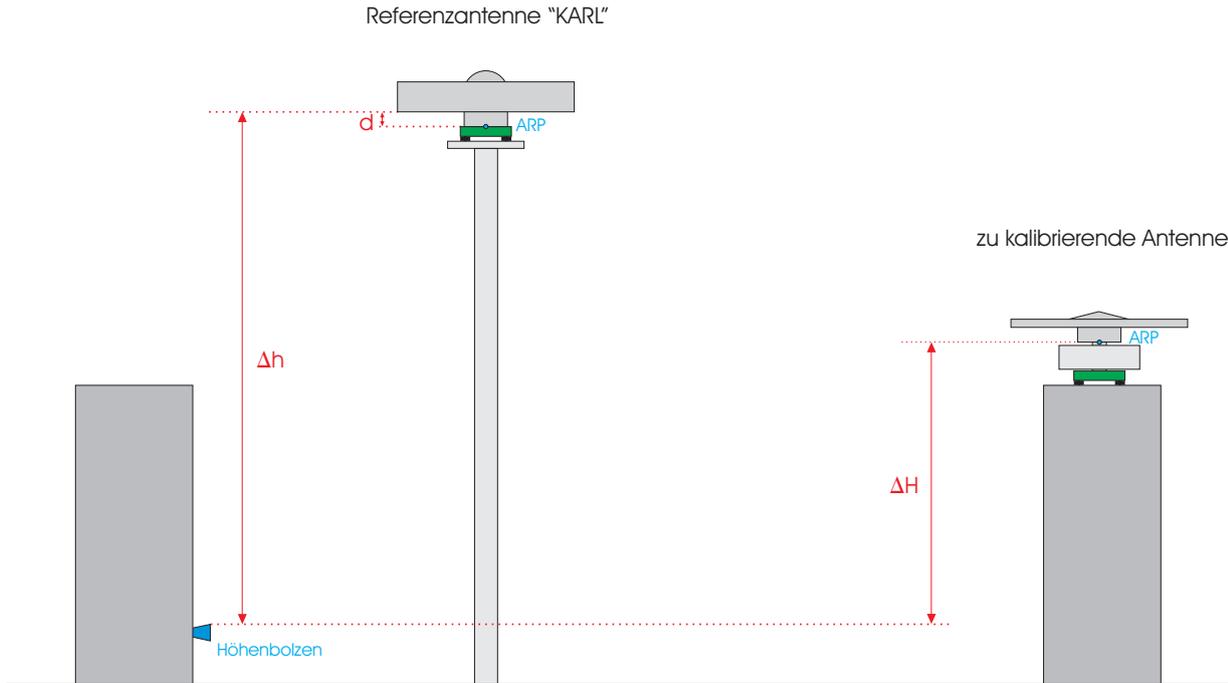


Bild 3-4: Schematische Darstellung der Bestimmung der Höhenunterschiede

Tabelle 3-1: Nivellementsablesungen [m]

KARL (inverse Ablesung)			Höhenbolzen
links	Mitte	rechts	
1.1004	1.1007	1.1000	1.2697
1.1004	1.1008	1.0006	1.2697
1.1005	1.1008	1.1006	1.2697
1.1005	1.1008	1.1006	1.2697
Mittel: 1.1006			Mittel: 1.2697

$$\Delta h = 1.1006 \text{ m} + 1.2697 \text{ m} - 0.0350 \text{ m} = 2.3353 \text{ m} \quad (3-1)$$

Auf der Drehvorrichtung wurde mit Hilfe der kurzen Inverband-Codelatte die Höhe der Auflagefläche bestimmt. Aus den zwei Höhenunterschieden zwischen Auflagefläche und Höhenbolzen sowie zwischen Höhenbolzen und ARP von KARL läßt sich der endgültige gesuchte Höhenunterschied zwischen den Antennenreferenzflächen der Referenzantenne und der zu kalibrierenden Antenne berechnen.

Im GIK-Observatorium wurde ein Steuerrechner etabliert, welcher über zwei lange serielle Kabel (ca. 15 m) mit den Steuerungsboxen verbunden ist. Zwar bietet die Steuerungssoftware auch die Möglichkeit einer Fernabfrage oder einer Benachrichtigung bei Problemen per e-mail, aber dies wurde bei dieser Arbeit nicht genutzt. Es wurde lediglich eine Webcam installiert, welche im Zeitabstand von fünf Minuten je ein Bild abspeicherte, um eventuelle Störungen zu erfassen bzw. zeitlich eingrenzen zu können. Diese Bilder konnten dann von jedem Rechner des Institutsnetzes abgefragt werden.

### 3.4 Ablauf der Messungen

Zu Beginn jeder Kalibrierung wurde auf beiden Pfeilern die Drehvorrichtung mittels Adapter und Dreifuß befestigt. Dabei wurde darauf geachtet, das System mit Hilfe einer Wasserwaage genau zu horizontalisieren. Die Steuerungsvorrichtung wurde zusammen mit dem GPS-Empfänger und dessen Stromversor-

gung in der Alu-Box am Fuß des Pfeilers abgestellt. Anschließend wurde der präzise Höhenunterschied zwischen Auflagefläche der Antenne und Höhenbolzen per Nivellement ermittelt und die Antenne aufgeschraubt. Hierbei war es wichtig, bei der Ausrichtung der Antenne darauf zu achten, dass zum einen der magnetische Kontakt des Zahnkranzes der Drehvorrichtung mit dem entsprechenden Sensor zur Deckung gebracht und zum anderen die Antenne nach Norden ausgerichtet wurde. Für die verwendeten *Leica*-Antennen wurde aufgrund eines fehlenden Nordpfeils vereinbart, dass der Kabelausgang nach Norden zeigt. Dieser Magnetkontakt ist für die Drehkontrolle des Systems notwendig. Ebenso muß beim Aufbau darauf geachtet werden, dass mit dem Antennenkabel zwei bis drei Schlaufen um die Drehvorrichtung gelegt werden, damit das System ohne Probleme rotieren kann. In der Bedienoberfläche der Software wurden nun die Seriennummern der Antennen und Empfänger, sowie die gewünschten Drehintervalle eingestellt und die beiden Drehsysteme gestartet. Zuerst führt das System einen Selbsttest mit Zeitsynchronisation und eine Drehzeit-Messung durch, wobei u.a. überprüft wird, ob eine dreiviertel Drehung ohne größeren Widerstand durchführbar ist. Falls hierbei keine Probleme auftreten, wartet das System auf den eigentlichen Beginn der Messzyklen. Da die Aufzeichnung der GPS-Signale bei einer Datenrate von 15 Sekunden immer zu den Sekunden Null, 15, 30 und 45 erfolgt, sind die Drehungen zeitlich dazu um etwa sieben Sekunden versetzt; d.h. das System dreht etwa bei GPS-Sekunde sieben von Nord auf Süd, bei Sekunde 22 von Süd auf West, bei Sekunde 37 von West auf Ost und etwa bei Sekunde 52 von Ost auf Nord.

Bevor die Aufzeichnung der GPS-Signale am Empfänger gestartet wurde, war die Sensoridentifikationsnummer auf die letzten vier Ziffern der Seriennummer der zu kalibrierenden Antenne gesetzt worden, um eine zusätzliche Kontrolle der Daten zu ermöglichen. Es wurde ebenfalls ein neuer Mess-Job auf der Speicherkarte angelegt. Anschließend wurde nochmals überprüft, ob die anfangs gewählte Elevationsmaske von  $0^\circ$  eingestellt war. Für die restlichen Einstellungen wurde zu Beginn auf jedem Empfänger eine Konfigurationsdatei erstellt, in der die gewünschten Informationen und Einstellungen gespeichert waren. Nun konnte die Aufzeichnung der Rohdaten mit einer Datenrate von 15 s gestartet werden.

Nach etwas mehr als 24 h wurden die Aufzeichnung der Daten im Empfänger und das „DrehRumBum“ gestoppt und mit dem Umbau begonnen. Die Ausdehnung der Messdauer auf über 24 h hat den Vorteil, dass zu Beginn und am Ende mehrere Minuten des aufgezeichneten Datensatzes herausgeschnitten werden können. Somit können die Einflüsse der Personen, die zu Start und Stop der Messungen an die Antennen bzw. Empfänger herantreten müssen, ausgeschlossen und trotzdem ein kompletter Tag Beobachtungsmaterial gesammelt werden.

Zu Beginn der Messungen wurde bei jedem Umbau noch einmal neu nivelliert. Durch Analyse dieser Ergebnisse wurde festgestellt, dass sich die Höhenunterschiede nicht geändert hatten. Somit wurden nur noch beim ersten Aufbau einer Woche die  $\Delta H$  gemessen. Allerdings wurde darauf geachtet, den Umbau vorsichtig vorzunehmen, so dass eine Veränderung der Horizontierung bzw. der Höhe ausgeschlossen werden konnte.

Zur Weiterverarbeitung der aufgezeichneten Daten mit *WASOFT* war es notwendig, die Rohdaten vom empfängereigenen Format in das RINEX-Format (*r*eceiver *i*ndependent *e*xchange, <http://www.aiub.unibe.ch/dow>) zu überführen. Für die mit den *Leica*-Empfängern aufgezeichneten Daten wurde in der Software *SkiPro* pro Messtag und Antenne ein neues Projekt angelegt, die Rohdaten eingelesen und wieder im RINEX-Format ausgegeben.

Neben den Daten der zu kalibrierenden Antennen wurden ebenso die von der Referenzstation KARL aufgezeichneten Daten benötigt. Diese werden mit einer Rate von einer Sekunde automatisch aufgezeichnet und können über die Homepage des GIK heruntergeladen werden. Dabei ist es möglich, die Datenrate sowie Beginn- und Endzeit in vorgegebenen Stufen auszuwählen. Bei dieser Arbeit wurde für die Daten von KARL eine Aufzeichnungsrate von 15 s als kompletter Tagessatz (von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr) ausgewählt.

## 4 Bestimmung von Kalibrierwerten

Zur Berechnung von Korrekturwerten für GPS-Antennenmodelle wurde das Softwarepaket *WaSoft/Kalib* des Ingenieurbüros *Wanninger* aus Neuwied eingesetzt. Im Folgenden soll näher auf die Programme des Paketes eingegangen werden. Wichtigster Bestandteil hierbei ist das Modul *WaAnt*, mit welchem die eigentliche Kalibrierungsberechnung vorgenommen wird.

### 4.1 Ablauf einer Auswertung

Bevor mit der Auswertung begonnen werden konnte, mussten die aufgezeichneten GPS-Daten vorverarbeitet werden. In einem ersten Schritt wurden die Navigationsdateien der Referenzstation zweier Tage, welche immer tagesweise vorlagen, mit *rinmerge* zu einer Datei zusammengefügt. Anschließend wurden diese und die aufgezeichneten Daten der zu kalibrierenden Antennen mit Hilfe von *WaRinex* auf das geeignete 24-Stunden-Intervall zugeschnitten.

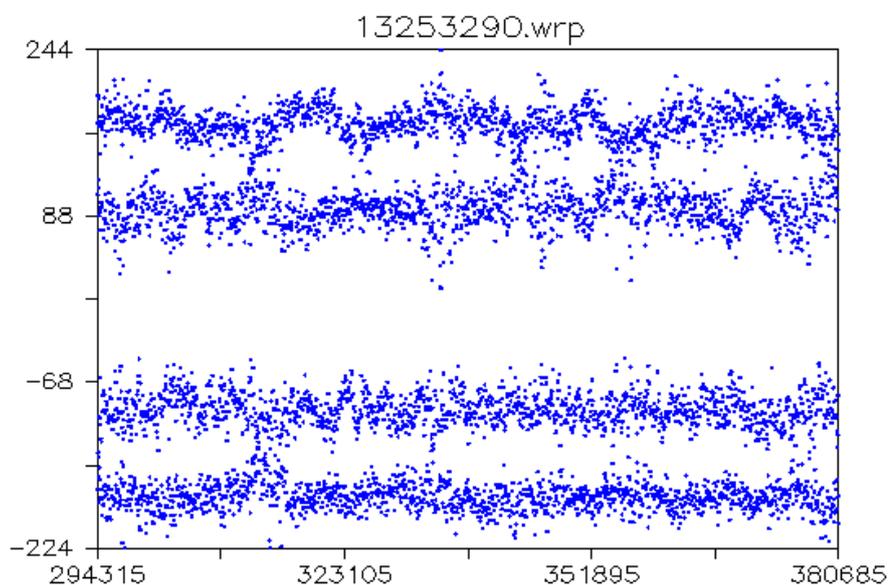


Bild 4-1: Plot des Drehtests mit *WaPlot*

Um neben dem Protokoll der Steuersoftware des Drehsystems eine weitere unabhängige Kontrolle darüber zu haben, ob sich das System während der gesamten Messdauer gedreht hat, lässt sich mit dem Softwarepaket *WaSoft/Kalib* eine Grafik erzeugen. Hierzu wurde auch eine Stapelverarbeitungsdatei erzeugt, welche folgende Schritte enthält:

- Berechnung der Basislinie von der Referenzantenne zur zu kalibrierenden Antenne mit *WaSoft*
- Berechnung der Azimutveränderungen mit *WaShow*
- Plotten des Ergebnisses *WaPlot*.

In diesem Plot lassen sich Probleme bei der Drehung sehr einfach ablesen. Ein Beispiel für einen Plot einer fehlerfreien Session ist mit Bild 4-1 gegeben. Auf der Abszisse ist die Zeitskala des Beobachtungszeitraumes in Sekunden aufgetragen, auf der Hochachse sind die einzelnen Azimute der Antennenausrichtung von  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $90^\circ$  bis  $180^\circ$  aufgetragen. Über den gesamten Zeitraum müssen diese Azimutveränderungen gleichmäßig verteilt sein. Bei Betrachtung dieser Grafik ist zu beachten, dass

die Standardabweichung der Azimutveränderungen zwischen  $5^\circ$  und  $10^\circ$  liegen. Daraus kann zwar keine genaue Ausrichtung der Antenne abgelesen werden, ein Stillstand ist jedoch sofort festzustellen.

Bisher liegen die originären GPS-Messdaten, welche für verschiedene azimutale Ausrichtungen aufgezeichnet wurden, in einer Datei vor. Für die weitere Verarbeitung ist es notwendig, sie nach ihrer Ausrichtung getrennt vorzuhalten. Hierzu wurde ebenfalls eine Batch-Datei erstellt, welche diese Aufgabe erleichtert und bspw. folgendes Aussehen hat:

```
rem Aufspalten der RINEX-Beobachtungsdateien

rem Zerteilung in Himmelsrichtungen mit WARINEX
rem      Sekunde      Antennenausrichtung      DDD S
rem      0            Nord = 0 Grad Azimut      349 n
rem      15           Sued = 180                349 s
rem      30           West = 270                349 w
rem      45           Ost  = 90                  349 o

rem Aufspalten der Dateien der Referenzantenne:
warinex karl3490.04o +R60      karl349n.04o
warinex karl3490.04o +R60,15 karl349s.04o
warinex karl3490.04o +R60,30 karl349w.04o
warinex karl3490.04o +R60,45 karl349o.04o

rem Aufspalten der Dateien der zu kalibrierenden Antenne:
warinex 13253490.04o +R60      1325349n.04o
warinex 13253490.04o +R60,15 1325349s.04o
warinex 13253490.04o +R60,30 1325349w.04o
warinex 13253490.04o +R60,45 1325349o.04o
```

Die zur GPS-Sekunde Null gewonnenen Daten wurden mit der azimutalen Ausrichtung  $0^\circ$  (entspricht „Nord“) aufgezeichnet, die zur Sekunde 15 registrierten Beobachtungen mit Azimut  $180^\circ$  (entspricht „Süd“), die zu Sekunde 30 erfassten Daten mit azimutaler Ausrichtung  $270^\circ$  (entspricht „West“) und die zu GPS-Sekunde 45 registrierten Daten mit Ausrichtung „Ost“ (= Azimut  $270^\circ$ ). Durch den mehrfachen Aufruf von *WaRinex* wird nun die Datei mit einer Beobachtungsrate von 15 Sekunden und allen azimutalen Ausrichtungen aufgespalten in vier Dateien, die jeweils eine Datenrate von 60 Sekunden und nur eine azimutale Ausrichtung aufweisen; z.B.: karl349n.04o, karl349s.04o, karl349w.04o, karl349o.04o. Die ersten vier Zeichen des Dateinamens repräsentieren hierbei den Standpunkt der Antenne (z.B. karl), die nächsten drei Zeichen den GPS-Tag des Jahres und das letzte Zeichen die azimutale Ausrichtung. Bei den kompletten, noch unbehandelten Dateien wird das letzte Zeichen durch eine „Null“ ersetzt. Bei den zu kalibrierenden Antennen wurden jeweils die vier letzten Zeichen der Seriennummer zur eindeutigen Identifizierung verwendet (z.B. 1325).

In einem weiteren Schritt wurden nun für die zu kalibrierende Antenne Näherungskordinaten mittels *WaSoft* berechnet, da diese für die weitere Kalibrierung benötigt werden. Hierzu müssen beim Programmaufruf schon genäherte Koordinaten für die beiden Endpunkte der Basislinie (Referenz- und zu kalibrierende Antenne) angegeben werden. Für KARL wurden die bekannten Koordinaten des Antennenreferenzpunktes, für die zu kalibrierende Antenne cm-genaue Näherungen eingeführt. Ebenso mussten an dieser Stelle A-priori-Kalibrierwerte angegeben werden. Für die Referenzantenne KARL wurden absolute Kalibrierungswerte, die von der Firma *Geo++* bestimmt wurden, verwendet; für die neu zu kalibrierende Antenne eine Dummy-Datei, in der alle Verbesserungen zu Null gesetzt waren. Diese zu Null gesetzten Werte werden dann bei der eigentlichen Kalibrierung durch die für diese An-

tenne bestimmten Korrekturen ersetzt. Ebenso wurde bei der relativen Kalibrierung verfahren, bei welcher für KARL die vom NGS zur Verfügung gestellten Werte und für die neu zu kalibrierenden Antennen wieder die zu Null gesetzten Anfangswerte verwendet wurden.

Bevor nun die Kalibrierergebnisse ermittelt werden konnten, wurde für jede Ausrichtung (Nord, Süd, West, Ost) der zu kalibrierenden Antenne die Basislinie zur Referenzantenne mit *WaSoft* berechnet. Hierbei wurden die zuvor berechneten Näherungskordinaten eingeführt. Die Software *WaSoft* setzt in diesem Auswerteschritt die Phasenmehrdeutigkeiten für die Basislinie fest, diese sollten nach der Berechnung noch validiert werden. Das Softwarepaket von *Wanninger* bietet hierzu das Programm *WaNet* an, welches u.a. eine Quote für die Lösung der Mehrdeutigkeiten ausgibt.

Nach diesen Vorarbeiten werden die eigentlichen Kalibrierwerte berechnet. Hierzu werden vom Modul *WaAnt* Doppeldifferenzresiduen genutzt. Ein Programmaufruf sieht bspw. wie folgt aus:

```
waant karl,1325 -1.3949 0:349n 90:349o 180:349s 270:349w -e0 +o3.
```

Nach dem Programmnamen folgen die zwei eine Basislinie bildenden Punkte, wobei zuerst die Referenzstation genannt werden muss. Anschließend folgt der (nivellierte) Höhenunterschied zwischen ARP der Referenzantenne und ARP der zu kalibrierenden Antenne. Hierbei gilt:

$$\Delta H = \text{Höhe der zu kalibrierenden Antenne} - \text{Höhe der Referenzantenne.}$$

Anschließend folgen die einzelnen azimutalen Ausrichtungen mit Angabe des GPS-Tages und der Bezeichnung der Beobachtungssession (n = Nord, s = Süd, w = West, o = Ost). Mittels der folgenden Eingaben können noch weitere Optionen gesetzt werden: „-e0“ setzt die Elevationsmaske auf 0° und „+o3“ gibt die Phasenzentrumsoffsets in die Datei „1325.pco“ im PZO-Format aus.

Durch einen weiteren Aufruf können anschließend die Variationen des Phasenzentrums berechnet werden. Dieser sieht zum Beispiel folgendermaßen aus:

```
waant karl,1325 -1.3949 0:349n 90:349o 180:349s 270:349w +AE +M +o0 +o4.
```

Die Option „+AE“ gibt die azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen aus. „+M“ bewirkt, dass keine neuen Werte für die Offsets des Phasenzentrums berechnet sondern die einer vorhergehenden Berechnung verwendet werden. Durch „+o0“ werden die Korrekturen im ANTEX-Format (<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/antex13.txt>) und durch „+o4“ in einem Vektorformat ausgegeben. *WaAnt* bietet noch weitere mögliche Ausgabeformate an: altes IGS, NGS und Geo++ [anl, 2004b].

Im Programmpaket *WaSoft/Kalib* werden die Variationen des Phasenzentrums mittels Kugelflächenfunktionen modelliert. Dabei werden für die azimut- und elevationsabhängigen PZV Funktionen bis zum Grad acht und der Ordnung fünf verwendet. Ist der Nutzer nur an elevationsabhängigen PZV interessiert, wird die maximale Ordnung Null verwendet. Mit der so vorliegenden flächenhaften Auflösung können die Variationen des Phasenzentrums hinreichend genau wiedergegeben werden. Mehrwegeinflüsse, die in der Regel kleinräumiger ausfallen, können hiermit schlecht erfasst werden [Wanninger, 2002].

## 4.2 Datenformate

Im Folgenden soll kurz auf die einzelnen Ausgabeformate von *WaAnt* eingegangen werden.

### 4.2.1 NGS und altes IGS-Format

In diesem Format ist es möglich, die Offsets des Phasenzentrums und die elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums in einer Datei abzuspeichern. Dabei können die Korrekturen beliebig vieler Einzelantennen oder Antennentypen in einer Datei vorgehalten werden. Beide Formate sind einander sehr ähnlich und unterscheiden sich jeweils nur in der ersten Zeile der Korrekturen.

Beispiel für NGS-Format:

```
LEIAT303      LEIC  WASOFT/KALIB-module WAANT  25.09.2003
      0.6      -0.8      61.5
      1.4  2.0  3.2  3.4  2.3  0.8 -0.2 -0.5 -0.9 -1.4
      -1.6 -1.0  0.1  0.8  1.4  3.1  6.6 10.4  0.0
      0.0      0.2      87.5
      4.5  4.1  3.1  2.0  1.3  0.8  0.1 -0.6 -1.0 -1.0
      -0.7 -0.3  0.0  0.5  1.5  3.2  4.9  6.2  0.0
```

Beispiel für das alte IGS-Format:

```
LEICA      LEIAT303      LEIC  WASOFT/KALIB-module WAANT  25.09.2002
      0.6      -0.8      61.5
      1.4  2.0  3.2  3.4  2.3  0.8 -0.2 -0.5 -0.9 -1.4
      -1.6 -1.0  0.1  0.8  1.4  3.1  6.6 10.4  0.0
      0.0      0.2      87.5
      4.5  4.1  3.1  2.0  1.3  0.8  0.1 -0.6 -1.0 -1.0
      -0.7 -0.3  0.0  0.5  1.5  3.2  4.9  6.2  0.0
```

Der ersten Zeile sind jeweils Informationen zur kalibrierten Antenne zu entnehmen. Weiterhin finden sich in der zweiten bzw. fünften Zeile jeweils die PZO für L1 bzw. L2 in Millimetern. In Zeile drei finden sich die von der Elevation abhängigen PZV in 5°-Schritten von 90° - 45°, darunter von 40° bis 0° für L1 jeweils in Millimetern. Analog dazu die Werte für L2 in den Zeilen sechs und sieben. Nachteilig an diesen Formaten ist die fehlende Information über das Zustandekommen der Korrekturwerte. Es lässt sich also im Nachhinein bspw. nicht feststellen, ob diese Antenne relativ oder absolut kalibriert wurde. Beim Zusammenfügen und anschließenden Verwenden der Ergebnisse mehrerer Antennen zu einer Datei muss daher genau auf die jeweilige Herkunft der Daten geachtet werden.

Falls für niedrige Elevationen keine Daten vorliegen, werden die entsprechenden Werte zu Null gesetzt. Ebenso werden die PZV auf „Null“ gesetzt, wenn nur PZO-Werte bestimmt wurden. Mit *WaAnt* können also auch keine azimut- und elevationsabhängigen Korrekturen in diesem Format abgespeichert werden [anl, 2004b].

### 4.2.2 *Geo++*-Format

Mit diesem nach der Firma *Geo++* benannten Format können sämtliche Arten von PZO und PZV abgespeichert werden. Allerdings kann pro Datei nur ein Korrekturdatensatz abgelegt werden. Es können also nicht die Ergebnisse mehrerer Antennen gleichen Typs zu einer Datei zusammengefasst werden. Im Gegensatz zum vorhergenannten Format sowie zum ANTEX-Format sind die Korrekturwerte hierbei in der Einheit Meter angegeben und die Richtungen der PZV-Werte entgegengesetzt zu den in Kapitel 4.2.1 behandelten Formaten, woraus sich ein umgekehrtes Vorzeichen ergibt.

Anschließend ein Beispiel zum *Geo++*-Format mit elevationsabhängigen PZV:

```

#####
# Antenna Calibration Results  WASOFT/KALIB-module WAANT 3.2  25.09.2003
#####
#
# Calibrated Antenna: 730045          LEIAT303          LEIC
#
# Reference Antenna : 0220077665          TRM22020.00+GP  TCWD
#   corrected using : dres02.ant
# at position (XYZ) : 3904733.1440  954014.3362  4935795.9832
#           (LLH) : 51  1 47.28471  13 43 46.83921  213.016
#
# Observation Sessions:
# Session/Rotation: 1 029 /2002    0
# Session/Rotation: 2 030 /2002    90
# Session/Rotation: 3 031 /2002   180
# Session/Rotation: 4 032 /2002   270
#
# Height difference (levelling):    -0.9227 m
# Approximate distance:             9.6 m
# Elevation mask for PC0: 15 deg
#
TYPE= LEIAT303          LEIC
NO OF FREQUENCIES=2
OFFSETS L1=  0.00062 -0.00083  0.06147
OFFSETS L2=  0.00004  0.00020  0.08754
ELEVATION INCREMENT=5
AZIMUTH INCREMENT=0
VARIATIONS L1=
  0.00000 -0.01042 -0.00659 -0.00313 -0.00140 -0.00079 -0.00008  0.00096  0.00161
0.00142  0.00087  0.00053  0.00021 -0.00076 -0.00232 -0.00342 -0.00319 -0.00205
-0.00141
VARIATIONS L2=
  0.00000 -0.00619 -0.00489 -0.00315 -0.00155 -0.00049  0.00000  0.00029  0.00066
0.00101  0.00104  0.00058 -0.00012 -0.00076 -0.00132 -0.00205 -0.00307 -0.00407
-0.00450

```

Die Variationen des Phasenzentrums werden hierbei in Schritten von  $5^\circ$  beginnend mit einer Elevation von  $0^\circ$  getrennt für L1 und L2 angegeben. Auch hier werden für den Fall, dass für geringe Elevationen keine Beobachtungen vorliegen, die Korrekturwerte zu Null gesetzt. Falls PZV abgespeichert werden, die sowohl azimut- als auch elevationsabhängig sind, folgen diese Werte den Zeilen „VARIATIONS“ mit einem Azimut-Inkrement von  $5^\circ$ . Eine ausführliche Beschreibung des Formats findet sich unter <http://www.ife.uni-hannover.de/aoa-kalibration/geonap.html> [anl, 2004b].

### 4.2.3 ANTEX-Format

Da die zuvor genannten Formate einige Unzulänglichkeiten aufweisen, wurde vom IGS das ANTEX-Format entwickelt, welches diese Probleme beseitigt. Es soll zukünftig das alte IGS-Format ablösen. Dieses Antennenkorrekturformat ist das erste, welches das Bezugsniveau der Korrekturen berücksichtigt, d.h. dem Nutzer können Informationen, ob die Verbesserungen absolut oder relativ bestimmt wurden, zur Verfügung gestellt werden. Ebenso können die Korrekturen von individuellen Antennen mit denen einer Baugruppe in einer Datei abgespeichert werden. Außerdem kann der von der Elevation

abhängige Gültigkeitsbereich spezifiziert werden. ANTEX unterstützt zusätzlich jegliche Arten von Phasenzentrumsoffsets und Phasenzentrumsvariationen.

Nun ein Beispiel zum ANTEX-Format mit elevationsabhängigen PZV:

```

1.2          G          ANTEX VERSION / SYST
A            PCV TYPE / REFANT
Written by WAANT (www.wasoft.de)      25.09.2003 COMMENT
Reference Antenna: TRM22020.00+GP TCWD0220077665 COMMENT
corrected using: dres02.ant           COMMENT
at position (XYZ): 3904733.1440 954014.3362 4935795.9832 COMMENT
(LLH): 51 1 47.28471 13 43 46.83921 213.016 COMMENT
Observation Sessions:                 COMMENT
Session/Rotation: 1 029 /2002 0       COMMENT
Session/Rotation: 2 030 /2002 90      COMMENT
Session/Rotation: 3 031 /2002 180     COMMENT
Session/Rotation: 4 032 /2002 270     COMMENT
Height difference (levelling):         -0.9227 m COMMENT
Approximate distance:                  9.6 m COMMENT
Elevation mask for PC0:                15 deg COMMENT
END OF HEADER
LEIAT303          LEIC730045          START OF ANTENNA
FIELD            LWa                   TYPE / SERIAL NO
2                1                     METH / BY / # / DATE
0.0              # OF FREQUENCIES
0.0 85.0 5.0     DAZI
2                ZEN1 / ZEN2 / DZEN
01              # OF FREQUENCIES
0.62 -0.83 61.47 START OF FREQUENCY
NOAZI 1.41 2.05 3.19 3.42 2.32 0.76 NORTH / EAST / UP
-1.42 -1.61 -0.96 0.08 0.79 1.40 3.13 -0.21 -0.53 -0.87
01              END OF FREQUENCY
02              START OF FREQUENCY
0.04 0.20 87.54 NORTH / EAST / UP
NOAZI 4.50 4.07 3.07 2.05 1.32 0.76 0.12 -0.58 -1.04
-1.01 -0.66 -0.29 0.00 0.49 1.55 3.15 4.89 6.19
02              END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA

```

Eine genauere Beschreibung findet sich momentan unter:  
<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/antex12.txt> [anl, 2004b].

#### 4.2.4 PZO-Format

Dieses Format dient im Softwarepaket *WaSoft/Kalib* dazu, die *WaAnt*-Zwischenergebnisse für die Offsets des Phasenzentrums zwischenzuspeichern, wenn diese in einen neuen Durchlauf des Programmes eingeführt werden sollen. Eine Ausgabe in diesem Format ist nur dann möglich, wenn keine PZV-Werte bestimmt werden sollen.

Eine Datei im PZO-Format sieht bspw. folgendermaßen aus:

```
15  0
    0.00062 -0.00083  0.06147
    0.00004  0.00020  0.08754
```

Die erste Zeile enthält dabei die minimale Elevation in Grad sowie eine Kennziffer für die Gewichtung von Beobachtungen (Null entspricht Gleichgewichtung, Eins einer Gewichtung mit dem quadratischen Sinus der Elevation). In den darauffolgenden beiden Zeilen sind die Offsets in Northing, Easting und Up für L1 und L2 in Meter zu finden [anl, 2004b].

#### 4.2.5 Vektorformat

Das Vektorformat dient dazu, die Variationen des Phasenzentrums mit einer geeigneten Software grafisch darzustellen. Die einzelnen Werte werden hierzu spaltenweise in drei Dateien ausgegeben: die zwei Trägerphasen L1 und L2, sowie eine ionosphärenfreie Linearkombination L0 [anl, 2004b].

Als Basisdatenformat für das weitere Vorgehen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das ANTEX-Format ausgewählt, aus welchem alle notwendigen Informationen entnommen und weitere benötigte Formate, wie zum Beispiel das „Bernese-Format“ abgeleitet wurden.

Für die Darstellung der PZV wurden *Matlab*-Routinen (<http://www.mathworks.de>) geschrieben. Mit ihnen war es möglich, leicht abgeänderte ANTEX-Dateien grafisch auszugeben, sowohl die elevations- als auch die azimut- und elevationsabhängigen Korrekturwerte.

### 4.3 Umrechnung der Datenformate

Die Antennenkorrekturdaten liegen nach Abschluss der Auswertung im ANTEX-Format getrennt für die einzelnen Tage und Antennen vor. Aus diesen einzelnen Datensätzen müssen anschließend verschiedene Enddatensätze generiert werden.

Für manche Antennen liegen Korrekturdatensätze mehrerer Tage vor, diese sollen zu einem zusammengefasst werden. Ebenso wird ein sog. Typmittel für die Antennen eines Typs benötigt, welches aus Einzelmessungen generiert werden soll. Weiterhin ist es notwendig, die Einzelergebnisse auf einen gemeinsamen Phasenzentrumsoffset umzurechnen, um korrekte Vergleiche v.a. für die optische Analyse von Grafiken anstellen zu können. Die Firma *Wanninger* bietet hierzu das Produkt *CCANT*, welches alle oben genannten Anforderungen erfüllt, an. Zusätzlich können hiermit auch andere Datenformate generiert werden; z.B. das zur reibungslosen Integration der ermittelten Ergebnisse in die *BS* notwendige Format.

Auch hier erfolgt der Programmaufruf kommandozeilenorientiert. Dieser kann ebenfalls durch die Verwendung von Batch-Dateien vereinfacht werden, in denen mehrere Kommandos zusammengefasst werden [anl, 2004a].

Mit dem folgenden Programmaufruf werden bspw. die Ergebnisse dreier antennenspezifischer Kalibrierungen in ein Typmittel umgerechnet:

```
ccant 0001.atx 0002.atx 0003.atx +0xyz.atx.
```

Hierbei stehen in den Dateien 0001.atx, 0002.atx und 0003.atx die Einzelresultate. Die Option +Oxyz.atx gibt an, wie die Ausgabedatei heißen soll (hier: xyz.atx). Ebenso können auch Mehrfachmessungen mit

einer Antenne gemittelt werden.

Da jede Antenne einen mittleren Phasenzentrumsoffset besitzt können die Phasenzentrumsvariationen verschiedener Antennen eines Typs nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Dazu müssen die PZV jeder Antenne auf einen identischen PZO umgerechnet werden. Prinzipiell könnte hierzu jeder beliebige Offset verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der vom IGS im Internet publizierte relative bzw. absolute PZO für den Antennentyp *Leica AT502* verwendet. So lassen sich die Ergebnisse der eigenen Kalibrierung zum einen untereinander und zum anderen mit denen des IGS vergleichen.

Nachstehend wird ein beispielhafter Aufruf von *CCANT* zur Umrechnung auf einen vorgegebenen Phasenzentrumsoffset dargestellt:

```
ccant at502ma.atx +F0.9,1.5,43.0,-1.5,1.2,57.5 +0at502mai.brn.
```

Bei diesem Programmdurchlauf werden die Variationen des Phasenzentrums auf einen vorgegebenen Phasenzentrumsoffset transformiert (Option +F) in diesem Fall auf den absoluten IGS-Offset und das Ergebnis im Format der *BS* in eine Datei ausgegeben (Endung brn).

## 5 Auswertung der Kalibrierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung der Kalibrierungsmessungen analysiert. Hierbei wird nacheinander auf die Phasenzentrumsoffsets, die elevationsabhängigen und zuletzt auch auf die azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen eingegangen. Ebenso werden die Ergebnisse der Kalibrierungen auf zwei ausgewählten Messpfeiler gegenübergestellt.

Um neben den reinen Zahlenwerten der Kalibrierung mit dem Softwarepaket *WaSoft/Kalib* auch anschauliche Grafiken zu erhalten, wurden Routinen für *Matlab 6.0* geschrieben, die die ausgegebenen Korrekturen in unterschiedlicher Form grafisch darstellen.

Bei der anfänglichen Analyse der Kalibrierungsergebnisse war aufgefallen, dass die Korrekturen erst ab einer Elevation von  $5^\circ$  vorlagen, obwohl in *WaSoft/Kalib* die Option „-e0“ angegeben wurde, welche bedeutet, die Korrekturen bis  $0^\circ$  Elevation zu berechnen. Bei der Durchführung der Kalibrierungsberechnungen war auch aufgefallen, dass die Empfänger der zu kalibrierenden Antennen im Schnitt systematisch mehr Satelliten empfangen konnten als der Empfänger der Referenzantenne KARL obwohl in beiden Empfängern eine Elevationsmaske von  $0^\circ$  eingestellt war.

Bei der Fehlersuche wurde schließlich auf die Tatsache gestoßen, dass der Empfänger der Referenzstation KARL (*Trimble 4000SSi*) nur über je neun Kanäle für L1 und L2 verfügt. Es können somit lediglich Signale von neun Satelliten gleichzeitig aufgezeichnet werden. Nach Beendigung des praktischen Teils der vorliegenden Arbeit wurde der „alte“ neunkanalige Empfänger gegen einen 12-Kanal-Empfänger ausgetauscht.

Alle im Folgenden genannten Antennenbezeichnungen (z.B. 1325) beziehen sich auf die letzten vier Ziffern der Seriennummer der im Rahmen dieser Arbeit kalibrierten GPS-Antennen des Typs *Leica AT502*.

### 5.1 Vergleich der Phasenzentrumsoffsets

Zuerst werden die Offsets des Phasenzentrums in Abhängigkeit vom Kalibrierungsverfahren analysiert.

#### 5.1.1 Absolute Kalibrierung

Absolute Kalibrierung bedeutet hier, dass die Beobachtungen zwar relativ zur Referenzantenne KARL durchgeführt, in die Auswertung für diese Antenne aber die vorliegenden, absoluten Kalibrierwerte anstelle von Modellwerten eingeführt wurden.

Mit zwei Antennen (1325 und 1334) wurden jeweils sechs Kalibrierungsmessungen durchgeführt, je drei auf HPF2 und NPF2. Diese Resultate sollen nun als erstes betrachtet werden.

In Tab. 5-1 sind die einzelnen Phasenzentrumsoffsets der absoluten Kalibrierung für zwei Antennen in Millimeter für L1 aufgeführt. N bedeutet „Northing“ (Nord-Süd-Komponente des PZO), E „Easting“ (Ost-West-Komponente des PZO) und Up die Höhenkomponente des PZO.

Tabelle 5-1: Übersicht der PZO der absoluten Kalibrierung, Trägerphase L1, Einzelmessungen

GPS-Tag		330	343	349	329	342	348	Standardabweichung
Pfeiler		HPF2	HPF2	HPF2	NPF2	NPF2	NPF2	
1325	N [mm]	-0.51	-1.01	-0.36	-0.98	-0.74	-0.60	0.260
	E [mm]	1.79	1.80	1.68	1.40	1.51	1.75	0.164
	Up [mm]	51.99	52.15	51.30	50.99	50.87	50.92	0.565
GPS-Tag		321	342	348	320	343	349	
Pfeiler		HPF2	HPF2	HPF2	NPF2	NPF2	NPF2	
1334	N [mm]	-0.61	-0.61	-0.90	-0.88	-0.92	-1.01	
	E [mm]	1.69	1.89	1.61	1.59	1.76	1.32	0.192
	Up [mm]	51.52	52.29	52.47	51.78	50.64	50.92	0.729

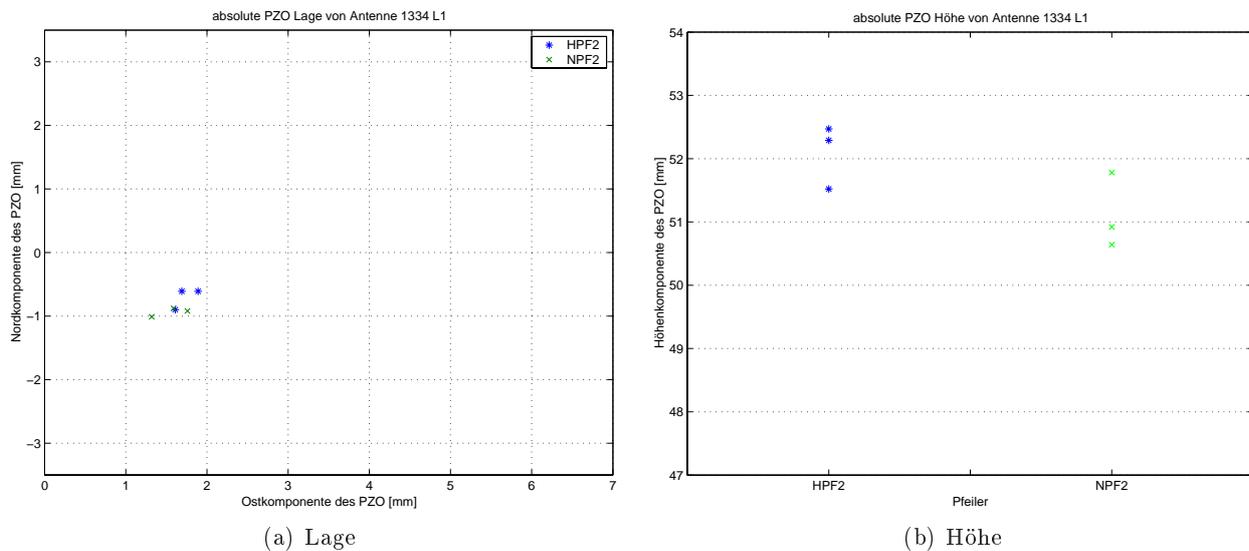


Bild 5-1: Absolute PZO für Antenne 1334

Bei Betrachtung der Up-Komponente des Offsets lassen sich geringe Unterschiede zwischen den Zahlenwerten der beiden Pfeiler erkennen. Bei Northing und Easting gibt es zwar geringe Unterschiede, welche sich aber nicht eindeutig einem Pfeiler zuordnen lassen. Dies bestätigt sich auch beim Blick in die Bilder 5-1a und 5-1b, welche die grafischen Darstellungen der Zahlenwerte für die Trägerphase L1 der Antenne 1334 enthalten. Bei Analyse der Höhenoffsets fällt auf, dass diese für NPF2 bis auf einen Ausreißer etwas kleiner ausfallen, als die die auf HPF2 bestimmt wurden.

Für die zweite GPS-Frequenz ergeben sich vergleichbare Ergebnisse. Hier fällt die Streuung der einzelnen Kalibrierwerte zwar etwas größer aus, aber eine Pfeilerabhängigkeit ist auch hier nicht signifikant feststellbar.

Bei anderen Antennen, welche auf beiden Pfeilern kalibriert wurden, gibt es ebenfalls geringe Unterschiede. Um aber statistisch fundierte Aussagen treffen zu können, ist es notwendig, weitere Kalibrierungsmessungen durchzuführen und auszuwerten. An dieser Stelle muss des Weiteren erwähnt werden, dass im Rahmen dieser Arbeit keine Untersuchungen zum Einfluss von Mehrwegeeffekten an den einzelnen Pfeilern unternommen wurden.

Das Typmittel wurde schließlich aus allen vorliegenden Messungen gebildet.

In Tab. 5-2 sind die mit *CCANT* gemittelten Ergebnisse der absoluten Kalibrierungsmessungen für die einzelnen Antennen aufgetragen.

Tabelle 5-2: Übersicht der PZO absolute Kalibrierung

Seriennummer		1325	1334	1954	1960	2709	2776	2819	3520	3614	4138	7189	8286
L1	N [mm]	-0.49	-0.58	-1.07	-0.48	0.27	-0.02	0.21	-0.49	-1.53	-0.22	0.83	-0.09
	E [mm]	1.64	1.57	0.93	1.88	1.07	1.34	1.26	0.70	1.75	0.38	0.68	0.83
	Up [mm]	51.03	51.06	53.43	51.82	52.66	51.78	51.60	51.32	53.46	50.55	50.27	52.60
L2	N [mm]	-3.54	-1.00	-3.07	-2.88	-1.88	-0.22	-1.47	-2.39	-2.17	-0.50	0.52	-1.74
	E [mm]	2.02	1.22	1.38	1.86	1.79	1.36	1.60	1.42	1.29	2.49	1.91	1.42
	Up [mm]	50.76	48.42	49.56	50.86	51.68	47.28	47.80	51.06	47.14	47.60	47.69	50.63

Wie hier ersichtlich ist, variieren die Höhenkomponenten des Phasenzentrumsoffsets der einzelnen Antennen für die Trägerphase L1 im Bereich von etwa 3 mm in der Höhe (Minimum: 50.27 mm, Maximum: 53.46 mm). Die Schwankungen der Lagekomponente liegen im Bereich von etwa 2 mm. Für L2 fallen die Variationen etwas größer aus. Sie bewegen sich für Northing zwischen -3.53 mm und +0.52 mm, für Easting zwischen 1.60 mm und 2.49 mm. Der Höhenoffset der einzelnen Antennen streut zwischen den Werten 47.14 mm und 51.68 mm. In Tab. 5-3 sind abschließend die mit *CCANT* gemittelten Werte des Typmittels für die Antenne *Leica AT502* dargestellt.

Tabelle 5-3: Gemittelte absolute PZO und deren Standardabweichungen für *Leica AT502*

	L1			L2		
	N [mm]	E [mm]	Up [mm]	N [mm]	E [mm]	Up [mm]
PZO	-0.31	1.16	51.79	-1.54	1.68	49.54
Standardabweichung	0.624	0.479	1.049	1.224	0.376	1.714

### 5.1.2 Relative Kalibrierung

Der relativen Kalibrierung wurden die identischen GPS-Datensätze wie der oben beschriebenen absoluten zu Grunde gelegt. Statt einer Datei mit absoluten Kalibrierergebnissen für die Referenzantenne KARL wurde eine Datei verwendet, bei der alle Werte des PZO und der Phasenzentrumsvariationen bis auf die Höhenoffsets zu Null gesetzt waren. Die Up-Komponenten wurden auf die vom IGS publizierten relativen Werte für diesen Antennentyp (*Trimble TRM29659.00* choke ring) gesetzt. Diese betragen für L1 110.00 mm und für L2 128.00 mm. Die Vorverarbeitung, welche Zusammenfügen, Zuschneiden und Aufteilen der RINEX-Dateien nach den Ausrichtungen umfasste, musste nicht erneut vorgenommen werden. Auch hier werden zunächst die Einzelergebnisse für die Antennen 1325 und 1334 betrachtet.

Tabelle 5-4: Übersicht der PZO relative Kalibrierung, Trägerphase L1, Einzelmessungen

	GPS-Tag	329	330	342	343	348	349	Standardabweichung
	Pfeiler	$\bar{NPF2}$	$\bar{HPF2}$	$\bar{NPF2}$	$\bar{HPF2}$	$\bar{NPF2}$	$\bar{HPF2}$	
1325	N [mm]	-0.98	-0.52	-0.73	-1.01	-0.60	-0.36	0.258
	E [mm]	1.41	1.79	1.51	1.78	1.75	1.67	0.158
	Up [mm]	60.24	61.37	59.23	60.94	59.92	60.58	0.760
	GPS-Tag	320	321	342	343	348	349	Standardabweichung
	Pfeiler	$\bar{NPF2}$	$\bar{HPF2}$	$\bar{HPF2}$	$\bar{NPF2}$	$\bar{HPF2}$	$\bar{NPF2}$	
1334	N [mm]	-0.89	-0.59	-0.62	-0.91	-0.91	-1.01	0.173
	E [mm]	1.60	1.69	1.89	1.76	1.62	1.32	0.192
	Up [mm]	60.28	60.30	60.92	59.18	61.76	59.87	0.885

Tab. 5-4 zeigt die Offsets des Phasenzentrums der relativen Kalibrierung für die beiden Antennen 1325 und 1334 in Millimeter, welche insgesamt je drei Mal auf HPF2 und NPF2 kalibriert wurden, in den Bildern 5-2a und 5-2b sind diese visualisiert.

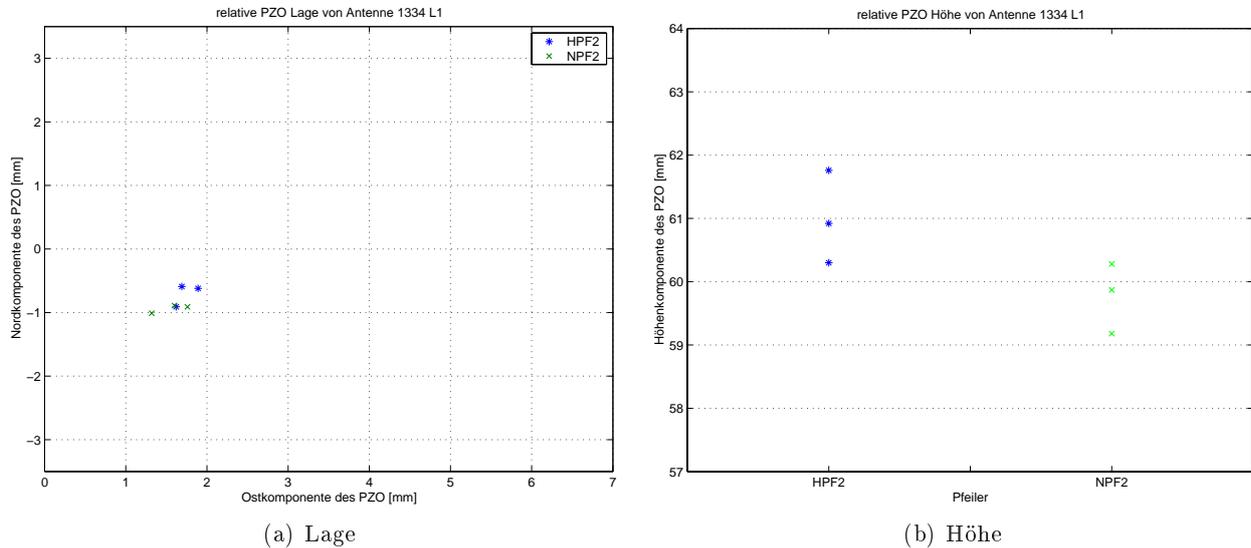


Bild 5-2: Relative PZO für Antenne 1334

Ein Blick auf die Lageoffsets der Einzelmessungen zeigt, dass diese auch hier sehr nahe beieinander liegen (Unterschiede zu Tab. 5-1: max. 0.02 mm), da durch das Drehen der Antenne während der Kalibrierungsmessungen absolute, auf der Basis von Koordinaten geschätzte Phasenzentrumsfehler ermittelt werden können. Die absoluten und relativen Lageoffsets müssen also bis auf geringe Unterschiede gleich sein [Mayer, 2002].

Eine eindeutige Zuordnung der Kalibrierergebnisse zu einzelnen Pfeilern kann hier ebenfalls nicht vorgenommen werden. Auch die Standardabweichungen für die Lage liegen wie bei der absoluten Kalibrierung zwischen 0.158 mm und 0.258 mm. Für die Up-Komponente fällt die Streuung der Ergebnisse etwas größer aus, was die größere Standardabweichung belegt. In Bild 5-2b fällt ebenso wie bei der absoluten Kalibrierung der Höhenversatz zwischen Pfeiler HPF2 und NPF2 auf. Für L2 zeigt sich ein ähnliches Bild, allerdings fällt die Streuung hier geringfügig größer aus.

Auch bei den Antennen, die einmal auf HPF2 und NPF2 kalibriert wurden, ist dieses Verhalten sichtbar. Die Lagekomponenten stimmen i.d.R. gut überein, während die Höhenkomponente eine Pfeilerabhängigkeit aufweist. Weitere zuverlässigere Aussagen können erst, wie oben erwähnt, nach weiteren längeren Messreihen getroffen werden. Die relativen, mit *CCANT* gemittelten Phasenzentrumsoffsets jeder Antenne sind in Tab. 5-5 aufgetragen.

Tabelle 5-5: Übersicht der PZO relativen Kalibrierung

Seriennummer		1325	1334	1954	1960	2709	2776	2819	3520	3614	4138	7189	8286
L1	N [mm]	-0.49	-0.57	-1.07	-0.48	0.27	-0.02	0.21	-0.50	-1.55	-0.22	0.83	-0.09
	E [mm]	1.64	1.56	0.93	1.88	1.07	1.34	1.26	0.69	1.75	0.38	0.68	0.82
	Up [mm]	70.04	70.05	62.19	70.83	71.67	70.79	70.58	60.10	62.44	69.54	69.26	71.62
L2	N [mm]	-3.54	-0.99	-3.07	-2.88	-1.88	-0.22	-1.47	-2.40	-2.19	-0.50	0.52	-1.74
	E [mm]	2.02	1.21	1.38	1.86	1.79	1.36	1.60	1.41	1.28	2.49	1.91	1.42
	Up [mm]	60.14	57.76	52.69	60.24	61.07	56.66	57.15	54.21	50.42	56.97	57.06	60.01

Die Lagekomponenten des Phasenzentrumsoffsets bewegen sich für die L1-Northing zwischen -1.55 mm und 0.83 mm, in Easting von 0.38 mm bis 1.88 mm und für Up-Komponente zwischen 60.10 mm und 71.67 mm. Bei L2 liegen die PZO für Northing zwischen -3.54 mm und 0.52 mm, für Easting von 1.21 mm bis 2.49 mm und für die Höhenkomponente zwischen 50.42 mm und 61.07 mm. Die Lagekomponenten der einzelnen Antennen zeigen keine signifikanten Abweichungen, während die Up-Werte in einem größeren Maß variieren.

Werden mit dem Softwaremodul *CCANT* die Mittel über die einzelnen Kalibrierwerte gebildet, so ergeben sich für den Antennentyp *Leica AT502* die in Tab. 5-6 aufgeführten Werte.

Tabelle 5-6: Gemittelte relative PZO und deren Standardabweichungen für *Leica AT502*

	L1			L2		
	N [mm]	E [mm]	Up [mm]	N [mm]	E [mm]	Up [mm]
PZO	-0.31	1.16	70.79	-1.54	1.68	58.91
Standardabweichung	0.627	0.480	4.130	1.226	0.378	3.252

## 5.2 Vergleich der rein elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen

Um die von der Elevation abhängigen Variationen des Phasenzentrums direkt miteinander vergleichen zu können wurden diese mit Hilfe von *CCANT* auf einen einheitlichen PZO umgerechnet. Hierzu wurden sowohl für die absolute als auch die relative Kalibrierung die vom NGS im Internet publizierten PZO-Werte für den Antennentyp *Leica AT502* verwendet (<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>).

Tabelle 5-7: PZO-Werte vom NGS/IGS für *Leica AT502*

		N [mm]	E [mm]	Up [mm]
absolut	L1	0.90	1.50	43.00
	L2	-1.50	1.20	57.50
relativ	L1	0.30	2.00	61.80
	L2	-1.40	1.80	65.40

Auch in diesem Kapitel soll die Analyse wieder getrennt nach der Art der Kalibrierung erfolgen.

### 5.2.1 Absolute Kalibrierung

Zunächst sollen die Ergebnisse der Antennen 1325 und 1334 betrachtet werden. Auf eine Darstellung von Zahlenwerten in Tabellenform wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet. Die Zahlenwerte, die den folgenden Betrachtungen zu Grunde liegen, wurden den auf den NGS-Offset umgerechneten ANTEX-Dateien entnommen (Zeile „NOAZI“).

In den Bildern 5-3a und 5-3b sind absolute elevationsabhängige Korrekturen der einzelnen auf beiden Pfeilern der Messdaches durchgeführten Kalibrierungsmessungen der Antennen 1325 und 1334 abgebildet. Primär ist erkennbar, dass die einzelnen Linien des Graphen sehr gut übereinstimmen. Auf den zweiten Blick fällt jedoch besonders bei Antenne 1334 auf, dass sich die Kurven von HPF2 und NPF2 ab einer Zenitdistanz von etwa 60° unterscheiden. Dieses Verhalten läßt sich teils mehr teils weniger stark ausgeprägt auch bei Antennen beobachten, mit denen nur jeweils eine Messung auf jedem Pfeiler durchgeführt wurde. Hier zeigt sich ebenfalls eine Pfeilerabhängigkeit der Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen. Über die Ursachen hierfür kann an dieser Stelle nur die Vermutung geäußert werden, dass

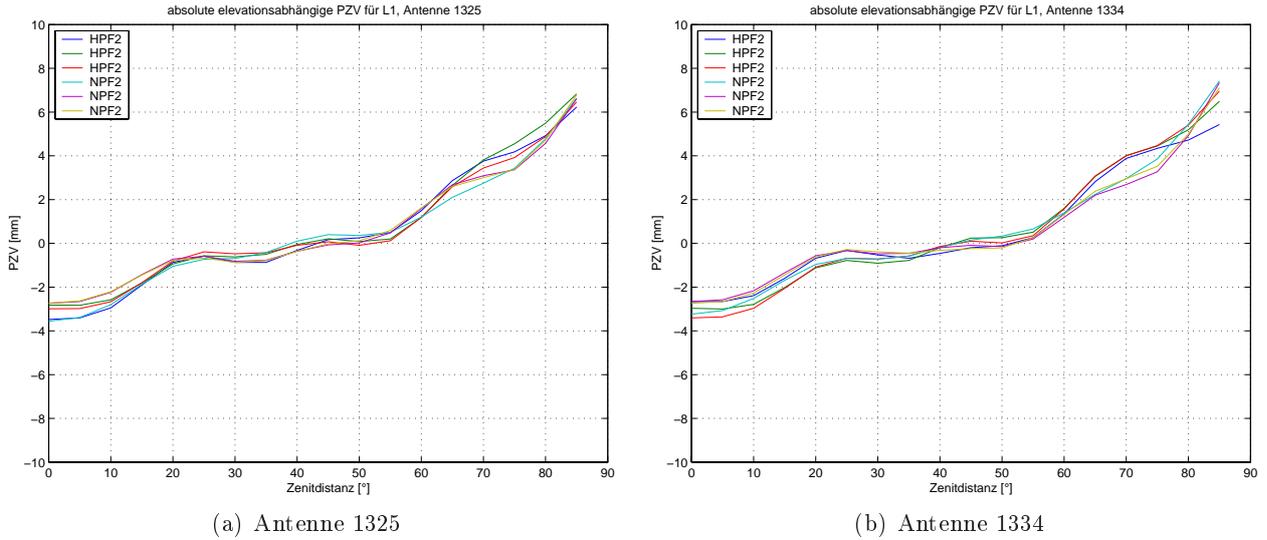


Bild 5-3: Absolute elevationsabhängige PZV für Antennen 1325 und 1334, L1

die Lage der Pfeiler auf dem Messdach sowie deren Form und Größe einen Einfluss haben könnten. Diese Annahme muss durch die Durchführung und Analyse weiterer Messreihen untersucht werden.

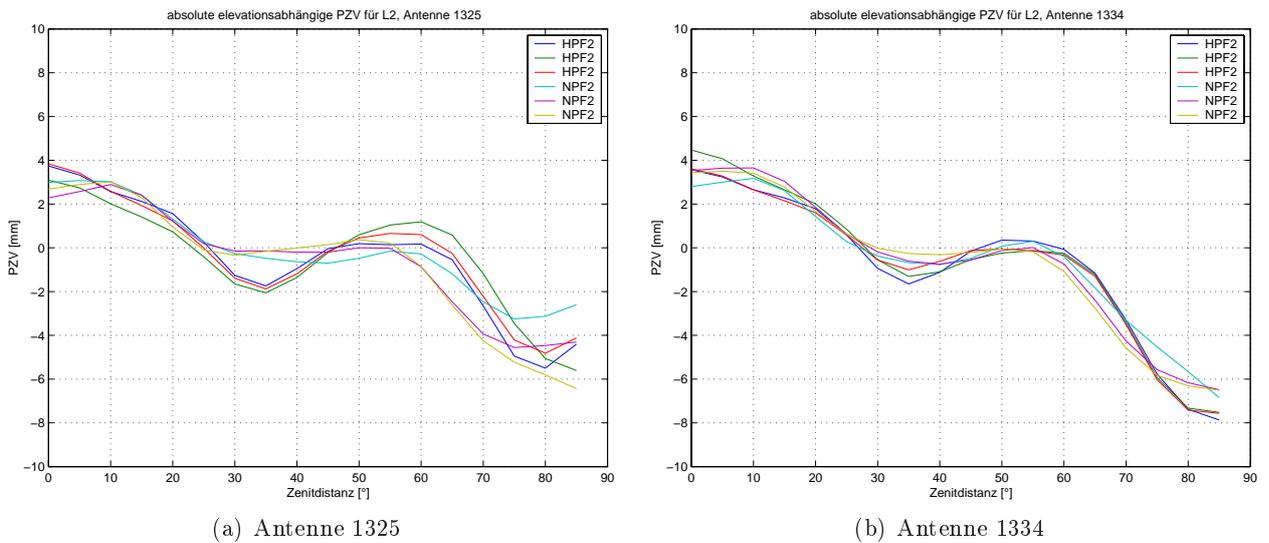


Bild 5-4: Absolute elevationsabhängige PZV für Antennen 1325 und 1334, L2

Vergleichbare Ergebnisse wurden für die Trägerphase L2 erhalten, wie den Bildern 5-4a und 5-4b zu entnehmen ist. Zwar verlaufen die PZV-Kurven hier qualitativ anders als für L1 und die Bandbreite ist größer, doch läßt sich der PZV-Unterschied zwischen den Pfeilern vor allem bei Antenne 1325 erkennen.

In den Bildern 5-5a und 5-5b sind elevationsabhängigen PZV-Korrekturen für alle zwölf kalibrierten Antennen des Typs *Leica AT502* aufgeführt. Der auffällige Verlauf der Kurven von Antenne 2819 hat den Hintergrund, dass bei der Kalibrierungsmessung dieser Antenne versehentlich eine Elevationsmaske von 15° (entspricht 75° Zenitdistanz) eingestellt war und die Korrekturen somit auch nur bis zu dieser Elevation berechnet werden konnten. Die Werte für die Zenitdistanzen 80° und 85° wurden zur Darstellung im Plot zu Null gesetzt.

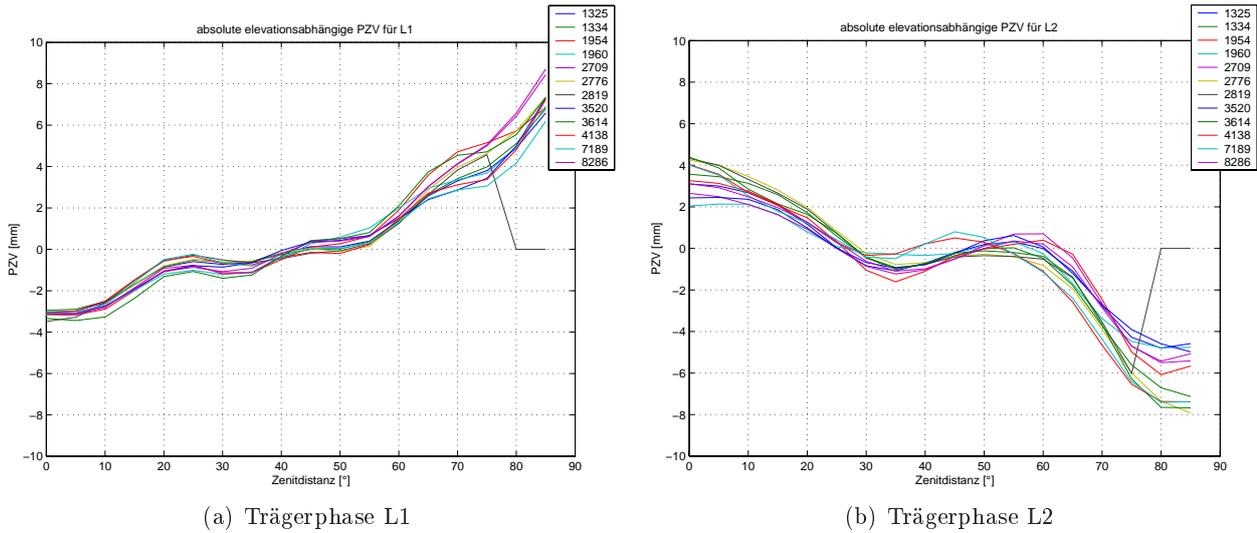


Bild 5-5: Absolute elevationsabhängige PZV aller Antennen

Bei Trägerphase L1 liegen die Graphen aller Antennen bis zu einer Zenitdistanz von etwa  $60^\circ$  eng zusammen. Die Unterschiede, die bei größeren Zenitdistanzen auftreten, lassen sich durch das Zustandekommen der einzelnen Korrekturen erklären. Mit manchen Antennen wurde nur eine Messung auf einem Pfeiler durchgeführt, während mit anderen einmal oder mehrfach auf beiden Pfeilern Beobachtungen erfasst wurden. Eine Übersicht hierzu liefert Tab. 5-8.

Für L2 fallen die Schwankungen geringfügig größer aus. Eine Zuordnung der PZV-Werte zu den einzelnen Pfeilern ist nur schwer möglich.

Tabelle 5-8: Übersicht über Anzahl und Pfeiler der Kalibrierungen

Seriennummer	1325	1334	1954	1960	2709	2776	2819	3520	3614	4138	7189	8286
Anzahl Kalibrierungen auf Pfeiler HPF2	3	3	1		1	1	1		1	2	2	1
Anzahl Kalibrierungen auf Pfeiler NPF2	3	3		2	1	1	1	1				1

### 5.2.2 Relative Kalibrierung

Die relativen elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen der Antennen 1325 und 1334 sind in Bild 5-6 für die Trägerphase L1 dargestellt.

Für Antenne 1325 liegen hierbei die Kurven innerhalb eines schmalen Bandes. Der oben ab einer Zenitdistanz von  $60^\circ$  festgestellte Unterschied der PZV-Werte zwischen beiden Messpfeilern kann hier nicht beobachtet werden. Für die zweite Antenne (1334) fällt diese Differenz etwas deutlicher aus. Der Verlauf der PZV kann dabei für HPF2 und NPF2 recht gut unterschieden werden. Die Ergebnisse beider Pfeiler unterscheiden sich zwar betragsmäßig geringfügig, aber in der grafischen Darstellung ist die Abhängigkeit von dem bei der Kalibrierung verwendeten Pfeiler teilweise recht gut zu erkennen.

Bei Betrachtung der L2-Ergebnisse der beiden Antennen in den Bildern 5-7a und 5-7b fällt auf, dass die Graphen für Antenne 1325 inhomogener ausfallen als die von Antenne 1334. Bei erstgenannter

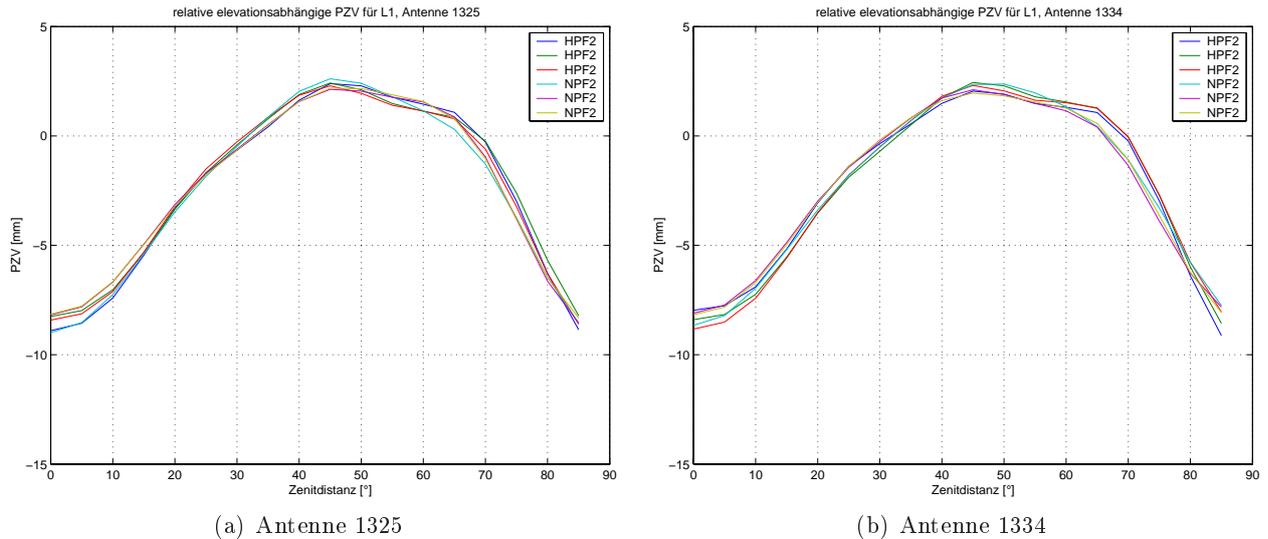


Bild 5-6: Relative elevationsabhängige PZV für Antennen 1325 und 1334, L1

liegen die Kurven für HPF2 und NPF2 jeweils zwischen einer Zenitdistanz von etwa  $25^\circ$  und  $50^\circ$  nahe zusammen. Bei der zweiten Antenne hingegen kann dieses Phänomen nicht beobachtet werden. Wie auch bei Antenne 1325 ist hier auffällig, dass der Kurvenverlauf bei einer Zenitdistanz von  $0^\circ$  für NPF2 mit einer positiven und für HPF2 mit einer negativen Steigung beginnt.

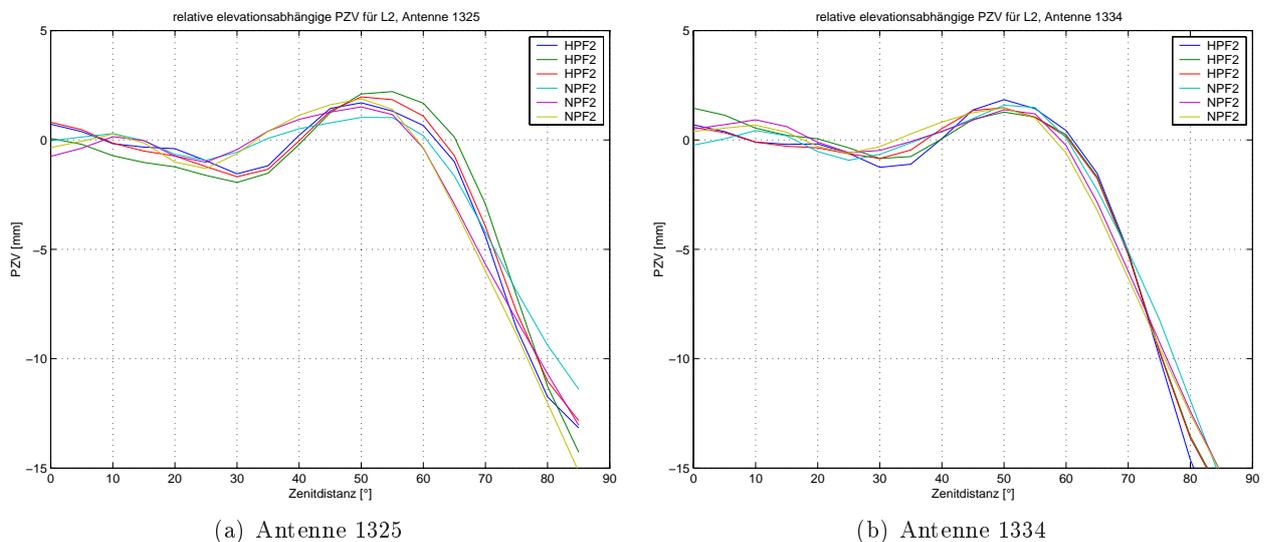


Bild 5-7: Relative elevationsabhängige PZV für Antennen 1325 und 1334, L2

In den Bildern 5-8a und 5-8b sind die elevationsabhängigen Korrekturen aller Antennen des Typs *AT502* aufgeführt, welche wiederum den ATX-Dateien der gemittelten Ergebnisse jeder Antenne entnommen wurden. Der charakteristische Verlauf der Kurve von Antenne 2819 kommt, wie schon oben erwähnt, durch die versehentliche Messung mit einer Elevationsmaske von  $15^\circ$  zustande.

Bis zu einer Zenitdistanz von etwa  $45^\circ$  liegen die Graphen der Trägerphase L1 sehr eng zusammen. Oberhalb dieser Schranke streuen die Ergebnisse in einem breiteren Band, welches in der unterschiedlichen Anzahl an Datensätzen der Kalibrierung auf beiden Pfeilern begründet ist.

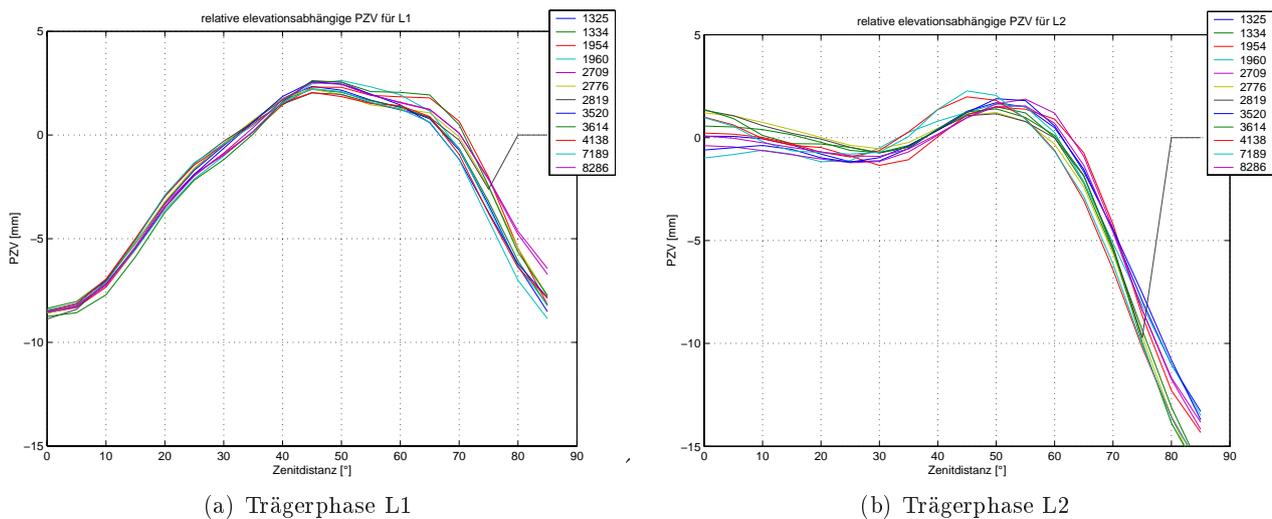


Bild 5-8: Relative elevationsabhängige PZV aller Antennen

Für Trägerphase L2 sieht das Schaubild nicht so homogen aus wie für L1. Hier ist schon im Zenit eine deutliche Streuung der einzelnen Ergebnisse zu beobachten. Das Band, in dem die einzelnen PZV-Kurven verlaufen, fällt hier auch etwas breiter aus. Auffällig ist ebenfalls, dass die PZV-Graphen der Antennen 4138 und 7189 im Gegensatz zu den anderen Antennen scheinbar leicht nach links verschoben sind.

### 5.3 Vergleich der azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen

Wie schon im vorigen Kapitel erscheint es hier aufgrund der Übersichtlichkeit nicht angebracht Zahlenwerte aufzuführen und zu vergleichen. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Antennen soll hier anhand der mit *Matlab* erstellten grafischen Darstellungen erfolgen. Die Betrachtungen werden wieder getrennt nach der Art der Kalibrierung vorgenommen.

Auch in diesem Kapitel werden wieder auf den NGS-Antennen-Offset umgerechnete Daten verwendet, um eine direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

#### 5.3.1 Absolute Kalibrierung

Zur Darstellung der Antennentopografie wurde ein *Matlab*-Programm erstellt, welches es erlaubt aus leicht modifizierten ANTEX-Dateien die PZV einzulesen und in Form eines 3D-Plots auszugeben. In den Bildern 5-9a und 5-9b sind für die Antenne 4138 die Darstellungen der Trägerphasen L1 und L2 aufgeführt.

Da hierdurch jedoch Unterschiede zwischen den einzelnen Antennen nicht sehr gut erkannt werden können, wurden für den Vergleich Differenzen zum Mittelwert gebildet, die sich mittels

$$\text{Differenz} = \text{Typmittel } AT502 - \text{individuelle Messung} \quad (5-1)$$

ergeben.

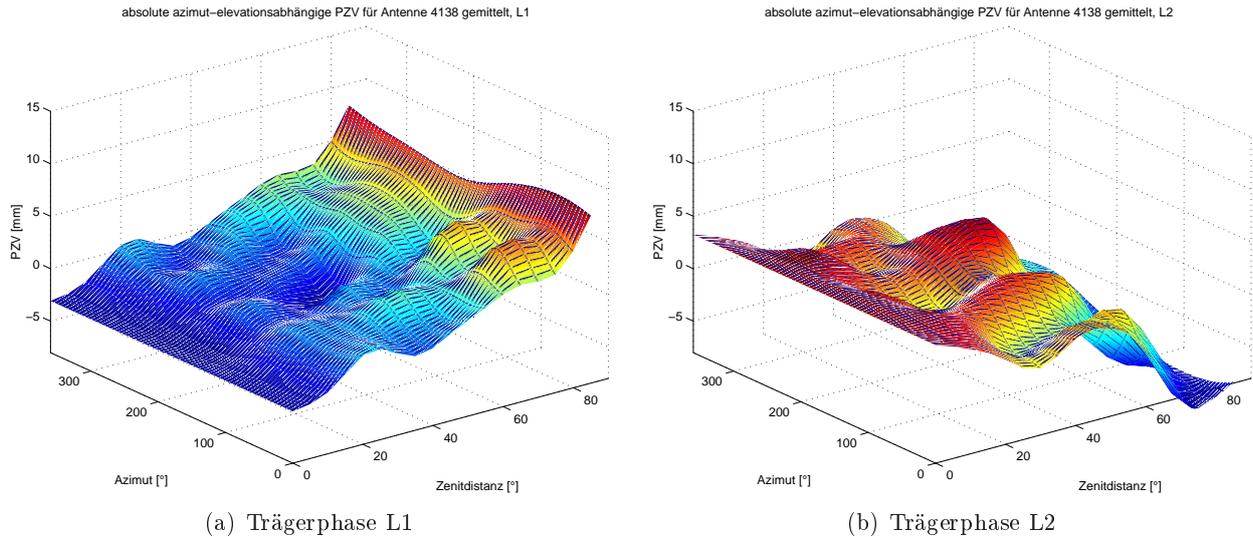
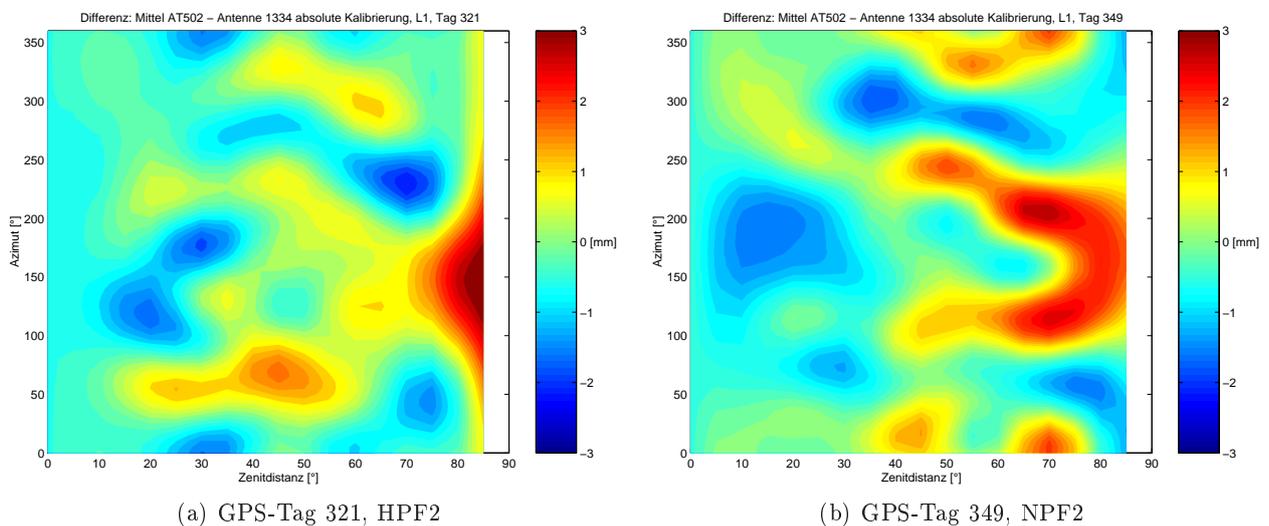


Bild 5-9: Absolute azimut- und elevationsabhängige PZV von Antenne 4138

Zuerst soll untersucht werden, ob eine Pfeilerabhängigkeit der Kalibrierergebnisse feststellbar ist (siehe Bilder 5-10a und 5-10b). Diese Darstellungen zeigen Kalibrierergebnisse von Antenne 1334 der GPS-Tage 321 und 349 des Jahres 2004. Am erstgenannten GPS-Tag wurde auf HPF2 und am zweitgenannten GPS-Tag auf NPF2 gemessen. Die Farbcodierung gibt die Differenz gemäß Formel (5-1) der einzelnen Messwerte zum ermittelten Typmittel in Millimeter an. Da für Zenitdistanzen größer  $85^\circ$  keine Kalibrierinformation vorliegt, ergibt sich in den Graphiken ein weißer Bereich.

Bild 5-10: Differenz der absoluten azimut- und elevationsabhängigen PZV von Antenne 1334 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L1

Sehr deutlich lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Pfeilern erkennen. Während im rechten Bild eine „Nierenform“ erkennbar ist, taucht im linken Bild nur eine Art Ausbeulung auf. Ähnliche Differenzen lassen sich auch am oberen und unteren Bildrand erkennen.

Diese Unterschiede zwischen den beiden Pfeilern für die Trägerphase L1 treten auch bei Betrachtung von Differenzbildern für L2 auf, wie die Bilder 5-11a und 5-11b zeigen.

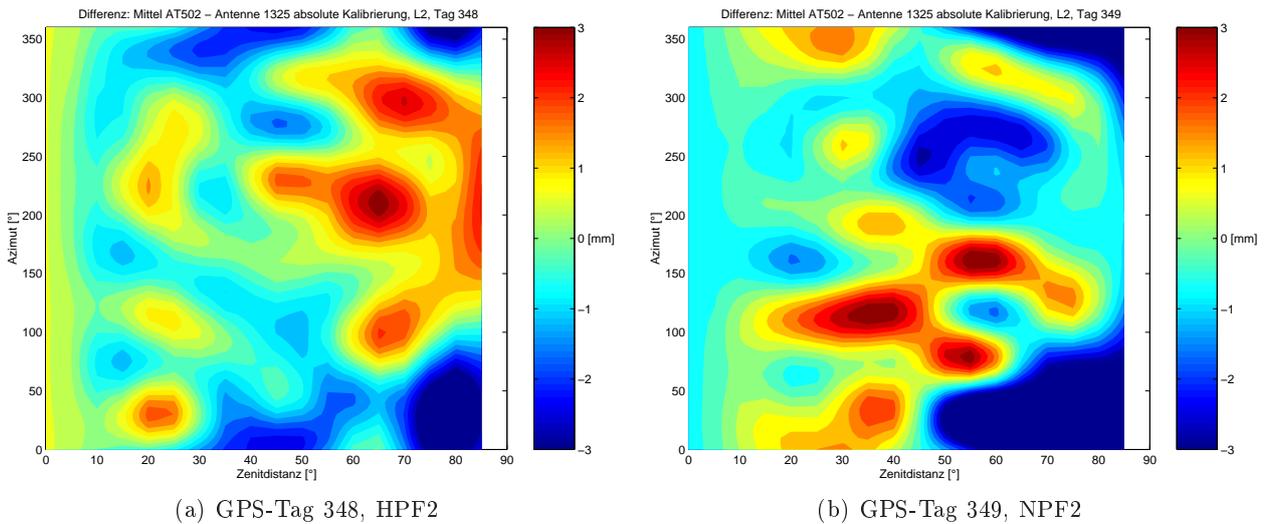


Bild 5-11: Differenz der absoluten azimuth- und elevationsabhängigen PZV von Antenne 1325 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L2

Auffällig ist hierbei eine Erhebung bei einer Zenitdistanz von  $60^\circ$  und einem Azimut von  $280^\circ$  an GPS-Tag 348 auf Pfeiler HPF2. Bei den Kalibrierungsmessungen am darauffolgenden GPS-Tag treten die Variationen des Phasenzentrums an dieser Stelle als Vertiefung hervor. Ebenso bewegt sich die Differenz für GPS-Tag 348 am linken Bildrand im positiven Bereich und am nächsten GPS-Tag an der gleichen Stelle im Negativen. Auch sei an dieser Stelle nochmals explizit auf den notwendigen Untersuchungsbedarf der Pfeilerabhängigkeit hingewiesen.

Weiterhin soll untersucht werden, ob einzelne Antennen ebenfalls signifikante Unterschiede aufweisen. Da es nicht sinnvoll erscheint, die Ergebnisse aller kalibrierten Antennen hier gegenüberzustellen, wurden zwei Extrembeispiele ausgesucht. Die beiden ausgewählten Beispiele sind in den Bildern 5-12a und 5-12b gegenübergestellt.

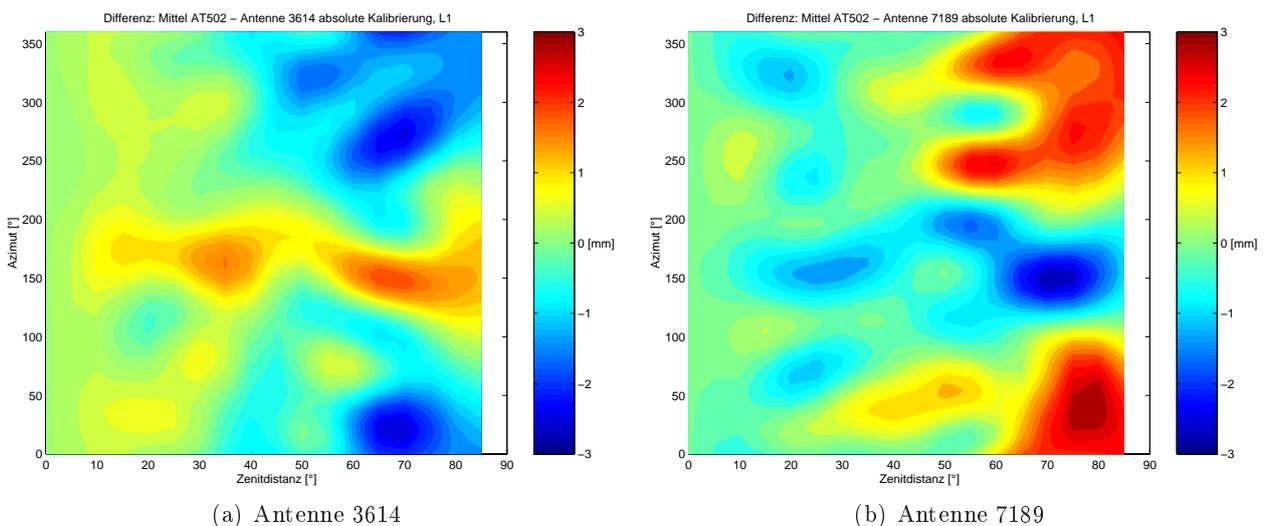


Bild 5-12: Differenz der absoluten azimuth- und elevationsabhängigen PZV der Antennen 3614 und 7189 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L1

Deutlich lassen sich hier die großen Unterschiede ( $\pm 3$  mm) zwischen den beiden Antennen des gleichen Bautyps erkennen, die auf Pfeiler HPF2 kalibriert wurden.

Schon durch die Gegenüberstellung dieser beiden Bilder kann belegt werden, dass bei der Verwendung von GPS-Antennen dieses Typs (*Leica AT502*) für hochgenaue Messungen immer individuelle Kalibrierergebnisse verwendet werden sollten, um ein bestmögliches Ergebnis erzielen zu können. Als Beispiel für die zweite GPS-Trägerphase sollen die Bilder 5-13a und 5-13b dienen.

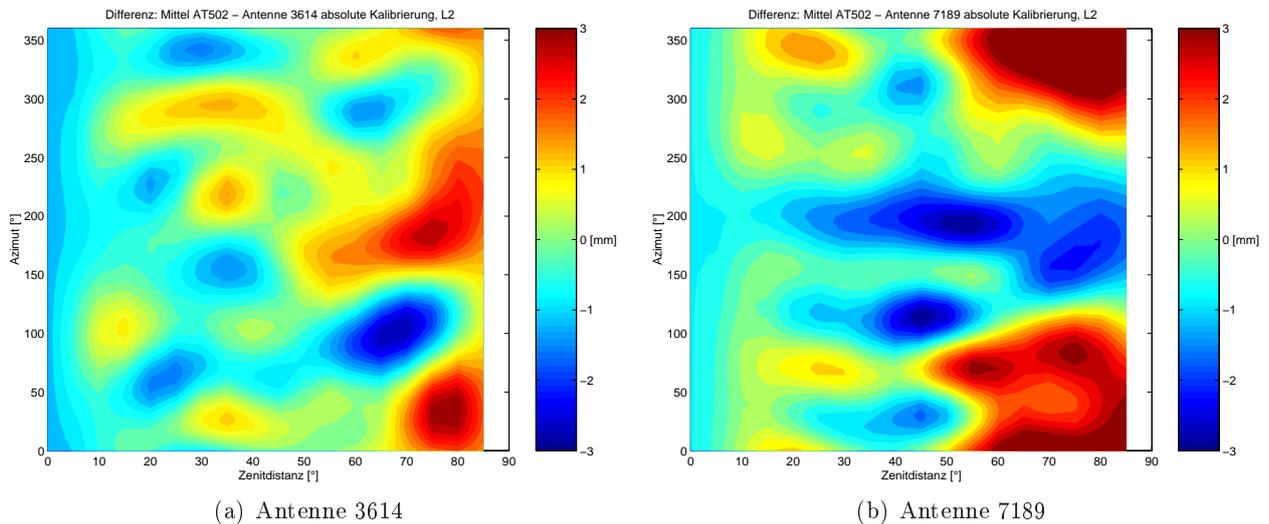


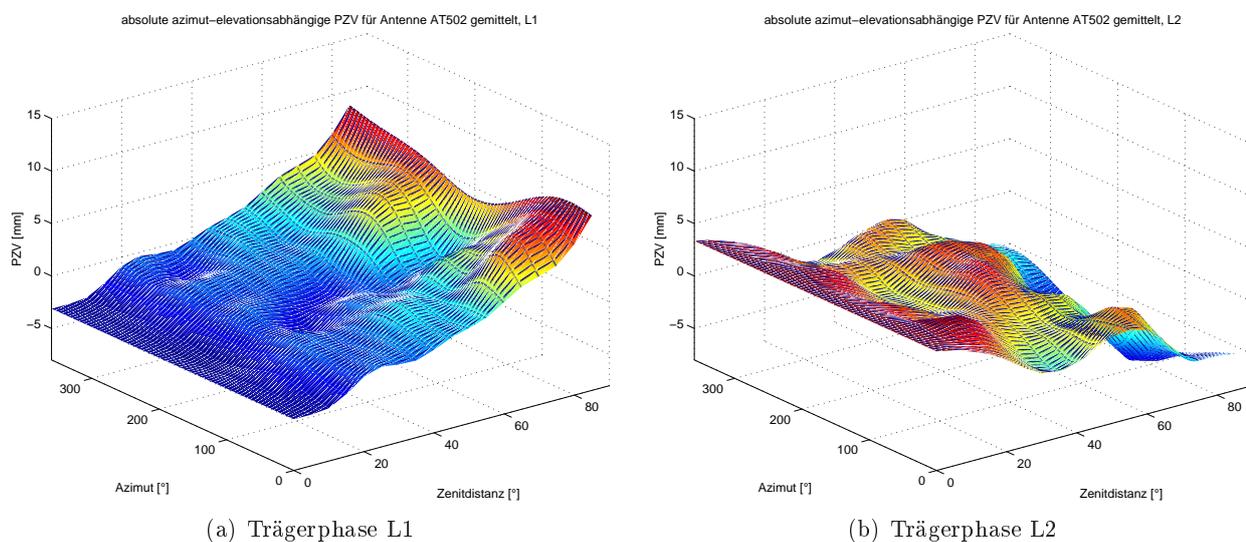
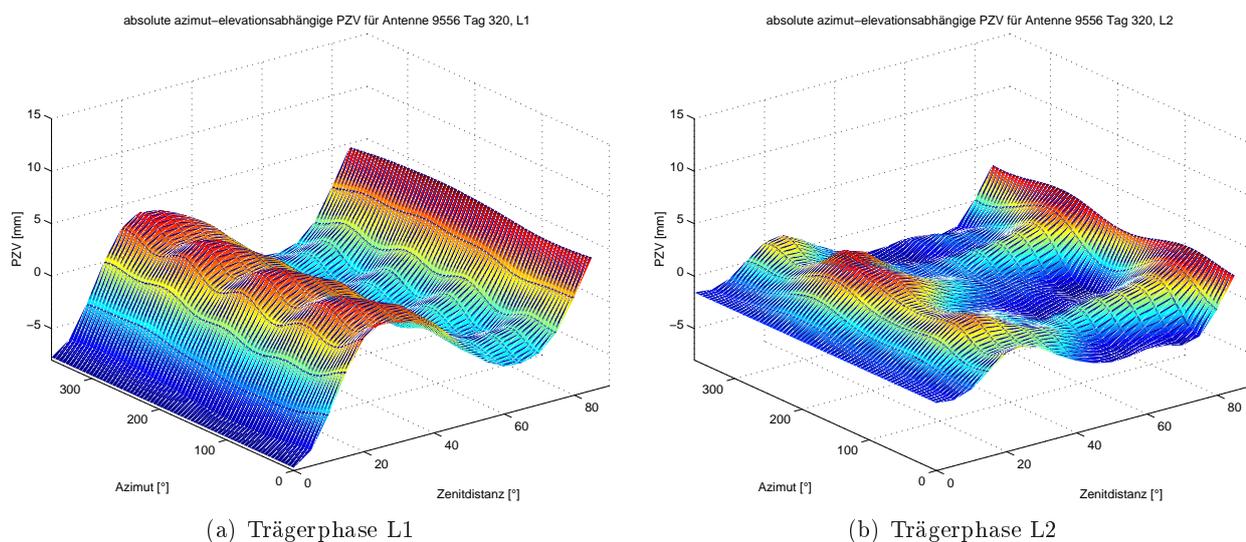
Bild 5-13: Differenz der absoluten azimut- und elevationsabhängigen PCV der Antennen 3614 und 7189 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L2

Auch hier lassen sich Unterschiede zwischen den Ergebnissen einzelner Antennen des gleichen Typs beobachten. Besonders groß sind die Abweichungen dieser beiden Antennen bei einer Zenitdistanz von mehr als  $45^\circ$ .

In den Bildern 5-14a und 5-14b sind abschließend noch die 3D-Darstellungen des absoluten Typmittels *Leica AT502* für beide Frequenzen aufgeführt. In diesen Darstellungen ist deutlich erkennbar, dass die Korrekturen dieses Antennentyps nicht nur von der Elevation, sondern auch sehr stark von der azimutalen Richtung abhängen.

Um einen Vergleich mit einem anderen Antennentyp zu ermöglichen, seien an dieser Stelle noch zwei Plots einer Antenne des Typs *Trimble Compact L1/L2 wGP* (Bilder 5-15a und 5-15b) aufgeführt. Diese Korrekturwerte wurden nicht auf ein gewähltes Niveau umgerechnet. Die Darstellung soll lediglich den qualitativen Verlauf der azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen zeigen.

Für L1 ist das Bild verglichen zu oben behandelten *Leica*-Antennen deutlich elevationsdominiert. Es unterscheidet sich in einer Seitenansicht kaum von der Darstellung der elevationsabhängigen Verbesserungen. L2 hingegen weist ebenso eine Azimutabhängigkeit auf.

Bild 5-14: Absolute azimut- und elevationsabhängige PZV, Typmittel *Leica AT502*Bild 5-15: Absolute azimut- und elevationsabhängige PZV, *Trimble Compact L1/L2 wGP*, GPS-Tag 320

### 5.3.2 Relative Kalibrierung

Zunächst werden auch wieder beispielhaft zwei repräsentative 3D-Darstellungen der relativen azimut- und elevationsabhängigen Kalibrierwerte einer Antenne aufgeführt (Bilder 5-16a und 5-16b).

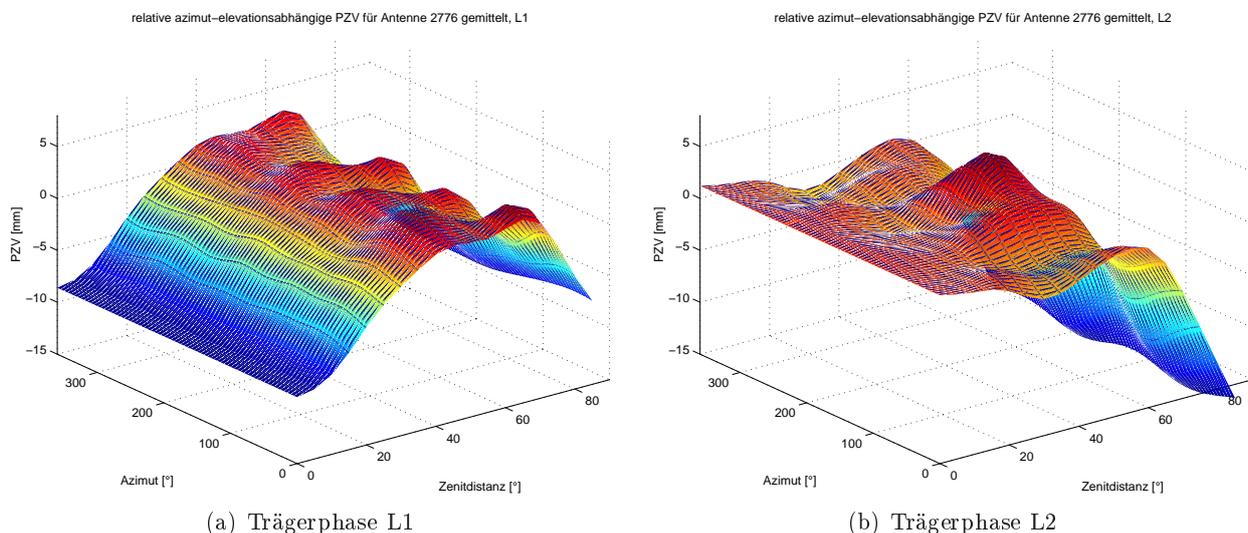


Bild 5-16: Relative azimut- und elevationsabhängige PZV von Antenne 2776

Im ersten Schritt wird wieder untersucht, ob die Kalibrierung auf unterschiedlichen Pfeilern einen Einfluss auf das Ergebnis besitzt. Hierzu wird die oben beschriebene Darstellungsform Differenz zum Mittelwert betrachtet.

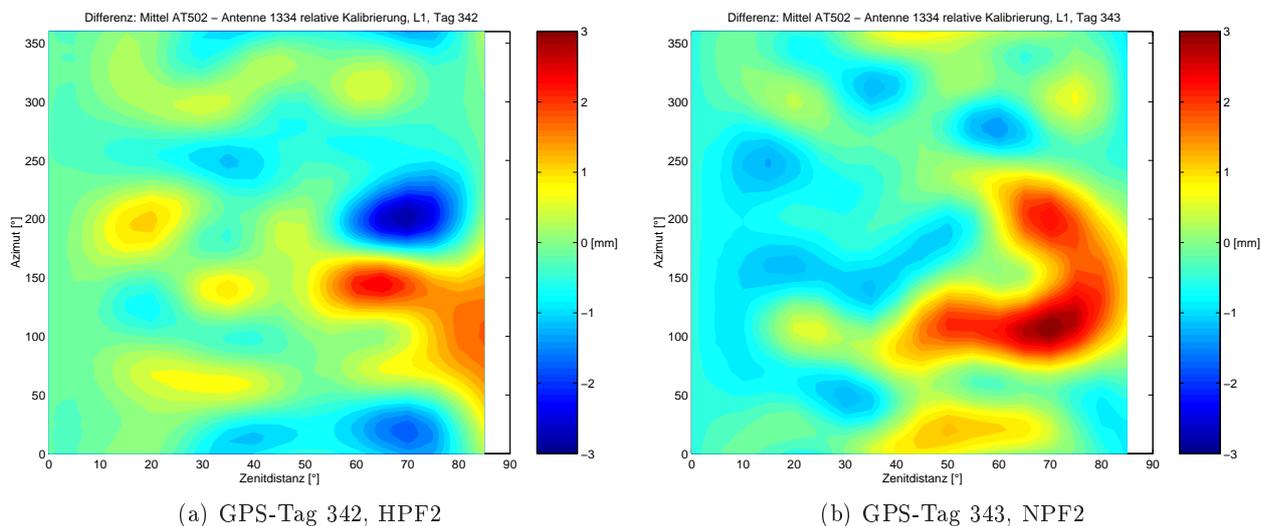


Bild 5-17: Differenz der relativen azimut- und elevationsabhängigen PZV von Antenne 1334 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L1

In den Bildern 5-17a und 5-17b sind die Ergebnisse der relativen Kalibrierungen der Antenne 1334 an zwei aufeinanderfolgenden Tagen dargestellt. An GPS-Tag 342 wurden die Messungen auf Pfeiler HPF2 und an GPS-Tag 343 auf Pfeiler NPF2 durchgeführt. Zu erwähnen ist, dass zwei Tageslösungen ausgewählt wurden, die sich sehr stark unterscheiden. An anderen Tagen ist der Unterschied zwischen

den beiden Örtlichkeiten geringer.

Die beiden Bilder weisen eine Ähnlichkeit zu denen der absoluten Kalibrierung auf (Bilder 5-10a und 5-10b). Hierbei ist auf NPF2 eine Art „Nierenform“ zu erkennen, welche auf dem zweiten Pfeiler nicht auftaucht. Auf dem linken Bild erscheint an dieser Stelle eine positive Differenz in Form einer „Zunge“. Auch auf der restlichen Bildfläche treten weitere kleine Unterschiede zwischen den beiden Bildern auf.

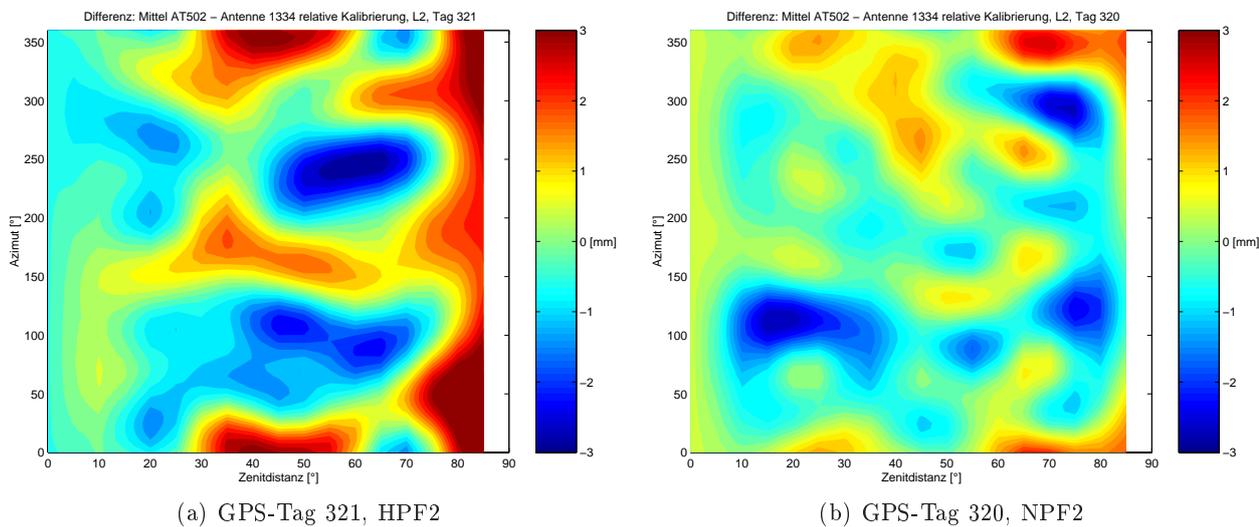


Bild 5-18: Differenz der relativen azimut- und elevationsabhängigen PZV von Antenne 1334 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L2

Auch für die Trägerphase L2 lassen sich teilweise signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Pfeilern erkennen. Hierzu Bild 5-18a und 5-18b. In Bild (Bild 5-18a) ist am rechten Rand deutlich eine Zone mit großen positiven Differenzen zum Antennenmittel zu erkennen. Ebenso treten in der rechten Bildhälfte bei den Azimuten  $100^\circ$  und  $250^\circ$  „Vertiefungen“ auf, welche im rechten Bild nicht zu beobachten sind. Ebenso fallen die positiven (NPF2) und negativen (HPF2) Differenzen am linken Rand auf.

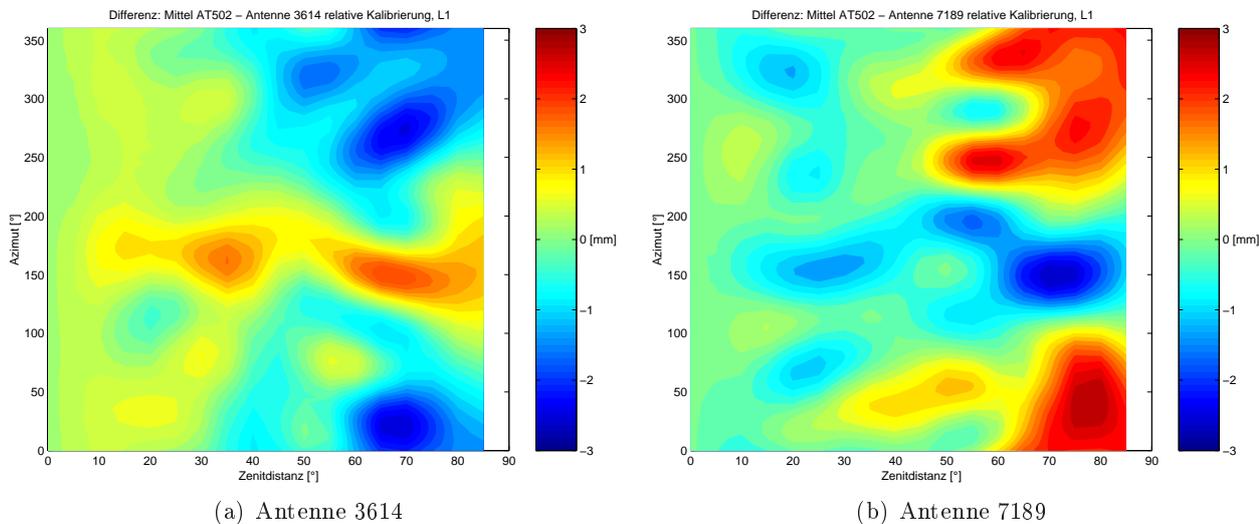


Bild 5-19: Differenz der relativen azimut- und elevationsabhängigen PZV der Antennen 3614 und 7189 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L1

Auch bei der Analyse der relativen Kalibrierung sollen zwei extrem gegensätzliche Ergebnisse zweier Antennen des gleichen Bautyps betrachtet werden, siehe Bild 5-19a und 5-19b. Beide Antennen wurden nur auf Pfeiler HPF2 kalibriert. Wie schon bei der Auswertung der absoluten Kalibrierergebnisse wurden hier für die beiden Antennen 3614 und 7189 als extreme Beispiele ausgewählt. Während bei der erstgenannten Antenne die Differenzen in der rechten oberen und unteren Hälfte negativ ausfallen, stellen sie sich bei Antenne 7189 an gleicher Stelle positiv dar. Auch in der Bildmitte fallen die Differenzen der beiden Antennen des Typs *AT502* gegensätzlich aus.

Die L2-Ergebnisse der o.g. Antennen sind in den Bildern 5-20a und 5-20b zu entnehmen.

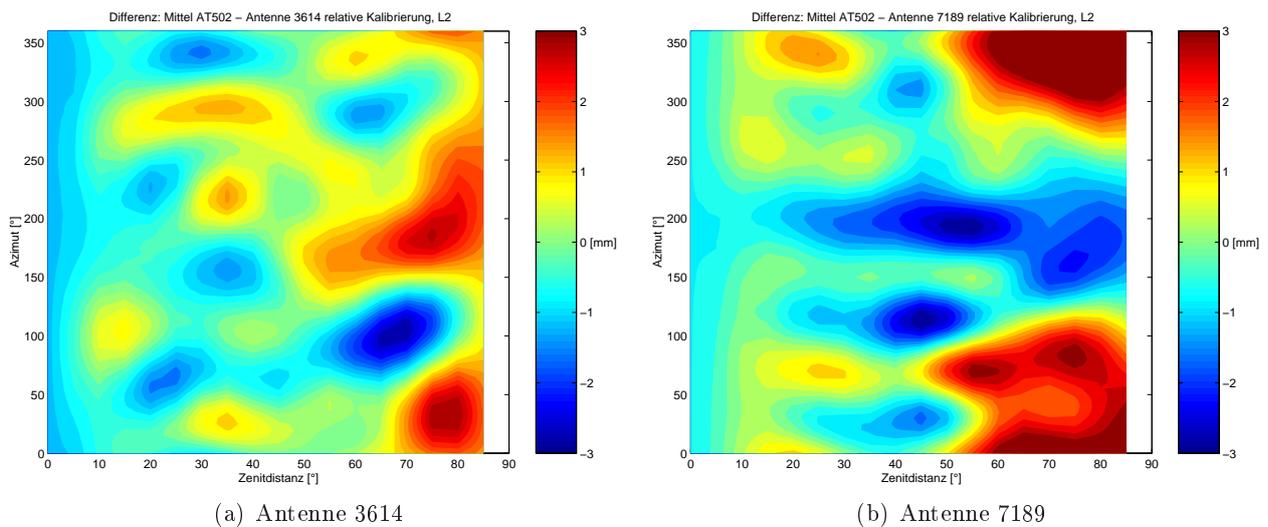
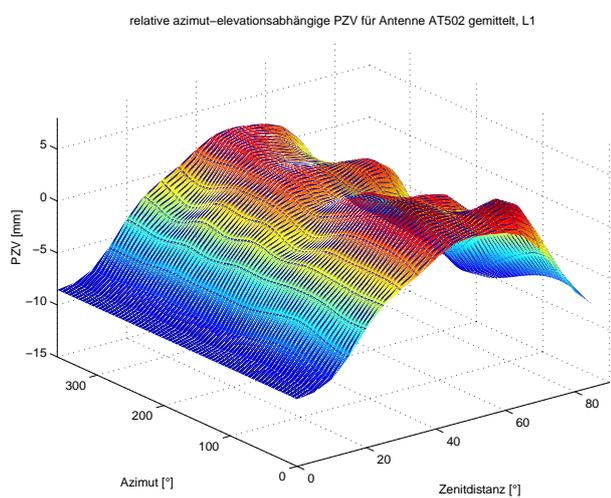


Bild 5-20: Differenz der relativen azimut- und elevationsabhängigen PZV der Antennen 3614 und 7189 zum Mittelwert des Typmittels *Leica AT502*, L2

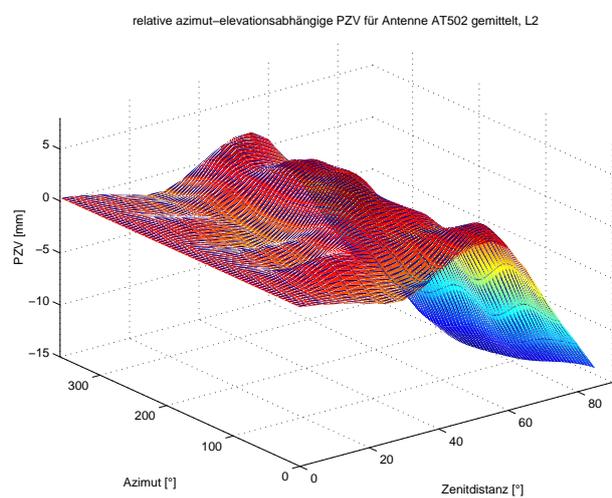
Die Unterschiede zwischen den beiden Antennen sind deutlich zu erkennen. Bei Antenne 7189 treten im oberen und unteren Drittel der rechten Bildhälfte große positive und im mittleren Drittel negative Differenzen hervor.

Abschließend sollen in den Bildern 5-21a und 5-21b die mit *Matlab* erstellten 3D-Plots für das Mittel aller relativen Kalibrierungen des Typs *Leica AT502* dargestellt werden.

Die dargestellten Bilder der Kalibrierungsergebnisse stellen nur einen Auszug der Gesamtheit aller im Rahmen dieser Arbeit kalibrierten Antennen dar. Ausgewählt wurden Darstellungen, die die gesamte Bandbreite der Ergebnisse bestmöglichst repräsentieren. Eine komplette PZV-Analyse ist bei diesem Antennentyp *Leica AT502* in jedem Fall zu empfehlen, da zum einen bekannt ist, dass Antennen dieser Bauart große Unterschiede aufweisen können und zum anderen die PZV zu dem stark azimutabhängig sind. Um genaue Aussagen bezüglich der Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierergebnisse treffen zu können, erscheint es zwingend notwendig, weitere Messreihen im Kalibrierfeld des GIK zu erfassen. In diesem Zusammenhang müssen auch die Einflüsse von Mehrwegeeffekten und Antennen-nahfeld im Kalibrierfeld gezielt untersucht und durch geeignete Maßnahmen reduziert werden.



(a) Trägerphase L1



(b) Trägerphase L2

Bild 5-21: Relative azimut- und elevationsabhängige PZV, Typmittel *Leica AT502*

## 6 Kurzbeschreibung des SFB 461

Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Auswertung eines lokalen GPS-Netzes, das Unterschiede hinsichtlich der Handhabung des Antennenmodells der verwendeten GPS-Antennen aufweist. Das behandelte Fallbeispiel bestand aus fünf Stationen, die Teil des Deformationsnetzes des Sonderforschungsbereich 461 „Starkbeben“ (SFB 461) Teilprojekt B1 der Universität Karlsruhe (TH) sind.

Der SFB 461 „Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen“ wurde im Jahr 1996 an der Universität Karlsruhe (TH) gegründet. Bei der Gründung wurden mehrere Ziele formuliert:

- Verstehen der tektonischen Ursachen mitteltiefer Beben
- Entwicklung von realistischen Modellen für Maximalbeschleunigungen
- Prognostik der Schadenswirkung auf der Basis von seismologischen Daten, Aufnahmen der Infrastruktur und des baulichen Zustandes
- Risikoverminderung durch präventive bauliche Ingenieurmaßnahmen, Entwicklung eines flexiblen Katastrophenmanagements sowie neuer Bergungstechnologien und Verfahrenstechniken der Wiederherstellung.

Aufgeteilt ist der SFB 461 in drei Projektbereiche:

- Projektbereich A: Lithosphärisches Szenario
- Projektbereich B: Rezente Kinematik und Dynamik
- Projektbereich C: Erdbebenauswirkungen und Ingenieurmaßnahmen.

Im zweiten Projektbereich ist die Arbeitsgruppe B1 „Dreidimensionale Plattenkinematik in Rumänien“ angesiedelt. Diese beschäftigt sich mit der Durchführung und Verarbeitung von GPS-Messungen zur Detektion von tektonischen Bewegungen.

Als Projektgebiet wurde die Vrancea-Region in der Nähe des Karpatenbogens in Rumänien ausgewählt. Der Grund hierfür liegt darin, dass dort starke, ortsfeste seismische Aktivität in mittlerer Tiefe zu verzeichnen ist. Hervorgerufen wird diese große Erdbebenaktivität durch mehrere Mikroplatten, die in dieser Region aufeinandertreffen. Besonders interessant hierbei ist, dass ein Teil einer Platte beinahe senkrecht subduziert wird. Sichtbar werden diese Bewegungen zum einen langfristig durch das Entstehen des stark gekrümmten Karpatenbogens sowie durch das Auftreten von Erdbeben mit Magnituden von mehr als fünf im Abstand von etwa ein bis zwei Jahren [SFB 461, 1998].

Seit 1995 wurden von verschiedenen Institutionen mehrwöchige Messkampagnen im Projektgebiet durchgeführt (1995, 1997, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004). Dabei wurde das GPS-Netz von zu Beginn sechs Stationen auf momentan 59 temporär zu besetzende und zusätzlich sieben Permanentstationen erweitert. Erweiterungen waren notwendig, um kleinräumige Bewegungen, die im Laufe der Auswertungen älterer Messungen aufgedeckt werden konnten, besser erfassen zu können. Für Sommer den 2006 ist eine weitere GPS-Messkampagne in Rumänien geplant.

Bei der Auswertung der bisherigen Kampagnen wurden nicht erklärbare Sprünge in den Höhen einiger Station aufgedeckt. Beispielhaft hierfür sei Bild 6-1 angeführt, worin die Residuen der ellipsoidischen Höhe der Auswertungen der Jahre 1995 bis 2004 der Station FUND in der Einheit Millimeter dargestellt sind. Deutlich lässt sich im Jahr 2003 ein Sprung von über 20 mm nach einem Ausrüstungswechsel (Übergang rote Punkte auf blaue Punkte) erkennen. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun untersucht werden, in welcher Weise die Verwendung von Kalibrierungsinformation von GPS-Antennen einen Einfluss

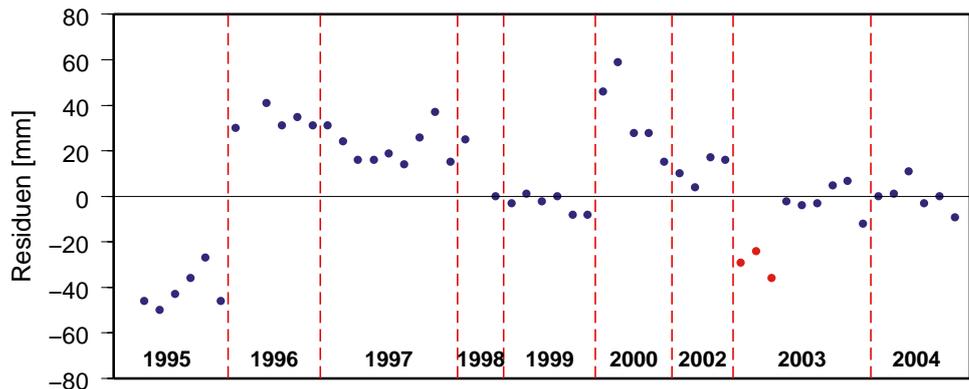


Bild 6-1: Residuen der ellipsoidischen Höhe der Station FUND der Jahre 1995 bis 2004 [mm]

auf die Ergebnisse der Prozessierung von GPS-Netzen hat.

Diese Arbeit läßt sich somit in zwei Teile gliedern. Zuerst sollen für die GPS-Antennen, die während der Kampagne im Jahr 2004 auf vier Stationen des Deformationsnetzes verwendet wurden, Kalibrierwerte für den Phasenzentrumsoffset sowie die Phasenzentrumsvariationen absolut und relativ bestimmt werden. Als Stationen wurden hierzu FUND, MAGU, MACH und TISM ausgewählt, da für die dort eingesetzten Antennen (Typ *Leica AT502*) recht einfach auf die notwendigen Kalibrierungsmessungen zugegriffen werden konnte. Sie wurden von den Besitzern dankenswerterweise unentgeltlich und kurzfristig zur Verfügung gestellt. Eine Zusammenstellung findet sich in Tab. 6-1. Als Basis wurde jeweils die EUREF-Permanentstation BUCU verwendet. Da für diese Station weder individuelle absolute oder noch individuelle relative Kalibrierwerte vorlagen, wurden bei der Auswertung für diese Station die vom NGS im Internet publizierten Korrekturen verwendet. Diese liegen aber nur in Abhängigkeit der Elevation und nicht wie bei den anderen im Rahmen dieser Arbeit kalibrierten Antennen in Abhängigkeit von Azimut und Elevation vor. Eine Skizze des verwendeten Netzes ist in Kapitel 8.1 auf Seite 53 zu finden.

Tabelle 6-1: Übersicht über die verwendeten Antennen

Seriennummer	Eigentümer
1325	Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
1334	Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
1954	Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Stuttgart
1960	Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Stuttgart
2709	Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, Koblenz
2776	Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, Koblenz
2819	Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, Koblenz
3520	Geodätisches Institut, Stuttgart
3614	Geodätisches Institut, Stuttgart
4138	Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Abt. Geodäsie, Karlsruhe
7189	Ingenieurteam Trenkle, Karlsruhe
8286	Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, Koblenz

Insgesamt sollten fünf verschiedene Versionen analysiert und deren Ergebnisse miteinander verglichen werden:

1. Version: absolut, individuell
2. Version: absolut, Typmittel
3. Version: relativ, individuell

4. Version: relativ, Typmittel

5. Version: relativ, bisher bei der Auswertung verwendete NGS-Kalibrierwerte

Hierbei bedeutet „absolut, individuell“, dass für jede verwendete Antenne (mit Ausnahme der Referenzstation BUCU) individuelle absolute Kalibrierwerte vorliegen, „absolut, Typmittel“ bedeutet hingegen, dass aus allen im Rahmen dieser Arbeit absolut kalibrierten Antennen des Typs *Leica AT502* ein sogenanntes Typmittel berechnet wurde. Analog dazu entsprechend „relativ, individuell“ und „relativ, Typmittel“. Bei der Auswertung wurden für alle Kalibrierungsarten azimut- und elevationsabhängige Korrekturen verwendet. Schließlich wurde das Netz auch mit den bisher im SFB verwendeten Korrekturen prozessiert um gegebenenfalls Unterschiede aufzeigen zu können. Bei diesen handelt es sich um die vom NGS veröffentlichten relativen elevationsabhängigen Korrekturen.

Insgesamt wurden drei Messblöcke zu je drei Tagen der Kampagne 2004 ausgewertet: GPS-Tage 221-223, 225-227 und 229-231. Tab. 6-2 zeigt, wann welche der oben genannten Antennen auf welchem Punkt aufgebaut war. Tage, für die kein Beobachtungsmaterial vorliegt, wurden mit „-“ gekennzeichnet. Gemessen und ausgewertet wurden jeweils Sessions mit einer Dauer von etwa 24 Stunden.

Tabelle 6-2: Übersicht über die Verteilung der verwendeten Antennen

<b>Station</b>	<b>221</b>	<b>222</b>	<b>223</b>	<b>225</b>	<b>226</b>	<b>227</b>	<b>229</b>	<b>230</b>	<b>231</b>
<b>FUND</b>	2709	2709	2709	4138	4138	4138	2776	2776	2776
<b>MAGU</b>	1334	1334	1334	2709	2709	2709	3520	3520	3520
<b>MACH</b>	3614	3614	3614	7189	7189	7189	-	-	-
<b>TISM</b>	4138	-	4138	3520	3520	3520	1334	1334	1334

## 7 GPS-Auswertung unter Verwendung der *Bernese GPS Software*

Bei der Auswertung wurde die im SFB eingesetzte Version 4.2 der *Bernese GPS Software* verwendet. Die erste Version wurde schon in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts vom Astronomischen Institut der Universität Bern (Schweiz) erstellt und seither weiterentwickelt.

Die *BS* wird überall dort eingesetzt, wo höchste Genauigkeit für die Auswertung von GPS-Beobachtungen gefordert wird. Hauptnutzer sind bspw. Wissenschaftler, große Vermessungsfirmen und Permanentstationsnetze betreibende Institutionen.

Einige Anwendungsszenarien sollen in der folgenden Aufzählung beispielhaft erwähnt werden:

- Prozessierung von Permanentstationsnetzen
- Auswertung langer Basislinien (bis 2000 km) unter Nutzung präziser Orbits
- Modellierung von Troposphäre und Ionosphäre.

Die *BS* wurde in den Programmiersprachen *Fortran 77*, *Fortran 90* und *C* entwickelt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Software systemunabhängig, d.h. auf verschiedenen Computerplattformen (PC, UNIX, ...) eingesetzt werden kann [Rothacher and Mervart, 2001].

Die *BS 4.2* kann in fünf Module aufgeteilt werden:

- Transfer: Konvertierung der Dateien ins Format der *BS* (Beobachtungen, Broadcast-Informationen, Meteorologie)
- Orbit: Generierung von Standard-Orbits und präzisen Orbits, Vergleich von Orbits
- Prozessierung: Code-Prozessierung, Parameter-Schätzung auf Basis von GPS- und/oder GLONASS-Beobachtungen und der Kombination von Normalgleichungen
- Simulation: Erzeugung simulierter GPS und GLONASS Beobachtungen basierend auf statistischer Information
- Service: Verändern und Betrachten binärer Beobachtungsdaten, Koordinatenvergleich, Residuenausgabe.

Die Steuerung der Software erfolgt über Textmenüs. In Bild 7-1 ist das Grundfenster dargestellt. Über Tastatureingaben können Untermenüs aufgerufen, einzelne Eingaben getätigt und Programme gestartet werden.

Ein Beispiel für ein Steuerungsfenster des Programms 4.2 „Code-Processing“ zeigt Bild 7-2. In diesem und den folgenden Fenstern können die gewünschten Eingabedateien ausgewählt, weitere Einstellungen vorgenommen und letztendlich die Verarbeitung gestartet werden.

Für die komplette Prozessierung mehrerer Basislinien ist es notwendig jedes Steuerungsfenster aller Programme einzeln abzuarbeiten auch wenn keine Änderungen an den Parametern vorgenommen werden. Für die Verarbeitung kleiner Netze oder einzelner Basislinien erscheint dieses Vorgehen praktikabel. Sollen aber größere GPS-Netze oder verschiedene geringfügig unterschiedliche Versionen eines Netzes mehrfach berechnet werden ist die Bedienung per Eingabefenster umständlich. Abhilfe schafft hier die sog. „*Bernese Processing Engine*“ (*BPE*). Mit ihr ist es möglich, die Eingabeparameter in einzelnen Dateien vorab festzulegen und die Programmaufrufe zu tätigen.

```

+-----+
| Primary |                               Bernese GPS Software Version 4.2 |
+-----+
| S:N C:0 |                               |
+-----+
| 0 .. | DEFAULTS           : Defaults for Processing, Program and File Names |
| 1 .. | CAMPAIGNS          : Informations and Update of Campaigns |
| 2 .. | TRANSFER            : Data Transfer to Bernese Format; Simulation |
| 3 .. | ORBITS              : Orbit Computation, Check and Update |
| 4 .. | PROCESSING          : Preprocessing and Processing of Observations |
| 5 .. | SERVICES            : Service Programs |
| 6 .. | BPE                 : Bernese Processing Engine |
| 7 .. | DOCU                : Documentation, Help Panels |
| 9 .. | USER               : Individual User Programs |
| =H   | HELP                : Get Help Panel |
| =X   | EXIT                : Terminate GPS Processing |
+-----+
| Enter Selection : █ |

```

Bild 7-1: Grundmenü der BS 4.2

```

+-----+
| 4.2 |                               PROCESSING: CODE PROCESSING |
+-----+
| CAMPAIGN      > ANDREAS < |
| Job Identification: |
| JOB CHARACTER  > <      (blank or character from A - Z, 0 - 9) |
| Input Files: |
| CODE          > SELECTED < | COORDINATES      > ANDREAS < |
| BROADCAST     > NO <      | STANDARD ORBIT   > IGS12830 < |
| ECCENTRICITIES > <      | SATELLITE CLOCKS > IGS12830 < |
| TROPO. ESTIMATES > NO < |
| Output Files: |
| COORDINATES   > TEST <    | RESIDUALS        > NO < |
| PHASE         > <        | RESULT SUMMARY   > TEST < |
| SATELLITE CLOCKS > NO < |
| See Help Panel |
+-----+
| U:/PAN/DAT42___.PAN | REPLACE |

```

Bild 7-2: Steuerungsmenü Programm 4.2 „Code-Processing“



#V_Y	YEAR	97	2
#V_PLUS	PLUS DAYS	+0	2
#V_MINUS	MINUS DAYS	-0	2

Hierbei wird die Abfolge der einzelnen Programmaufrufe über einzelne Skripte gesteuert. Ebenso sind in dieser Datei die Verzeichnisse hinterlegt, in welchen die Dateien mit den Optionen abgespeichert sind. Zudem besteht an dieser Stelle die Möglichkeit die Verarbeitung auf mehrere Prozessoren (CPU) zu verteilen, um eine schnellere Berechnung zu erreichen.

Im Folgenden soll nun kurz auf einzelne Teile des Softwarepaketes der *BS*, die in dieser *BPE* verwendet worden sind, eingegangen werden. Diese werden in etwa in dieser Reihenfolge abgearbeitet, jedoch auch teilweise mehrfach eingesetzt. Entnommen wurden diese Beschreibungen dem Handbuch zur Version 4.2 [Rothacher and Mervart, 2001].

#### *PRETAB:*

Mit diesem Modul wird eine tabellenförmige Datei mit den Orbitinformationen in der Epoche „J2000.0“ erstellt. Hierzu wird auch eine Datei, welche die Polbewegungen enthält, verwendet. Ausgegeben wird eine Datei mit Informationen zu den Satellitenuhren, die für die Bestimmung von Verbesserungen derselben für jede Beobachtungsepoche verwendet werden kann.

#### *ORBGEN:*

Die Hauptaufgabe dieses Programmes besteht in der Berechnung von sog. „Standard-Orbits“. Ein solcher kann sich aus einem oder mehreren Standardbögen zusammensetzen, von denen jeder durch eine Start- und Endzeit definiert wird. Diese Bögen sind die Lösungen der Bewegungsgleichungen, wobei pro Satellit bis zu neun deterministische Parameter möglich sind.

#### *RXOBV3:*

Dieses Tool wandelt die Beobachtungen vom RINEX- ins Bernese-Format um. Hierzu sind drei sog. „Translation Tables“ notwendig für Station, Empfänger-Antennen-Kombination und Antenneninformation. Die Ausgabe enthält je eine Datei für Code und Phase, Header und Beobachtungen mit den Endungen \*.CZO, \*.PZO, \*.CZH und \*.PZH.

#### *CODSPP:*

Ein wichtiger Schritt bei der Auswertung von GPS-Beobachtungen ist die Synchronisierung der Empfängeruhr mit der GPS-Zeit. Hierzu muss der Empfängeruhrfehler  $\delta_k$  mit einer Genauigkeit von besser als  $1 \mu\text{s}$  bestimmt werden. Diese Aufgabe obliegt *CODSPP*. Außerdem können mit diesem Modul auch Koordinaten für die Punktposition auf Basis der Codebeobachtungen berechnet werden.

#### *SNGDIF:*

In der *BS* werden als Grundbeobachtungen Doppeldifferenzen verwendet. Grundlage für diese sind Empfängereinfachdifferenzen (Basislinien), welche von *SNGDIF* gebildet und in Dateien vorgehalten werden.

#### *MAUPRP:*

Durch *MAUPRP* werden aus den Dateien mit den Einfachdifferenzen sinnvolle Linearkombinationen der Phasenbeobachtungen gebildet und analysiert. Außerdem werden diese Kombinationen u.a. auf sog. „cycle slips“ untersucht.

#### *GPSEDT:*

Zuerst werden in diesem Schritt mit *GPSEST* Code und Phase prozessiert. Abgespeichert werden sowohl die Residuen der Doppeldifferenzen-Linearkombination  $L_3$  als auch die Normalgleichungen. Anschließend werden die so entstandenen Residuen auf schlechte Phasen-Doppeldifferenzen geprüft

und gegebenenfalls entfernt.

*SERVOBS:*

Hierbei werden die im vorigen Schritt entdeckten Ausreißer in den Dateien der Einfachdifferenzen markiert.

*GPSEST:*

*GPSEST* dient der Parameterschätzung, bestimmt werden bspw. die ionosphärische und troposphärische Refraktion.

*GPSQIF:*

Hier wird der Algorithmus zur Lösung der Mehrdeutigkeiten getrennt für jede einzelne Basislinie angewendet.

*GPSXTR:*

Mit Hilfe dieser Routine werden aus den Ausgabedateien verschiedener Programme Zusammenfassungen und Ergebnisse extrahiert.

*GPSEST:*

Mit diesem Aufruf des Moduls *GPSEST* wird die sogenannte „Sessionlösung“ generiert.

*DEL\_PS:*

Schließlich werden entstandene Daten an einen gewünschten Ort kopiert und nicht mehr benötigte temporäre Dateien gelöscht.

Die *BS* bietet für die Auswertung von GPS-Messungen umfangreiche Variationsmöglichkeiten. Es können unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt und korrigiert werden, was aber große Auswerteerfahrung erfordert, um die Ergebnisse nicht unwissentlich falsch zu beeinflussen. Bei den Auswertungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden kam die bisher im SFB 461 eingesetzte Auswertestrategie zur Anwendung. Für jede Station liegen Tagessessions mit einer Beobachtungsrate von 30 s vor. Die Daten wurden mit einer Elevationsmaske von 5° erfasst und ebenso ausgewertet. Zur Beschreibung der Satellitenantennen wurde eine Datei verwendet, die für jeden GPS-Satelliten die Offsets der Antennen enthält. Diese kann von der Homepage des Astronomischen Instituts der Universität Bern (<http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER42/GEN/SATELLIT.TTT>) heruntergeladen und direkt in die Auswertung integriert werden. Sowohl bei den Versionen mit relativen, als auch absoluten Kalibrierwerten für die Empfangsantennen kam diese Datei (*SATELLIT.TTT*) zum Einsatz.

Um in der Zukunft eine Genauigkeitssteigerung der mit GPS bestimmten Ergebnisse zu erreichen sollten die bisher angewandten Strategien überdacht und der Einsatz neuer Wege auf diesem Gebiet untersucht werden.

## 8 Analyse der GPS-Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung des GPS-Netzes analysiert, welche mit der *BS* in den fünf verschiedenen Versionen berechnet worden sind.

### 8.1 GPS-Netz

Die Stationen, aus denen sich das in dieser Arbeit analysierte Netz zusammensetzt, sind Teil des Deformationsnetzes des SFB 461 in Rumänien. Verwendet wurden die vier SFB-Stationen *FUND*, *MACH*, *MAGU* und *TISM* sowie die permanent betriebene EUREF-Station *BUCU*, welche als Referenzstation diente. Bild 8-1a zeigt alle Stationen des Deformationsnetzes in Rumänien. Bild 8-1b zeigt die ausgewerteten Basislinien, wobei die dort dargestellte Station *MACI* mit der Station *MACH* identisch ist.

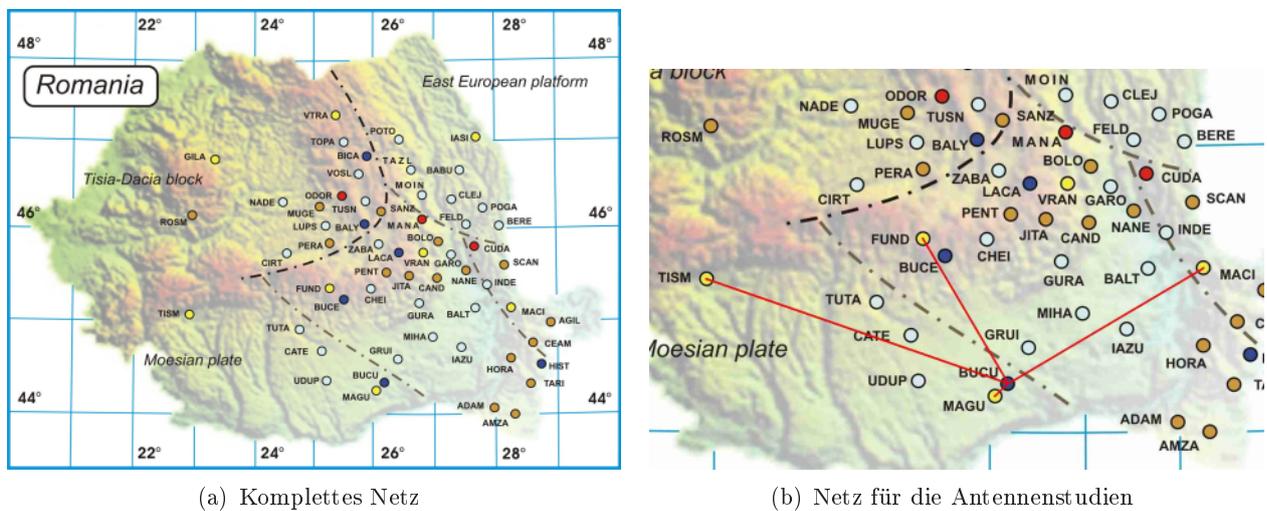


Bild 8-1: GPS-Netze

Ziel der Berechnung war, den Einfluss von unterschiedlichen Kalibrierwerten für die auf den Stationen eingesetzten Antennen zu untersuchen. Da es im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich war, alle im Deformationsnetz eingesetzten Antennen zu kalibrieren, wurden vier Stationen ausgewählt. Diese wurden nach der möglichst einfachen Verfügbarkeit der GPS-Ausrüstungen selektiert.

Geplant war, auf allen vier SFB-Stationen in drei Blöcken zu je drei Tagen 24-Stunden-Messungen durchzuführen, damit neuntägiges Beobachtungsmaterial vorliegt. Zwischen den einzelnen 3-Tages-Blöcken ergibt sich aus logistischen Gründen eine Messunterbrechung von einem Tag, da die Messteams nach jedem Block die Station wechselten. Auf zwei Stationen ist für einzelne Tage lediglich lückenhaftes Beobachtungsmaterial vorhanden: *MACH* (GPS-Tage 229-231) und *TISM* (GPS-Tag 222). Auf den einzelnen Punkten wurde in den Blöcken mit unterschiedlichen Ausrüstungen gemessen (siehe Tab. 6-2).

Es ist allgemein bekannt, dass GPS-Ergebnisse von differentiellen Auswertungen vom Stationsabstand abhängen. Tab. 8-1 stellt die Entfernungen zur Referenzstation *BUCU* in Kilometern dar.

Tabelle 8-1: Zusammenstellung der Basislinienlänge

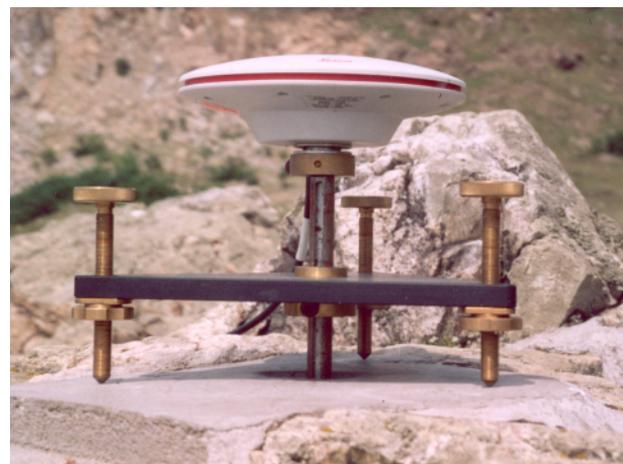
Basislinie	BUCU-MAGU	BUCU-FUND	BUCU-MACH	BUCU-TISM
Länge der Basislinie [km]	14.0	126.2	184.7	248.4

Zuverlässige, genaue und repräsentative Deformationsraten können nur bestimmt werden, wenn adäquate Vermarkungen und Vermarkungstechniken zum Einsatz kommen. Um die GPS-Antenne über den zu messenden Punkten aufzubauen, werden im Rahmen des SFB zwei verschiedene Modi verwendet. Bei Punkten, an denen unbeschädigte Vermarkungsbolzen vorhanden sind, werden spezielle, im Rahmen des SFB entwickelte einschraub- und horizontierbare Adapter eingesetzt. An Punkten, bei denen die Vermarkung zerstört wurde, werden einfache Mauerplatten eingesetzt. Bild 8-2 zeigt die beiden Aufbauvarianten. Ein Einfluss dieser unterschiedlichen Arten des Messaufbaus auf die empfangenen GPS-Signale ist zu erwarten.

Die Mauerplatten werden in FUND, MACH und TISM verwendet, der SFB-Adapter kommt am Punkt MAGU zum Einsatz.



(a) SFB-Adapter



(b) Mauerplatte

Bild 8-2: Eingesetzte Aufbauvarianten

## 8.2 Koordinatenübersicht

In Tab. 8-2 sind die Koordinaten der vier Stationen MAGU, FUND, MACH und TISM nach der Auswertung der verschiedenen, in Kapitel 6 beschriebenen Auswerteversionen zu finden. Die kartesischen WGS84-Koordinaten X, Y, Z liegen hierbei bezüglich des geodätischen Datums ITRF2000 (Epochen 2004-08-08 = GPS-Tag 221 bis Epoche 2004-08-18 = GPS-Tag 231) vor. Sie entstammen einer Datei, die durch einen Durchlauf des Moduls *ADDNEQ* der *BS* entstanden ist. Mit Hilfe dieses Moduls ist es möglich, Tageslösungen einzelner Punkte zu einer Kampagnenlösung zusammenzufassen. In diesem Fall wurden hiermit die Ergebnisse der neun Messtage zu einem Koordinatensatz für jede Station vereint. *ADDNEQ* verarbeitet Normalgleichungen und bietet hierbei viele verschiedene Varianten des Zusammenschlusses an. Beispielsweise kann in einem Durchlauf auch die Geschwindigkeit einer Station bestimmt werden, worauf jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet wurde [Rothacher and Mervart, 2001].

Für die hier beschriebenen Berechnungen wurde die Permanentstation BUCU festgehalten und die Positionen der vier anderen Stationen bestimmt.

Tabelle 8-2: Koordinatenzusammenstellung aus den *ADDNEQ*-Ergebnissen [m]

		Version 1	Version 2	Version 3	Version 4	Version 5
MACH	X	3964965.5623	3964965.5647	3964965.5659	3964965.5702	3964965.5931
	Y	2125098.9890	2125098.9898	2125098.9892	2125098.9917	2125099.0043
	Z	4506468.0410	4506468.0421	4506468.0408	4506468.0447	4506468.0693
	ell. Höhe	116.4231	116.4256	116.4253	116.4315	116.4674
MAGU	X	4104310.8841	4104310.8829	4104310.8871	4104310.8864	4104310.9120
	Y	2006316.5142	2006316.5132	2006316.5161	2006316.5154	2006316.5271
	Z	4436074.7987	4436074.7982	4436074.8000	4436074.8001	4436074.8261
	ell. Höhe	111.6632	111.6618	111.6667	111.6660	111.7043
TISM	X	4145762.0174	4145762.0193	4145762.0205	4145762.0212	4145762.0464
	Y	1770613.0666	1770613.0649	1770613.0710	1770613.0695	1770613.0821
	Z	4497519.1560	4497519.1561	4497519.1573	4497519.1565	4497519.1827
	ell. Höhe	452.6981	452.6990	452.7023	452.7018	452.7402
FUND	X	4057655.5920	4057655.5905	4057655.5954	4057655.5941	4057655.6186
	Y	1913147.0076	1913147.0058	1913147.0102	1913147.0082	1913147.0194
	Z	4520422.8739	4520422.8719	4520422.8746	4520422.8728	4520422.8982
	ell. Höhe	1252.6662	1252.6633	1252.6696	1252.6669	1252.7040

Ein erster kurzer Blick auf die Koordinatenübersicht zeigt, dass sich die ersten vier Versionen kaum unterscheiden und sich die letzte Version deutlich von den anderen abhebt. Vor allem die ellipsoidische Höhe unterscheidet sich um etwa 4 cm. Auf diesen Höhenversatz wird in Kapitel 8.4 näher eingegangen.

In Tab. 8-3 sind für die obigen Punkte die mittleren Fehler der Koordinaten aus den *ADDNEQ*-Dateien aufgeführt.

Tabelle 8-3: Mittlere Fehler der Koordinaten aus *ADDNEQ*

		Version 1	Version 2	Version 3	Version 4	Version 5
MACH	N [mm]	3.1	2.8	3.2	3.1	3.0
	E [mm]	7.5	8.0	7.3	8.0	7.6
	Up [mm]	10.1	14.8	9.0	14.4	15.1
MAGU	N [mm]	2.3	1.5	2.2	1.4	1.7
	E [mm]	1.4	1.0	1.4	1.0	1.4
	Up [mm]	7.3	9.2	6.6	8.1	9.6
TISM	N [mm]	5.6	6.1	6.0	6.0	5.6
	E [mm]	6.4	6.4	6.8	6.9	6.3
	Up [mm]	18.6	21.2	19.8	21.8	21.2
FUND	N [mm]	8.5	10.3	8.7	10.6	10.4
	E [mm]	4.0	3.6	4.2	3.9	4.0
	Up [mm]	9.3	8.1	9.0	7.8	8.4

GPS-typisch ist in Tab. 8-3 festzustellen, dass bei den ersten drei Stationen die Höhenkomponente (Up) in allen Versionen schlechter ausfällt als die Lagekomponenten (Northing, Easting). Bei FUND ist jedoch der Lagefehler in Northing für die Versionen zwei, vier und fünf schlechter bestimmt als die beiden anderen Komponenten.

Ebenfalls ungewöhnlich ist, dass bei MACH und MAGU Northing unabhängig von der Version besser ausfällt als Easting. Theoretischen Überlegungen nach sollte in mittleren Breiten auf Grund der Anordnung der Satelliten im GPS-Raumsegment („Nordloch“) Northing schlechter bestimmt sein als Easting.

Die mittleren Lagefehler für MACH, MAGU und TISM unterscheiden sich kaum zwischen den verschiedenen Auswerteversionen. Für die mittleren Höhenfehler der Versionen, die mit individuellen Kalibrierwerten (Versionen 1 und 3) erzeugt wurden, werden Ergebnisse erhalten, die meist um mehrere Millimeter besser sind, als die, die mit Typmitteln berechnet wurden.

Da in den beiden obigen Tabellen nur die gemittelten Werte über alle Tage enthalten sind, werden im Folgenden Tageslösungen untersucht.

### 8.3 Vergleich der Lage-Residuen

Im Rahmen dieses Untersuchungsteils sollen die Residuen für Northing und Easting der einzelnen Stationen nacheinander analysiert werden.

In den präsentierten Bildern sind die Residuen einzeln nach Art (N, E) und Version aufgetragen. Die Rechtsachse gibt die GPS-Tage des Jahres 2004 und die Hochachse die Residuen in Millimetern an. Die senkrechten rot gestrichelten Linien markieren einen Antennenwechsel. Die schwarzen Zahlen im unteren Drittel der Grafik geben die Seriennummer der verwendeten Antennen wieder. Da eine Wiedergabe aller Residuen in Zahlenwerten an dieser Stelle zu umfangreich ist, sind diese im Anhang in Tabellenform aufgeführt (Tabellen A-1, A-2, A-3 und A-4).

Northing der Station MACH bewegt sich im Bereich -3 mm bis +6 mm, wie in Bild 8-3a zu sehen ist. Bis auf GPS-Tag 221 liegen die einzelnen Auswerteversionen sehr eng zusammen.

Ein Blick auf die Easting-Residuen zeigt, dass diese in einem größeren Maß schwanken als die Northing-Residuen (siehe Bild 8-3b), welche über alle untersuchten Tage gesehen, im Intervall  $\pm 10$  mm liegen.

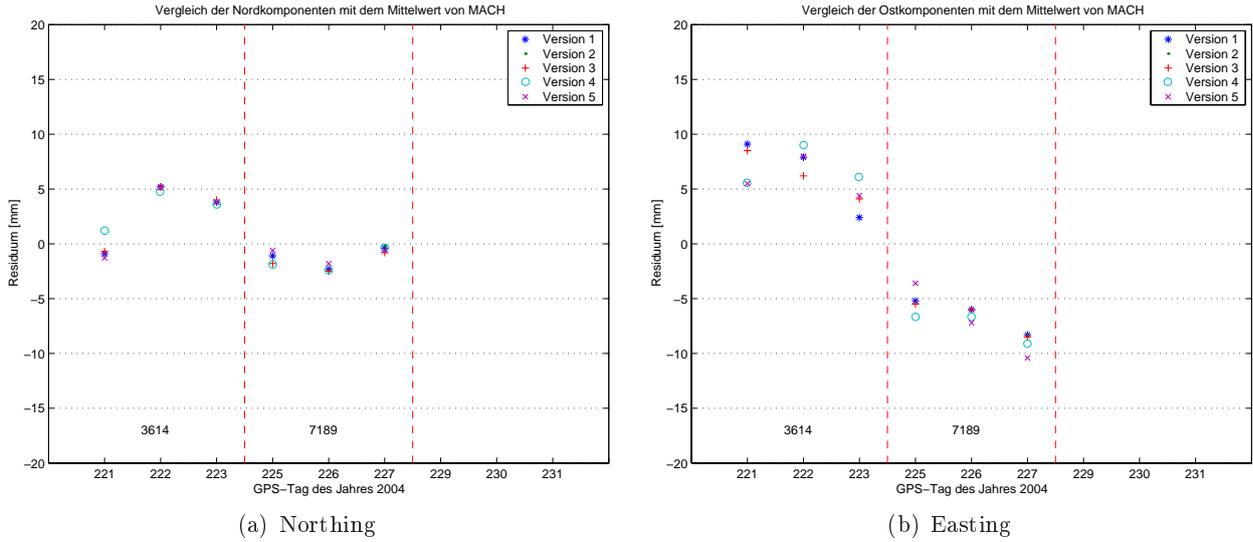


Bild 8-3: Lagerresiduen der Station MACH (Länge BL: 184.7 km)

Werden nur die drei Tage, an denen mit einer Antenne gemessen wurde, getrennt betrachtet, so liegen die Ergebnisse in einem deutlich kleineren Intervall. Somit treten nach einem Antennenwechsel Sprünge in den berechneten Koordinaten auf, dies ist ebenfalls bei den anderen Stationen beobachtbar. Falls diese signifikanten Abweichungen auf Abweichungen im Empfangsverhalten der verwendeten Antennen zurückzuführen sind, sollten durch die Verwendung von individuellen Kalibrierwerten diese Sprünge signifikant reduziert werden. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Berechnungsversionen weist sowohl hinsichtlich Vorzeichen als auch betragsmäßig keine Systematiken auf. Auffallend jedoch ist, dass sich die Differenzen der GPS-Tage 221 bis 223 stark von denen der GPS-Tage 225 bis 227 unterscheiden. Möglicherweise verhält sich die im zweiten Block eingesetzte Antenne anders gegenüber äußeren Einflüssen, als die des ersten Blocks. Im zweiten Beobachtungsblock liegen weiterhin die mit den individuellen Kalibrierwerten erzielten Ergebnisse sehr eng zusammen.

Bild 8-4 zeigt die Abweichungen der Lagekomponenten der Station MAGU vom Mittelwert.

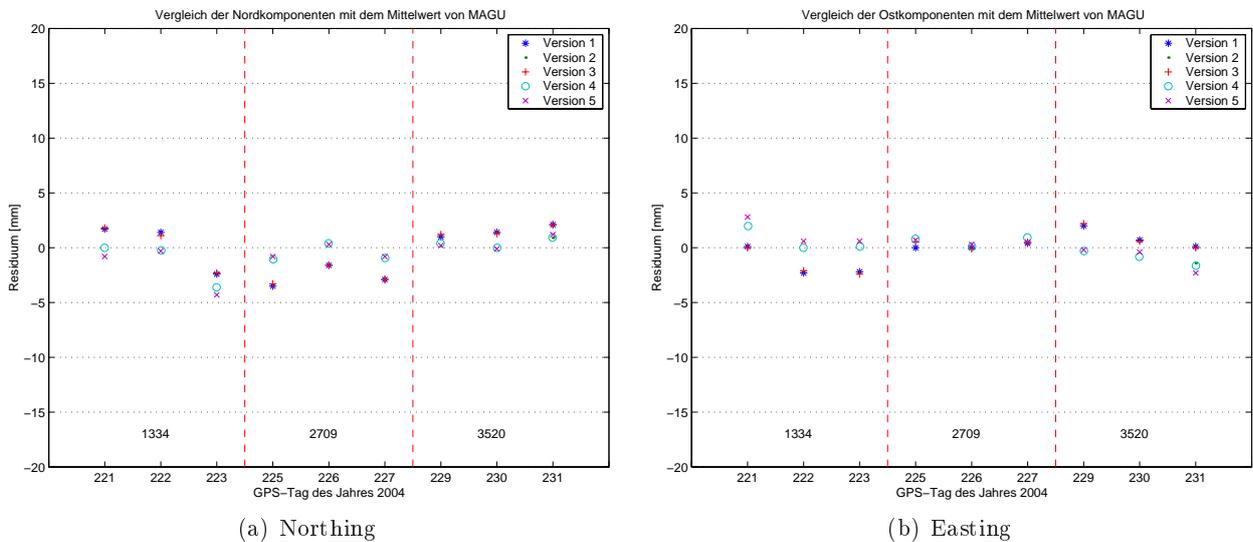


Bild 8-4: Lagerresiduen der Station MAGU (Länge BL: 14.0 km)

Zunächst folgt die Betrachtung der Werte der Northing-Residuen. Diese bewegen sich in einem Band von weniger als  $\pm 5$  mm um den Mittelwert. Die Werte der einzelnen Auswerteversionen liegen an dieser Station jedoch nicht so eng zusammen wie bei der zuvor behandelten Station. Zu erkennen ist hier vielmehr, dass die Residuen der Versionen 2, 4 und 5 (Typmittelwerte) geringere Beträge annehmen als die der beiden anderen Auswerteversionen. Die Ergebnisse der individuellen Kalibrierung (absolut, relativ) liegen ebenfalls sehr nahe beieinander.

Auch die Easting-Werte der beiden mit individuellen Kalibrierwerten berechneten Resultate unterscheiden sich kaum. Im mittleren Beobachtungsblock (GPS-Tage 225-227) treten jedoch Differenzen zwischen den einzelnen Versionen auf. Für den ersten und letzten Block der Messungen nehmen die Residuen der beiden Typmittel-Versionen geringere Beträge an. Im mittleren Teil kann hierzu keine definitive Aussage getroffen werden. Insgesamt ist für diese Station, die die geringste Entfernung zur Referenzstation BUCU aufweist, keine signifikante Aussage bezüglich der Unterschiede der einzelnen Auswerteversionen möglich.

In den Grafiken 8-5a und 8-5b sind die Northing- und Easting-Residuen für TISM dargestellt. Die fehlenden Darstellungen für GPS-Tag 222 resultieren aus fehlendem Datenmaterial.

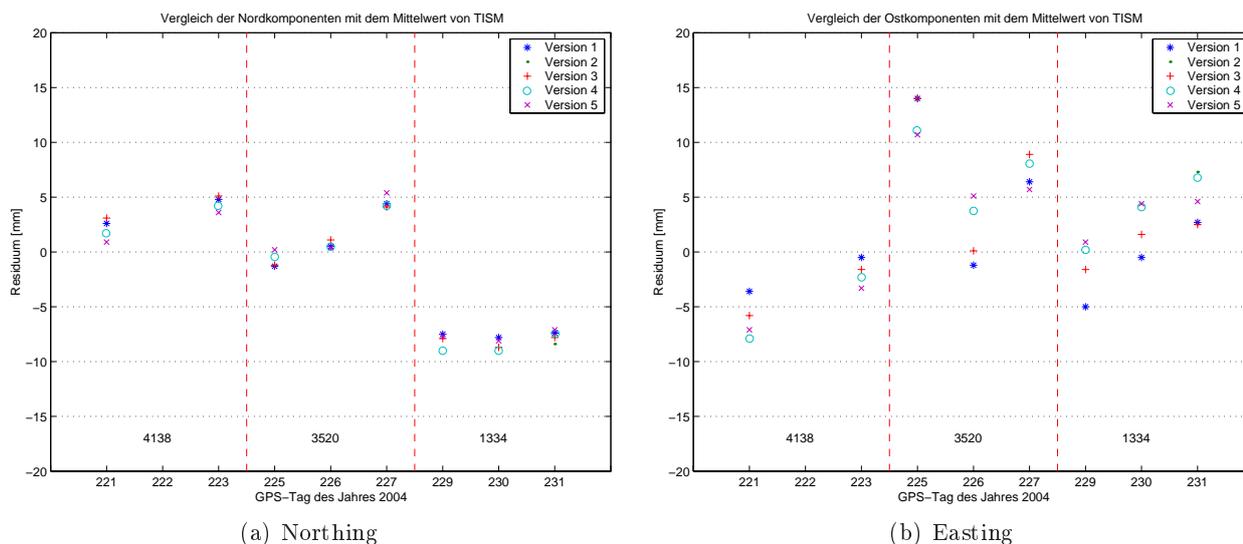


Bild 8-5: Lagerresiduen der Station TISM (Länge BL: 248.4 km)

Es ist auffallend, dass die in beiden Grafiken dargestellten Abweichungsbeträge kein homogenes bzw. systematisches Verhalten zeigen. Insbesondere die Abweichungen für Easting streuen in großem Maße zwischen  $-8$  mm und  $+14$  mm. Als Gründe für die große Streuung können zum einen die größere Länge der Basislinie (BL) (248.4 km) und zum anderen nicht bekannte lokale Einflüsse wie bspw. Mehrwegeeffekte angeführt werden. Für Northing ergeben sich in den ersten beiden 3-Tages-Blöcken Residuen zwischen  $-2$  mm und  $+6$  mm, während an den GPS-Tagen 229 bis 231 größere Werte als  $-7$  mm angenommen werden; hierbei variieren die einzelnen Versionen jedoch an drei aufeinanderfolgenden Tagen (gleiches Instrumentarium) wenig. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Koordinaten der ersten beiden Blöcke gut zusammenpassen; auch die des dritten Blockes variieren kaum, unterscheiden sich aber um mehrere Millimeter von den ersten beiden. Hier könnte also das besondere Empfangsverhalten dieser Antenne eine wichtige Rolle spielen.

Die Resultate der Easting-Komponente der einzelnen dargestellten Versionen differieren in einem grö-

ßeren Maße als die der bisher betrachteten Stationen. Diese Abweichungsbeträge nehmen teilweise Werte über 5 mm an.

Die beiden Bilder 8-6a und 8-6b zeigen die Lagerresiduen der Station FUND.

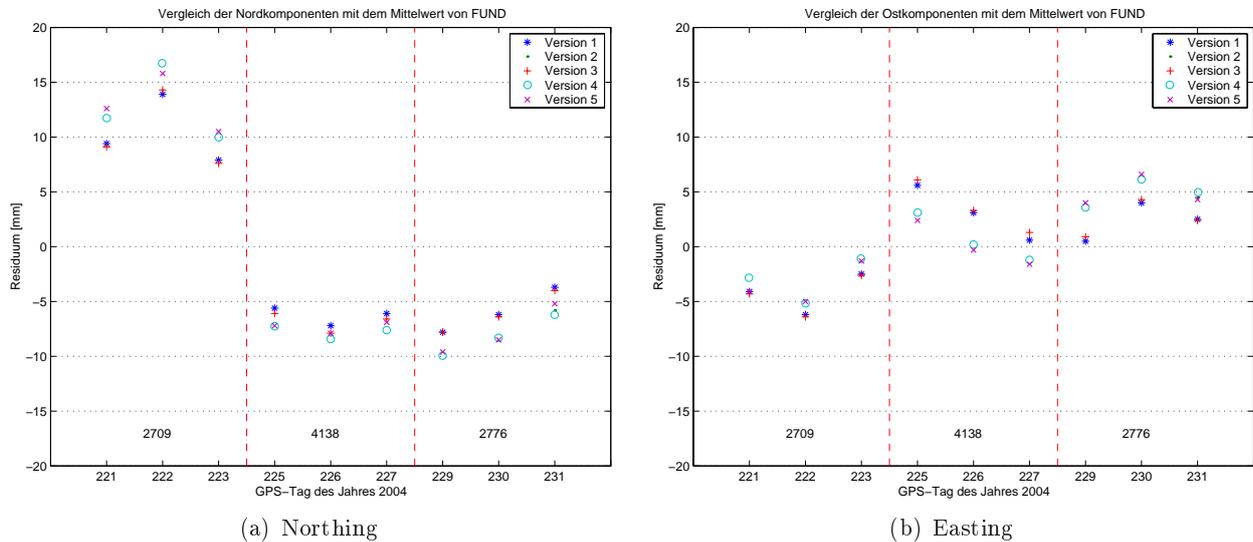


Bild 8-6: Lagerresiduen der Station FUND (Länge BL: 126.2 km)

Bei dieser Station muss erwähnt werden, dass während der ersten drei Tage auf einem Exzentrum gemessen wurde und mittels einer kurzen Basislinie die Koordinatenunterschiede zum eigentlichen Punkt gemessen und berechnet wurden. Die Ergebnisse des ersten Block sind daher auf andere Weise entstanden als die restlichen und ein Vergleich erscheint nur bedingt möglich.

Es lassen sich insbesondere in der linken Darstellung (Northing) starke Unterschiede zwischen dem ersten und den letzten beiden Blöcken erkennen. Die Abweichungen vom Mittelwert liegen zwischen +7 mm und +17 mm (GPS-Tage 221-223), wohingegen sie sich bei Block 2 und 3 zwischen -3 mm und -10 mm bewegen. Die Ursache hierfür ist v.a. in den Exzentrumsmessungen zu suchen. Ebenso läßt sich feststellen, dass die mit Typmitteln und mit individuellen Kalibrierungen berechneten Koordinaten jeweils sehr gut zueinander passen, die unter Verwendung von individuellen Kalibrierwerten erzielten Ergebnisse liegen jedoch näher am Mittelwert als die Typmittel, was im Gegensatz zu den bei der Station MAGU gewonnenen Erkenntnisse steht.

Im rechten Bild fällt der Unterschied zwischen den GPS-Tagen 221 bis 223 und dem Rest nicht so deutlich aus wie bei Northing. Alle Blöcke liegen etwa im Bereich  $\pm 7$  mm. Es läßt sich jedoch feststellen, dass die Residuen der ersten drei Tage negativ ausfallen und die der restlichen Tage überwiegend positiv. In den Blöcken 1 und 2 liegen die Differenzen zum Mittelwert der mit Typmitteln berechneten Koordinaten im Schnitt näher bei Null als die mit Individualkalibrierungen. Bei den letzten drei Tagen verhält sich dies umgekehrt. Wird der erste Block aufgrund der Exzentrumsmessungen bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt, passen die restlichen beiden Blöcke sehr gut zusammen.

## 8.4 Vergleich der Höhen-Residuen

In diesem Unterkapitel werden die Differenzen der einzelnen Tage zum mit *ADDNEQ* stationsweise berechneten Mittelwert analysiert. Wie schon im vorigen Unterkapitel werden in den Bildern die Up-Residuen der untersuchten Auswerteversionen für die Stationen MAGU, FUND, MACH und TISM

aufgeführt. In den linken Bildern werden jeweils die ellipsoidischen Höhen und in den rechten Bildern die Residuen der Station in allen fünf AuswerteverSIONen gezeigt. Auch an dieser Stelle wird wieder auf die tabellarische Darstellung der Residuen verzichtet und auf die Tabellen A-1, A-2, A-3 und A-4 im Anhang verwiesen.

Bild 8-7 zeigt die ellipsoidischen Höhen sowie die Residuen der Höhe der Station MACH. In der Grafik für die Höhenresiduen fallen bei GPS-Tag 225 die Werte für die Versionen 2 und 4 größer aus, als der Darstellungsbereich der Grafik. Auf eine andere Skalierung wurde wegen der dann nicht mehr gegebenen Vergleichbarkeit mit den im Folgenden dargestellten Stationen verzichtet.

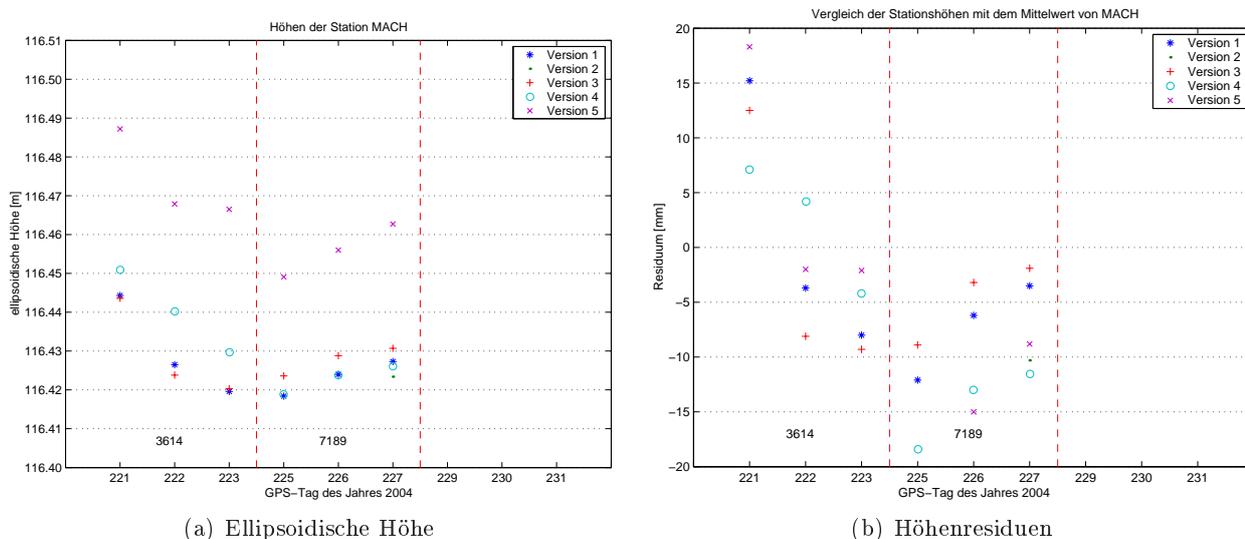


Bild 8-7: Höhen und deren Residuen für die Station MACH (Länge BL: 184.7 km)

Im linken Bild fällt als erstes auf, dass die ellipsoidischen Höhen für die Berechnungen in Version 5 im Schnitt um etwa 4 cm höher liegen als die der übrigen Versionen. Um hierfür eine Erklärung zu finden, sind in Tab. 8-4 die Phasenzentrumoffsets für die Versionen 2, 4 und 5 aufgeführt. Bei den ersten beiden Versionen handelt es sich um die absoluten bzw. relativen Typmittel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Kalibrierungen für den Antennentyp *Leica AT502* sowie um die im Internet veröffentlichten absoluten bzw. relativen Antennenkorrekturwerte des NGS für den Antennentyp *Ash-tech 700936D\_M*. Antennen des ersten Typs wurden auf den SFB-Stationen eingesetzt, wohingegen auf der Station BUCU eine Antenne des zweitgenannten Typs verwendet wurde.

In der fünften Version wurden relative Kalibrierwerte des NGS für die benutzten Antennen verwendet, diese Auswertestrategie wurde bei den bisherigen Auswertungen im SFB 461 eingesetzt. Für BUCU kamen hierbei die Modellwerte für eine Antenne des Typs „Dorne Margolin“ zum Einsatz.

Die PZO für die Versionen 1 und 3 sind an dieser Stelle nicht aufgeführt, da dort für jede Antenne individuelle Kalibrierwerte in die Berechnungen mit der *BS* eingeflossen sind. Diese sind in Tab. 5-2 für die absoluten und Tab. 5-5 für die relativen Kalibrierungen genannt.

Tabelle 8-4: Phasenzentrumsoffsets der Versionen 2, 4 und 5

		<i>Leica AT502</i>		<i>ASH700936D_M</i>	
		L1	L2	L1	L2
Version 2	N [mm]	-0.3	-1.5	0.9	0.8
	E [mm]	1.2	1.7	-0.7	-0.1
	Up [mm]	51.8	49.5	89.3	117.7
Version 4	N [mm]	-0.3	-1.5	0.3	0.9
	E [mm]	1.2	1.7	-0.2	0.5
	Up [mm]	70.8	58.9	108.1	125.6
Version 5	N [mm]	0.3	-1.4	0.0	0.0
	E [mm]	2.0	1.8	0.0	0.0
	Up [mm]	61.8	65.4	110.0	128.0

In Tab. 8-5 sind die PZO-Differenzen der Höhenkomponente, berechnet mittels:

$$PZO_{ASH700936D\_M}^{UP} - PZO_{LeicaAT502}^{UP} \quad (8-1)$$

dargestellt.

Zwischen den ersten beiden Versionen gibt es für die Trägerphase L1 kaum Unterschiede (0.2 mm) und für L2 nur geringfügige (1.5 mm). Version 5 weist zwar größere Unterschiede zu den vorigen (10.7 mm bzw. 10.9 mm für L1 und 5.6 mm bzw. 4.1 mm für L2) auf, aber der Versatz von etwa 4 cm zwischen den Versionen 1 bis 4 und Version 5 kann hierdurch nicht vollständig geklärt werden.

Tabelle 8-5: Differenzen der Up-Komponenten der PZO *ASH700936D\_M* - *Leica AT502*

	L1	L2
Version 2	37.5 mm	68.2 mm
Version 4	37.3 mm	66.7 mm
Version 5	48.2 mm	62.6 mm

Ein weiterer Unterschied zwischen den einzelnen Versionen besteht darin, dass bei den Versionen 1 bis 4 neben den auf dem Messdach bestimmten PZO azimuth- und elevationsabhängige PZV verwendet wurden. Bei Version 5 hingegen wurden nur elevationsabhängige PZV eingesetzt.

Um zu untersuchen, ob dieser Unterschied den oben beschriebenen Höhengsprung erklären kann, wurde für den GPS-Tag 221 eine sechste Version berechnet, die sich von der vierten dadurch unterscheidet, dass die PZV nur in Abhängigkeit von der Elevation modelliert wurden. Zuvor soll mit Tab. 8-6, in der auszugsweise die PZV der Versionen 5 und 6 in Abhängigkeit von der Zenitdistanz dargestellt sind, gezeigt werden, welche Unterschiede in den Antennenmodellen bestehen; Bild 8-8 zeigt die grafische Darstellung dieser PZV-Reihen. Hierbei fällt auf, dass bei den vom NGS publizierten und in Version 5 verwendeten Werten für die Zenitdistanz 0° signifikant andere Zahlenwerte zu finden sind, als in der gleichen Spalte für die sechste Version.

Tabelle 8-6: Auszug aus den PZV der Versionen 5 und 6 für *Leica AT502* [mm]

		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	...
Version 5	L1	0.00	1.50	2.90	4.20	5.30	6.40	7.40	8.20	...
	L2	0.00	-1.20	-1.50	-1.30	-0.60	0.30	1.10	2.00	...
Version 6	L1	-6.17	-5.90	-4.95	-3.30	-1.51	-0.26	0.45	1.16	...
	L2	-1.39	-1.49	-1.69	-1.86	-1.96	-1.98	-1.69	-0.87	...

Werden nun die Werte dieser Spalte an die Up-Komponente des Phasenzentrumsoffsets angebracht, ergeben sich folgende Werte:

- Version 5: L1 61.8 mm, L2 65.4 mm
- Version 6: L1 64.6 mm, L2 57.5 mm.

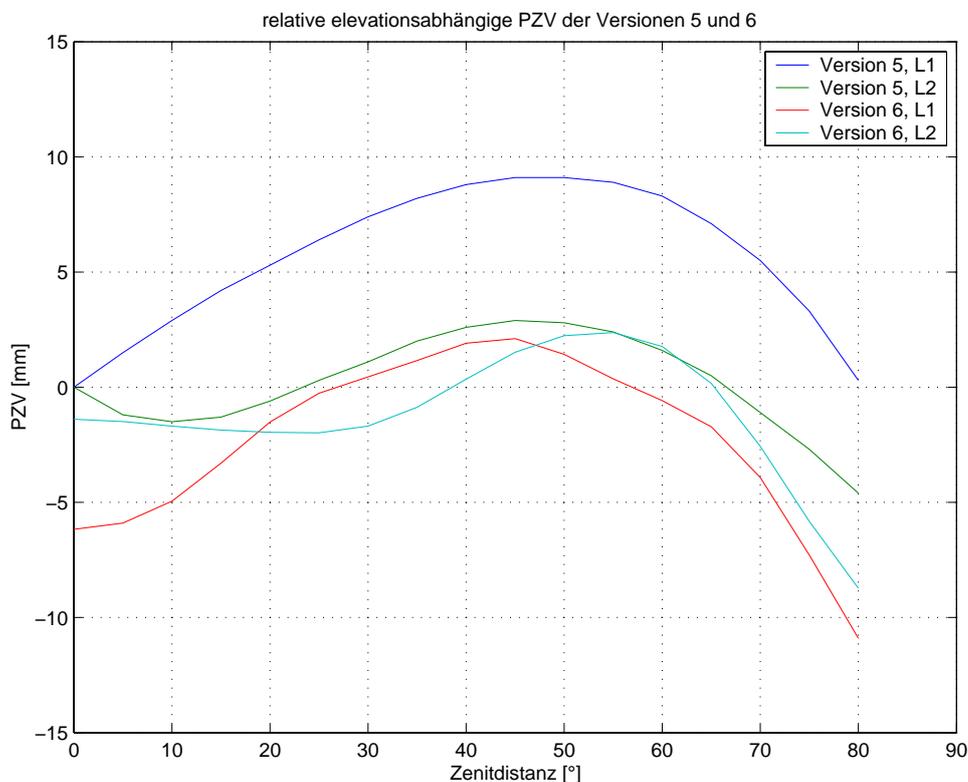


Bild 8-8: Grafische Darstellung der elevationsabhängigen PZV der Versionen 5 und 6 für *Leica AT502*

Diese Höhenoffsets unterscheiden sich um 2.8 mm für L1 bzw. um 7.9 mm für L2. Die Abweichungen der durch Version 5 gegebenen Modellbildung für die Antenne *Leica AT502* gegenüber der in BUCU verwendeten Antenne bleibt unverändert, die Differenzen von Version 6 betragen hingegen für L1 45.4 mm und für L2 70.5 mm. Ein Vergleich dieser Werte mit den in Tab. 8-5 aufgelisteten ergibt zu Version 5 ebenfalls Differenzen für L1 bzw. L2 mit einem Betrag von 2.8 mm bzw. 7.9 mm. Dies sind zwar signifikante Unterschiede, sie lassen jedoch einen Höhenversatz von wenigen Zentimetern nicht erklären, auch wenn für die Berechnung der endgültigen Koordinaten mit der *BS* im letzten Rechenschritt die L3-Linearkombination verwendet wird.

Die Höhen der Berechnung des GPS-Tages 221 des Jahres 2004 sind in Tab. 8-7 aufgeführt.

Tabelle 8-7: Ellipsoidische Höhen des GPS-Tages 221 [m]

	Version 1	Version 2	Version 3	Version 4	Version 5	Version 6
MACH	116.4443	116.4495	116.4436	116.4509	116.4872	116.4497
MAGU	111.6903	111.6898	111.6915	111.6919	111.7234	111.6947
TISM	452.6965	452.6903	452.7002	452.6924	452.7275	452.7010
FUND	1252.6863	1252.6824	1252.6909	1252.6866	1252.7192	1252.6886

Wie in Tab. 8-7 erkenntlich ist, unterscheiden sich die in der letzten Spalte aufgeführten ellipsoidischen Höhen kaum von denen der Spalten 2 bis 5. Nach Analyse der Berechnungsergebnisse der sechsten

Version kann festgestellt werden, dass sich durch das Einführen von rein elevationsabhängigen PZV kaum Variationen der berechneten Höhen ergeben.

Ein weiterer Unterschied zwischen der fünften und den vier ersten Versionen besteht darin, dass für die Station BUCU in den Fällen eins bis vier PZO und elevationsabhängige PZV und im fünften Fall nur die PZO des Modells für Antennen des Typs Dorne Margolin benutzt wurden. Um dies zu untersuchen wurde eine weitere Auswerteversion für den GPS-Tag 221 mit der *BPE* berechnet, bei der die PZV-Datei der Version 5 verwendet wurde, für die Antenne der Station BUCU wurden dabei die Werte der vierten Version verwendet. Für die Höhen der einzelnen Stationen ergaben sich dabei folgende Werte:

- MACH: 116.4784 m
- MAGU: 111.7086 m
- TISM: 453.7198 m
- FUND: 1252.7113 m.

Diese Werte stimmen am ehesten mit denen der Version 5 überein. Die Unterschiede zu den anderen Versionen nehmen zwar ab, verschwinden jedoch nicht vollständig. Die Höhensprünge lassen sich durch diese Untersuchung ebenfalls nicht erklären.

Außerdem fällt in Bild 8-7a auf, dass im ersten 3-Tage-Block die mit individuellen Kalibrierwerten (Versionen 1 und 3) errechneten Höhen gut zueinander passen und absolut immer am niedrigsten ausfallen. Im zweiten Beobachtungsfenster (GPS-Tage 225-227) liegen die Versionen 1 und 4 sehr nahe beieinander. Unter Verwendung von Version 2 werden die kleinsten ellipsoidischen Höhen erhalten.

Um den Höhenversatz weiter zu untersuchen, wurde eine weitere Netzkonfiguration für den GPS-Tag 221 berechnet. Bei den bisherigen Versionen kamen für die Punkte des SFB immer eigene Kalibrierwerte zum Einsatz und für die Referenzstation BUCU Werte des NGS. Statt BUCU wurde nun die mit *Leica AT502* Antennen besetzte Station MAGU als Referenzstation verwendet und drei Basislinien nach FUND (134 km), MACH (196 km) und TISM (247 km) in den fünf oben beschriebenen Versionen prozessiert. Tab. 8-8 zeigt die sich daraus ergebenden ellipsoidischen Höhen.

Tabelle 8-8: Ellipsoidische Höhen [m] mit MAGU als Basis

	Version 1	Version 2	Version 3	Version 4	Version 5
MACH	116.4916	116.4898	116.4932	116.4927	116.4928
TISM	452.7669	452.7774	452.7676	452.7766	452.7743
FUND	1252.7427	1252.7428	1252.7433	1252.7427	1252.7421

Wie Tab. 8-8 zu entnehmen ist, stimmen die ellipsoidischen Höhen der einzelnen Stationen in den unterschiedlichen Versionen mit MAGU als gefixter Station sehr gut überein. Die Streuung der Werte für TISM fällt zwar höher aus als die der anderen beiden Stationen, was sich aber durch die längere Basislinie erklären lässt.

Diese Untersuchung zeigt, dass die Modellwerte für Antennen des Typs Dorne Margolin, die für die in BUCU verwendete Antenne in Version 5 in die Auswertung eingeführt wurden, nicht dem tatsächlichen Antennenverhalten entsprechen. Es ist anzunehmen, dass durch das Antennennahfeld ein sehr großer Einfluss ausgeübt wird. Wird BUCU als Basisstation verwendet, ist davon auszugehen, dass sich die NGS-Korrekturwerte der Antenne *Ashtech 700936D\_M* und die Antennen von Typ *Leica AT502* gegenseitig so ungünstig beeinflussen, dass der bei der Netzberechnung aufgetretene Höhenoffset in Erscheinung tritt. Ebenso erscheinen die NGS-Korrekturwerte der *Leica AT502*-Antenne nicht repräsentativ, u.a. da nur zwei Kalibrierungen zur Festlegung dieser Werte beitrugen, was im Hinblick auf

das stark unterschiedliche Verhalten dieses Antennentyps als zu gering zu bezeichnen ist.

Nun sollen die Residuen für die Station MACH analysiert werden, siehe hierzu Bild 8-7b. Die Höhenresiduen streuen GPS-typisch in einem größeren Rahmen als die der Lage, sie bewegen sich im Bereich  $\pm 20$  mm. Auffällig ist zudem, dass die Werte für den GPS-Tag 221 durchweg positiv ausfallen und ab GPS-Tag 222 bis auf eine Ausnahme komplett kleiner als Null sind. Ebenfalls lässt sich erkennen, dass für die GPS-Tage 222 und 223 die Residuen der Version 5 nahe bei Null liegen und im mittleren Block die der dritten Version am nächsten bei Null liegen.

Die berechneten Höhen der Station MAGU zeigen ein ähnliches Verhalten, wie in Bild 8-9 zu sehen ist. Auch hier unterscheidet sich die fünfte Version in der absoluten Höhe wieder deutlich von den restlichen. Die Differenz beträgt hier etwa 3 cm. Zwischen den anderen Versionen ist der Unterschied sehr gering. Zu erwähnen ist auch der Ausreißer an GPS-Tag 223, an dem alle Versionen einen großen Versatz im Vergleich zu den vorhergehenden Tagen zeigen. Die Ergebnisse des zweiten und dritten Blocks passen absolut gesehen recht gut zusammen. Im ersten und dritten Block sind die berechneten Höhen für die Version 1 und im zweiten Block für Version 2 am geringsten. Im rechten Bild sind wieder die Residuen der einzelnen Tage und Versionen dargestellt. Auch bei dieser Station streuen die Höhenresiduen weit stärker als die der Lage. Sie liegen zwischen -12 mm und +17 mm. Zwar zeigen die einzelnen Versionen vom Verlauf her ein ähnliches Verhalten, unterscheiden sich aber untereinander vom kleinsten bis zum größten Wert teilweise um mehr als 5 mm. Ebenfalls auffällig ist, dass die Residuen der ersten drei Tage betragsmäßig am größten ausfallen.

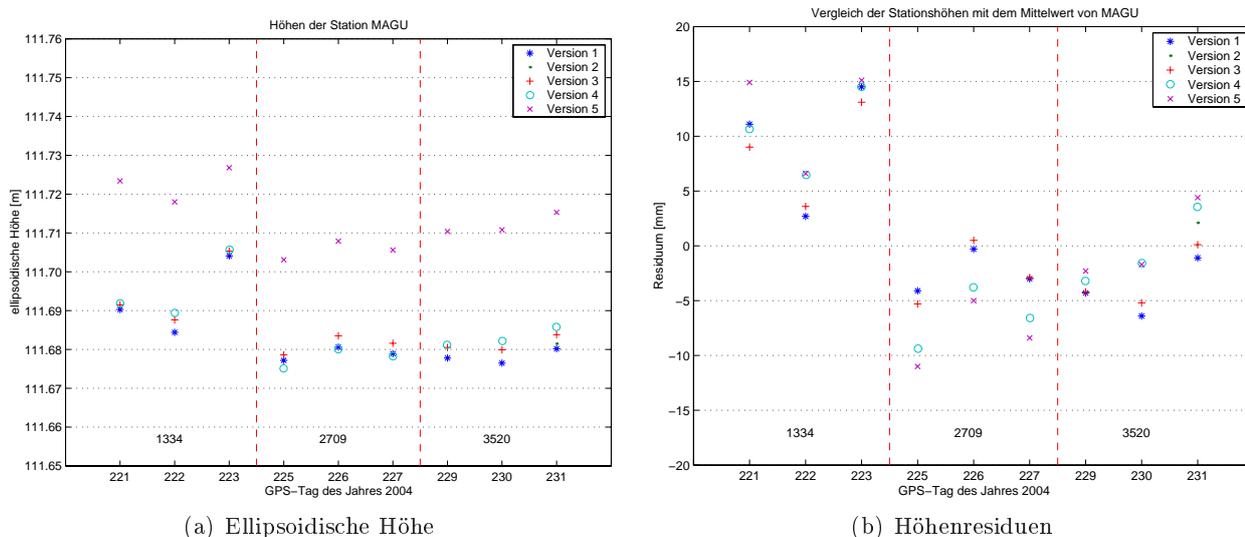


Bild 8-9: Höhen und deren Residuen für die Station MAGU (Länge BL: 14.0 km)

In den Bildern 8-10a und 8-10b sind die Höhen und die Höhenresiduen für die Station TISM visualisiert. Die Basislinie von BUCU zu diesem Punkt ist mit 248.4 km die längste des hier behandelten GPS-Netzes.

Wie schon bei den vorigen Stationen besteht zwischen der fünften Version und den übrigen ein fast konstanter Offset in der absoluten Höhe von etwa 3-4 cm. Ein Vergleich der einzelnen 3-Tages-Blöcke zeigt, dass diese jeweils einen Versatz gegeneinander aufweisen und die Höhen vom ersten zum letzten Tag eines Blockes stetig abnehmen. Die Versionen, die unter Verwendung eigener Kalibrierwerte erhalten werden, stimmen recht gut überein. In den letzten beiden Blöcken liefert Version 1 meist die kleinsten Werte für die ellipsoidische Höhe.

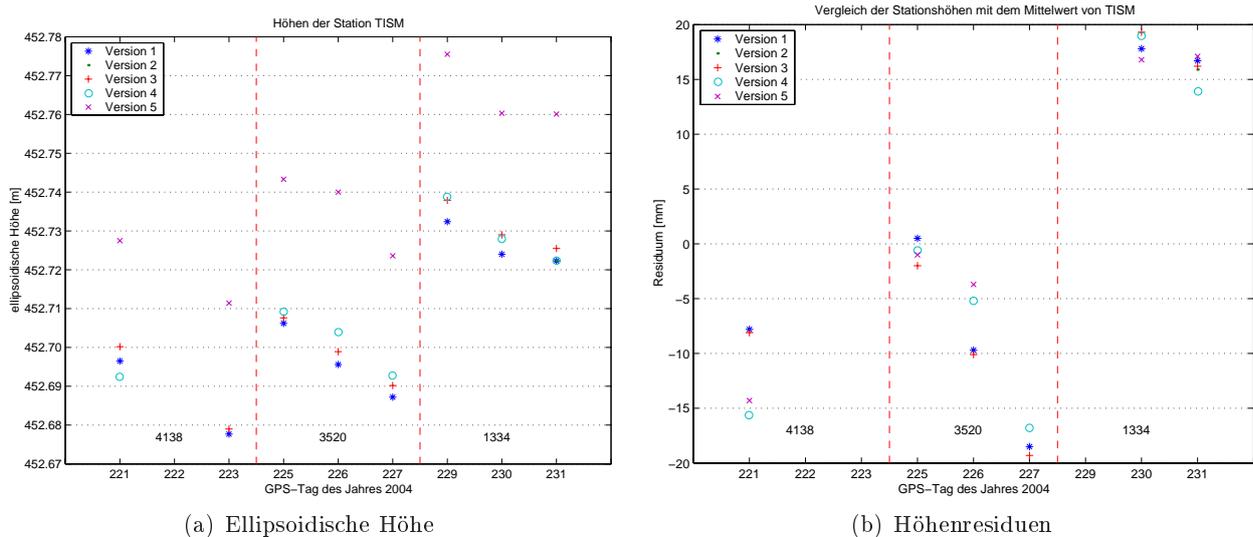


Bild 8-10: Höhen und deren Residuen für die Station TISM (Länge BL: 248.4 km)

Da bei der Erstellung der Bilder darauf geachtet wurde, dass alle Grafiken die gleichen Achsskalierungen aufweisen, können nicht alle Residuen der Station TISM (Bild 8-10b) dargestellt werden. Von einer geänderten Skalierung wurde abgesehen, um Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit der Diagramme zu gewährleisten. Die Residuen für GPS-Tag 223 bewegen sich zwischen -25.2 mm und -36.9 mm und für GPS-Tag 229 zwischen 26.4 mm und 31.8 mm. Auch hier weisen die einzelnen Blöcke gegeneinander einen recht großen Versatz auf. Besonders zwischen den GPS-Tagen 227 und 229 ist ein großer Sprung zu beobachten.

Auch beim Punkt FUND zeigt sich ein ähnliches Bild (Bild 8-11). Hier weist Version 5 ebenfalls eine Differenz von etwa 3 cm zu den übrigen auf, welche sich in einem schmalen Band von ca. 1 cm Breite bewegen. Der 3-Tage-Block, der mit Antenne 2709 beobachtet wurde, ist gegenüber den anderen beiden, welche eng zusammenliegen, etwas nach oben versetzt. In den Blöcken der GPS-Tage 221-223 und 225-227 liefert Version 2 die geringsten ellipsoidischen Höhen, im letzten Beobachtungsabschnitt hingegen Version 1.

Die Residuen dieser Station zeigen ein sehr bewegtes Bild. Sie verlaufen zwischen -12 mm und +16 mm. Bis auf den Ausreisser von Antenne 4138 an GPS-Tag 226 liegen die Abweichungen vom Mittelwert eines 3-Tage-Blockes nahe beieinander. Auch hier ist der erste Beobachtungsblock gegenüber den beiden übrigen versetzt.

## 8.5 Vergleich der gelösten Ambiguities

Zusätzlich zum Vergleich der berechneten Zahlenwerte für Lage und Höhe sowie deren Residuen werden in diesem Unterkapitel die gelösten Ambiguities der einzelnen Versionen vergleichend analysiert. In Tab. 8-9 sind die gelösten Ambiguities der untersuchten Basislinien für die einzelnen Tage getrennt nach Versionen aufgeführt, sie wurden den Dateien des Typs „QIFXTR.SUM“ entnommen, welche bei der Prozessierung mit der *BS* erzeugt wurden. In diesen Dateien sind neben diesen mittleren Werten auch die Prozentzahlen der gelösten Mehrdeutigkeiten für die einzelnen Basislinien enthalten. Diese sind in den Tabellen A-5, A-6, A-7, A-8 und A-9 im Anhang aufgeführt. Ebenso sind in den Tabellen A-10, A-11, A-12 und A-13 die Zahlenwerte der zu lösenden und ungelösten Ambiguities für die einzelnen Basislinien zu finden.

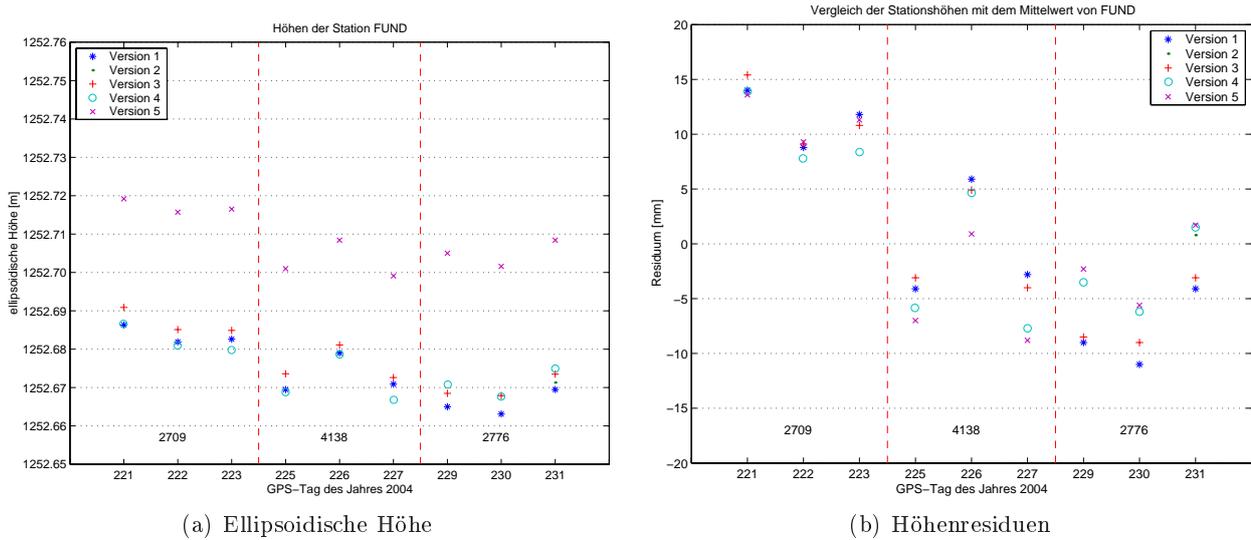


Bild 8-11: Höhen und deren Residuen für die Station FUND (Länge BL: 126.2 km)

Tabelle 8-9: Gelöste Ambiguities des Netzes [%]

	221	222	223	225	226	227	229	230	231
Version 1	56.7	49.2	53.0	62.3	57.7	50.6	52.3	55.9	61.6
Version 2	54.5	43.7	51.6	63.1	56.9	53.2	54.3	58.8	64.4
Version 3	56.5	49.5	53.0	66.2	57.9	52.7	56.1	59.9	62.4
Version 4	55.7	47.7	52.1	64.8	55.3	55.7	53.5	58.8	64.4
Version 5	56.3	40.9	50.7	64.4	60.2	54.2	60.1	61.0	62.1

Das Verhalten der untersuchten Auswerteversionen hinsichtlich der Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten variiert stets, sowohl tage- als auch versionenweise. Beispielsweise liegen die Werte für GPS-Tag 222 unter 50 %, während sie am GPS-Tag 225 über 60 % liegen. An manchen Tagen unterscheidet sich das Lösungsverhalten der Auswerteversionen nur um wenige Prozentpunkte (z.B. GPS-Tag 221), während an anderen Tagen Differenzen von fast zehn Prozentpunkten zu beobachten sind (z.B. GPS-Tag 222).

Eine Aussage, ob eine oder mehrere Versionen besser geeignet sind, um die Phasenmehrdeutigkeit erfolgreich festzusetzen soll anhand einer grafischen Darstellung versucht werden, siehe hierzu Bild 8-12, in der die Zahlenwerte von Tab. 8-9 aufgeführt sind.

Wie aus dieser Grafik zu entnehmen ist, streut die Anzahl der gelösten Ambiguities in den unterschiedlichen Versionen bis auf einen Ausreißer am GPS-Tag 222 immer in etwa der gleichen Bandbreite. Es kann jedoch keine allgemein gültige Aussage getroffen werden, ob eine der untersuchten Versionen eine höhere Anzahl an gelösten Ambiguities liefert als andere. Nur in den ersten drei Messtagen liefern die Berechnungen mit den individuellen Kalbrierwerten knapp die größte Anzahl an gelösten Mehrdeutigkeiten. An den restlichen Tagen ergeben sich die besten Ergebnisse immer mit unterschiedlichen Versionen. Dies entspricht nicht den Erwartungen, dass die Versionen mit individuellen PZO und PZV generell mehr gelöste Ambiguities erzielen als andere. Es ist also nicht möglich unter Analyse des Lösungsverhaltens bei der Phasenmehrdeutigkeitsbetrachtung eine der in dieser Arbeit untersuchten Versionen als die Beste zu bezeichnen.

Auch bei der Betrachtung der Darstellungen der gelösten Mehrdeutigkeiten der einzelnen Basislinien

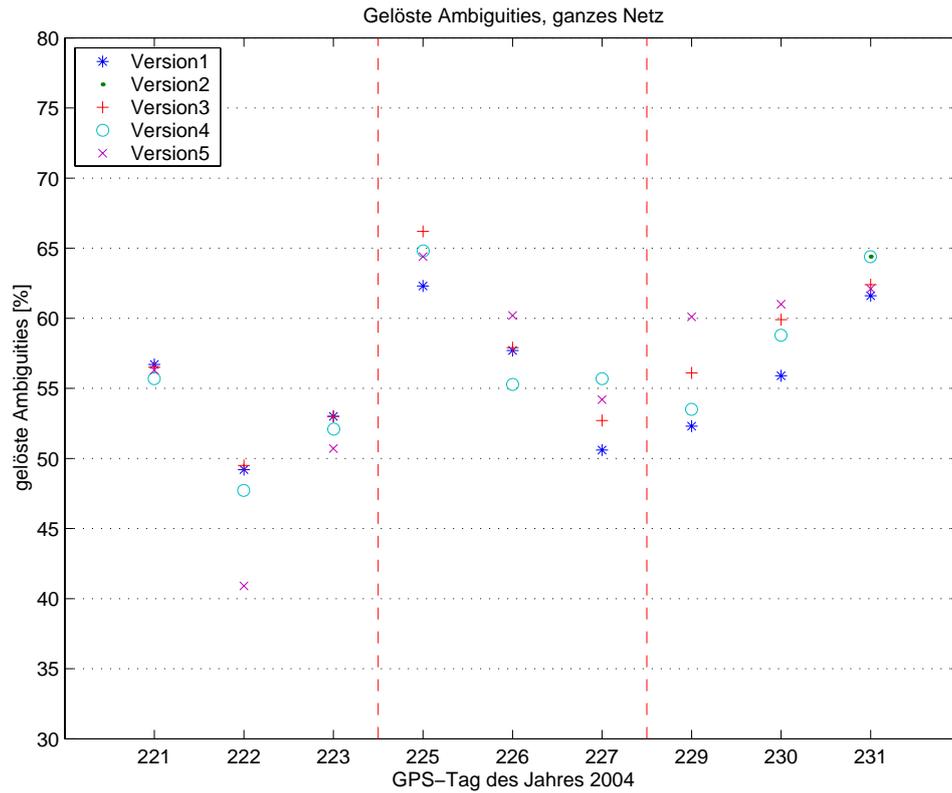


Bild 8-12: Mittlere Anzahl gelöster Ambiguities für das gesamte Netz [%]

ergeben sich keine signifikanten Trends (siehe Bilder A-1a, A-1b, A-2a und A-2b).

Generell verbleibt die Frage, warum nicht ein größerer Prozentsatz an gelösten Ambiguities erzielt werden kann.

## 9 Zusammenfassung und Empfehlungen

In diesem Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst und Empfehlungen hinsichtlich des Vorgehens zu endgültigen Fehlerlokalisierung sowie für zukünftige Messkampagnen ausgesprochen. Begonnen wird mit der Zusammenfassung der Kalibrierungsmessungen, deren Auswertung und Analyse der Resultate sowie Verbesserungsvorschlägen.

### 9.1 GPS-Antennenkalibrierung

Die für die Kalibrierung notwendigen Feldmessungen wurden auf dem Messdach des GIK durchgeführt. Zum Einsatz kamen neben den GPS-Ausrüstungen des Typs *Leica SR530* mit zu kalibrierenden Antennen des Typs *Leica AT502*, den Drehvorrichtungen „DrehRumBum“ und als Referenzantenne die *SAPOS*<sup>®</sup>-Station KARL mit einem *Trimble 4000SSi*-Empfänger auch ein PC mit der Software *AAKDD* zur Steuerung. Aus den registrierten Beobachtungen wurden mit der Auswertesoftware *WaSoft/Kalib* absolute und relative Kalibrierwerte bestehend aus den Phasenzentrumsoffsets und azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen berechnet. Die so erhaltenen Einzelkalibrierwerte konnten mittels *WaSoft/CCANT* zu Typmittelwerten zusammengefasst werden.

Da die Beobachtungen zur Bestimmung der Kalibrierwerte auf zwei Messpfeilern durchgeführt wurden, erfolgte bei der Analyse der Ergebnisse eine Untersuchung der Standortabhängigkeit. Hierbei kann zwischen den Ergebnissen von absoluter und relativer Kalibrierung unterschieden werden. Beim absoluten Verfahren konnten aus Mehrfachmessungen mit einzelnen Antennen auf beiden Pfeilern zwar Unterschiede zwischen den Lagekomponenten des PZO der einzelnen Messungen festgestellt werden, diese konnten jedoch nicht eindeutig einzelnen Messorten zugeordnet werden. Im Vergleich dazu konnte unter Analyse der Höhenkomponente des PZO eine zuverlässige Zuordnung zu einem der beiden Pfeiler vorgenommen werden. Zur Reproduzierbarkeit der PZO kann für die Lage ausgesagt werden, dass die Standardabweichungen zwischen 0.2 mm und 0.3 mm bei sechs Messungen liegen und für die Höhe etwa bei 1 mm. Die Lagekomponenten der PZO verschiedener Antennen eines Antennentyps liegen alle sehr nahe beisammen, wohingegen die Höhenkomponenten teilweise sehr unterschiedlich ausfallen. Um die PZV der einzelnen Antennen direkt vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse der einzelnen Antennen mit *CCANT* auf einen einheitlichen PZO umgerechnet. Die elevationsabhängigen PZV der auf zwei Pfeilern durchgeführten Kalibrierungen unterscheiden sich für große Elevationen kaum. Erst unter einer Elevation von etwa 40° lassen sich geringfügige Unterschiede erkennen. Bei azimut- und elevationsabhängigen PZV sind ebenfalls pfeilerabhängige Unterschiede festzustellen. Es ist v.a. die stark ausgeprägte Antennentopographie dominierend, wobei unterschiedliche Antennen des gleichen Typs stark unterschiedliche PZV aufweisen.

Die Ergebnisse der relativen Kalibrierungen fallen ähnlich aus wie die der absoluten. Auch ist eine schwache Pfeilerabhängigkeit der Kalibrierergebnisse zu beobachten, die sich bei den Offsets des Phasenzentrums kaum auf die Lage, aber - wie bei der absoluten Kalibrierung - deutlich auf die Höhe auswirkt. Standardabweichungen von Mehrfachmessungen liegen im gleichen Bereich wie die der absoluten Kalibrierung. Die Offsets der Lage unterschiedlicher Antennen weisen ebenso kaum Abweichungen auf, die Höhenoffsets hingegen teilweise Unterschiede von über 10 mm. Die auf unterschiedlichen Pfeilern bestimmten elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums verlaufen geringfügig unterschiedlich, was vor allem für Frequenz L2 auffällt. Der Verlauf der PZV-Kurven für verschiedene Antennen eines Typs fällt recht ähnlich aus. Nur die Variation für L2 fällt auch hier etwas größer aus. Ein Vergleich der azimut- und elevationsabhängigen PZV von Kalibrierungen die auf beiden Pfeilern durchgeführt wurden, zeigt eine leicht ausgeprägte Standortabhängigkeit. Die Kalibrierergebnisse verschiedener Antennen des gleichen Typs unterscheiden sich teilweise signifikant. Bei Antennen des Typs *Leica AT502* spielt damit sowohl die azimutale als auch die zenitale Richtung des einfallenden Signals eine wichtige Rolle.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erscheint eine Kalibrierung der Antennen des Typs *Leica AT502* sinnvoll, falls hochgenaue GPS-Netze gemessen und ausgewertet werden sollen. Vor allem die individuelle Bestimmung von Phasenzentrumsoffset und azimuth- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen für jede Antenne ist anzuraten, da sich verschiedene Antennen des gleichen Typs sehr stark voneinander unterscheiden können. Primär spielt die Art der Kalibrierung (absolut, relativ) keine Rolle. Vorzuziehen ist aber eine absolute Kalibrierung, da beim relativen Verfahren die Korrekturwerte der eingesetzten Referenzantenne für die Lage zu Null gesetzt und nur Höhenoffsets eingeführt werden, Fehler der Referenzantenne gehen somit direkt auf die zu kalibrierende Antenne über.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass GPS-Antennen des Typs *Leica AT502* ursprünglich nicht für den Einsatz in hochpräzisen GPS-Netzen entwickelt wurden, sondern für die Verwendung als Antenne für Real-Time-Kinematik-Rover, da Anwendungen dieser Art ein geringeres Genauigkeitspotential aufweisen als statische Messungen mit längeren Beobachtungszeiten.

Künftig sollten bei der Verwendung von Kalibrierwerten in größeren GPS-Netzen nur Ergebnisse einer Kalibrierstelle für die eingesetzten GPS-Antennen genutzt werden, da bei Kalibrierungsmessungen lokale Einflüsse nie gänzlich auszuschließen sind. Bei GPS-Netzen, in die permanent betriebene Stationen integriert sind, wird diese Forderung Probleme bereiten, da diese i.d.R. nicht kalibriert werden können.

Für weitere Aussagen bezüglich Reproduzierbarkeit, Güte und Standortabhängigkeit sind längere und wiederholte Messreihen erforderlich. Ebenso muss der Einfluss der einzelnen Messpfeiler auf die Kalibrierung intensiv untersucht werden. Die beiden auf dem Messdach verwendeten Pfeiler weisen eine unterschiedlich große Grundfläche auf, die sich auf die Kalibrierergebnisse auswirkt. Ein Vorschlag hierzu ist, auf die Pfeiler während der Messungen Absorbermatten zu legen, damit keine Signale indirekt über die Pfeileroberflächen in die Antenne gelangen können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zudem festgestellt, dass der Empfänger der Referenzstation KARL nur jeweils neun Kanäle für L1 und L2 besitzt. Da bei einer Elevationsmaske von  $0^\circ$  meist mehr als neun Satelliten über dem lokalen Horizont stehen, werden vorhandene Beobachtungen teilweise nicht aufgezeichnet. Für weitere Kalibrierungen muss deshalb entweder ein 12-Kanal-Empfänger in die Referenzstation eingebaut werden oder über einen sogenannten Splitter ein eigener Empfänger an die Antenne angeschlossen werden. Nach Abschluss des praktischen Teils der vorliegenden Arbeit wird deshalb der vorhandene Empfänger gegen einen anderen mit jeweils zwölf Kanälen für L1 und L2 ausgetauscht.

## 9.2 Auswertung mit der *Bernese GPS Software*

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein GPS-Netz, welches aus den vier SFB-Stationen FUND, MACH, MAGU und TISM sowie der Permantenstation BUCU besteht in unterschiedlichen Versionen prozessiert. Die Unterschiede zwischen den Auswerteversionen bestehen in der Verwendung unterschiedlicher Kalibrierdaten. Es wurden sowohl absolute (individuell, Typmittel) als auch relative (individuell, Typmittel) Kalibrierwerte eingesetzt. Außerdem kamen die bisher im SFB 461 verwendeten Kalibrierwerte zum Einsatz. Ziel war die Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Korrekturwerte auf die Ergebnisse der Prozessierung des Netzes. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die geschätzten ellipsoidischen Höhen gelegt.

Eingangsdaten der Prozessierung waren jeweils die Rohdaten der Messkampagne 2004 der GPS-Tage 221-223, 225-227 und 229-231. Für die Berechnung des GPS-Netzes wurde die *BS* in der Version 4.2 verwendet. Um die Steuerung der Programmdurchläufe wirtschaftlich zu gestalten und zu vereinfachen, wurde die *Bernese Processing Engine* genutzt, mit der die notwendigen Einstellungen durch Editieren

weniger Dateien geändert und weitere Berechnungen einfach gestartet werden konnten.

Ein Vergleich der gemittelte Koordinaten aller Tage eines Messzeitraums der unterschiedlichen Versionen zeigt, dass sich die Versionen mit eigenen Kalibrierwerten kaum voneinander unterscheiden. Die Version der Berechnungen mit den bisher verwendeten Korrekturen hebt sich jedoch deutlich von diesen ab, vor allem in der Höhenkomponente, die um etwa drei bis vier Zentimeter differiert. Die Standardabweichungen unterscheiden sich kaum, nur die Werte der mit individuellen Kalibrierungen erzielten Höhen fallen meist um zwei bis drei Millimeter besser aus.

Die Residuen der Lage weisen in Easting meist größere Schwankungen auf als in Northing. Für die Abweichungen zwischen den einzelnen Blöcken läßt sich feststellen, dass diese je nach Länge der Basislinie mehr oder weniger gut übereinstimmen. Eine am besten geeignete Auswertestrategie konnte nicht gefunden werden. Zwischen den einzelnen 3-Tage-Messblöcken sind häufig größere Sprünge festzustellen. Bei Betrachtung der ellipsoidischen Höhen der Berechnungsversionen zeigt sich, dass unter Verwendung von Version 5 i.d.R. um drei bis vier Zentimeter größere Werte erhalten werden als für die restlichen Versionen, die zudem nahe zusammenliegen. Als Grund hierfür wird vermutet, dass in Version 5 für die als Referenzstation eingesetzte Station BUCU nur NGS-Modellwerte in die Auswertung eingeführt wurden, von denen sich das tatsächliche Verhalten der Antenne stark zu unterscheiden scheint. Zwischen den einzelnen 3-Tage-Blöcken sind deutliche Sprünge, vor allem bei der Station TISM zu beobachten. Die Residuen der Höhenkomponente streuen erwartungsgemäß in einer größeren Breite als die der Lage, wobei auch zwischen einzelnen Tagen erhebliche Unterschiede auftreten.

Schließlich wurde das Verhalten Ambiguitätslösung untersucht. Dabei war auffällig, dass Werte einzelner Tage starken Schwankungen unterworfen sind. Eine Version, die immer die größte Anzahl an gelösten Ambiguitäten liefert, konnte nicht gefunden werden.

Die Einführung von Kalibrierwerten für die GPS-Antennen in die Auswertung ist für Netze höchster Genauigkeit unerlässlich. Generell sind individuelle Kalibrierwerte Typmitteln vorzuziehen, vor allem bei der Verwendung von Antennen, von denen bekannt ist, dass die einzelnen Antennen einer Baureihe ein stark unterschiedliches Verhalten aufweisen (z.B. *Leica AT502*). An dieser Stelle muss allerdings betont werden, dass während der Planungsphase eines GPS-Netzes auch eine für diesen Einsatz geeignete GPS-Ausrüstung ausgewählt werden sollte. Besonderes Augenmerk muss auf die Auswahl guter geodätischer Antennen gelegt werden.

Bei der Prozessierung mit GPS gemessener Netze sollten, wenn möglich, für die verwendeten Antennen nur Kalibrierwerte die von einer Kalibrierstelle bestimmt wurden, verwendet werden, um Abhängigkeiten von Kalibrierverfahren und -orten ausschließen zu können. Diese Vorgabe lässt sich vor allem bei großen Netzen kaum verwirklichen. Da es i.d.R. nicht möglich ist, auf Antennen des Netzes zur Kalibrierung zuzugreifen, könnten bspw. für Antennen des gleichen Typs Korrekturen eines Kalibrierfeldes bestimmt werden, um wenigstens Typmittelwerte verwenden zu können, die auf gleiche Weise entstanden sind. Generell wird zur Verwendung absoluter Kalibrierwerte geraten, da hierbei keine Fehler der zur Kalibrierung verwendeten Referenzantenne auf die Antenne übergehen. Die vom International GNSS Service veröffentlichten Werte sollten zudem nur mit Vorsicht in die Auswertung eingeführt werden, da dort Modellwerte für einen Antennentyp aufgeführt sind bzw. die Kalibrierwerte teilweise nur mit einer geringen Stichprobe an Antennen ( $Anzahl_{Leica\ AT502} = 2$ ) ermittelt wurden.

Um bei zukünftigen Auswertungen des Deformationsnetzes des SFB 461 die Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu steigern, sollten verschiedene Gesichtspunkte verändert bzw. überdacht werden. Wenn möglich sollten alle eingesetzten GPS-Antennen z.B. im Kalibrierfeld auf dem Messdach des GIK kalibriert werden, um einheitliche Korrekturen für alle Antennen verwenden zu können. Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse kann durch Untersuchung der Mehrwegeeffekte der einzelnen Stationen

erreicht werden. Ebenso sollte über die Berücksichtigung troposphärischer Einflüsse nachgedacht und gegebenenfalls ein geeignetes Modell entwickelt werden. Zu überlegen ist auch die Einführung von Modellen oder Korrekturen für die Sendeantennen der im Umlauf befindlichen GPS-Satelliten, da diese bisher bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Neben der Einführung zusätzlicher Modelle und Korrekturen in die Prozessierung der GPS-Beobachtungen sollte auch die bisher verwendete Auswertestrategie mit der *BS* überdacht und gegebenenfalls geändert werden.

## Literatur

- [lei, 2002] (2002). *Gebrauchsanweisung GPS Ausrüstung System 500*. Leica Geosystems.
- [anl, 2004a] (2004a). *Anleitung CCANT 2.1*. Ingenieurbüro Wanninger.
- [anl, 2004b] (2004b). *Anleitung WaSoft/Kalib 3.31*. Ingenieurbüro Wanninger.
- [Breuer et al., 1995] Breuer, B., Campbell, J., Görres, B., Hawig, J., and Wohlleben, R. (1995). Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. *Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*. S. 49-59.
- [Campbell et al., 2004] Campbell, J., Görres, B., Siemes, M., Wirsch, J., and Becker, M. (2004). Zur Genauigkeit der GPS Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren. *AVN*, Heft 1, S. 2-11.
- [de Lacerda, 2003] de Lacerda, C. F. (2003). An Investigation on Multipath Effects in GPS Code and Phase Observations. *Projeto Final*. Geodätisches Institut Karlsruhe.
- [Frevert et al., 2003] Frevert, V., Stöcker, D., and Nuckelt, A. (2003). Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. *Schriftenreihe des Geodätischen Instituts Dresden, Heft 3*.
- [Geiger, 1988] Geiger, A. (1988). Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen. *Mitteilungen Nr. 43*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz.
- [Gesellschaft zur Förderung der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, 1998] Gesellschaft zur Förderung der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover (1998). Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur hochpräzisen Kalibrierung von GPS-Antennenaufstellungen. *Berichtsheft*, S. 57.
- [Görres, 2001] Görres, B. (2001). Kalibrierung von GPS-Antennen. *VDV-Schriftenreihe*, Band 19, S. 31-46.
- [Hofmann-Wellenhof et al., 2001] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2001). *Global positioning system : theory and practice*. Springer, 5., rev. ed. edition.
- [Mayer, 2002] Mayer, M. (2002). GPS-Antennenkalibrierung. *DVW Schriftenreihe*, Band 44, S. 118-134.
- [Menge and Seeber, 1999] Menge, F. and Seeber, G. (1999). Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS Antennen. *DGK Reihe B*, Nr. 310.
- [Rothacher and Mervart, 2001] Rothacher, M. and Mervart, L. (2001). *Bernese GPS Software Version 4.2*. Astronomical Institute University of Berne.
- [Schupler and Clark, 1991] Schupler, B. and Clark, T. (1991). How different antennas effect the GPS observable. *GPS World*. S. 32-36.
- [Seeber, 1989] Seeber, G. (1989). *Satellitengeodäsie*. de Gruyter.
- [SFB 461, 1998] SFB 461 (1998). *Berichtsband für die Jahre 1996 - 1999*. Sonderforschungsbereich 461, Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmassnahmen, S. 1-16, 120-162.
- [SFB 461, 2004] SFB 461 (2004). *Berichtsband für die Jahre 2002 - 2004*. Sonderforschungsbereich 461, Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen, S. 179-228.
- [Wanninger, 2000] Wanninger, L. (2000). Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. *DGK Reihe C*, Heft 508.

- [Wanninger, 2002] Wanninger, L. (2002). Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. *Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv)*, Heft 1, S. 51-58.
- [Wanninger and Böhme, 1999] Wanninger, L. and Böhme, J. (1999). GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden. *Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, 28. April 1999*. Geodätisches Institut, Universität Bonn.
- [Wübbena et al., 2000] Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V., and Seeber, G. (2000). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000*. 19.-22. September 2000, Salt Lake City, Utah.

## **A Anhang**

**A.1 Daten-DVD (kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden)**

**A.2 Tabellen**

Tabelle A-1: Residuen der einzelnen GPS-Tage, Station MACH

		Antenne 3614			Antenne 7189					
		GPS-Tag 221	GPS-Tag 222	GPS-Tag 223	GPS-Tag 225	GPS-Tag 226	GPS-Tag 227	GPS-Tag 229	GPS-Tag 230	GPS-Tag 231
Version 1	N [mm]	-0.9	5.2	3.8	-1.1	-2.3	-0.4	-	-	-
	E [mm]	9.1	7.9	2.4	-5.2	-6.0	-8.3	-	-	-
	Up [mm]	15.2	-3.7	-8.0	-12.1	-6.2	-3.5	-	-	-
Version 2	N [mm]	1.1	4.7	3.3	-1.4	-2.0	-0.2	-	-	-
	E [mm]	6.3	10.1	5.5	-6.1	-6.2	-8.4	-	-	-
	Up [mm]	17.7	-4.6	-1.7	-21.1	-14.0	-10.6	-	-	-
Version 3	N [mm]	-0.7	5.2	4.0	-1.8	-2.5	-0.8	-	-	-
	E [mm]	8.5	6.2	4.1	-5.5	-6.0	-8.5	-	-	-
	Up [mm]	12.5	-8.1	-9.3	-8.9	-3.2	-1.9	-	-	-
Version 4	N [mm]	1.2	4.8	3.6	-1.9	-2.4	-0.4	-	-	-
	E [mm]	5.6	9.0	6.1	-6.7	-6.7	-9.1	-	-	-
	Up [mm]	13.6	2.4	-6.1	-20.3	-14.9	-13.3	-	-	-
Version 5	N [mm]	-1.3	5.1	3.8	-0.6	-1.8	-0.6	-	-	-
	E [mm]	5.5	8.0	4.4	-3.6	-7.2	-10.4	-	-	-
	Up [mm]	18.3	-2.0	-2.1	-22.4	-15.0	-8.8	-	-	-

Tabelle A-2: Residuen der einzelnen GPS-Tage, Station MAGU

	Antenne 1334			Antenne 2709			Antenne 3520		
	GPS-Tag 221	GPS-Tag 222	GPS-Tag 223	GPS-Tag 225	GPS-Tag 226	GPS-Tag 227	GPS-Tag 229	GPS-Tag 230	GPS-Tag 231
Version 1	N [mm]	1.7	1.4	-2.4	-1.6	-2.9	1.0	1.4	2.1
	E [mm]	0.1	-2.3	-2.2	0.0	0.4	2.0	0.7	0.1
	Up [mm]	11.1	2.7	14.5	-4.1	-3.0	-3.0	-4.3	-6.4
Version 2	N [mm]	0.0	-0.6	-3.6	-1.3	-0.6	0.4	0.4	0.9
	E [mm]	2.1	0.0	0.3	0.8	0.6	-0.3	-1.0	-1.4
	Up [mm]	12.0	7.2	17.3	-9.4	-7.9	-3.5	-1.7	2.3
Version 3	N [mm]	1.8	1.1	-2.3	-3.3	-2.9	1.2	1.3	2.1
	E [mm]	0.0	-2.1	-2.4	0.5	0.5	2.2	0.6	0.0
	Up [mm]	9.0	3.6	13.1	-5.3	-2.9	-4.2	-5.2	0.1
Version 4	N [mm]	0.0	-0.2	-3.6	-1.1	-0.9	0.4	0.0	0.9
	E [mm]	2.0	0.0	0.1	0.8	0.9	-0.3	-0.8	-1.6
	Up [mm]	10.3	6.6	14.6	-9.3	-6.5	-3.1	-1.5	3.7
Version 5	N [mm]	-0.8	-0.3	-4.3	-0.8	-0.8	0.2	-0.1	1.2
	E [mm]	2.8	0.6	0.6	0.7	0.5	-0.2	-0.4	-2.3
	Up [mm]	14.9	6.6	15.1	-11.0	-8.4	-2.3	-1.7	4.4

Tabelle A-3: Residuen der einzelnen GPS-Tage, Station TISM

	Antenne 4138			Antenne 3520			Antenne 1334		
	GPS-Tag 221	GPS-Tag 222	GPS-Tag 223	GPS-Tag 225	GPS-Tag 226	GPS-Tag 227	GPS-Tag 229	GPS-Tag 230	GPS-Tag 231
Version 1	N [mm]	-	4.8	-1.3	0.5	4.4	-7.5	-7.8	-7.4
	E [mm]	-	-0.5	14.0	-1.2	6.4	-5.0	-0.5	2.7
	Up [mm]	-	-25.2	0.5	-9.7	-18.5	26.4	17.8	16.7
Version 2	N [mm]	-	3.8	-0.5	0.7	4.6	-8.6	-8.6	-8.4
	E [mm]	-	-0.4	10.2	0.3	5.8	2.2	5.1	7.3
	Up [mm]	-	-30.6	-2.1	-5.8	-19.8	30.3	18.9	16.2
Version 3	N [mm]	-	5.1	-1.2	1.1	4.1	-7.9	-8.7	-7.8
	E [mm]	-	-1.6	14.0	0.1	8.9	-1.6	1.6	2.5
	Up [mm]	-	-27.9	-2.0	-10.1	-19.3	28.1	19.3	16.2
Version 4	N [mm]	-	4.2	-0.4	0.5	4.2	-9.0	-9.0	-7.4
	E [mm]	-	-2.3	11.1	3.7	8.1	0.2	4.1	6.8
	Up [mm]	-	-36.8	-0.4	-5.1	-16.7	29.6	19.2	14.1
Version 5	N [mm]	-	3.6	0.2	0.4	5.4	-7.7	-8.1	-7.1
	E [mm]	-	-3.3	10.7	5.1	5.7	0.9	4.4	4.6
	Up [mm]	-	-30.1	-1.0	-3.7	-20.6	31.8	16.8	17.1

Tabelle A-4: Residuen der einzelnen GPS-Tage, Station FUND

	Antenne 2709			Antenne 4138			Antenne 2776			
	GPS-Tag 221	GPS-Tag 222	GPS-Tag 223	GPS-Tag 225	GPS-Tag 226	GPS-Tag 227	GPS-Tag 229	GPS-Tag 230	GPS-Tag 231	
Version 1	N [mm]	13.9	7.9	-5.6	-7.2	-6.1	-7.8	-6.2	-3.7	
	E [mm]	-4.1	-2.5	5.6	3.1	0.6	0.5	4.0	2.5	
	Up [mm]	14.0	8.8	11.8	-4.1	5.9	-2.8	-9.0	-11.0	-4.1
Version 2	N [mm]	12.1	15.6	10.3	-7.1	-8.6	-9.6	-7.9	-5.8	
	E [mm]	-3.0	-3.4	-1.3	2.9	-0.1	-2.7	3.0	6.1	4.5
	Up [mm]	13.0	7.8	9.4	-5.6	7.0	-7.1	-3.8	-7.5	0.8
Version 3	N [mm]	9.1	14.3	7.6	-6.1	-7.9	-7.8	-6.4	-4.0	
	E [mm]	-4.3	-6.4	-2.6	6.1	3.3	1.3	0.9	4.3	2.4
	Up [mm]	15.4	9.1	10.8	-3.1	4.9	-4.0	-8.5	-9.0	-3.1
Version 4	N [mm]	11.7	16.7	10.0	-7.3	-8.4	-9.9	-8.3	-6.2	
	E [mm]	-2.8	-5.2	-1.1	3.1	0.2	-1.2	3.6	6.1	5.0
	Up [mm]	13.9	7.8	8.4	-5.8	4.6	-7.7	-3.5	-6.2	1.5
Version 5	N [mm]	12.6	15.8	10.5	-7.2	-7.9	-9.6	-8.5	-5.2	
	E [mm]	-4.1	-5.0	-1.3	2.4	-0.3	-1.6	4.0	6.6	4.3
	Up [mm]	13.6	9.3	11.3	-7.0	0.9	-8.8	-2.3	-5.6	1.7

Tabelle A-5: Gelöste Ambiguities der einzelnen Basislinien, Version 1 [%]

Basislinie/GPS-Tag	221	222	223	225	226	227	229	230	231	Länge BL [km]
BUFN	62.2	39.0	43.8	59.7	60.0	52.6	51.5	63.9	60.3	126.2
BUMA	56.5	59.4	63.8	60.0	65.0	47.3	-	-	-	184.7
BUMG	54.5	51.8	56.5	70.2	62.1	62.3	70.1	60.7	66.7	14.0
BUTI	52.5	-	53.6	59.6	41.8	39.3	34.4	41.8	57.4	248.4

Tabelle A-6: Gelöste Ambiguities der einzelnen Basislinien, Version 2 [%]

Basislinie/GPS-Tag	221	222	223	225	226	227	229	230	231	Länge BL [km]
BUFN	61.3	40.3	43.8	58.1	57.3	55.4	53.0	62.3	64.5	126.2
BUMA	50.0	51.6	63.8	70.0	66.7	48.6	-	-	-	184.7
BUMG	54.5	39.3	56.5	71.9	60.3	62.3	64.2	63.9	68.3	14.0
BUTI	50.8	-	48.2	52.6	41.8	46.4	45.3	49.1	60.0	248.4

Tabelle A-7: Gelöste Ambiguities der einzelnen Basislinien, Version 3 [%]

Basislinie/GPS-Tag	221	222	223	225	226	227	229	230	231	Länge BL [km]
BUFN	66.2	42.7	45.0	60.0	57.7	54.8	50.7	63.9	58.7	126.2
BUMA	53.2	56.9	62.1	70.7	65.1	50.0	-	-	-	184.7
BUMG	52.7	50.0	56.5	73.7	65.5	62.3	69.1	62.3	70.2	14.0
BUTI	51.6	-	53.6	60.7	41.8	42.9	47.6	52.7	58.5	248.4

Tabelle A-8: Gelöste Ambiguities der einzelnen Basislinien, Version 4 [%]

Basislinie/GPS-Tag	221	222	223	225	226	227	229	230	231	Länge BL [km]
BUFN	63.5	40.8	43.8	60.0	54.5	55.4	53.7	63.9	66.7	126.2
BUMA	54.8	53.7	63.8	70.7	66.7	50.7	-	-	-	184.7
BUMG	52.7	50.0	56.5	75.0	63.8	65.6	64.7	62.3	68.4	14.0
BUTI	50.0	-	50.0	53.6	34.5	51.8	41.3	49.1	57.4	248.4

Tabelle A-9: Gelöste Ambiguities der einzelnen Basislinien, Version 5 [%]

Basislinie/GPS-Tag	221	222	223	225	226	227	229	230	231	Länge BL [km]
BUFN	63.5	36.8	44.4	61.3	59.2	56.2	61.2	65.6	57.6	126.2
BUMA	56.5	48.5	57.9	58.6	62.9	43.2	-	-	-	184.7
BUMG	56.4	37.5	52.2	73.7	67.2	68.3	69.1	62.3	64.9	14.0
BUTI	47.5	-	51.8	64.3	50.9	50.9	49.2	54.5	64.8	248.4

Tabelle A-10: Zahlenwerte gelöster und ungelöster Ambiguities, Basislinie BUCU-FUND

		221	222	223	225	226	227	229	230	231
Version 1	zu lösen	148	154	160	124	150	152	132	122	126
	ungelöst	56	94	90	50	60	72	64	44	50
Version 2	zu lösen	150	154	160	124	150	148	132	122	124
	ungelöst	58	92	90	52	64	66	62	46	44
Version 3	zu lösen	148	150	160	120	156	146	134	122	126
	ungelöst	50	86	88	48	66	66	66	44	52
Version 4	zu lösen	148	152	160	120	154	148	134	122	126
	ungelöst	54	90	90	48	70	66	62	44	42
Version 5	zu lösen	148	152	162	124	152	146	134	122	132
	ungelöst	54	96	90	48	62	64	52	42	56

Tabelle A-11: Zahlenwerte gelöster und ungelöster Ambiguities, Basislinie BUCU-MACH

		221	222	223	225	226	227	229	230	231
Version 1	zu lösen	124	128	116	120	120	148	-	-	-
	ungelöst	54	52	42	48	42	78	-	-	-
Version 2	zu lösen	124	128	116	120	120	144	-	-	-
	ungelöst	62	62	42	36	40	74	-	-	-
Version 3	zu lösen	124	130	116	116	126	148	-	-	-
	ungelöst	58	56	44	34	44	74	-	-	-
Version 4	zu lösen	124	134	116	116	126	146	-	-	-
	ungelöst	56	62	42	34	42	72	-	-	-
Version 5	zu lösen	124	132	114	116	124	148	-	-	-
	ungelöst	54	68	48	48	46	84	-	-	-

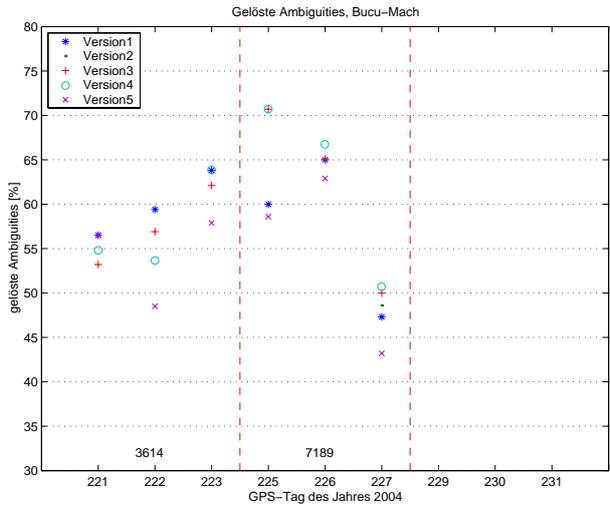
Tabelle A-12: Zahlenwerte gelöster und ungelöster Ambiguities, Basislinie BUCU-MAGU

		221	222	223	225	226	227	229	230	231
Version 1	zu lösen	110	112	46	114	116	122	134	122	120
	ungelöst	50	54	20	34	44	46	40	48	40
Version 2	zu lösen	110	112	46	114	116	122	134	122	120
	ungelöst	50	68	20	32	46	46	48	44	38
Version 3	zu lösen	110	112	46	114	116	122	134	122	114
	ungelöst	52	56	20	30	40	46	42	46	34
Version 4	zu lösen	110	112	46	112	116	122	136	122	114
	ungelöst	52	56	20	28	42	42	48	46	36
Version 5	zu lösen	110	112	46	114	116	120	136	122	114
	ungelöst	48	70	22	30	38	38	42	46	40

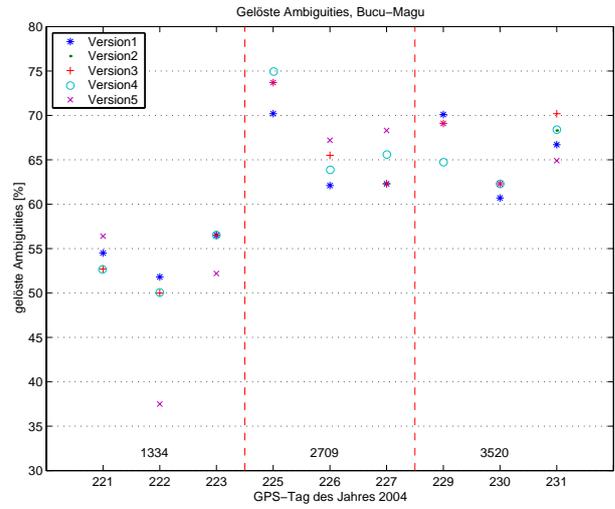
Tabelle A-13: Zahlenwerte gelöster und ungelöster Ambiguities, Basislinie BUCU-TISM

		221	222	223	225	226	227	229	230	231
Version 1	zu lösen	122	-	112	114	110	112	128	110	108
	ungelöst	58	-	52	46	64	68	84	64	46
Version 2	zu lösen	122	-	112	114	110	112	128	110	110
	ungelöst	60	-	58	54	64	60	70	56	44
Version 3	zu lösen	124	-	112	112	110	112	126	110	106
	ungelöst	60	-	52	44	64	64	66	52	44
Version 4	zu lösen	124	-	112	112	110	112	126	110	108
	ungelöst	62	-	56	52	72	54	74	56	46
Version 5	zu lösen	122	-	112	112	110	114	126	110	108
	ungelöst	64	-	54	40	54	56	64	50	38

A.3 Bilder

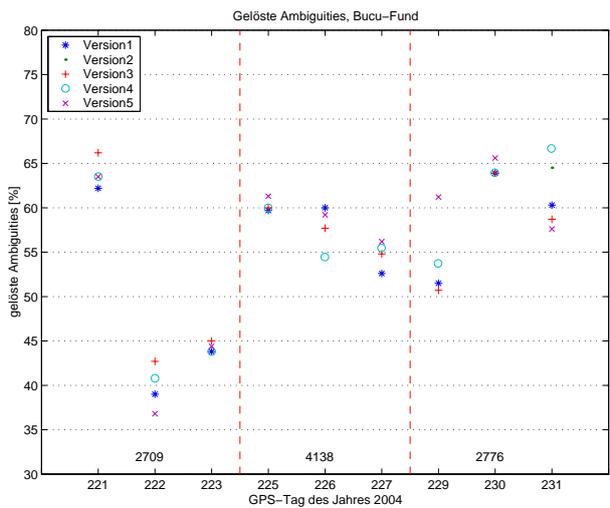


(a) MACH

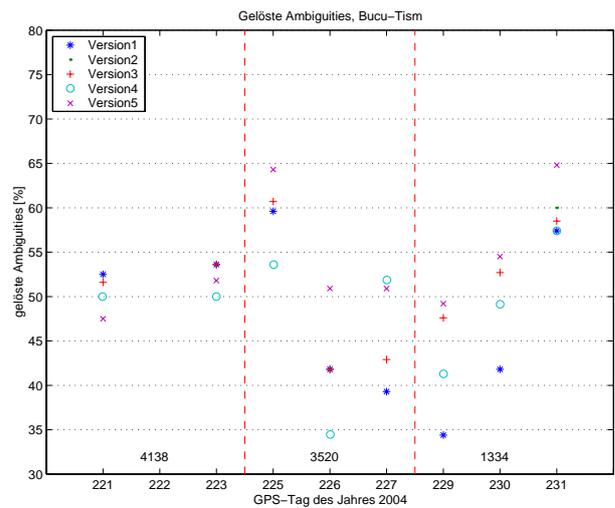


(b) MAGU

Bild A-1: Gelöste Ambiguities für MACH und MAGU [%]



(a) FUND



(b) TISM

Bild A-2: Gelöste Ambiguities für FUND und TISM [%]

---

ISSN: 1612-9733  
ISBN: 978-3-86644-110-1

[www.uvka.de](http://www.uvka.de)