

# Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen

von der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Lehrbefähigung  
im Fachgebiet Geodäsie  
genehmigte Habilitationsschrift

von

**Dr.-Ing. Lambert Wanninger**

Gutachter der schriftlichen Habilitationsleistung:  
Prof. Dr.-Ing. W. Augath, Dresden  
Prof. Dr.-Ing. A. Kleusberg, Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. G. Seeber, Hannover

Tag der Einreichung: 09. 11. 1998

Tag der mündlichen Habilitationsleistungen: 15. 10. 1999

# Zusammenfassung

Permanent arbeitende GPS-Referenzstationen erzeugen Korrekturdaten für die cm-genaue relative Positionierung und schaffen gleichzeitig die Verbindung zum gewünschten geodätischen Bezugssystem. Für eine flächendeckende und wirtschaftliche Versorgung mit Korrekturdaten ist es notwendig, die Anzahl der Referenzstationen gering zu halten, ohne aber gleichzeitig Genauigkeitsverluste hinnehmen zu müssen. Dies gelingt nur über eine präzise Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse.

Voraussetzung für eine solche Modellierung auf der Grundlage von Phasendaten ist die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten im Netz der Referenzstationen. Wie theoretisch und praktisch gezeigt, gelingt dann die mm-genaue Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler mit Hilfe eines zweidimensionalen linearen Interpolationsalgorithmus, wenn die Entfernungen zwischen den Referenzstationen unter 100 km liegen.

Beim Auftreten von regionalen Störungen in der Ionosphäre oder Troposphäre muß aber mit größeren Restfehlern gerechnet werden. Um höchsten Genauigkeitsansprüchen zu genügen, sind daher für Mit-

teleuropa Stationsabstände von maximal 50 km zu empfehlen.

In der praktischen Verwirklichung dieses Ansatzes werden die realen Referenzstationsdaten zu Beobachtungskorrekturen einer Basisstation und Korrekturmodellen der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler vorverarbeitet. In einem zweiten Schritt werden dann virtuelle Beobachtungen für eine vorgegebene Stationsposition berechnet, die dann für die relative Positionierung eines Neupunktes genutzt werden. Die basislinienweise Neupunktbestimmung kann dabei problemlos mit vorhandener Software durchgeführt werden.

Umfangreiche Testmessungen und -auswertungen ergaben, daß in einem mitteleuropäischen Referenzstationsnetz mit einem Punktabstand von 50 km eine Genauigkeit der Lagekoordinaten von 1 cm (einfache Standardabweichung) auf für GPS gut geeigneten Meßpunkten innerhalb von wenigen Minuten flächendeckend erreicht werden können. Da die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse fast vollständig korrigiert werden, ist die notwendige Meßdauer auf einem Neupunkt fast ausschließlich von seiner GPS-Eignung abhängig.

## Abstract

Permanent GPS reference stations produce observation corrections to be used for cm-accurate relative positioning and they establish the connection to a geodetic reference frame. In order to supply observation corrections for larger areas at minimum costs, the number of reference stations should be as small as possible, but large enough to guarantee cm-accuracy. The solution lies in the precise modelling of the distance and direction dependent errors.

Error modelling based on GPS phase data requires fixing of the carrier phase ambiguities in the network of reference stations. It could be shown, both theoretically and with real observation data, that a two-dimensional linear interpolation algorithm yields mm-accurate corrections if the reference station distances do not exceed 100 km.

However, if regional scale disturbances exist in the ionosphere or in the troposphere, larger errors can be encountered. For the application in Central Europe,

it is therefore recommended to limit the reference station distances to some 50 km.

The realization of this positioning concept is performed in two steps. In the first one, the observations of the reference stations are preprocessed and separated into observation correction of one base station and correction models for the distance and direction dependent errors. In the second step, virtual observations of a reference station at a selected position are calculated. They can then be used for the positioning of a rover receiver in baseline mode using existing software.

The processing of various test data sets showed that in Central Europe and with reference station distances of some 50 km, 1 cm accurate horizontal coordinates could be obtained within a few minutes. Since the distance and direction dependent errors can almost completely be corrected, the necessary observation time at a rover site is mainly a function of the rover receiver's data quality.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>Virtuelle Referenzstationen</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>Präzise Positionierung mit GPS</b>	<b>10</b>	5.1	Das Konzept	38
2.1	Beobachtungsgleichungen und Arten der Positionierung	10	5.2	Berechnung virtueller Beobachtungen	38
2.2	Linearkombinationen der Phasen- messungen	14	5.3	Realisierungsarten	41
2.3	Mehrdeutigkeitsuchverfahren	16	5.3.1	Zentrale oder dezentrale Berechnung	41
<b>3</b>	<b>Fehlerquellen und Fehlerverminderung bei der relativen Positionierung</b>	<b>17</b>	5.3.2	Verwendung von Beobachtungen oder Beobachtungskorrekturen	42
3.1	Orbitfehler	17	<b>6</b>	<b>Anwendungen und Ergebnisse</b>	<b>44</b>
3.2	Ionosphärische Refraktion	19	6.1	Anwendungen in einer Referenz- stations-Netzschleife	44
3.3	Troposphärische Refraktion	21	6.1.1	Korrekturmodelle	44
3.4	Mehrwegeausbreitung	23	6.1.2	Verringerung der Fehlereinflüsse	47
3.5	Antennenphasenzentren	24	6.1.3	Positionierungsergebnisse	48
<b>4</b>	<b>Fehlermodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen</b>	<b>26</b>	6.2	Untersuchungen extremer Fehler- einflüsse	52
4.1	Fehlerbestimmung im Referenz- stationsnetz	26	6.2.1	Korrekturmodelle	52
4.1.1	Mehrdeutigkeitsfestsetzung	26	6.2.2	Positionierungsergebnisse	55
4.1.2	Beobachtungsresiduen	28	6.3	Anwendungen in einer großräu- migen Referenzstations-Netzschleife	57
4.2	Linearität der entfernungs- und rich- tungsabhängigen Fehler	29	<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>61</b>
4.2.1	Orbitfehler	29	<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>63</b>
4.2.2	Ionosphärische Refraktion	31	<b>A</b>	Differenzen der Satellitenelevationen auf- grund des Stationsabstandes	67
4.2.3	Troposphärische Refraktion	33	<b>B</b>	Differenzen der Satellitenelevationen auf- grund des Höhenunterschieds zwischen zwei Stationen	68
4.3	Flächenhafte Modellierung der entfer- nungs- und richtungsabhängigen Fehler- einflüsse	35			
4.4	Stationsabhängige Fehlereinflüsse	37			
4.4.1	Mehrwegeausbreitung	37			
4.4.2	Antennenphasenzentren	37			

[mit 37 Abbildungen und 9 Tabellen]



# 1 Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der Geodäsie ist die Bereitstellung von Bezugssystemen und geodätischen Netzen als Realisierung dieser Systeme. Einzelvermessungen schließen sich dabei an Punkte der höchsten Verdichtungsstufe dieser Netze an. Durch die Einführung der Positionierung mit Hilfe von Signalen des Global Positioning Systems (GPS) wurden und werden nicht nur die Meßverfahren einem grundsätzlichen Wandel unterzogen, sondern es wurde auch der bisherige Aufbau der Grundlagennetze in Frage gestellt (*Vaníček u. a. 1983*), da Sichtverbindungen zwischen Meßpunkten nicht mehr notwendig sind und auch über viele Kilometer Entfernung höchste Genauigkeiten erzielt werden können.

Noch in der Testphase des GPS wurde deutlich, daß mit geeigneten Empfängern und Auswertearithmen Genauigkeiten der relativen Positionierung in der Größenordnung von 1 ppm, also 1 cm auf 10 km Punktentfernung, erzielbar sind (Beispiele in *Wells 1986*). Während solche Ergebnisse ursprünglich nur nach längerer Meßdauer (eine Stunde und mehr) und bei Auswertungen im *Post-Processing* möglich waren, wurden im Laufe der ersten Hälfte der 90er Jahre Lösungsalgorithmen entwickelt, die mit sehr kurzen Beobachtungsperioden (minimal eine oder wenige Epochen) auskommen und bei Vorhandensein einer geeigneten Kommunikationsverbindung auch in Echtzeit einsetzbar sind (z.B. *Han und Rizos 1997b*). Andererseits wurde es möglich, über im Prinzip beliebig große Entfernungen cm-Genauigkeit zu erzielen, wenn nur die Beobachtungszeit auf viele Stunden bis Tage ausgedehnt wird (z.B. *Gendt u. a. 1995*).

Ursprünglich mußte ein Nutzer der relativen Positionierung über mindestens zwei Empfänger verfügen und diese simultan einsetzen. Inzwischen gibt es aber immer mehr Serviceanbieter, die Referenzstationen betreiben. Sie bilden ein eigenständiges Segment bei der Positionierung mit GPS (Abb. 1.1). Aufgabe dieses Referenzstationssegments ist es, auf der Grundlage von GPS-Messungen auf Punkten bekannter Position Beobachtungskorrekturen bzw. Korrekturmodelle zu erzeugen, die Nutzern in Echtzeit (mit wenigen Sekunden Verzögerung oder auch z.T. prädiziert) oder mit zeitlicher Verzögerung zur Verfügung gestellt werden. Im Gegensatz zu der für den Nutzer kostenlosen Zurverfügungstellung der GPS-Satellitensignale arbeiten die meisten Anbieter im Referenzstationssegment kommerziell und verlangen dementsprechend die Bezahlung ihres Service.

Als die künstliche Genauigkeitseinschränkung durch *Selective Availability (SA)* Anfang der 90er Jahre ein-

geführt wurde, waren im Navigationsbereich bei Genauigkeitsanforderungen von einem bis einigen Metern viele Nutzer gezwungen, auf relative Positionierung (DGPS) umzusteigen. Es entstanden zum Teil kommerzielle und zum Teil amtliche Services, die die Referenzstationsinformationen meistens in der Form von Beobachtungskorrekturen anbieten. Um den Anforderungen der Navigationsnutzer gerecht zu werden, ist eine große zeitliche und räumliche Verfügbarkeit sowie eine hohe Zuverlässigkeit der Korrekturen notwendig. Dafür braucht man nicht nur eine größere Anzahl von Referenzstationen, sondern vielfach werden deren Beobachtungen auch gemeinsam vorausgewertet (vernetzt), um die Zuverlässigkeits- und Genauigkeitsanforderungen erfüllen zu können. So werden bei vielen *Wide Area DGPS (WADGPS)*-Algorithmen aus den GPS-Referenzbeobachtungen und z.T. unter Hinzunahme weiterer Daten (z.B. meteorologischer Parameter) die entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse (der Orbits, der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion) bestimmt. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, einen DGPS-Service für ein größeres Gebiet mit wenigen Empfängern zu betreiben (*Mueller 1994*).

Es liegen dabei zusätzlich zu den Beobachtungskorrekturen, die im wesentlichen Satellitenuhrenfehler berücksichtigen, weitere fehlerspezifische Korrekturmodelle vor, die in Abhängigkeit von der Näherungsposition des Nutzers auf Zuschläge zu den Beobachtungskorrekturen umgerechnet werden (*Kee 1996*). Es kann auch die Technik der virtuellen Referenzstationen angewandt werden, bei der für eine gewählte Position optimale Beobachtungskorrekturen erzeugt werden, die dann für ein begrenztes Gebiet Gültigkeit haben (*Weber und Tiwari 1995*).

Im Vermessungswesen mit seinen Genauigkeitsanforderungen im Submeter- über Zentimeter- bis Millimeter-Bereich haben sich in den letzten Jahren auch etliche Formen von Referenzstationsnetzen entwickelt. Das globale Netz des *International GPS Service (IGS)* trägt zur Realisierung eines globalen Bezugssystems bei und liefert dafür präzise Stationskoordinaten und Satellitenorbits. Gleichzeitig und untrennbar damit verbunden werden geodynamische Parameter bestimmt. Weiterhin werden großräumige Fehlermodelle für troposphärische und ionosphärische Refraktion entwickelt (*IGS 1997*). IGS-Meßdaten und IGS-Produkte werden kostenlos zur Verfügung gestellt. Netze von GPS-Referenzstationen auf kontinentaler oder nationaler Ebene werden zur Verdichtung des globalen IGS-Netzes genutzt und bilden die

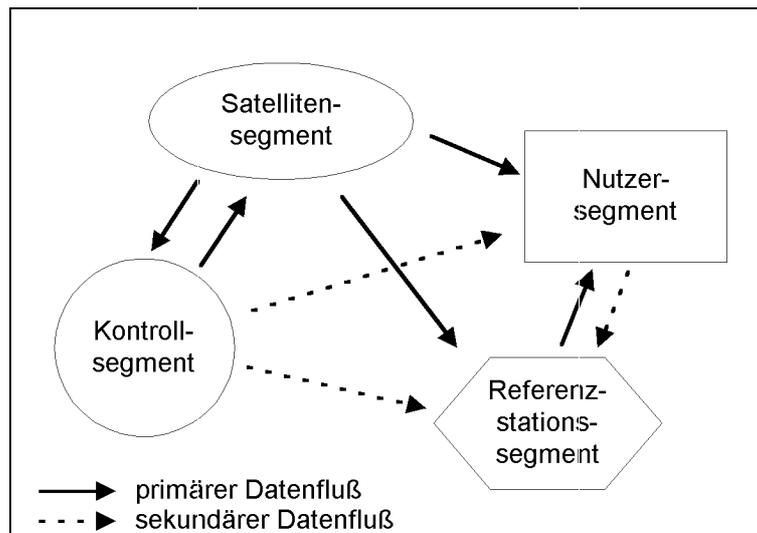


Abb. 1.1: GPS-Segmente und Datenfluß in den 90er Jahren.

Voraussetzung für regionale geodynamische Untersuchungen (*Bruyninx u.a. 1997, Abe und Tsuji 1994*).

In Deutschland wurden die DGPS-Serviceanbieter des öffentlichen Vermessungswesens unter der Markenbezeichnung SAPOS zusammengefaßt. Sie decken alle Genauigkeitsbereiche der relativen GPS-Positionierung vom metergenauen DGPS über kurzzeitige statische bzw. kinematische Positionierung mit Genauigkeiten von einem bis zu einigen Zentimeter und auch die Millimeter-Genauigkeit bei langer Beobachtungsdauer ab. Zum Teil versorgen Referenzstationen alle drei Genauigkeitsbereiche (*Hankemeier u.a. 1998*).

Der Aufbau der Referenzstationsnetze für die flächendeckende cm-genaue Positionierung ist seit Anfang der 90er Jahre im Gang (*Augath u.a. 1993*). Er konnte aber bisher nur in wenigen der großflächigen Bundesländer abgeschlossen werden (z.B. *Patzschke und Leipholz 1996*). Als Punktabstand zwischen den Referenzstationen wurde vielfach 30 bis 50 km gewählt. Die Begründung dafür basierte eher auf wirtschaftlichen Aspekten als auf wissenschaftlichen Ergebnissen über einen maximal verträglichen Punktabstand.

Der optimale Punktabstand zwischen den Referenzstationen, der die Anzahl notwendiger Stationen und damit die zu kommunizierende Datenmenge und somit die Gesamtkosten eines solchen Referenzstationensystems bestimmt, ist schwer abzuschätzen. Als Einflußfaktoren seien genannt: angestrebte maximale Meßzeit, angestrebte Koordinatengenauigkeit, maximal zulässiger Anteil der Lösungen, die eine vorgegebene Fehlergrenze überschreiten dürfen, Größe der entfernungsabhängig wirkenden Fehler, Modellierungsansätze für diese Fehler, Häufigkeit und Stärke

von extremen entfernungsabhängig wirkenden Fehlern, Datenqualität der Referenzstationsdaten, minimal notwendige Datenqualität der Mobilstationsdaten, angewandte Auswertelgorithmen. Vorliegende Untersuchungen konnten bisher nur unbefriedigende Antworten geben, weil die für regionale Referenzstationsnetze optimalen Auswertelgorithmen bisher nicht genutzt wurden. Trotzdem war schon erkennbar, daß ein Referenzstationsabstand von 30 bis 50 km eine realistische Vorgabe darstellt, um die gesetzten Anforderungen von maximal einigen Minuten Meßzeit und 1 cm Lagegenauigkeit zu erfüllen (*Fröhlich 1995, Jahn 1996*).

Bei Stationsentfernungen über ungefähr 10 km dominieren die entfernungsabhängig wirkenden Fehlerinflüsse aufgrund von Orbitfehlern, ionosphärischer und troposphärischer Refraktion den Gesamtfehlerhaushalt der relativen Positionierung. Sie erschweren und verhindern die schnelle bzw. RTK (*Real-Time Kinematic*) Mehrdeutigkeitslösung und damit cm-genaue Positionierung. Nur wenn die entfernungsabhängig wirkenden Fehler erheblich verringert werden, können die Meßzeiten bei Basislinien über 10 km Länge deutlich gesenkt und die Koordinatengenauigkeiten verbessert werden.

Regionale Netze von Referenzstationen bieten günstige Voraussetzungen zur Modellierung der genannten Fehler. Geeignete Modellansätze erlauben das Anbringen von Korrekturen an die Beobachtungen. Dies wurde zuerst für die ionosphärische Refraktion durch *Webster und Kleusberg (1992)* demonstriert. *Wu (1994)* schlug ein ähnliches Verfahren für Orbitfehler vor. Die präzise Modellierung differentieller ionosphärischer Fehler gelang *Wanninger (1995a)*, wobei ein entsprechender Ansatz für troposphäri-

sche und Orbitfehler aufgrund der geringen Qualität der Referenzstationsbeobachtungen fehlschlug. *Wübbena u.a. (1996b)* zeigten, daß bei Verwendung eines geometrischen Modells zur Erfassung von Orbitfehlern bei der Neupunktbestimmung die Mehrdeutigkeitslösung beschleunigt und die Koordinatenfehler verringert werden können. Die gemeinsame Anwendung von ionosphärischem und geometrischem Modell in regionalen Netzen demonstrierten *Wanninger (1996)* und auch *Han und Rizos (1996), (1997a)*.

Auch stationsabhängige Fehlereinflüsse, die insbesondere durch Mehrwegeausbreitung verursacht werden, lassen sich in Referenzstationsnetzen verringern. *Raquet (1996)* zeigte dies für Codemessungen und schlug ein entsprechendes Verfahren auch für Phasemessungen vor. Eine Verringerung sowohl der entfernungsabhängig wirkenden wie auch stationsbedingten Beobachtungsfehler gelingt durch den Ansatz der virtuellen Referenzstationen. *Wanninger (1997a,b)* zeigt die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes virtueller Stationen in regionalen Referenzstationsnetzen auf.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich ausschließlich mit cm-genaue Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen (Punktabstand bis 100 km), die mit möglichst kurzer Meßdauer erzielt werden soll. Der Schwerpunkt liegt auf den die relative Positionierung beeinflussenden Fehlern und ihrer Behandlung in Referenzstationsnetzen. Während es keine Zweifel geben

kann, daß das ultimative Ziel der Positionierung darin liegt, die gewünschte Genauigkeit in Echtzeit zu erzielen, ist die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Realisierung ausschließlich für *Post-Processing*-Anwendungen geeignet. Echtzeit-Aspekte wurden trotzdem überall dort behandelt, wo Unterschiede zu den *Post-Processing*-Ansätzen existieren. Kommunikationstechnische Fragestellungen, die bei der praktischen Echtzeit-Realisierung der präzisen Positionierung in regionalen Netzen eine große Rolle spielen, wurden aber von der Betrachtung ausgeschlossen.

Im Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen zur präzisen relativen GPS-Positionierung bereitgestellt. Das Kapitel 3 gibt einen Überblick über die auf die relative Positionierung entfernungsabhängig wirkenden Fehlerquellen (Orbitfehler, ionosphärische und troposphärische Refraktion) und die stationsabhängigen Fehlerquellen (Mehrwegeausbreitung und Antennenphasenzentren) sowie die Techniken zur Fehlerverminderung. Es folgen in Kapitel 4 die Bestimmung der relativen Beobachtungsfehler in Referenzstationsnetzen sowie ihre flächenhafte Modellierung. Aufbauend auf diesen Korrekturmodellen werden Beobachtungen virtueller Referenzstationen erzeugt, deren Konzept und Realisierung in Kapitel 5 beschrieben werden. In einem umfangreichen Kapitel werden danach praktische Anwendungen und Ergebnisse aus regionalen Referenzstationsnetzen dargestellt und diskutiert (Kapitel 6).

## 2 Präzise Positionierung mit GPS

Das NAVSTAR Global Positioning System (GPS) ist ein satellitengestütztes Radionavigationssystem, welches durch die USA betrieben wird und seit 1994 vollständig ausgebaut ist. Jeder der nominal 24 Satelliten sendet zwei Trägerwellen  $L_1$  und  $L_2$  mit den Frequenzen  $f_1 = 1575,42$  MHz und  $f_2 = 1227,60$  MHz aus, denen Navigationssignale (Codes) und Navigationsnachricht aufmoduliert sind. Das  $L_1$ -Signal enthält sowohl den mit einer Taktrate von 10,23 Mbps genaueren P- bzw. Y-Code wie auch den mit einer Taktrate von 1,023 Mbps weniger genauen C/A-Code. Das  $L_2$ -Signal enthält ausschließlich den P- bzw. Y-Code. Aus Messungen an fünf Monitorstationen auf der Erde werden die Satellitenbahnen und das Satellitenuhrverhalten bestimmt und prädiiziert. Dem Nutzer werden die Ergebnisse in der Navigationsnachricht mitgeteilt. Da es sich bei GPS um ein Einweg-Entfernungsmessverfahren handelt, ist die Anzahl der Nutzer unbegrenzt (*USCG 1995*).

Der Meßvorgang beinhaltet die Erzeugung einer identischen Codesequenz im Empfänger, die soweit verschoben wird, bis maximale Korrelation mit dem empfangenen Signal erreicht ist (Code-Korrelation). Bei maximaler Korrelation entspricht der Verschiebungsbetrag der Laufzeit des Signals. Nach Beseitigung der Signalmodulation erfolgt die Trägerphasenmessung in Differenz zu einem intern erzeugten Trägersignal mit der Nominalfrequenz  $f_1$  bzw.  $f_2$  (Trägermischphase). Für beide Signale eines jeden Satelliten gibt es somit zwei unabhängige Beobachtungsgrößen: die eindeutige und mit deutlich stärkerem Meßrauschen behaftete Codebeobachtung und andererseits die mehrdeutige und genauer bestimmbare Phasenbeobachtung. Diese Laufzeitmessungen werden insbesondere durch den Synchronisationsfehler der Empfängeruhr in bezug auf die GPS-Systemzeit verfälscht, so daß man für sie den Begriff **Pseudostreckenmessung** verwendet.

Um die erreichbaren Genauigkeiten für zivile und unberechtigte Nutzer gering zu halten, wurden zwei Verfahren der künstlichen Systemverschlechterung eingeführt. Das erste Verfahren, die sogenannte *Selective Availability* (SA), besteht aus einer kontrollierten Beeinflussung der Satellitenuhr, welche direkt und in identischer Weise auf alle Beobachtungsgrößen wirkt. Die ebenfalls angekündigte kontrollierte Verschlechterung der in den Navigationsnachrichten gesendeten Bahnparameter scheint nicht angewendet zu werden. Im Normalfall soll unter SA der horizontale Punktfehler zu 95% der Zeit 100 m nicht übersteigen (*USCG 1995*). Satellitenuhren-SA kann durch differentielles GPS (DGPS) praktisch vollständig beseitigt werden.

Um auch bei Echtzeit-Anwendungen die hochfrequenten SA-Anteile zu erfassen, ist die häufige (Sekundenabstand) Aufdatierung der Pseudostreckenkorrekturen und die Verwendung von Pseudogeswindigkeitskorrekturen notwendig.

Die zweite Methode, Nutzern den Zugang zu höchsten Genauigkeiten zu verweigern, besteht in der Umwandlung des bekannten P-Codes in den „unbekannten“ Y-Code (*Anti-Spoofing* (A-S)). In der praktischen Anwendung bedeutet dies, daß auf  $L_1$  nur noch der ungenauere C/A-Code zur Verfügung steht und auf  $L_2$  keine Code-Korrelations-Messungen mehr durchführbar sind. Die Empfängerhersteller reagierten auf A-S mit neuen Verfahren, mit denen auch ohne Code-Kennntnis  $L_2$ -Beobachtungsgrößen erzeugt werden können: z.B. die Bestimmung des Gruppenlaufzeitunterschieds und der  $L_1$ - $L_2$ -Phasendifferenz durch Kreuzkorrelation der Codes auf beiden Frequenzen oder Meßverfahren, die die unverschlüsselten P-Code-Anteile des Y-Codes nutzen (*Breuer u.a. 1993*). Die erhaltenen Beobachtungen weisen aber im Vergleich zum Code-Korrelations-Verfahren durchweg ein höheres Meßrauschen auf.

### 2.1 Beobachtungsgleichungen und Arten der Positionierung

Die Beobachtungsgleichungen für Code- und Phasenmessungen sollen hier in der für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Ausführlichkeit behandelt werden. Eine noch detailliertere Aufstellung von Beobachtungsgleichungen findet sich in *Teunissen und Kleusberg (1996)*.

Ein geodätischer GPS-Empfänger  $a$  liefert in jeder Meßepoche Codemessungen  $C_{a,f}^i$  und Phasenmessungen  $\Phi_{a,f}^i$  jedes sichtbaren Satelliten  $i$  auf einer (Einfrequenz-) oder beiden Frequenzen  $f$  (Zweifrequenz-Empfänger):

$$\begin{aligned} C_{a,f}^i &= R_a^i + c_0 \cdot [\delta t_a + h_{a,f,C} - \delta t^i - h_{f,C}^i] \\ &\quad + I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,C}^i + A_{a,f,C}^i \\ &\quad + \epsilon_{a,f,C}^i \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{a,f}^i &= R_a^i + c_0 \cdot [\delta t_a + h_{a,f,\phi} - \delta t^i - h_{f,\phi}^i] \\ &\quad - I_{a,f}^i + T_a^i + O_a^i + M_{a,f,\phi}^i + A_{a,f,\phi}^i \\ &\quad + \lambda_f \cdot N_{a,f}^i + \epsilon_{a,f,\phi}^i \end{aligned} \quad (2.2)$$

mit

$$R_a^i = |\vec{X}^i - \vec{X}_a|. \quad (2.3)$$

Dabei zeigen die Indizes  $C$  (Code) bzw.  $\phi$  (Phase) Abhängigkeiten von der Art der Beobachtungsgröße an und es bedeuten

$C_a^i$	– Codemessung [m],
$\Phi_a^i$	– Phasenmessung [m],
$R_a^i$	– Entfernung Satellit $i$ – Empfänger $a$ [m] gemäß Gl. (2.3),
$c_0$	– Vakuumlichtgeschwindigkeit [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],
$N_a^i$	– nicht-ganzzahlige Phasenmehrdeutigkeit [-],
$\vec{X}_a, \vec{X}^i$	– Vektoren globaler kartesischer Koordinaten $X, Y, Z$ [m].

Die geometrische Entfernung  $R_a^i$  gibt die Entfernung zwischen der Position des Satelliten  $i$  zum Signalaussendezeitpunkt und der Position des GPS-Empfängers  $a$  zum Signalempfangszeitpunkt an. Da die verwendeten Satellitenorbits, die der Berechnung des Satellitenpositionsvektors  $\vec{X}^i$  dienen, nicht fehlerfrei sind, werden Orbitfehler  $O_a^i$  berücksichtigt. Uhrfehler  $\delta t_a$  und instrumentelle Verzögerungen im Empfänger  $h_{a,f}$  können bei der Positionsberechnung nicht einwandfrei voneinander getrennt werden und werden gemeinsam als „Uhr“-fehler bestimmt. Die weiteren primären Unbekannten sind die Empfängerkoordinaten  $\vec{X}_a$ .

Die Auswirkungen der ionosphärischen Refraktion erster Ordnung sind für Code und Phase gleicher Trägerfrequenz vom Betrag her gleich groß, aber unterscheiden sich in ihren Vorzeichen (Gruppensignalverzögerung, Phasenbeschleunigung). Die Phasenmehrdeutigkeit  $N_a^i$  hat in dieser undifferenzierten Form nicht die Eigenschaft der Ganzzahligkeit, da davon ausgegangen werden muß, daß sowohl das Satellitensignal zum Signalaussendezeitpunkt und auch das empfängerintern erzeugte Trägersignal zum Empfangszeitpunkt keine Phasennullage aufweisen.

Für Relativmessungen werden die Differenzen zwischen simultanen Beobachtungen zweier Empfänger  $a$  und  $b$  und jeweils einem Satelliten  $i$  gebildet ( $\Delta$ -Operator). Der maximale zeitliche Abstand der Beobachtungen zweier GPS-Empfänger beträgt heute knapp über 2 ms, da die Meßzeitpunkte mit maximal  $\pm 1$  ms Abweichung auf die volle GPS-Sekunde synchronisiert sind und zusätzlich unterschiedliche Signallaufzeiten auftreten. Diese Beobachtungen können als ausreichend simultan betrachtet werden. Bei der Bildung einfacher Differenzen zwischen Empfängern fallen Satellitenuhrfehler und instrumentelle Signalverzögerungen heraus, Refraktions- und Orbitfehlereinflüsse werden verringert:

$$\begin{aligned} \Delta C_{ab,f}^i &= C_b^i - C_a^i \\ &= \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,C}] \\ &\quad + \Delta I_{ab,f}^i + \Delta T_{ab}^i + \Delta O_{ab}^i + \Delta M_{ab,f,C}^i \\ &\quad + \Delta A_{a,f,C}^i + K_{ab}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta C}^i \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{ab,f}^i &= \Phi_b^i - \Phi_a^i \\ &= \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,\phi}] \\ &\quad - \Delta I_{ab,f}^i + \Delta T_{ab}^i + \Delta O_{ab}^i + \Delta M_{ab,f,\phi}^i \\ &\quad + \Delta A_{a,f,\phi}^i + \lambda_f \cdot \Delta N_{ab,f}^i \\ &\quad + K_{ab}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta \phi}^i \end{aligned} \quad (2.5)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta R_{ab}^i &= R_b^i - R_a^i \\ &= |\vec{X}^i - \vec{X}_b| - |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \\ &= |\vec{X}^i - \vec{X}_a - \Delta \vec{X}_{ab}| - |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \end{aligned} \quad (2.6)$$

wobei

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

Als primäre Unbekannte werden der Basislinienvektor  $\Delta \vec{X}_{ab}$  und die Summe aus der Differenz der Empfängeruhrfehler und der Differenz der instrumentellen Verzögerungen bestimmt. Die absolute Lage der Basislinie, die z.B. durch den Positionsvektor  $\vec{X}_a$  des Punktes  $a$  gegeben sein kann, wird nicht fehlerfrei sein und bedingt den neu hinzugenommenen Fehlerterm  $K_{ab}^i$ . Die einfache Differenz der Phasenmehrdeutigkeiten  $\Delta N$  besitzt weiterhin nicht die Eigenschaft der Ganzzahligkeit, da davon ausgegangen werden muß, daß die Differenz der empfängerintern erzeugten Trägersignale keinen Phasennullage aufweist.

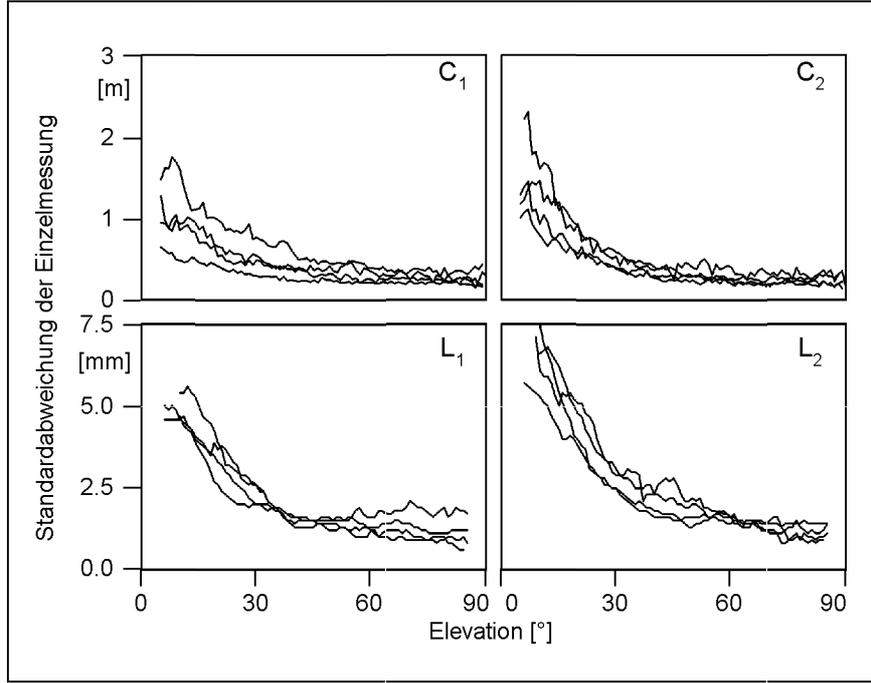


Abb. 2.1: Beispiele für die Elevationsabhängigkeit der Mehrwegefehler und des Meßrauschens bei Messungen unter vergleichbaren Mehrwegeeffekten aber mit unterschiedlichen Zweifrequenz-Empfängern unter *Anti-Spoofing*. Die Standardabweichungen der Codemessungen (C1, C2) wurden aus der Differenz von Code- und Phasemessungen (Rocken u.a. 1994) abgeleitet, die Standardabweichungen der Phasemessungen (L1, L2) aus der Auswertung einer kurzen Basislinie.

Für kurze Basislinien, bei denen von verschwindend geringen Unterschieden der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion und der Orbitfehler ausgegangen werden kann, vereinfachen sich die Gleichungen. Setzt man zusätzlich eine ausreichend genaue absolute Lagerung der Basislinie und baugleiche und gleich ausgerichtete Empfangsantennen voraus, gilt:

$$\Delta C_{ab,f}^i = \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,C}] + \Delta M_{ab,f,C}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta C}^i \quad (2.7)$$

$$\Delta \Phi_{ab,f}^i = \Delta R_{ab}^i + c_0 \cdot [\Delta \delta t_{ab} + \Delta h_{ab,f,\phi}] + \Delta M_{ab,f,\phi}^i + \lambda_f \cdot \Delta N_{ab,f}^i + \epsilon_{ab,f,\Delta \phi}^i \quad (2.8)$$

Bei kurzen Basislinien verbleiben also Mehrwegeeffekte und Meßrauschen als Hauptfehlereinflüsse. Beide können durch längere Beobachtungsdauer, d.h. also statische Messungen, wirksam verringert werden. Die Größe dieser Fehlereinflüsse ist sowohl empfänger- als auch stationsabhängig. Typische Beispielswerte von auf Einzelbeobachtungen bezogene Standardabweichungen zeigen einen starken Anstieg mit kleiner werdenden Elevationen (Abb. 2.1). Für hochstehende Satelliten betragen die Standardabweichungen der Codemessungen um 0,3 m und die der Phasemessungen um 1,3 mm. Bei 15° Elevation liegen sie bei 0,5 - 2,0 m für Codemessungen und 5,0 - 7,0 mm bei Phasemessungen.

Der Mehrdeutigkeitsterm bekommt erst auf der Ebene der Doppelten Differenzen die Eigenschaft der Ganzzahligkeit. Doppelte Differenzen der Phasemessungen ergeben sich aus der Differenz zweier einfacher Differenzen (Operator  $\nabla$ ) nach:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \Phi_{ab,f}^{ij} &= \Delta \Phi_{ab}^j - \Delta \Phi_{ab}^i \\ &= \nabla \Delta R_{ab}^{ij} - \nabla \Delta I_{ab,f}^{ij} + \nabla \Delta T_{ab}^{ij} \\ &\quad + \nabla \Delta O_{ab}^{ij} + \nabla \Delta M_{ab,f,\phi}^{ij} \\ &\quad + \nabla \Delta A_{ab,f,\phi}^{ij} + \lambda_f \cdot \nabla \Delta N_{ab,f}^{ij} \\ &\quad + \nabla K_{ab}^{ij} + \epsilon_{ab,f,\nabla \Delta \phi}^{ij} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Da nun auch die Empfängeruhrfehler und instrumentellen Verzögerungen eliminiert wurden, verbleiben nur noch die Basislinienkoordinaten  $\Delta \vec{X}_{ab}$  im Term  $\nabla \Delta R_{ab}^{ij}$  als primäre Unbekannte.

Für kurze Basislinien vereinfacht sich (2.9) unter oben schon verwendeten Voraussetzungen zu:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \Phi_{ab,f}^{ij} &= \nabla \Delta R_{ab}^{ij} + \nabla \Delta M_{ab,f,\phi}^{ij} \\ &\quad + \lambda_f \cdot \nabla \Delta N_{ab,f}^{ij} + \epsilon_{ab,f,\nabla \Delta \phi}^{ij} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Bei der geometrischen Methode der Mehrdeutigkeitslösung verwendet man möglichst genaue Näherungskoodinatendifferenzen für  $\Delta \vec{X}_{ab}$  und kann somit reelle Werte für  $\nabla \Delta N_{ab,f}^{ij}$  berechnen.

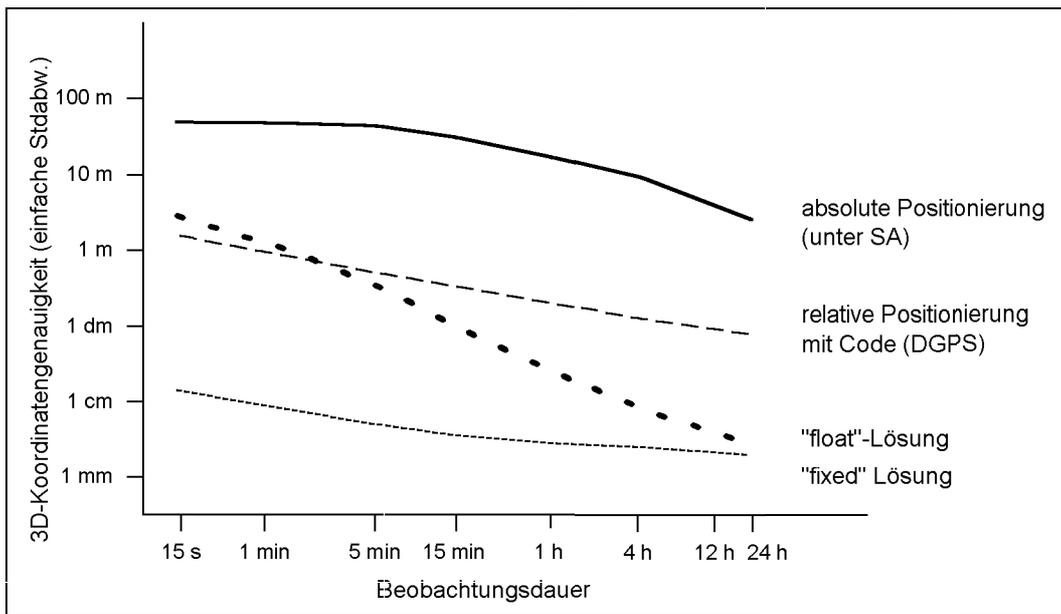


Abb. 2.2: Dreidimensionaler Punktfehler bei vier Arten der GPS-Positionierung und unterschiedlicher Meßdauer. Die Ergebnisse wurden empirisch ermittelt, bei den Relativmessungen aus den Daten einer kurzen Basislinie.

Aus (2.10) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta N_{ab,f}^{ij} = & 1/\lambda \cdot [\nabla \Delta \Phi_{ab}^{ij} - (\nabla \Delta R_{ab}^{ij} \\ & + \nabla \Delta M_{ab,f,\phi}^{ij} + k_{ab}^{ij} \\ & + \epsilon_{ab,f,\nabla \Delta \phi}^{ij})]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Der Einfluß der Fehler der Näherungskoodinatendifferenzen  $\Delta X_{ab}$  wird im Term  $k_{ab}^{ij}$  berücksichtigt. Sind die Einflüsse durch Mehrwegeeffekte, fehlerbehaftete Basislinienkoordinaten und Meßrauschen deutlich geringer als eine halbe Wellenlänge, können die Mehrdeutigkeiten zuverlässig auf ihre korrekte Zahl festgesetzt werden und fallen als Unbekannte aus Gleichung (2.10) heraus. Die Bedingung geringer Meßfehlerinflüsse für eine schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeitsfestsetzung ist um so schwerer zu erfüllen, je größer der Abstand der Meßstationen ist. Weitere Methoden der Mehrdeutigkeitsbestimmung und -festsetzung werden in den Unterkapiteln 2.2 und 2.3 behandelt.

Zwar besitzen nur Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten die Eigenschaft der Ganzzahligkeit, so daß nur sie auf ganze Zahlen festgesetzt werden können, doch müssen für diesen Vorgang nicht explizit Doppel-Differenz-Beobachtungen erzeugt werden. Ebenso ist die Verwendung undifferenzierter Beobachtungen nach Gl. (2.2) oder einfacher Differenzen nach Gl. (2.5) möglich. Anstatt die Uhrparameter zu eliminieren, werden diese dann geschätzt.

Einer der Vorteile der Auswertung mit undifferenzierten Beobachtungen ist die implizit korrekte und

damit vom Algorithmus her einfache Generierung der Kovarianzmatrix bei der Auswertung von GPS-Netzen (Goad 1985, Wübbena 1991). Zwar können auch bei Verwendung von Einfach- oder Doppel-Differenzen als Beobachtungsgrößen Korrelationen zwischen den Beobachtungen in GPS-Netzen streng berücksichtigt werden (Beutler u.a. 1986, 1987), doch steigt die Rechenzeit bei größeren Netzen und den damit häufiger vorkommenden Datenlücken auf einzelnen Stationen stark an. Bei Verwendung undifferenzierter Beobachtungen ergeben sich andererseits Nachteile bei Auswertungen einzelner Basislinien. Hier besteht ein erhöhter Speicher- und Rechenzeitbedarf gegenüber Ansätzen, die auf Beobachtungsdifferenzen beruhen.

Die für diese Arbeit notwendigen Auswertungen von regionalen GPS-Netzen erfolgte auf der Grundlage von undifferenzierten Beobachtungen. In jeder Meßepoche werden dabei neben den globalen Unbekannten (Koordinaten, Mehrdeutigkeiten etc.) epochenspezifische Parameter für Satellitenuhren und Empfängeruhren als Unbekannte angesetzt. Zur Vermeidung von Singularitäten wird dabei eine Empfängeruhr ausgenommen. Die epochenspezifischen Parameter werden nach jeder Meßepoche eliminiert, um die Gesamtzahl der Unbekannten klein zu halten (Elimination durch Blockzerlegung, Augath 1985). Um die zwischen den Mehrdeutigkeiten  $N_a^i$  bestehenden linearen Abhängigkeiten zu beseitigen, müssen einige Mehrdeutigkeiten vorab auf ganze Zahlen festgesetzt werden. Die Auswahl der dafür geeigneten Mehrdeutigkeiten gelingt z.B. durch Cholesky-Zerlegung der Normalgleichungsmatrix (Press u.a. 1992). Die verblei-

benden Mehrdeutigkeiten  $N_a^i$  entsprechen dann denen doppelter Differenzen.

GPS bietet mehrere Arten der Positionierung, die mit unterschiedlichem Meß- und Auswerteaufwand einen weiten Bereich von Genauigkeiten abdecken. Vier Arten der Positionierung, die gleichzeitig für vier Genauigkeitsstufen stehen, sollen hier unterschieden werden. In aller Regel werden bei der Positionierung mit GPS alle Stufen bis zur gewünschten Genauigkeitsstufe durchlaufen. Die jeweilige Vorstufe dient als Näherungslösung der ihr folgenden Stufe. In der Reihenfolge mit ansteigender Positionsgenauigkeit sind dies:

- **absolute Positionierung** unter Verwendung der Beobachtungsgleichung (2.1). Hauptfehlereinfluß sind die SA-bedingten Satellitenuhrenfehler.
- **relative Positionierung mit Codemessungen (DGPS)** unter Verwendung der Beobachtungsgleichung (2.4). Bei kurzen Basislinien ( $\leq 200$  km) ist der Hauptfehlereinfluß die Mehrwegeausbreitung. Ihr Einfluß kann durch Phasenglättung oder längerzeitige statische Messungen stark verringert werden.
- **die float-Lösung** basiert auf Phasemessungen und wird – je nach Grad der Beobachtungsdifferenzierung – unter Verwendung einer der Beobachtungsgleichungen (2.2), (2.5) oder (2.9) erzeugt. Die Mehrdeutigkeiten werden als reelle Zahlen mitgeschätzt, aber nicht auf ganze Zahlen festgesetzt.
- **die fixed-Lösung** basiert auch auf der Auswertung einer der drei Beobachtungsgleichungen (2.2), (2.5) oder (2.9). Hier gilt, daß alle oder zumindest ein Großteil der Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten in einem Vorverarbeitungsschritt auf ganze Zahlen festgesetzt wurden.

Die mit diesen Verfahren erzielbaren Genauigkeiten lassen sich durch statische Beobachtungen und damit Akkumulation von Beobachtungen über die Zeit deutlich erhöhen (Abb. 2.2). Zentimeter-genaue Koordinaten ergeben sich bei kurzer Beobachtungsdauer nur bei festgesetzten Mehrdeutigkeiten. Der Mehrdeutigkeitslösung kommt somit eine besondere Bedeutung zu.

## 2.2 Linearkombinationen der Phasemessungen

Aus Zweifrequenz-Phasemessungen (und auch Zweifrequenz-Codemessungen) können unendlich viele Linearkombinationen gebildet werden, die in

bezug auf frequenzabhängige Eigenheiten (Wellenlänge, Einfluß der Ionosphäre, Meßrauschen) zum Teil günstigere Eigenschaften aufweisen als die Ursprungssignale. Der Darstellung von *Wübbena (1989)* folgend werden Linearkombinationen der Phasemessungen nach

$$\phi_{n,m} = n \cdot \phi_1 + m \cdot \phi_2 \quad (2.12)$$

gebildet, wobei

- $\phi_1, \phi_2$  – die Phasemessungen auf  $L_1$  bzw.  $L_2$  in Zyklen [cy],
- $n, m$  – die Linearkoeffizienten [-] und
- $\phi_{n,m}$  – die Phasenbeobachtungen der Linearkombination

darstellen.

Die wichtigsten Auswahlkriterien für sinnvolle Linearkombinationen der Phasemessungen sind:

- die Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeit, die erreicht wird, wenn  $n$  und  $m$  ganzzahlig sind. Die Mehrdeutigkeit der Linearkombination  $N_{n,m}$  berechnet sich aus den  $L_1$ - und  $L_2$ -Mehrdeutigkeiten nach

$$N_{n,m} = n \cdot N_1 + m \cdot N_2. \quad (2.13)$$

- die Wellenlänge des Signals. Die Mehrdeutigkeitslösung nach (2.11) wird vereinfacht, wenn die Wellenlänge  $\lambda_{n,m}$  möglichst groß ist:

$$\lambda_{n,m} = c_0 / (n \cdot f_1 + m \cdot f_2). \quad (2.14)$$

- der ionosphärische Einfluß auf die Koordinatenlösung. Er wird hier durch den ionosphärischen Verstärkungsfaktor  $V_{I,n,m}$  wiedergegeben:

$$V_{I,n,m} = \frac{(n \cdot f_2 + m \cdot f_1)}{(n \cdot f_1 + m \cdot f_2)}. \quad (2.15)$$

- der ionosphärische Einfluß auf die Mehrdeutigkeitslösung. Er ist durch das Verhältnis von ionosphärischem Verstärkungsfaktor  $V_{I,n,m}$  zur Signalwellenlänge  $\lambda_{n,m}$  gegeben (*Wanninger 1994*).
- die Stärke des Meßrauschens, ausgehend von 0,1 rad (*ICD-GPS-200 1997*) unkorreliertem Phasenrauschen der Originalbeobachtungen. Sie hat Bedeutung für die Qualität der Koordinatenlösung.

$$\sigma_{n,m} = \lambda_{n,m} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot 0,1 / 2\pi. \quad (2.16)$$

	Signal	n	m	$\lambda$ [cm]	$V_I$	$V_I/\lambda$ [1/m]	$\sigma$ [cm]
Originalsignal	$L_1$	1	0	19,0	0,779	4,1	0,30
Originalsignal	$L_2$	0	1	24,4	1,283	5,3	0,39
Widelane	$L_W, L_5$	1	-1	86,2	-1,000	-1,2	1,94
Narrowlane	$L_N$	1	1	10,7	1,000	9,3	0,24
iono. gering beeinfl.	$L_{97}$	9	-7	5,4	0,004	0,1	0,97
geom. gering beeinfl.	$L_{79}$	-7	9	1465,3	273,000	18,6	265,89
ionosphären-frei	$L_0, L_3$	77	-60	0,6	0,000	0,0	0,98
geometrie-frei	$L_I, \sim L_4$	-60	77	$\infty$	$\infty$	-	-

Tab. 2.1: Die wichtigsten Linearkombinationen der Trägerphasen.

	$L_1$	$L_2$	$L_W$	$L_N$	$L_{97}$	$L_{79}$	$L_0$
$\nabla\Delta N_W$ festgesetzt	19,0	24,4	-	21,4	10,7	2930,5	10,7
$\nabla\Delta N_{79}$ festgesetzt	171,3	170,9	172,4	171,1	171,8	-	171,8

Tab. 2.2: Die wichtigsten effektiven Wellenlängen [cm].

Aufgrund ihrer Eigenschaften ergibt sich eine kleine Anzahl von Linearkombinationen, die für die präzise Positionierung mit GPS von Bedeutung sind (Tab. 2.1). Das ionosphären-freie Signal  $L_0$  wird bei größeren Punktabständen für die Koordinatenlösung verwendet. Der Vorteil der praktisch vollständigen Elimination des ionosphärischen Einflusses geht einher mit einer sehr kurzen Wellenlänge, die eine Mehrdeutigkeitslösung mit diesem Signal unmöglich macht, und der Verstärkung des Meßrauschens um einen Faktor von ungefähr drei gegenüber den Originalsignalen  $L_1$  und  $L_2$ . Um das ionosphären-freie Signal nutzen zu können, ist die Bestimmung ganzzahliger Mehrdeutigkeiten mit zwei beliebigen anderen Signalen notwendig. Die  $L_0$ -Mehrdeutigkeit kann dann nach (2.13) berechnet werden.

Die Lösung der Mehrdeutigkeiten ist für die *Widelane*  $L_W$  aufgrund dessen großer Wellenlänge besonders einfach. Die mit  $L_W$  erzeugbare Koordinatenlösung ist aber aufgrund des hohen Meßrauschens und des ionosphärischen Einflusses für präzise Anwendungen zu ungenau. Sie findet aber vielfach als sehr genaue Näherungslösung Verwendung. Eine weitere Besonderheit der *Widelane* besteht in der Möglichkeit, deren Mehrdeutigkeiten in der Differenz zu der *Narrowlane*-Linearkombination von Zweifrequenz-Codebeobachtungen zu bestimmen (Melbourne 1985, Wübbena 1985). Dieses Verfahren setzt das Vorhandensein genauer Zweifrequenz-Codebeobachtungen voraus, welches unter *Anti-Spoofing* und bei starker Mehrwegebeeinflussung erschwert ist. Vorteile dieses Verfahrens bestehen darin, daß es geometrie-frei arbeitet, also ohne Kenntnisse der Satellitenorbits und der Nutzerposition auskommt, und zusätzlich von Ionosphäre und Troposphäre nicht beeinflusst wird. Es wird dementspre-

chend bei sehr großen Punktentfernungen und bei kinematischen Anwendungen eingesetzt. Bei kurzen Basislinien kann die  $C_1$ -Beobachtung allein verwendet werden, wodurch unter *Anti-Spoofing* vielfach bessere Ergebnisse als mit Zweifrequenz-Codemessungen erzielt werden können.

Die *Narrowlane* hat besondere Bedeutung bei der Koordinatenschätzung. Sind die Mehrdeutigkeiten gelöst worden, können mit diesem Signal die genauesten Koordinaten berechnet werden, wenn die ionosphärische Refraktion keine Rolle spielt. Dies ist im allgemeinen nur bei kurzen Basislinien gegeben. Bei starker ionosphärischer Beeinflussung kann es von Vorteil sein, mit  $L_{97}$  Mehrdeutigkeitslösungen durchzuführen. Dieses Signal ist quasi-ionosphären-frei, hat aber auch nur eine relativ kurze Wellenlänge von 5,4 cm. Das quasi-geometrie-freie Signal  $L_{79}$  ist zur Koordinatenlösung nicht geeignet, wohl aber zur Mehrdeutigkeitslösung. Liegt eine nur geringe ionosphärische Beeinflussung vor (kurze Basislinie), können hiermit auch bei ungenauen Näherungskordinaten (z.B. aus DGPS) Mehrdeutigkeiten gelöst werden. Dieser Ansatz wird besonders bei kinematischen und kurzzeitig statischen Messungen verwendet.

Wird eine Mehrdeutigkeit in einer Linearkombination festgesetzt, so kann dies Auswirkungen auf die entsprechenden Mehrdeutigkeiten in anderen Linearkombinationen haben. Sie ergeben sich aus dem Zwang der Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeiten. Die effektiven Wellenlängen einiger Signale vervielfachen sich bei Mehrdeutigkeitsfestsetzungen z.B. der *Widelane* oder von  $L_{79}$  (Tab. 2.2). Verfahren, die die bei der Festsetzung von  $L_{79}$  entstehenden effektiven Wellenlängen von über 1,7 m nutzen, werden als „*Extra Wide Laning*“ bezeichnet (Wübbena 1988).

Wurde die  $L_W$ -Mehrdeutigkeit festgesetzt, also der ganzzahlige Anteil der Phasenmessungen so verändert, daß die  $L_W$ -Mehrdeutigkeit den Wert 0 erhält, so müssen die  $L_1$ - und  $L_2$ -Mehrdeutigkeiten identische Werte aufweisen, da die  $L_W$ -Mehrdeutigkeit die Differenz der  $L_1$ - und  $L_2$ -Mehrdeutigkeiten darstellt. Derselbe Mehrdeutigkeitswert ist dann auch der wahre Wert der Mehrdeutigkeiten aller anderen in Tabelle 2.2 erwähnten Linearkombinationen, wenn man deren effektive Wellenlängen berücksichtigt.

Die erfolgreichste und zuverlässigste Mehrdeutigkeitslösung läßt sich mit der simultanen Verarbeitung aller Meßgrößen (Zweifrequenz-Phase und -Code) erzielen. Von Vorteil ist weiterhin, wenn Meßfehler gering ausfallen. Dies ist insbesondere bei kurzen Basislinien (maximal wenige Kilometer Länge) der Fall. Hier sind die ionosphärischen Restfehler so gering, daß die Messungen der zweiten Frequenz nicht für die Bestimmung des ionosphärischen Einflusses genutzt werden müssen, sondern mit „*Extra Wide Laning*“-Ansätzen gearbeitet werden kann. Diese sind insbesondere dann erfolgreich, wenn auch die Mehrwegefehler gering ausfallen.

## 2.3 Mehrdeutigkeitssuchverfahren

Mehrdeutigkeitssuchverfahren betrachten nicht einzelne Mehrdeutigkeiten isoliert, sondern alle Mehrdeutigkeiten gemeinsam oder zumindest eine für die Koordinatenberechnung notwendige Mindestanzahl. Gesucht wird die Kombination von ganzzahligen Mehrdeutigkeitswerten, die eine Koordinatenlösung mit möglichst geringen Widersprüchen (kleinste Verbesserungsquadratsumme) erzeugt. In der Literatur der letzten Jahre finden sich viele Beispiele und Variationen dieser Algorithmen. Überblicke und Vergleiche verschiedener Ansätze findet man bei *Erickson (1992)*, *Hatch und Euler (1994)* sowie *Han und Rizos (1997b)*.

Die wesentlichen Arbeitsschritte der Suchverfahren sind:

- 1) Erzeuge eine möglichst gute Näherungslösung der Basislinienkoordinaten  $\Delta \vec{X}_{ab}$ . Die besten Ergebnisse sind mit kombinierten Auswertungen der Phasen- und Codebeobachtungen erzielbar. Bei kinematischen Anwendungen entspricht das Ergebnis im wesentlichen dem aus phasengeglätteten Codebeobachtungen (DGPS) und bei langzeitigen statischen Beobachtungen entspricht es dem einer *float*-Lösung (vgl. Abb. 2.2).
- 2) Berechne reelle Schätzwerte der gesuchten Mehrdeutigkeiten und erzeuge einen Suchraum der ganzzahligen Mehrdeutigkeitswerte, der in jedem Fall die wahren Werte enthält. Anstatt die originalen, untereinander korrelierten Mehrdeutigkeiten zu verwenden, können die Mehrdeutigkeiten auch in ein Set von dekorrelierten Mehrdeutigkeiten transformiert werden (*Teunissen 1995*). Dieses Verfahren begrenzt die Anzahl der ganzzahligen Mehrdeutigkeitskandidaten und beschleunigt damit die Suche nach dem korrekten Lösungsvektor.
- 3) Suche den Lösungsvektor mit der geringsten Verbesserungsquadratsumme. Eine frühzeitige Elimination von falschen Mehrdeutigkeitskombinationen beschleunigt den Auswerteprozess.
- 4) Entscheide, ob die beste Lösung auch eine eindeutige Lösung ist. Dies geschieht im allgemeinen über das Verhältnis der Verbesserungsquadratsummen der besten und zweitbesten Lösungen.

Mehrdeutigkeitssuchverfahren gehen im allgemeinen davon aus, daß nur geringe Doppel-Differenz-Meßfehler auftreten. Sie sind somit auf Anwendungen bei kurzen Basislinien beschränkt (maximal einige Kilometer Abstand der Punkte). Je größer die vorhandenen Meßfehler ausfallen, um so schwieriger wird die Unterscheidung der beiden besten Lösungen. In aller Regel wird dies dazu führen, daß keine eindeutige beste Lösung gefunden werden kann. Bei starken Meßfehlereinflüssen kann es aber auch vorkommen, daß eine falsche Mehrdeutigkeitskombination als beste und eindeutige Lösung gewählt wird.

Voraussetzung für den Einsatz von Mehrdeutigkeitssuchverfahren für Basislinien über einige Kilometer Länge ist also die Modellierung und effektive Reduzierung der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse.

### 3 Fehlerquellen und Fehlerverminderung bei der relativen Positionierung

Die bei der relativen Positionierung bedeutendsten Fehlerquellen lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe wird von denjenigen Fehlern gebildet, die durch relative Positionierung deutlich verringert werden können und deren verbleibende Restfehler in starkem Maße vom Abstand der Stationen abhängen. Es sind dies die Auswirkungen der Orbitfehler und die Refraktionseinflüsse durch Ionosphäre und Troposphäre. Die zweite Gruppe enthält die stationsabhängigen Fehlereinflüsse. Dies ist zum einen die Mehrwegeausbreitung, die zwischen Stationen unkorreliert ist und dementsprechend durch Relativmessungen nicht verringert werden kann. Zum anderen gehören hierzu die Antennenphasenzentrumsfehler, die nur bei speziellem Meßaufbau (baugleiche Antennen, gleiche Antennenausrichtung, kurze Basislinien) durch Relativauswertungen vermindert werden können und deren verbleibende Restfehler nicht vom Stationsabstand abhängig sind.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung und die Möglichkeiten, die einzelnen Fehlereinflüsse zu vermindern. Der Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung regionaler Netze und kurzer Beobachtungszeiten.

#### 3.1 Orbitfehler

Fehler der Satellitenorbits sind keine Beobachtungsfehler, aber durch die Einführung der Orbits in den Auswerteprozess wirken sie sowohl auf die Datenauswertung (Mehrdeutigkeitsbestimmung) wie auch auf die Koordinatenlösung.

Die mit Abstand am häufigsten verwendeten Orbits sind die sogenannten *broadcast*-Orbits, die als Teil der Navigationsnachricht von den Satelliten zur Verfügung gestellt werden. Sie werden aus den Orbitbestimmungen des GPS-Kontrollsegments, welche auf den GPS-Beobachtungen der fünf GPS-Monitorstationen beruhen, durch Prädiktion abgeleitet und den Satelliten übermittelt (*Francisco 1996*). Auch nach der Einführung von *Selective Availability* (SA) konnte (außer bei wenigen SA-Testbetrieben) keine Verschlechterung der *broadcast*-Orbits festgestellt werden, so daß man davon ausgehen kann, daß Orbit-SA nicht aktiviert ist. In Anbetracht der US-amerikanischen GPS-Politik, die die mittelfristige Abschaltung von SA beinhaltet (*The White House 1996*), ist mit einer Aktivierung auch kaum zu rechnen. Die im Vergleich zu präzisen Orbits ermittelte

Genauigkeit liegt um 3 m, wobei bei einzelnen Satelliten zum Teil deutlich größere Fehler auftreten können (*Kouba und Mireault 1997*). Die Untersuchung der für die GPS-Datenauswertung von drei Monaten Permanentbeobachtungen verwendeten *broadcast*-Orbits (November 1996 – Januar 1997) ergab, daß im Durchschnitt für einen Satellitendurchgang pro Woche Orbitfehler von 30 m bis maximal 50 m aufgetreten sind (*Wanninger 1997a*).

Seit einigen Jahren bietet der *International GPS Service* (IGS) weitere Orbitprodukte an, die augenblicklich kostenfrei zur Verfügung stehen und leicht erhalten und in die Datenauswertung implementiert werden können. Dies sind im einzelnen (*Kouba und Mireault 1997*):

- präzise IGS-Orbits: Seit 1994 werden die Orbitbestimmungen von sieben IGS-Analysezentren zu diesen kombinierten Orbits zusammengefaßt. Die Analysezentren verwenden für ihre Orbitberechnungen zwischen 30 und 120 der IGS-Stationen. Präzise IGS-Orbits stehen augenblicklich innerhalb von 11 Tagen nach Abschluß der Tagesmessungen zur Verfügung. Die aus den Widersprüchen zwischen Einzellösung und kombinierter Lösung abgeleitete Genauigkeit liegt unter 0,1 m.
- *rapid* IGS-Orbits: Sie stehen seit Mitte 1996 zur Verfügung, augenblicklich 22 Stunden nach Messungsschluß. Auch sie ergeben sich als kombinierte Lösung aus den Ergebnissen der sieben Analysezentren. Ihre Genauigkeit im Vergleich zu den präzisen Orbits wird mit 0,1 m angegeben.
- prädierte IGS-Orbits: Die meisten der IGS-Analysezentren prädizieren die GPS-Satellitenbahnen über zwei Tage. Auch hier wird eine kombinierte IGS-Lösung erzeugt, die für den Zeitraum 24 h – 48 h nach Messungsschluß als prädierte Orbits 30 Minuten vor Tagesbeginn zur Verfügung gestellt werden. Ihre Genauigkeit im Vergleich zu den präzisen Orbits wird mit 1 m und besser angegeben. Wie bei den *broadcast*-Orbits treten hier insbesondere, aber nicht ausschließlich, für eine kleine Gruppe von Satelliten zum Teil sehr viel größere Prädiktionsfehler auf.

Um die Literaturangaben zu ergänzen, wurden die verschiedenen GPS-Orbits für die zufällig gewähl-

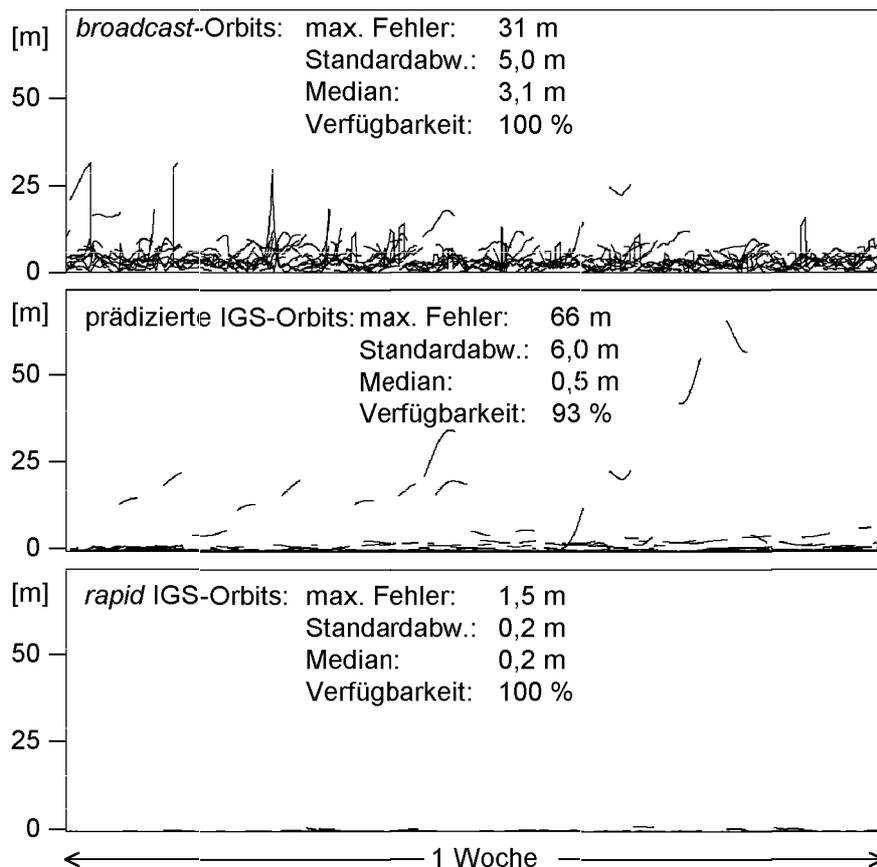


Abb. 3.1: Positionsfehler verschiedener GPS-Orbitarten im Vergleich zu präzisen IGS-Orbits, Verfügbarkeit der Orbitdaten, GPS-Woche 938.

te GPS-Woche 938 für über Mitteleuropa sichtbare Satellitendurchgänge in Differenz zu den präzisen IGS-Orbits ausgewertet und verglichen (Abb. 3.1). Die gegebenen Standardabweichungen fallen dabei schlechter aus als die oben erwähnten Angaben aus der Literatur, weil sie direkt aus den Satellitenkoordinatendifferenzen gerechnet wurden und nicht erst eine 7-Parameter Helmerttransformation zwischen den unterschiedlichen Orbitarten durchgeführt wurde. So gehen auch die Unterschiede der Bezugssysteme ITRF94 (IGS-Orbits) und WGS84 (*broadcast*-Orbits), die Dezimeter-Größenordnung erreichen (*Slater und Malys 1997*), in die Orbitfehlerberechnung mit ein.

Die *broadcast*- und die *rapid* IGS-Orbits entsprechen in ihrer Qualität den Literaturangaben. Die Fehler der prädierten IGS-Orbits liegen zwar zum größten Teil unter 1 m, aber bei insgesamt 13 Satellitendurchgängen wurden deutlich größere Fehler gefunden. Der maximale Wert beträgt 66 m. Große Orbitfehler (über 15 m) traten bei den prädierten Orbits häufiger auf als bei den *broadcast*-Orbits. Die Analyse von sechs Wochen (936-941) Daten prädiertter Orbits ergab ein entsprechendes Bild, wobei drei Satelliten (PRN Nr. 14, 16 und 24) häufig große Fehler auf-

wiesen und weitere vier Satelliten nur ein- oder zweimal im Gesamtzeitraum. Die meisten der betroffenen Satelliten gehören zur Gruppe der Block-II-Satelliten, aber auch Block-IIa-Satelliten sind betroffen. Eine besondere Häufung großer Fehler bei Satellitenbahnen, die den Erdschatten durchqueren und damit schwerer zu modellieren sind, ist nicht zu erkennen. Auch die bei der Kombination der Einzellösungen zu den prädierten IGS-Orbits anfallenden Genauigkeitsangaben zu den einzelnen Orbits lassen keine Rückschlüsse auf Bahnen mit großen Fehlern zu. Es besteht somit keine Möglichkeit, Bahnen mit großen Fehlern zu identifizieren und zu eliminieren.

Prädierte IGS-Orbits stehen nicht für alle aktiven Satelliten zur Verfügung. Die durchschnittliche Verfügbarkeit in der Woche 938 betrug 93%. Der Vergleich mit anderen Wochen ergab, daß sie sonst eher etwas höher liegt. Als Nutzer prädiertter IGS-Orbits ist man also darauf angewiesen, bei deren Fehlen auf die *broadcast*-Orbits einzelner Satelliten zurückzugreifen, wenn man nicht eine Einschränkung der Verfügbarkeit der GPS-Positionierung in Kauf nehmen will.

Die Wirkung der Orbitfehler auf die einfache Differenz der Beobachtungen hängt von einer ganzen Rei-

he von variierenden Faktoren ab und wird in der Literatur nur wenig behandelt.

Dagegen hat folgende Faustformel von Bauersima 1983 (*Beutler 1996*) über die Fortpflanzung der Orbitfehler in die Basislinienkoordinaten weite Verbreitung gefunden:

$$\frac{|\vec{d}l|}{l} = \frac{|\vec{d}O|}{R}. \quad (3.1)$$

Sie besagt, daß das Verhältnis von Orbitfehler  $|\vec{d}O|$  zur mittleren Entfernung  $R$  zwischen Stationen und Satellit dem Verhältnis von Basislinienfehler  $|\vec{d}l|$  zur Basislinienlänge  $l$  entspricht. Der Einfluß ist also in erster Näherung linear zur Basislinienlänge. Gleichung (3.1) bezieht sich auf alle drei Komponenten des Basislinienfehlervektors. Betrachtet man nur die Länge der Basislinie und damit insbesondere die Lagekomponenten, so fallen die Fehler um eine halbe bis ganze Größenordnung geringer aus (*Zielinski 1988*). Auch bei dieser Fehlerabschätzung ist die lineare Abhängigkeit von der Basislinienlänge erkennbar.

### 3.2 Ionosphärische Refraktion

Unter ionosphärischer Refraktion versteht man die für Mikrowellen dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung der Signale in der oberen Atmosphäre (Ionosphäre und Protonosphäre). Mit Hilfe der GPS-Zweifrequenzmessungen kann die ionosphärische Refraktion praktisch vollständig erfaßt und eliminiert werden. Trotzdem werden auch Zweifrequenz-Nutzer beeinträchtigt (*Wanninger 1994*):

- Die Zweifrequenzkorrektur geht einher mit einer Verstärkung der Mehrwegefehler und des Meßrauschens. Bei einigen Anwendungen kann es deswegen sinnvoll sein, auf die ionosphärische Zweifrequenz-Korrektur zugunsten eines geringeren Meßrauschens zu verzichten.
- Die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten gelingt auch bei Zweifrequenz-Beobachtungen schneller und zuverlässiger, wenn die ionosphärischen Einflüsse auf die Relativmessungen verschwindend gering sind.
- Kleinräumige ionosphärische Störungen können das Empfängermeßverhalten negativ beeinflussen und zu einem verstärkten Auftreten von Cycle-Slips oder sogar längeren Datenausfällen führen.

Der für die ionosphärische Refraktion entscheidende Elektronengehalt der Ionosphäre unterliegt starken räumlichen (höhen- und breitenabhängigen) und

zeitlichen (tageszeit- und jahreszeitlichen, sonnenaktivitätsabhängigen) Variationen. Die tageszeitlich stärkste Ionisierung tritt nach dem Sonnenhöchststand auf, die geringste Ionisierung vor Sonnenaufgang. Die breitenabhängig stärkste Ionisierung findet man in der Äquatorregion ( $\pm 30^\circ$  magnetische Breite), die geringste Ionisierung im Grenzgebiet zwischen mittleren Breiten ( $\pm (30-65)^\circ$  magnetische Breite) und den Polarregionen ( $\pm (65-90)^\circ$  magnetische Breite). Dementsprechend finden sich in der Äquatorregion auch die stärksten großräumigen horizontalen Gradienten des Elektronengehalts, die bei der relativen GPS-Positionierung vielfach von ähnlich großer Bedeutung sind wie der absolute Elektronengehalt. Kleinräumige ionosphärische Störungen, die Phasen- und Amplitudenzintillationen verursachen, treten in ihrer stärksten Form in der Äquatorregion auf. Häufiger, aber nicht so stark ausgeprägt, sind sie auch in den Polarregionen anzutreffen. Die mittleren Breiten sind davon nur bei sehr starken magnetischen Stürmen betroffen.

Wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe (Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances - MSTIDs) sind dagegen in mittleren Breiten häufiger anzutreffen. Sie stellen für die präzise relative Positionierung mit GPS bei Beobachtungsdauern unter 20 Minuten ein großes Problem dar (*Wanninger 1993*).

Neben der Zweifrequenzkorrektur ist die relative GPS-Positionierung die effektivste Methode zur Verringerung der Auswirkung ionosphärischer Refraktion. So liefert die Einfrequenz-Koordinatenbestimmung im Entfernungsbereich bis zu wenigen km genauere Ergebnisse als die Zweifrequenz-Koordinatenbestimmung. Eine exaktere Entfernungsbereichsangabe ist nicht möglich, da hierbei eine Vielzahl von Faktoren Einfluß nehmen. Der Entfernungsbereich ist um so geringer, je stärker der absolute Elektronengehalt ist und je ausgeprägter großräumige Gradienten und ionosphärische Störungen sind.

Eine weitere Möglichkeit, den Einfluß der ionosphärischen Refraktion zu verringern, besteht in der Anwendung von Modellen. Bei deren Betrachtung sollen Prädiktionsmodelle ausgeschlossen werden, da sie aufgrund der großen zeitlichen Variabilität der Ionosphäre selbst das Monatsmittel des integrierten Elektronengehalts nur ungenügend erfassen (*Brown u.a. 1991*) und damit für die relative Positionierung nicht in Frage kommen. Vielmehr bietet sich an, aktuelle Modelle aus den Zweifrequenz-GPS-Messungen selbst abzuleiten.

Als Meßgrößen werden dafür genutzt:

- Code-Messungen (*Lanyi und Roth 1988, Manucci u.a. 1993*): die Laufzeitdifferenz der

Zweifrequenz-Codemessungen ist nicht direkt proportional zum ionosphärischen Elektronengehalt, sondern wird von differentiellen instrumentellen Laufzeitverzögerungen sowohl im Satelliten wie auch im Empfänger verfälscht. Diese Laufzeitverzögerungen müssen im Auswerteprozess mitgeschätzt oder als Kalibrierungswerte eingeführt werden (*Sardón und Zarraoa 1997*). Zur Verringerung der Mehrwegeeffekte und des Meßrauschens werden im allgemeinen phasengeglättete Codebeobachtungen (Echtzeit) oder auf das Codeniveau korrigierte Phasenbeobachtungen (*Post-Processing*) genutzt.

- undifferenzierte Phasenmessungen (*Georgiadou und Kleusberg 1988a, Wild u.a. 1989*): bei alleiniger Verwendung der Phasendaten muß pro Station und Satellit und auch für jeden nicht beseitigten Cycle-Slip eine Unbekannte mitgeschätzt werden, die die Summe aus Phasenmehrdeutigkeit und differentiellen instrumentellen Verzögerungen der Phasendaten erfaßt.
- differenzierte Phasenmessungen (*Schaer u.a. 1995*): insbesondere nach Festsetzung der Doppeldifferenz-Phasenmehrdeutigkeiten kann der Elektronengehalt auch aus differenzierten Phasenbeobachtungen abgeleitet werden. Voraussetzungen sind möglichst unterschiedliche Elevationswinkel, unter denen identische Signale auf verschiedenen Stationen empfangen werden, d.h. möglichst große Abstände zwischen den Stationen.

Alle in der Literatur behandelten Modelle beschreiben die Ionosphäre als zweidimensionales Ein-Schicht-Modell in der Form einer Kugelschale (*Single-Layer-Modell*, siehe auch Abb. 4.7). Dabei ergibt sich der Einfluß der ionosphärischen Refraktion  $I_f$  auf eine Messung aus vertikalem Elektronengehalt  $VEC$  am Durchstoßpunkt des Signals durch die Ionosphärenschicht, skaliert mit dem zugehörigen Wert der ionosphärischen Mapping-Funktion  $m_I$ , (z.B. *Wanninger 1994*):

$$I_f = -\frac{1}{2} \frac{A}{f^2} \cdot m_I \cdot VEC \quad (3.2)$$

mit

$$m_I = \frac{1}{\cos z^I} \quad (3.3)$$

$$z^I = \arcsin \left( \frac{r_e}{r_e + h_I} \sin z \right) \quad (3.4)$$

wobei

- $A$  - 80,6 [ $m^3 s^{-2}$ ],
- $f$  - Signalfrequenz [Hz],
- $z$  - Zenitdistanz [rad],
- $z^I$  - Zenitdistanz in der mittleren Ionosphärenhöhe [rad],
- $r_e$  - Erdradius [m],
- $h_I$  - mittlere Ionosphärenhöhe [m],  
z.B. 400 km.

Der vertikale Elektronengehalt VEC wird auf die Koordinaten des Schnittpunktes des Satellitensignals mit der Kugelschale bezogen. Die Modelle werden in einem Koordinatensystem von geographischer/geomagnetischer Breite  $\phi$  und Ortszeit  $t_O$  dargestellt.

Die Beschreibung des vertikalen Elektronengehalts erfolgt über:

- zweidimensionale Polynome bei lokalen und regionalen Anwendungen (*Lanyi und Roth 1988, Georgiadou und Kleusberg 1988a, Wild u.a. 1989*):

$$VEC(\phi, t_O) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} a_{nm} \cdot (\phi - \phi^0)^n \cdot (t_O - t_O^0)^m \quad (3.5)$$

mit

- $n_{max}, m_{max}$  - maximale Grade der Polynome, vielfach (1,2), oft ohne gemischte Glieder,
- $a_{nm}$  - die Modellkoeffizienten,
- $\phi^0, t_O^0$  - Koordinaten des Polynomursprungs.

- Kugelfunktionsentwicklungen bei kontinentalen und globalen Anwendungen (*Wilson und Manucci 1993, Schaer u.a. 1995*):

$$VEC(\phi, t_O) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos mt_O + b_{nm} \sin mt_O) \cdot P_{nm}(\sin \phi) \quad (3.6)$$

$$m_{max} \leq n_{max}$$

wobei

- $n_{max}, m_{max}$  - Grad und Ordnung der Kugelfunktionsentwicklung,
- $a_{nm}, b_{nm}$  - die Modellkoeffizienten
- $P_{nm}$  - normierte zugeordnete Legendresche Funktionen (*Heiskanen und Moritz 1967*)

darstellen.

- globales (oder regionales) Dreiecksnetz, für deren Eckpunkte der vertikale Elektronengehalt als stochastischer Prozeß geschätzt wird und wobei innerhalb der Dreiecke Interpolationsalgorithmen angewandt werden (*Mannucci u.a. 1993*).

Alle genannten Ansätze können nur großräumige Strukturen der Ionosphäre beschreiben. Kleinräumige und kurzperiodische Erscheinungen werden aufgrund der begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modelle nicht erfaßt. Die Modelle liefern daher für viele Anwendungen der präzisen relativen und schnellen GPS-Positionierung keine ausreichend genauen Korrekturen. Eine Erfassung kleinräumiger Strukturen gelingt nur unter Verwendung mehrerer Referenzstationen eines regionalen Netzes und differentieller, satellitenindividueller Modellierung (*Webster und Kleusberg 1992, Wanninger 1995b*), wie sie im Rahmen dieser Arbeit angewendet wird (Kapitel 4).

Der absolute Elektronengehalt der Ionosphäre wirkt sich auf die Einfrequenz-Auswertung bei der relativen Positionierung in erster Linie in der Form eines Maßstabfehlers von der Größe 0,6 – 0,7 ppm für  $10 \cdot 10^{16}$  Elektronen pro  $m^2$  VEC aus (*Santerre 1989*). In mittleren Breiten ist also mit maximal wenigen ppm Fehler zu rechnen, in Jahren geringer Sonnenaktivität mit weniger als 1 ppm. Hinzu kommen die Fehlereinflüsse, die durch großräumige Gradienten verursacht werden, die aufgrund tageszeitlicher oder breitenabhängiger Variationen des Elektronengehalts entstehen. Ihre Auswirkungen liegen in mittleren Breiten im Bereich von unter einem bis zu wenigen ppm und betreffen alle drei Koordinatenkomponenten. Aufgrund der stärkeren Ionisierung in der Äquatorregion führen beide genannten Fehlergruppen dort zu deutlich größeren Koordinatenfehlern.

Hinzu kommen die Fehleranteile aufgrund ionosphärischer Störungen. Sie wirken sich insbesondere auf kurzzeitige Messungen aus. So muß beim Auftreten von MSTIDs bei Meßdauern von weniger als 10 bis 20 Minuten mit Koordinatenfehlern von einigen Zentimetern selbst bei Basislinien von weniger als 10 km Länge gerechnet werden. Bei einer längeren Meßdauer mitteln sich die Effekte weitgehend heraus (*Wanninger 1993*).

### 3.3 Troposphärische Refraktion

Unter troposphärischer Refraktion versteht man die für Mikrowellen nicht dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung der Signale in der unteren Atmosphäre (Troposphäre und Stratosphäre). Man unterteilt den troposphärischen Einfluß in eine trockene

Komponente, die im wesentlichen vom Luftdruck und der Temperatur abhängig ist, und in eine vom Wasserdampfgehalt bestimmte feuchte Komponente. Die trockene Komponente stellt den größeren Anteil (90%) dar. Sie ist aber geringeren räumlichen und zeitlichen Veränderungen unterworfen und besser modellierbar als die Feuchtkomponente.

Die troposphärische Refraktion wird bei der GPS-Auswertung durch Standardtroposphärenmodelle erfaßt und weitgehend beseitigt. Die Einführung von an den GPS-Punkten durchgeführten Wettermessungen führt aufgrund lokaler Anomalien im allgemeinen nicht zu besseren Ergebnissen.

Die Standardmodelle bestehen meistens aus folgenden Komponenten:

- konstante Standardwerte für Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtwerte für eine Referenzhöhe (0 m),
- Modelle zur Umrechnung dieser Standardwerte von der Referenzhöhe auf die tatsächliche Stationshöhe,
- Modelle zur Berechnung der Zenitverzögerung aus den Standardwerten und der Stationshöhe (z.T. auch der geographischen Breite der Station), hier wird im allgemeinen zwischen Trocken- und Feuchtkomponente unterschieden.
- Modelle für troposphärische *Mapping*-Funktionen, die die Umrechnung der Zenitverzögerung auf die Verzögerung unter einem gegebenen Elevationswinkel erlauben. Auch hier wird vielfach zwischen Trocken- und Feuchtkomponente unterschieden.

Die existierenden Modelle der *Mapping*-Funktionen liefern für Elevationswinkel über 15 Grad vielfach vergleichbare Ergebnisse. Bei niedrigeren Elevationswinkeln gibt es aber zum Teil beträchtliche Unterschiede. Vergleiche verschiedener *Mapping*-Funktionen mit tatsächlichen Refraktionsbedingungen, die aus Radiosondenmessungen abgeleitet wurden, zeigen (*Mendes und Langley 1994*), daß z.B. die Modelle von *Herring (1992)* und *Niell (1996)* bei niedrigen Elevationswinkeln deutlich bessere Ergebnisse liefern als viele der heutzutage bei GPS-Auswertungen eingesetzten Modelle, wie z.B. die von *Saastamoinen (1973)*, *Goad und Goodman (1974)* oder *Black (1978)*. Alle hier genannten Modelle der troposphärischen *Mapping*-Funktionen kommen ohne gemessene Wetterparameter aus und sind dementsprechend einfach anzuwenden.

Die verbleibenden Fehler nach Anbringung der troposphärischen Korrektur aus Standardmodellen werden im allgemeinen durch die Differenzbildung bei der

relativen Positionierung vermindert. Für kleinräumige Netze (bis 20 km), bei geringen Höhenunterschieden (bis 100 m) und bei weitgehend homogenen Refraktionsbedingungen (keine starken Temperatur- und Feuchtgradienten, keine Inversionswetterlagen etc.) liegen die Restfehler im mm-Bereich.

Bei großräumigeren Netzen, größeren Höhenunterschieden, inhomogenen oder den Standardmodellen widersprechenden Refraktionsbedingungen können die troposphärischen Restfehler durch Einführung eines Zenitparameters  $dT^z$  pro Station in der GPS-Auswertung erfaßt werden. Der Zusammenhang zum Fehler einer Einzelbeobachtung ergibt sich aus

$$dT = m_T \cdot dT^z \quad (3.7)$$

mit

- $dT$  – troposphärische Restverzögerung,
- $m_T$  – troposphärische Mapping-Funktion,
- $dT^z$  – troposphärische Restverzögerung in Zenitrichtung.

Dabei wird entweder ein konstanter Zenitparameter pro Beobachtungszeitraum von einer oder mehreren Stunden angesetzt oder die Parameter werden als zeitvariante stochastische Prozesse geschätzt. In kleinräumigen Netzen sollte aufgrund der hohen Korrelation der Zenitparameter dieser für eine Station nicht angesetzt werden, so daß nur relative troposphärische Einflüsse berücksichtigt werden (*Rothacher und Mervart 1996*). Es werden dann für alle Stationen  $b$  die troposphärischen Restverzögerungen in Zenitrichtung relativ zur gewählten Station  $a$  durch

$$\Delta dT_{ab} = m_T \cdot \Delta dT_{ab}^z \quad (3.8)$$

bestimmt, wobei

- $\Delta dT_{ab}$  – Differenz der troposphärischen Restverzögerungen zwischen den Stationen  $a$  und  $b$ ,
- $\Delta dT_{ab}^z$  – Differenz der troposphärischen Restverzögerungen in Zenitrichtung zwischen den Stationen  $a$  und  $b$ .

Aufgrund der vorausgesetzten geringen Entfernung zwischen den Stationen bleiben die stationsabhängigen Differenzen der Mapping-Funktionen so klein, daß sie vernachlässigt werden können.

Die Einführung von Zenitparametern führt aufgrund deren hoher Korrelation mit den Stationshöhen zu ungünstigeren Fehlerfortpflanzungen der zufälligen Fehleranteile in die Stationshöhen. Während bei einer Elevationsmaske von 15 Grad ohne Zenitparameter die Höhengenaugigkeit um ungefähr einen Faktor von 3 schlechter bestimmt werden kann als die der Lagekomponenten, verschlechtert sich dieses Verhältnis bei Einführung von Zenitparametern auf 6. Die

Schätzung von troposphärischen Zenitparametern in der GPS-Auswertung macht also nur Sinn, wenn tatsächlich Restverzögerungen noch vorhanden sind (z.B. bei großräumigen Netzen) und somit systematische Fehler erfaßt werden können. Durch Hinzunahme von Beobachtungen unter niedrigeren Elevationen kann die Korrelation zwischen Zenitparametern und Höhen gesenkt werden und damit beide Gruppen von Unbekannten genauer geschätzt werden (*Santerre 1989, Yunck 1993*). Die Hinzunahme von Beobachtungen unter niedrigen Elevationen sollte nur durchgeführt werden, wenn Zenitparameter mitgeschätzt werden, weil die troposphärisch bedingten Fehler bei diesen Beobachtungen besonders groß ausfallen. Weiterhin ist zu beachten, daß der Hinzunahme von Daten niedriger Elevationen aufgrund zunehmender Mehrwegeinflüsse und abnehmender Datenverfügbarkeit Grenzen gesetzt sind.

Beim Ansatz eines Zenitparameters pro Station geht man davon aus, daß an den einzelnen Meßstationen keine Azimutabhängigkeit der troposphärischen Refraktion existiert. Um zusätzlich Gradienten zu erfassen, kann der Ansatz (3.7) wie folgt erweitert werden (*Herring 1992, MacMillan 1995, Rothacher u.a. 1997*):

$$dT = m_T \cdot dT^z + \frac{dm_T}{de} \cdot (\cos \alpha \cdot dT^n + \sin \alpha \cdot dT^e) \quad (3.9)$$

mit

- $dm_T/de$  – Ableitung der troposphärischen Mapping-Funktion nach der Elevation,
- $\alpha$  – Azimut des Satelliten,
- $dT^n$  – Gradientenparameter in Nord-Süd-Richtung,
- $dT^e$  – Gradientenparameter in Ost-West-Richtung.

Die zusätzliche Schätzung von Gradientenparametern führt insbesondere zu einer Verbesserung der Lagekoordinaten.

Nicht modellierte oder eliminierte Restfehler der troposphärischen Refraktion wirken besonders auf die Höhenkoordinate: jeder relative troposphärische Fehler von 1 mm bewirkt einen Höhenfehler von ungefähr 3 mm (*Santerre 1989*). Die weiteren Einflüsse auf die Koordinaten fallen sehr viel geringer aus. Die Azimutabhängigkeit der Restfehler wirkt sich auf die Lagekoordinaten aus. Die Verbesserung der Wiederholungsgenauigkeit der Lagekoordinaten bei Schätzung troposphärischer Gradienten zeigt dies deutlich auf (*Rothacher u.a. 1997*). Weiterhin führen absolute troposphärische Fehler zu einem Maßstabsfehler der Relativkoordinaten. Seine Größe wird mit 0,01 ppm je 2 cm Restfehler abgeschätzt (*Beutler u.a. 1988*).

### 3.4 Mehrwegeausbreitung

Mehrwegeausbreitung bedeutet, daß nicht nur das Satellitensignal direkt die Empfangsantenne erreicht, sondern auch in der Empfangsantennenenumgebung reflektierte Signale, die sich dem direkten Signal überlagern. Die indirekten Signale weisen eine längere Laufzeit als das direkte Signal auf und erfahren eine Veränderung der zirkularen Rechtspolarisierung der Ursprungssignale. Inwieweit das direkte Signal verfälscht wird, hängt von den Reflexionseigenschaften in der Empfangsantennenenumgebung und vom Antennenempfangsverhalten ab.

Mehrwegeausbreitung beeinflusst die Signalamplitude und die Messungen des Codes und der Trägermischphase. Der Einfluß auf die Codemessungen ist um ungefähr zwei Größenordnungen stärker (dm – m) als der Einfluß auf die Phasemessungen (mm – cm). Aufgrund der sich ändernden Umwegelängen haben alle Mehrwegeeffekte einen stark periodischen Charakter. Für statische Empfänger ergeben sich im Zusammenhang mit der Bewegung der GPS-Satelliten typische Perioden von Stunden bei einem Abstand Reflektor – Antenne von weniger als einem Meter und wenigen Minuten bei Abständen von mehreren Metern (*Georgiadou und Kleusberg 1988b*). Dabei gehen maximale Codefehler einher mit maximaler Beeinflussung der Signalamplitude und gleichzeitig minimalen (Nulldurchgang) Phasenfehlern. Maximale Phasenfehler andererseits treten gleichzeitig mit minimalen (Nulldurchgang) Codefehlern und minimaler Signalamplitudenbeeinflussung auf (*Axelrad u.a. 1994, Sleewaegen 1997*).

Die Verringerung der Mehrwegeausbreitung kann auf drei Ebenen erfolgen:

- vor der Signalverarbeitung durch Auswahl der Meßumgebung und des Antennendesigns,
- durch die Signalverarbeitung,
- nach der Signalverarbeitung durch Weiterverarbeitung der Meßgrößen.

Durch keine Technik ist eine vollkommene Beseitigung der Mehrwegebeeinflussung erzielbar, so daß nur ein Zusammenwirken von mehreren Ansätzen aller drei Ebenen optimale Ergebnisse erzeugen kann.

Die Auswahl einer geeigneten Meßumgebung ist die effektivste Methode, um Mehrwegeeffekte zu minimieren. Reflektoren oberhalb des Antennenhorizonts und starke Reflektoren unterhalb des Antennenhorizonts sollten vermieden werden. Oft ist eine Vermeidung einer Umgebung mit starken Mehrwegeeffekten aber aufgrund anderer Restriktionen bei der Meßpunktwahl nicht möglich. Gerade GPS-Referenzstationen weisen vielfach starke Mehrwege-

effekte auf, wenn sie auf Gebäudedächern installiert werden.

GPS-Antennen können in Bezug auf Mehrwegeeffekte optimiert werden, indem sie eine geringe Empfindlichkeit in Antennenhorizontnähe und unterhalb des Horizonts aufweisen und maximale Empfindlichkeit für zirkular rechtspolarisierte Signale besitzen (*Braasch 1996*). Vergrößerte Antennengrundplatten sollen unterhalb des Antennenhorizonts reflektierte Signale abschirmen. Aufgrund von Signalbeugungserscheinungen an der Grundplattenkante ist die Abschirmung aber nur begrenzt erfolgreich. Eine Verbesserung tritt ein, wenn auf der Grundplatte *Choke-Ring*-Elemente montiert sind. Grundplatte und *Choke-Ring*-Elemente wirken aber nicht auf Signale, die von oberhalb des Antennenhorizonts einstrahlen (*Weill 1997*).

Bei der Verringerung der Mehrwegebeeinflussung durch die Signalverarbeitung wurden in den 90er Jahren etliche Fortschritte erzielt. Dabei wurde sich lange auf C/A-Code-Messungen konzentriert. Erst seit 1995 finden sich in der Literatur verstärkt Quellen, die sich auch mit der Reduzierung der Phasenfehler beschäftigen. Die wichtigsten Techniken sind:

- *Narrow*-Korrelator, bei dem der Abstand des beim Meßvorgang verwendeten Korrelatorenpaares auf 1/10 bis 1/20 der Signal-Chiplänge verkleinert wird und die Eingangsbandbreite auf 8 MHz oder mehr vergrößert wird (*Van Dierendonck u.a. 1992, Weill 1997*).
- MEDLL-Technik (*MEDLL - Multipath Estimating Delay Lock Loop*), bei der es durch Erhöhung der Anzahl von Korrelatoren auf 10 oder mehr gelingt, die Korrelationsfunktion detailliert zu erfassen und somit den Einfluß einzelner Mehrwegesignale zu bestimmen und zu eliminieren (*Townsend u.a. 1995*).
- weitere Techniken sind in der Entwicklung, die ähnliche Resultate wie die MEDLL-Technik erzielen, aber ohne den dabei notwendigen geräte-technischen Aufwand für eine große Anzahl von Korrelatoren. In der Literatur finden sich aber keine Einzelheiten zu den Funktionsweisen dieser Techniken: Strobe-Korrelator (*Garin und Rousseau 1997*), MM-Korrelator (*Hatch u.a. 1997*).

Allen genannten Techniken gelingt eine Trennung von direktem und indirekten Signalen nur, wenn der zusätzliche Weg der Umwegsignale 10 m oder deutlich mehr beträgt. Bei kürzeren zusätzlichen Wegen wird die Mehrwegebeeinflussung des resultierenden Signals durch diese Techniken nicht vermindert. Gerade Phasemessungen erfahren aber auch bei kurzen Umwegen maximale Fehler, so daß hier bisher kaum Fortschritte erzielt werden konnten. Bei geodätischen

Anwendungen, bei denen sich die Signalreflektoren vielfach im geringen Abstand (wenige Meter) von der Empfangsantenne befinden, sind diese Techniken also weitgehend wirkungslos.

Nach der Signalverarbeitung liegen Code-, Trägermischphasen- und Signalamplitudenmessungen vor, je nach Empfängertyp für Messungen auf der ersten Frequenz oder auf beiden Frequenzen. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften der Mehrwegefehler werden folgende Techniken eingesetzt, um deren Einfluß auf die Mehrdeutigkeitslösung und Koordinatenbestimmung zu vermindern:

- Die bei geodätischen Messungen am weitesten verbreitete Methode ist die Durchführung statischer Messungen und damit eine Mittelung der Mehrwegefehler über die Sessiondauer. Bei typischen Perioden der Mehrwegefehler von wenigen Minuten sind minimale Beobachtungsdauern in dieser Größenordnung notwendig, um den Fehlerinfluß deutlich zu senken.
- Die Codemehrwegefehler können durch Glättung mit den weniger beeinflussten Phasenmessungen stark vermindert werden (Hatch-Filter, *Hatch 1982*). Bei Einfrequenz-Messungen wird die Glättungswirkung dadurch begrenzt, daß die unterschiedliche Wirkung der Ionosphäre auf Code und Phase berücksichtigt werden muß. Mit Zweifrequenz-Phasenmessungen wird diese Limitierung überwunden.
- Aus der Differenz von Code- und Zweifrequenz-Phasenmessungen kann die Codemehrwegebeeinflussung berechnet werden. Geht man davon aus, daß bei Referenzstationen mit unveränderter Empfangsantennenumgebung die Mehrwegefehler für Signale, die unter gleichem Einfallswinkel empfangen werden, identisch sind, so können in Echtzeit Korrekturen an die Codebeobachtungen angebracht werden, die aus älteren Daten abgeleitet wurden. Die Korrekturmodelle können entweder für jede Satellitenbahn einzeln gespeichert werden, da sich jede Satellitenbahn ungefähr nach 24 h Sternzeit wiederholt (*Bishop u.a. 1994*) oder als Kugelfunktionsmodell, wobei zwar weniger Koeffizienten abgespeichert werden müssen, aber gleichzeitig eine geringere räumliche Auflösung erreicht wird (*Kee und Parkinson 1994*). Eine Verbesserung der Ergebnisse wird erreicht, wenn man die Veränderungen der Signalstärke bei Satellitensignalen mit gleichem Einfallswinkel nutzt, um Variationen der Codemehrwegeeffekte abzuleiten und zu korrigieren (*Sleewaegen 1997*).
- Die Informationen der Signalamplitude können auch direkt zur Korrektur der Phasenmehrwegeeffekte verwendet werden (*Axelrad u.a. 1994*).

Echtzeit-Anwendungen sind denkbar.

- Liegen simultane Messungsdaten von mehreren Antennen vor, so kann ausgenutzt werden, daß Mehrwegeeffekte auch schon bei geringem Antennenabstand unkorreliert sind. Durch Zusammenfassung der korrespondierenden Messungen können so die Mehrwegeeffekte deutlich verringert werden. Die Anwendung dieser Technik setzt die Kenntnis der Koordinatendifferenzen zwischen den Antennen und bei Anwendung auf Phasendaten die Lösung der Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten voraus (*Raquet 1996, Wanninger 1997a*, siehe auch Kapitel 4).

Die große Anzahl von Ansätzen zur Verminderung der Mehrwegeeffekte deutet darauf hin, daß die Problematik bisher nicht befriedigend gelöst werden konnte. Da auch im Vermessungswesen die Entwicklung auf immer kürzere Meßzeiten hingeht, nimmt die Bedeutung der Mehrwegeausbreitung als Fehlerquelle zu. Mehrwegeeffekte sind einer der Hauptgründe, warum bei wenigen Sekunden Messung 1 cm-Genauigkeit in der Lage nicht garantiert werden kann.

### 3.5 Antennenphasenzentren

Das geometrische Phasenzentrum von GPS-Antennen fällt nicht exakt mit dem elektrischen Phasenzentrum zusammen. Darüber hinaus ist das wirksame elektrische Phasenzentrum eine Funktion der Richtung, aus der das Satellitensignal eintrifft. Der Abstand zwischen elektrischem und geometrischem Zentrum beträgt bei geodätischen Antennen Millimeter bis wenige Zentimeter und kann somit bei präzisen relativen Anwendungen nicht unberücksichtigt bleiben. Die Antennenphasenzentren für  $L_1$  und  $L_2$  sind weitgehend unabhängig voneinander, so daß Koordinatenlösungen, die mit der ionosphären-freien Linearkombination  $L_0$  berechnet werden, vielfach verstärkt von dieser Fehlerquelle betroffen sind.

Je nach erforderlicher Genauigkeit und angewandtem Kalibrierungsverfahren unterscheidet man zwischen mittleren Antennenphasenzentrumsfehlern und elevations- und azimutabhängigen Variationen. Konstruktionsbedingt weisen viele GPS-Antennen eher eine Elevations- als eine Azimutabhängigkeit des Phasenzentrums auf. Veränderungen an der Antennenrundplatte oder Verwendung einer Antennenabdeckung (*Dome*) führen zu Veränderungen des Phasenzentrums (*Rothacher u.a. 1995, Braun u.a. 1997*). Verbleibende elevationsabhängige Restfehler wirken sich bei der Datenauswertung insbesondere dann negativ aus, wenn andere ebenfalls elevationsabhängige Unbekannte wie z.B. troposphärische Zenitfaktoren oder Ionosphärenmodelle geschätzt werden. Für

die Anbringung von Korrekturwerten für das Antennenphasenzentrum muß die räumliche Ausrichtung der Meßantenne bekannt sein. Bei Vermessungsanwendungen ist dies meist durch Horizontierung und Nordorientierung der Antenne gegeben.

Für Antennen einer Baureihe kann im allgemeinen von weitgehend identischen Antennenphasenzentrumsfehlern ausgegangen werden, so daß bei gleicher Antennenausrichtung die Fehler bei der Relativmessung herausfallen. Dieses Verfahren ist aber bei langen Basislinien wirkungslos, weil dort die Signale unter verschiedenen Elevationen und Azimuten empfangen werden (*Schupler und Clark 1991*). In diesem Fall sind auch relative Kalibrierungswerte zwischen zwei Antennentypen nicht ausreichend. Absolute Kalibrierungswerte sind notwendig.

Die Kalibrierung von GPS-Antennen kann mit unterschiedlichem Aufwand und auf unterschiedlichen Genauigkeitsniveaus erfolgen. Grundsätzlich gilt, daß bei der Feldkalibrierung Relativmessungen mit geringem Antennenabstand vorgenommen werden, um den Einfluß von Refraktionsfehlern zu minimieren. Die Messungsdauer sollte mindestens 24 Stunden betragen, um die maximale Satellitenüberdeckung zu nutzen und Ergebnisse mit Millimetergenauigkeit zu erzielen. Die Hauptfehlerquelle ist die Mehrwegeausbreitung. Bei Laborkalibrierungen in mikrowellentoten Kammern können elevations- und azimutabhängige Variationen des Phasenzentrums bestimmt werden (*Schupler und Clark 1991*). Laborkalibrierungen ermöglichen zwar absolute Kalibrierungen, sie sind aber sehr aufwendig.

Bei Feldkalibrierungen ergibt sich der mittlere Antennenphasenzentrumsfehler relativ zwischen zwei Antennen aus der Messung einer koordinatenmäßig bekannten Basislinie. Die Kalibrierungswerte für die Nord- und Ostkomponenten können auch absolut bestimmt werden, wenn mit der zu kalibrierenden Antenne Messungen in mindestens zwei unterschiedlichen Orientierungen vorgenommen werden. Mehrwegefehler mitteln sich aufgrund der langen Meßdauer weitgehend heraus. Die Kalibrierungswerte des mittleren Antennenphasenzentrums sind eine Funktion

der gewählten Elevationsmaske und aufgrund der Satellitenüberdeckung eine Funktion der geographischen Breite des Kalibrierungsortes.

Die relative, elevationsabhängige Kalibrierung erfolgt mit den selben Meßwerten. Im Auswerteprozess werden die Koeffizienten einer elevationsabhängigen Funktion (z.B. eines Polynoms) als zusätzliche Unbekannte angesetzt (*Breuer u.a. 1995*). Mehrwegefehler werden über den gesamten Azimutbereich gemittelt und dadurch stark verringert. Absolute Kalibrierungswerte ergeben sich nur, wenn für die Referenzantenne absolute, elevationsabhängige Kalibrierungswerte z.B. aus Labormessungen vorliegen.

Aus den erzeugten Meßdaten können auch elevations- und azimutabhängige Kalibrierungswerte abgeleitet werden. Für ihre Darstellung werden Kugelfunktionsentwicklungen verwendet (*Rothacher u.a. 1995*). Durch gemeinsames Drehen der Antennen gelingt es auch in mittleren Breiten, den gesamten Azimutbereich zu erfassen. Mehrwegeeffekte können dabei zu großen Kalibrierungsfehlern führen, da deren Verringerung durch Mittelbildung nicht bzw. kaum möglich ist. Absolute Kalibrierungswerte ergeben sich auch hier nur, wenn für die Referenzantenne absolute Kalibrierungswerte vorliegen. Absolute Kalibrierungswerte aus Feldmessungen bei gleichzeitiger weitgehender Elimination von Mehrwegeeffekten gelingt, wenn einerseits die Antenne nicht nur gedreht, sondern auch gekippt wird und andererseits Mehrwegeeffekte durch Wiederholungsmessungen nach einem Sterntag erfaßt werden (*Wübbena u.a. 1996a*).

Für Messungen in regionalen Referenzstationsnetzen ist eine relative Kalibrierung der Antennen ausreichend. Die Einrichtung von Referenzstationsnetzen verstärkt die Bedeutung der Antennenkalibrierung, weil mehr und mehr Antennen unterschiedlicher Baureihen gemeinsam verwendet werden. Dies liegt zum einen daran, daß der Nutzer einer Mobilstation häufig Geräte anderer Hersteller nutzt als die, die im Referenzstationsnetz eingesetzt werden. Andererseits verwendet man auf den Referenzstationen vielfach Antennentypen (*Choke-Ring-Antennen*, ggf. mit Abdeckung), die für Mobilstationen ungeeignet sind.

## 4 Fehlermodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen

Mit der Verwendung nicht nur einer, sondern mehrerer räumlich um die Mobilstation verteilter Referenzstationen (Abb. 4.1) kann eine deutliche Qualitätssteigerung der Positionierung erzielt werden. Die räumliche Verteilung der Stationen ermöglicht die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängig wirkenden relativen Fehlereinflüsse (Orbit, Ionosphäre, Troposphäre). Für die Verringerung der stationsabhängigen Fehler im Referenzstationssegment (im wesentlichen Mehrwegeeffekte) ist insbesondere die Anzahl der Stationen von Bedeutung. Da ein Großteil des Informationsgehalts der simultanen Messungen in einem regionalen Netz redundant ist, können weiterhin effektive Algorithmen zur Detektierung und Beseitigung von groben Meßfehlern eingesetzt werden.

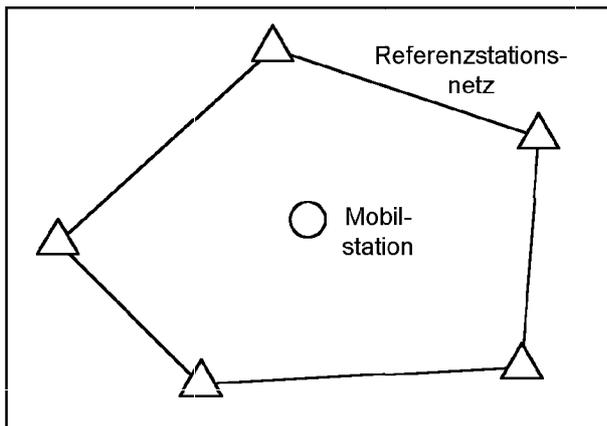


Abb. 4.1: Positionierung in einem regionalen Referenzstationsnetz.

Um bei allen Arten der relativen Positionierung anwendbar zu sein, müssen die Fehlermodelle in Echtzeit berechnet werden können. Dies bedeutet, daß diese nach Eintreffen der Beobachtungen einer Gruppe von Referenzstationen an einer zentralen Rechenstelle sofort erzeugt bzw. aufdatiert werden. Diese Forderung beinhaltet auch, daß eine epochenweise Erzeugung der Modelle möglich sein muß, um hochfrequente Fehleranteile zu erfassen.

### 4.1 Fehlerbestimmung im Referenzstationsnetz

Die hochgenaue Fehlerbestimmung muß auf der Basis der Phasemessungen erfolgen, da nur diese aufgrund

ihres geringen Meßrauschens und des geringen Einflusses der Mehrwegeausbreitung mm-Genauigkeit ermöglichen. Weiterhin ist – wie bei der relativen Positionierung – die Lösung und Festsetzung der Doppel-Differenz-Phasenmehrdeutigkeiten auf ihre ganzzahligen wahren Werte Voraussetzung zur Ausnutzung der hohen Phasengenauigkeiten.

Die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehleranteile wirken auf Code- und Phasemessungen identisch (Troposphäre), wirken sich bei der Positionsberechnung mit Code oder Phase identisch aus (Orbit) oder stehen für Code und Phase in einem festen Verhältnis zueinander (Ionosphäre). Von den Fehlern der einen Beobachtungsart kann also auf die der anderen geschlossen werden und somit können die Fehlermodelle, die auf der Grundlage der Phasendaten entstanden sind, auch auf die Codebeobachtungen angewendet werden. Dies gilt nicht für die Mehrwegefehler, die für jede Beobachtungsart und Signalfrequenz individuell behandelt werden müssen.

#### 4.1.1 Mehrdeutigkeitsfestsetzung

Die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz ist im Vergleich zur Mehrdeutigkeitslösung in einem Netz mit nur näherungsweise bekannten Stationskoordinaten deutlich vereinfacht. Dadurch, daß die Referenzstationskoordinaten hochgenau bekannt sind (mm-Relativgenauigkeit in der Lage und maximal wenige mm in der Höhe, dm-Genauigkeit in der absoluten Lagerung), verbleiben als Einflußfaktoren auf die Mehrdeutigkeitsbestimmung im wesentlichen die Fehlereinflüsse, die in der späteren Fehlermodellierung verringert werden sollen. Wird Gleichung (2.9) nach der Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_f$  aufgelöst, ergibt sich

$$\begin{aligned} \nabla\Delta N_f = & 1/\lambda \cdot [\nabla\Delta\Phi - (\nabla\Delta R - \nabla\Delta I_f \\ & + \nabla\Delta dT + \nabla\Delta O + \nabla\Delta M_{f,\phi} \\ & + \nabla\Delta A_{f,\phi} + \epsilon_{f,\nabla\Delta\phi})], \end{aligned} \quad (4.1)$$

wobei  $\nabla\Delta R$  als bekannt und fehlerfrei angenommen werden kann. Im Gegensatz zu Gleichung (2.9) wird hier davon ausgegangen, daß der Hauptteil der troposphärischen Refraktion durch Standardmodelle erfaßt wurde (siehe Kapitel 3.3), so daß hier nur noch der verbleibende troposphärische Restfehler  $dT$  berücksichtigt werden muß. Die Darstellung erfolgt der Übersichtlichkeit halber für Doppelte Differenzen,

obwohl die tatsächliche Realisierung auch auf einfacher oder undifferenzierten Beobachtungen basieren kann.

Im Gegensatz zu Positionierungsanwendungen, bei denen man mit einer weitgehenden Mehrdeutigkeitslösung zufrieden ist und nicht auf einer vollständigen Lösung besteht, wird hier eine möglichst 100 % Mehrdeutigkeitslösung erwartet. Jede Satellitenbeobachtung ohne Mehrdeutigkeitslösung entfällt für die Fehlermodellierung und kann so die Verfügbarkeit der Fehlermodelle einschränken.

Für geringe Stationsentfernungen ist im allgemeinen eine unmittelbare Mehrdeutigkeitslösung möglich, d.h. also schon mit einer einzelnen Meßepoche. Bei Stationsentfernungen größer als wenige 10er-Kilometer kann es aber durch das Anwachsen der entfernungsabhängig wirkenden Fehler teilweise zu Problemen kommen. Diese bestehen insbesondere für aufgehende Satelliten und flache Satellitendurchgänge, deren Signale am stärksten durch Meßfehler beeinflusst werden (*Wanninger 1997b*).

Um diese entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse möglichst gering zu halten, erfolgt die Mehrdeutigkeitslösung über die kürzesten Basislinien im Netz. In einem ersten Schritt werden die Mehrdeutigkeiten in einer Grundbasislinie gelöst und beseitigt, d.h. beide Stationen werden auf ein Mehrdeutigkeitsniveau gebracht. Dieses Netz aus zwei Stationen wird durch nachbarschaftliche Anbindung weiterer Stationen vergrößert, bis alle Stationen auf dem selben Mehrdeutigkeitsniveau liegen. Als Ergebnis liegt ein Netz vor, in dem alle Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten in allen Basislinien beliebiger Stationspaare den Wert Null besitzen. Das Netz ist damit mehrdeutigkeitsfrei.

Weiterhin läßt sich eine Vorabverringering der Einflüsse der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse bei der Mehrdeutigkeitslösung erreichen durch:

**Verwendung genauerer Satellitenorbits:** Es stehen dafür prädierte und präzise IGS-Datensätze zur Verfügung. Erstere weisen bis heute aber nicht die notwendige Genauigkeitssteigerung gegenüber den *broadcast*-Orbits auf (siehe Kapitel 3.1). Hier bleibt die weitere Entwicklung abzuwarten. Die präzisen Ephemeriden stehen dagegen nur für *Post-Processing* zur Verfügung, welches ihre Anwendung stark einschränkt. Aus den genannten Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich mit *broadcast*-Ephemeriden gearbeitet.

**Anwendung eines Ionosphärenmodells:** Hier kommen insbesondere die Modelle in Frage, die in Echtzeit oder im *Post-processing* aus Zweifrequenz-GPS-Beobachtungen hergeleitet werden können (siehe Kapitel 3.2). Diese

Ansätze erfassen aber nur großräumige Strukturen der Ionosphäre. Die Verringerung der Fehleranteile aufgrund kleinräumiger Störungen oder Störungen mittlerer Größe gelingt damit nicht. Trotzdem sind ab wenige 10er-Kilometer Stationsabstand deutliche Verbesserungen bei der Mehrdeutigkeitslösung erzielbar.

**Anwendung eines Troposphärenmodells:** Auch hier bieten die GPS-Daten selbst die beste Grundlage für Modelle hoher Qualität. Sind die Mehrzahl der Phasenmehrdeutigkeiten gelöst worden, können Zusatzparameter entsprechend Gl. (3.8) oder (4.33) angesetzt werden, die die troposphärischen Restfehler erfassen und somit die Festsetzung der verbliebenen Mehrdeutigkeiten vereinfachen. Für Echtzeit-Anwendungen ist die Extrapolation aus den letzten Meßepochen auf die aktuelle Meßepoche problemlos möglich. Insbesondere die Mehrdeutigkeitslösung für Beobachtungen niedrig stehender Satelliten kann mit diesem Ansatz verbessert werden.

Die beschriebenen Modelle zur Groberfassung von Refraktionseinflüssen sind Voraussetzung für die vollständige Mehrdeutigkeitsfestsetzung in regionalen Referenzstationsnetzen. Sie können in ähnlicher Form sowohl für Echtzeit- wie auch für *Post-Processing*-Realisierung verwendet werden.

Mehrwegeeffekte sollten durch Wahl des Standortes und von Empfänger bzw. Antenne möglichst klein gehalten werden. Es wird auch vorausgesetzt, daß Antennenphasenzentrumsfehler korrigiert wurden. Das Meßrauschen der Phasenmessungen ist so gering, daß es die Mehrdeutigkeitslösung nicht beeinflusst.

Die Erfahrungen in regionalen Referenzstationsnetzen mit bis zu 100 km Stationsabstand zeigen, daß bei Kenntnis der Stationskoordinaten und bei Anwendung der oben erwähnten Ionosphären- und Troposphärenmodelle die Lösung der Widelane-Mehrdeutigkeit trivial ist, da deren Fehler nur in sehr seltenen Ausnahmefällen 0,3 *cy* (Zyklen) übersteigt. Nach Beseitigung der  $L_W$ -Mehrdeutigkeit müssen die Mehrdeutigkeiten von  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_{97}$  identische Werte aufweisen (siehe Kapitel 2.2). Durch simultane Verarbeitung der reellen Schätzwerte der  $L_1$ -,  $L_2$ - und  $L_{97}$ -Mehrdeutigkeiten läßt sich im allgemeinen problemlos deren wahrer Wert finden.

Berechnet man für jedes dieser Signale (Linearkombinationen)  $f$  die Differenz zwischen reellem Mehrdeutigkeitsschätzwert  $\nabla\Delta\overline{\phi}_f$  und potentiellem wahren ganzzahligem Mehrdeutigkeitswert  $\nabla\Delta N_{pot}$  nach

$$n_f = \nabla\Delta\overline{\phi}_f - \nabla\Delta N_{pot}, \quad (4.2)$$

so lassen sich die implementierten Testverfahren wie folgt beschreiben. Das erste Testverfahren akzeptiert

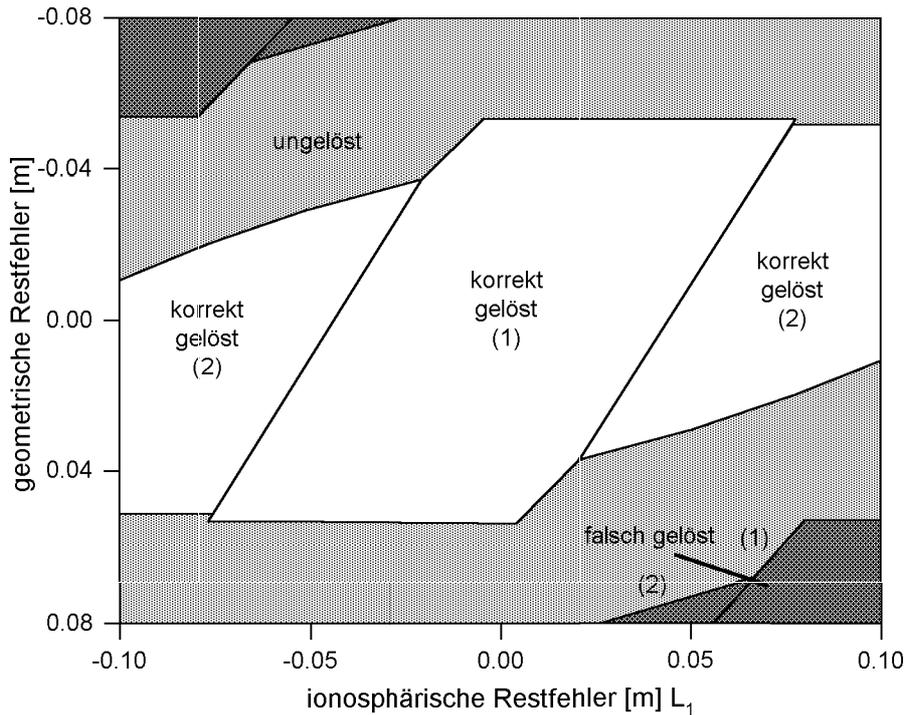


Abb. 4.2: Einfluß von ionosphärischen und geometrischen Restfehlern auf die Mehrdeutigkeitslösung mit den Testverfahren (1) und (2).

diejenige Mehrdeutigkeit  $\nabla\Delta N_{pot}$  als wahren Wert, für die gilt:

$$n_1 \leq 0,3 \text{ cy,}$$

$$n_2 \leq 0,3 \text{ cy,}$$

$$n_{97} \leq 0,5 \text{ cy}$$

ihrer effektiven Wellenlängen.

Da sich bei der Bearbeitung von umfangreichen Referenzstationsdatensätzen (Kapitel 6.2) zeigte, daß die nach Anwendung der beschriebenen Modelle zur Groberfassung von Refraktionsfehlern verbleibenden Restfehler eher ionosphärischen als troposphärischen Ursprung haben, wurde ein zweites Testverfahren so gestaltet, daß auch bei ionosphärischen Restfehlern von einigen Zentimetern auf  $L_1$  eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitslösung möglich ist. Für dieses zweite Testverfahren werden Mehrdeutigkeitssuchräume der Größe  $[-1,1]$  Zyklen um die reellen  $L_1$ -Schätzwerte gebildet und Testgrößen  $T_N$  berechnet nach

$$T_N = n_1^2 + n_2^2 + n_{97}^2. \quad (4.3)$$

Eine Festsetzung auf den Mehrdeutigkeitswert mit kleinster Testgröße  $T_N$  wird dann vorgenommen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\text{zweitkleinste } T_N / \text{ kleinste } T_N \geq 4,0$$

$$n_{97} \leq 0,5 \text{ cy seiner effektiven Wellenlänge.}$$

Der relativ breite Korridor, in dem keine Mehrdeutigkeitsfestsetzung erfolgt (Abb. 4.2), dient der Berücksichtigung von Mehrwegeinflüssen, die auf den vor-

handenen Referenzstationen der deutschen Landesvermessungsämter z.T. recht stark sind. Bei einer Verbesserung der Datenqualität der Referenzstationen kann dieser Korridor verkleinert und somit die korrekte Mehrdeutigkeitslösung vereinfacht werden.

In Abhängigkeit von der Größe der verbliebenen ionosphärischen und geometrischen (Orbit und Troposphäre) Restfehler erzielt man mit diesen beiden Testverfahren im allgemeinen korrekte, selten keine und nur in Ausnahmefällen falsche Lösungen (Abb. 4.2). Im allgemeinen übersteigen die Restfehler wenige Zentimeter nicht, so daß eine vollständige und korrekte Mehrdeutigkeitslösung erreicht wird. Bei starken Fehlereinflüssen und insbesondere bei einem Stationsabstand von über 50 km kommt es aber in Einzelfällen vor, daß keine Lösung gefunden werden kann. Falsche Lösungen können sich nur ergeben, wenn sowohl große ionosphärische wie auch große geometrische Restfehler auftreten. Im *Post-Processing* mit Datenblöcken von mindestens 15 Minuten Länge und bei Stationsentfernungen bis 100 km wurden bisher keine falschen Festsetzungen entdeckt.

#### 4.1.2 Beobachtungsresiduen

Nach Lösung und Beseitigung der Mehrdeutigkeiten ergeben sich Beobachtungsresiduen  $\nabla\Delta r_f$  nach

$$\nabla\Delta r_f = \nabla\Delta\Phi_f - \nabla\Delta R$$

$$= -\nabla\Delta I_f + \nabla\Delta dT + \nabla\Delta O \\ + \nabla\Delta M_{f,\phi} + \nabla\Delta A_{f,\phi} + \epsilon_{f,\nabla\Delta\phi}. \quad (4.4)$$

Bildet man aus Zweifrequenzmessungen die ionosphärische (geometrie-freie) und ionosphären-freie („geometrische“) Linearkombination, so erhält man

$$\nabla\Delta r_I = -\nabla\Delta I_I + \nabla\Delta M_{I,\phi} \\ + \nabla\Delta A_{I,\phi} + \epsilon_{I,\nabla\Delta\phi} \quad (4.5)$$

$$\nabla\Delta r_0 = \nabla\Delta O + \nabla\Delta dT + \nabla\Delta M_{0,\phi} \\ + \nabla\Delta A_{0,\phi} + \epsilon_{0,\nabla\Delta\phi} \quad (4.6)$$

und damit eine teilweise Trennung nach Fehlerursachen. Die ionosphärischen Residuen  $\nabla\Delta r_I$  werden von Orbitfehlern und troposphärischen Restfehlern nicht beeinflusst und geben im wesentlichen Restfehler der ionosphärischen Refraktion wieder. Die ionosphären-freien (geometrischen) Residuen  $\nabla\Delta r_0$  sind frei von ionosphärischen Einflüssen und lassen im wesentlichen Orbit- und Troposphäreinflüsse erkennen. Beide Residuenarten sind auch von stationsabhängigen Fehlereinflüssen, also insbesondere von Mehrwegefehlern, betroffen, die die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse erschweren. Eine weitere Aufspaltung nach ihren hauptsächlichen Fehlerquellen ist für die geometrischen Residuen bei entsprechenden Modellierungsansätzen möglich.

Bei Entwicklung von Korrekturmodellen für Positionierung in Referenzstationsnetzen müssen die besonderen Eigenarten der einzelnen Fehlerquellen berücksichtigt werden. Diese sind:

**Orbitfehler:** Sie wirken satellitenindividuell, haben langperiodischen Charakter und können Unstetigkeiten bei einem Wechsel des *broadcast*-Ephemeridensatzes aufweisen.

**Ionosphäre:** Der mit Modellen am schwersten zu erfassende Anteil der ionosphärischen Refraktion wird durch kleinräumige Störungen oder Störungen mittlerer Größe verursacht. Diese sind satellitenindividuell am besten zu modellieren, da dabei jedes Einzelmodell nur eine Modellfläche in der Größe des Referenzstationsnetzes erfassen muß (*Webster und Kleusberg 1992; Wanninger 1995b*). Störungen, die kleinräumiger als der Abstand der Referenzstationen sind, können in den Modellen nicht erfaßt werden.

**Troposphäre:** Auch die troposphärischen Restzeitfehler lassen sich im regionalen Referenzstationsnetz satellitenindividuell erfassen. Sie werden dann gemeinsam mit den Orbitfehlern im geometrischen Modell berücksichtigt. Als Alternative bietet sich an, ein gemeinsames Modell der

Restzeitfehler für alle Satelliten zu berechnen. Dadurch werden dann getrennte Modelle für die Troposphäre und die Orbitfehler erstellt. Vor- und Nachteile dieser beiden Ansätze werden in den weiteren Kapiteln diskutiert.

## 4.2 Linearität der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler

Wie schon im Kapitel 3 erwähnt, wirken einige Fehlerquellen entfernungsabhängig und sogar proportional zur Basislinienlänge. Im folgenden Kapitel soll untersucht werden, ob diese Eigenschaft in regionalen Netzen (bis 100 km Ausdehnung) in ausreichendem Maße gültig ist, um bestehende Fehler auf Messungsebene mit mm-Genauigkeit zwischen Referenzstationen linear zu interpolieren.

### 4.2.1 Orbitfehler

Der Argumentation von *Wu (1994)* folgend, die auch von *Han (1997)* verwendet wurde, soll der Fehler der Satellitenkoordinaten in folgende drei Komponenten zerlegt werden (vgl. Abb. 4.3): die  $\xi$ -Komponente zeigt vom Satelliten zum Empfänger A und stellt die Normale zu einer Ebene dar, die den Satelliten und den  $\eta$ -Vektor enthält. Letzterer wird in zwei Komponenten zerlegt, bei der  $\eta_1$  parallel zur Basislinie AB verläuft und  $\eta_2$  senkrecht dazu steht.

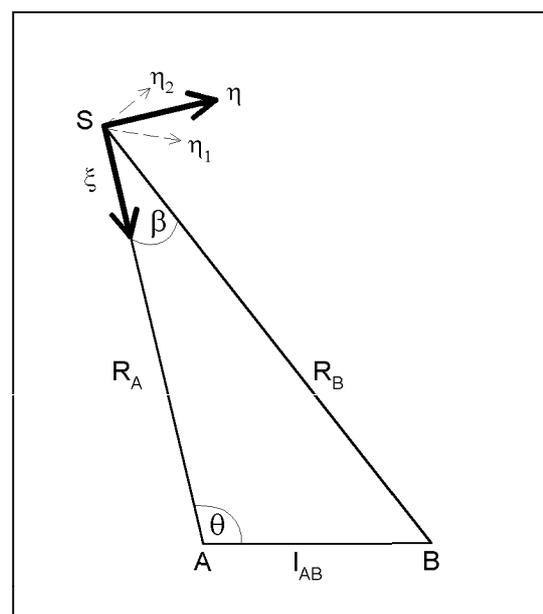


Abb. 4.3: Geometrie der Orbitfehler.

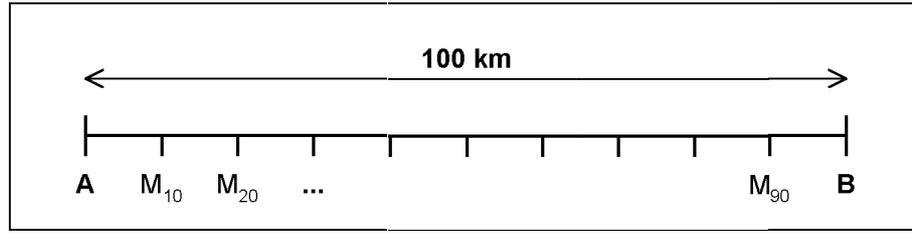


Abb. 4.4: Anordnung der Mobilstationen im Abstand von jeweils 10 km zwischen zwei 100 km entfernten Referenzstationen A und B.

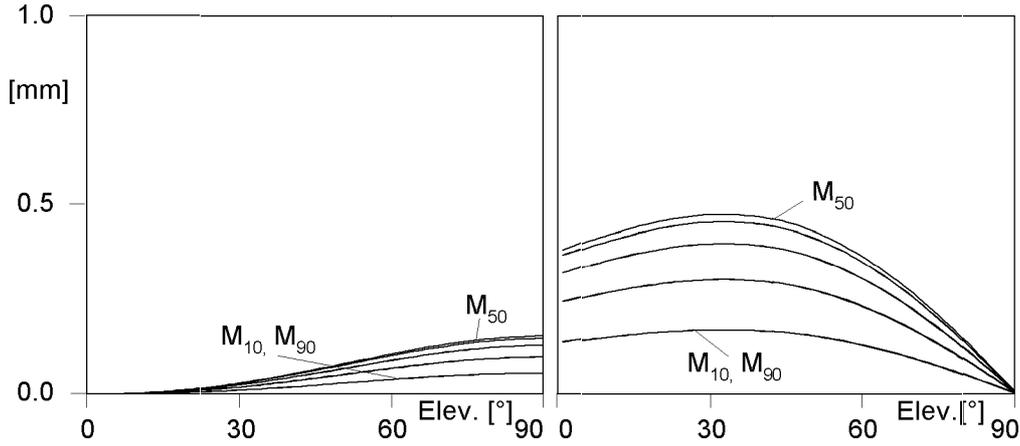


Abb. 4.5: Interpolationsfehler für Mobilstationen zwischen zwei 100 km entfernten Referenzstationen. Links: Auswirkungen einer Orbitfehlerkomponente  $\xi$  von 50 m. Rechts: Auswirkungen einer Orbitfehlerkomponente  $\eta_1$  von 50 m.

Die  $\eta_2$ -Komponente der Orbitfehler hat keinen Einfluß auf die Positionierung der Stationen A und B, genausowenig wie die  $\eta_1$ -Komponente die Positionierung der Station A beeinträchtigt. Der Einfluß der Orbitfehler auf die Pseudostrecken beträgt (vgl. Abb. 4.3)

$$O_A = |\vec{\xi}| \quad (4.7)$$

$$O_B = |\vec{\xi}| \cos \beta + |\vec{\eta}_1| \sin \beta \quad (4.8)$$

und somit für die einfache Differenz zwischen Stationen

$$\begin{aligned} \Delta O_{AB} &= O_B - O_A \\ &= -|\vec{\xi}|(1 - \cos \beta) + |\vec{\eta}_1| \sin \beta. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Der Einfluß der  $\xi$ -Komponente auf die einfache Differenz ist sehr gering. Er wird durch die Differenzbildung weitgehend beseitigt. Bei einem Punktabstand von 100 km und einem Basislinien-Satelliten-Abstand von 20000 km beträgt  $\beta$  maximal  $1/200$  rad und somit bei einer maximalen Länge der  $\xi$ -Fehlerkomponente von 50 m der erste Term in Gl. (4.9) immer deutlich weniger als 1 mm. In der weiteren Betrachtung kann dieser Term also vernachlässigt werden. Der zweite Term nimmt bei einer maximalen Länge der  $\eta_1$ -

Fehlerkomponente von 50 m Werte von bis zu 25 cm an.

Durch Anwendung des Sinussatzes im Dreieck SAB und unter Vernachlässigung des geringen Einflusses der Erdkrümmung ergibt sich:

$$\Delta O_{AB} \approx |\vec{\eta}_1| \sin \beta = |\vec{\eta}_1| \frac{l_{AB}}{R_B} \sin \theta \quad (4.10)$$

Da  $R_A - l_{AB} \leq R_B \leq R_A + l_{AB}$ , beträgt der maximale Relativfehler, den man durch Ersetzen von  $R_B$  durch  $R_A$  macht

$$\begin{aligned} &\left| \frac{|\vec{\eta}_1| l_{AB} \sin \theta \cdot [R_A^{-1} - (R_A \pm l_{AB})^{-1}]}{|\vec{\eta}_1| l_{AB} \sin \theta \cdot (R_A \pm l_{AB})^{-1}} \right| = \\ &\left| \frac{R_A \pm l_{AB}}{R_A} - 1 \right| \leq 0,5\% \end{aligned} \quad (4.11)$$

also maximal 0,5 % von maximal 25 cm und somit maximal 1,2 mm. Als gute Approximation der Wirkung von Orbitfehlern auf die einfache Differenz der Beobachtungen zweier Stationen, die nicht mehr als 100 km voneinander entfernt sind, kann man dementsprechend nutzen:

$$\Delta O_{AB} \approx |\vec{\eta}_1| \frac{l_{AB}}{R_A} \sin \theta. \quad (4.12)$$

Orbitfehler wirken auf die relative GPS-Positionierung also in guter Näherung proportional zur Basislinienlänge  $l_{AB}$  und sind somit zwischen Referenzstationen linear interpolierbar.

Um die Größe der verbleibenden Restfehler abzuschätzen, wurde die Fehlerinterpolation für zwei Referenzstationen mit 100 km Abstand simuliert. Dabei wurde von maximalen Orbitfehlern von 50 m sowohl in der  $\xi$ - wie auch in der  $\eta_1$ -Komponente ausgegangen. Die Berechnungen erfolgten für Satellitenelevationen  $\epsilon_A$  an der Station A im Bereich von 1 bis 90 Grad. Die korrespondierenden Elevationen für die Station B und die Mobilstationen M wurden unter Berücksichtigung der Erdkrümmung iterativ mit Gl. (A.7) berechnet.

Für die Mobilstationen im Abstand von 10 bis 90 km von der Station A (Abb. 4.4) ergeben sich die Interpolationsfehler  $\delta\Delta O_{AM}$  als Differenz der aus den Referenzstationsfehlerdifferenzen  $\Delta O_{AB}$  linear interpolierten Fehlern und den für die einfache Differenz zwischen der Station A und den Mobilstationen M berechneten Fehlern  $\Delta O_{AM}$  nach

$$\delta\Delta O_{AM} = \frac{l_{AM}}{l_{AB}} \Delta O_{AB} - \Delta O_{AM}. \quad (4.13)$$

Sie übersteigen 0,5 mm in keinem Fall (Abb. 4.5). Orbitfehler können also im Entfernungsbereich bis 100 km mit mm-Genauigkeit linear interpoliert werden.

In der bisherigen Betrachtung wurde davon ausgegangen, daß alle Stationen auf gleichem Höhenniveau liegen. Unterschiedliche Stationshöhen haben aber Einfluß auf den Elevationswinkel, unter dem der Satellit beobachtet wird und damit auf die Wirkung von Orbitfehlern. Weicht eine Referenzstationshöhe deutlich von denen der anderen Stationen ab, so wird das Fehlermodell verfälscht. Liegt dagegen eine Mobilstation nicht auf dem Höhenniveau der Referenzstationen, sind die interpolierten Korrekturwerte nur begrenzt gültig.

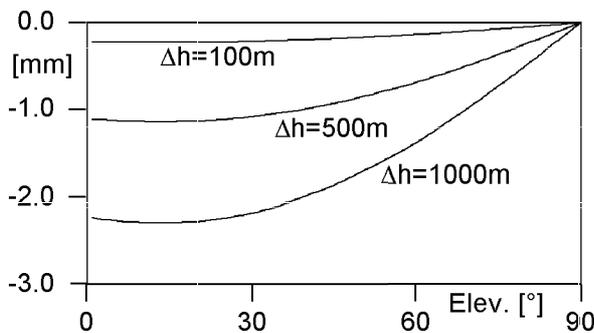


Abb. 4.6: Wirkung von Höhenunterschieden  $\Delta h$  auf den Einfluß einer  $\eta_1$ -Orbitfehlerkomponente von 50 m.

In Anhang B wird der Einfluß eines Höhenunterschieds auf den Elevationswinkel, unter dem ein Satellit beobachtet wird, hergeleitet. Die Differenz der Elevationen aufgrund des Höhenunterschieds entspricht dem in Gl. (4.9) verwendeten Winkel  $\beta$  und kann so zur Abschätzung der zu erwartenden Fehler genutzt werden. Bei einem Höhenunterschied von 1000 m beträgt  $\beta$  maximal  $0,0023^\circ$  bei  $13^\circ$  Elevation und damit der Einfluß einer  $\xi$ -Komponente von 50 m maximal  $4 \cdot 10^{-5}$  mm. Bei einer  $\eta_1$ -Komponente von 50 m betragen die maximalen Fehler dagegen ungefähr  $-0,2$  mm pro 100 m Höhenunterschied (Abb. 4.6). Für die meisten Anwendungsfälle kann also der Höhendifferenzeinfluß vernachlässigt werden.

## 4.2.2 Ionosphärische Refraktion

Die ionosphärische Refraktion und ihre räumlichen und zeitlichen Variationen können in einen ungestörten (absoluter Elektronengehalt, großräumige Gradienten) und in einen gestörten Anteil (Störungen mittlerer Größe bis zu kleinräumigen Störungen) aufgeteilt werden. Nur der ungestörte Anteil kann durch ein Ein-Schicht-Ionosphärenmodell (Abb. 4.7) zumindest teilweise erfaßt und nur er kann hier detailliert behandelt werden. Kleinräumige ionosphärische Störungen (Szintillationen) mit Wellenlängen von Metern bis 1 km können in regionalen Referenzstationsnetzen (Punktabstand 50 bis 100 km) nicht erfaßt und verringert werden. Wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe (MSTIDs, siehe Kapitel 3.2) mit Wellenlängen über 100 km können zum größten Teil, aber nicht vollständig erfaßt werden. Die in regionalen Referenzstationsnetzen nichtmodellierbaren Restfehler stellen in mittleren Breiten den größten Anteil der verbleibenden ionosphärischen Fehler dar.

Unter Verwendung des Ein-Schicht-Ionosphärenmodells (Abb. 4.7) ergibt sich der Einfluß der ionosphärischen Refraktion  $I_f$  auf eine Messung aus Gl. (3.2) – (3.4). Als einfache Differenz des Einflusses erhält man demnach für zwei Stationen im Abstand  $l_{AB}$ :

$$\Delta I_{AB} = -\frac{1}{2} \frac{A}{f^2} \cdot \left( \frac{VEC_B}{\cos z_B^I} - \frac{VEC_A}{\cos z_A^I} \right). \quad (4.14)$$

Verwendet man

$$VEC = VEC_A \quad (4.15)$$

$$\delta VEC = (VEC_B - VEC_A)/l_{AB}, \quad (4.16)$$

um den Einfluß des absoluten Elektronengehalts  $VEC$  von dem des relativen Elektronengehalts (Gradienten)  $\delta VEC$  zu trennen, erhält man

$$\Delta I_{AB} = -\frac{1}{2} \frac{A}{f^2}.$$

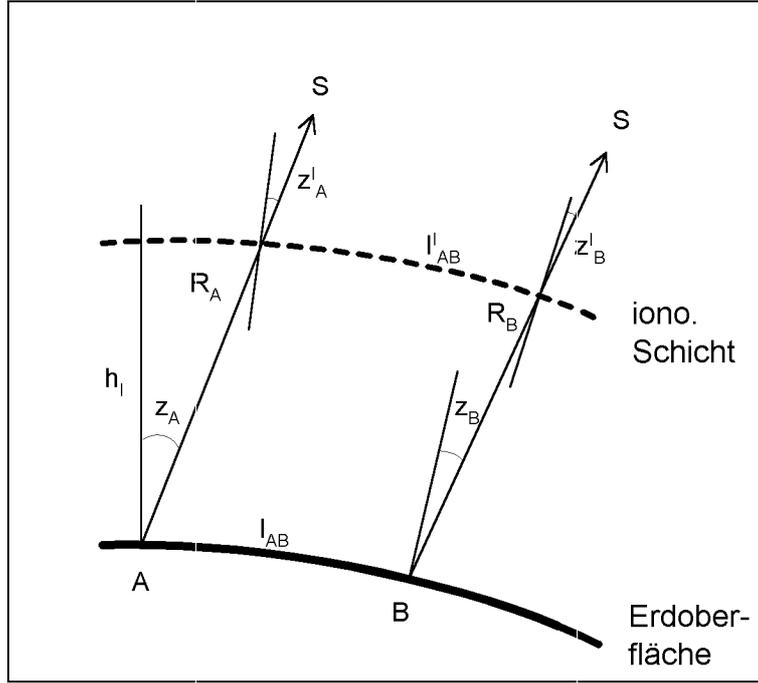


Abb. 4.7: Geometrie des Ein-Schicht-Ionosphärenmodells.

$$\left[ \underbrace{VEC \left( \frac{1}{\cos z_B^I} - \frac{1}{\cos z_A^I} \right)}_{abs.} + \underbrace{\delta VEC \cdot \frac{l_{AB}}{\cos z_B^I}}_{rel.} \right] \quad (4.17) \quad \approx \quad 1 + 2 \cdot \left( \frac{2}{\pi} \cdot z + \frac{1}{15} \right)^3$$

$$= \frac{3377}{3375} + \frac{4}{75\pi} z + \frac{8}{5\pi^2} z^2 + \frac{16}{\pi^3} z^3. \quad (4.19)$$

Nach *Santerre (1989)* läßt sich der Zenitwinkel an der Station B näherungsweise aus dem an der Station A berechnen:

$$z_B \approx z_A - (r_e^{-1} + R_A^{-1} \cos z_A) \cdot \cos \Delta\alpha \cdot l_{AB} \quad (4.18)$$

wobei

- $R_A$  – Distanz Station A – Satellit [m],
- $\Delta\alpha$  – Winkel zwischen Basislinienrichtung und Richtung von der Station A zum Satelliten [rad].

Die Gültigkeit dieser Näherung ist begrenzt auf Basislinienlängen kleiner 100 km und geringe Höhenunterschiede. Sie zeigt, daß die Zenitdistanzdifferenz (in Näherung) proportional zur Stationsentfernung ist und maximal wird, wenn der Satellit in Richtung oder Gegenrichtung der Basislinie steht.

Die *Mapping*-Funktion (3.3) läßt sich für Zenitdistanzen bis  $85^\circ$  mit einem Fehler von maximal 2% mit folgender Reihenentwicklung approximieren (*Klobuchar 1977*):

$$m_I = \frac{1}{\cos z^I}$$

Setzt man nun die Näherung (4.19) in (4.17) ein und ersetzt man gleichzeitig  $z_B$  durch die Näherung (4.18) so ergibt sich bei Vernachlässigung aller Terme mit Nennern größer  $R_A$  für den absoluten Ionosphärenfehler

$$\Delta I_{AB}^{abs.} \approx \frac{1}{2} \frac{A}{f^2} VEC \left( \frac{4}{75\pi} + \frac{8}{5\pi^2} z_A + \frac{16}{\pi^3} z_A^2 \right) \cdot (r_e^{-1} + R_A^{-1} \cos z_A) \cos \Delta\alpha \cdot l_{AB} \quad (4.20)$$

und als Zwischenergebnis für den Term des relativen Ionosphärenfehlers:

$$\frac{1}{\cos z_B^I} \approx \frac{1}{\cos z_A^I} - \left( \frac{4}{75\pi} + \frac{16}{5\pi^2} z_A + \frac{48}{\pi^3} z_A^2 \right) \cdot (r_e^{-1} + R_A^{-1} \cos z_A) \cos \Delta\alpha \cdot l_{AB} \quad (4.21)$$

Für einen maximalen Abstand der Stationen von  $l_{AB} = 100$  km und einem maximalen Wert für  $\cos \Delta\alpha$  von 1 beträgt der zweite Term von (4.21) maximal 1,1 % des Gesamtterms, so daß dieser vernachlässigt werden kann und sich für den relativen Ionosphärenfehler ergibt:

$$\Delta I_{AB}^{rel.} \approx -\frac{1}{2} \frac{A}{f^2} \cdot \delta VEC \cdot \frac{l_{AB}}{\cos z_A^I}. \quad (4.22)$$

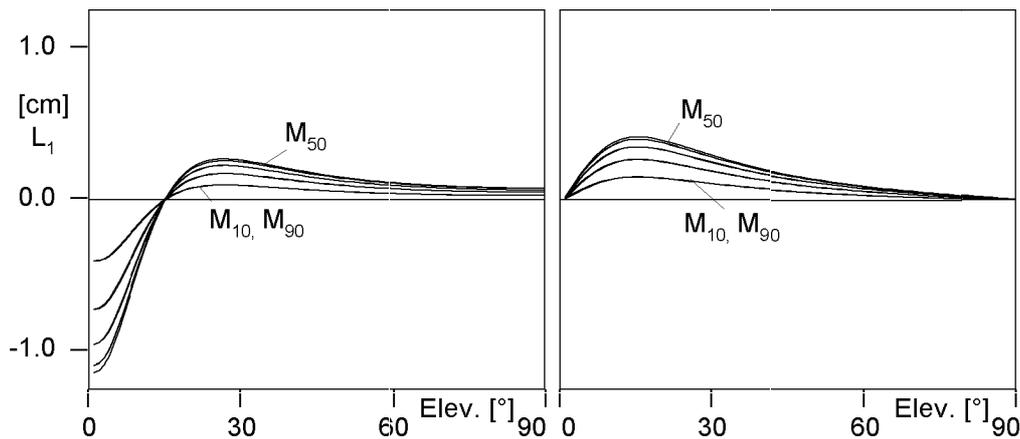


Abb. 4.8: Interpolationsfehler für Mobilstationen zwischen zwei 100 km entfernten Referenzstationen und Satelliten in Basislinienrichtung. Links: Auswirkungen eines absoluten vertikalen Elektronengehalts von  $100 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  skaliert auf  $L_1$ . Rechts: Auswirkungen eines Gradienten des vertikalen Elektronengehalts in Basislinienrichtung von  $2 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2} / 100 \text{ km}$  skaliert auf  $L_1$ .

Näherungen (4.20) und (4.22) lassen erkennen, daß sowohl absoluter wie auch relativer Ionosphärenfehler in Näherung proportional zur Länge der Basislinie sind. Sie lassen aber noch keine Aussage über die Größe der Restfehler zu.

Um eine genauere Vorstellung von den Restfehlern bei linearer Interpolation zu erhalten, wurden Simulationsrechnungen ähnlich denen für die Orbitfehler durchgeführt. Auch hier wurde von einem Abstand zwischen zwei Referenzstationen von 100 km ausgegangen, Ionosphärenfehler für Mobilstationen im Abstand von 10 km interpoliert und die Differenz zu direkt abgeleiteten Ionosphärenfehlern gebildet (Abb. 4.8). Es wurde hier nur der Sonderfall betrachtet, daß der Satellit in Richtung der Basislinie steht. In diesem Fall ist die Differenz der Zenitwinkel an den verschiedenen Stationen maximal (vgl. Näherung (4.18)) und somit auch die zu erwartenden Interpolationsfehler.

Unter für mittlere Breiten extremen ionosphärischen Verhältnissen erreichen die Interpolationsfehler für  $L_1$ -Beobachtungen maximale Werte von 4 mm aufgrund der räumlichen Gradienten des vertikalen Elektronengehalts und von 3,5 mm bei  $10^\circ$  Elevation aufgrund des absoluten Elektronengehalts. Bei niedrigeren Elevationen steigt der letzte Fehlerwert auf ungefähr 1 cm an. In Anbetracht der Tatsache, daß diese Werte in mittleren Breiten und für einen Referenzstationsabstand von 100 km absolute Maximalwerte darstellen, die fast nie erreicht werden dürften, und daß der nicht-reguläre Anteil der Ionosphäre diese Maximalwerte leicht übertrifft, kann auch hier von ausreichender Linearität der Fehler der ungestörten Ionosphäre ausgegangen werden.

Der Einfluß von Höhenunterschieden zeigt (Abb. 4.9),

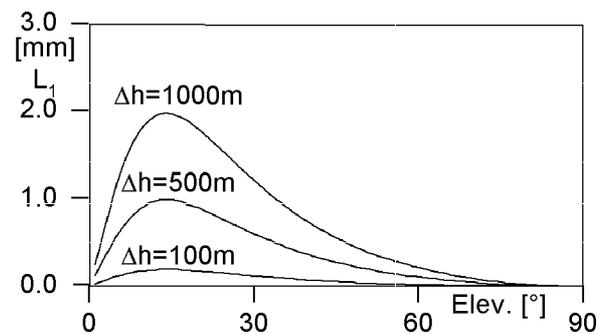


Abb. 4.9: Wirkung von Höhenunterschieden  $\Delta h$  auf den Einfluß eines vertikalen Elektronengehalts von  $100 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  auf  $L_1$ -Beobachtungen.

daß bei einem extrem hohen vertikalen Elektronengehalt von  $100 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  Restfehler von bis zu 0,2 mm pro 100 m Höhenunterschied für  $L_1$ -Beobachtungen auftreten. Selbst bei Höhenunterschieden von mehreren 100 m sind also keine bedeutenden Interpolationsfehler aufgrund von Höhenunterschieden zu erwarten.

### 4.2.3 Troposphärische Refraktion

Der Hauptanteil der troposphärischen Refraktion kann durch Standardmodelle erfaßt werden. Bei der relativen Positionierung beseitigen diese insbesondere die Höhenabhängigkeit der troposphärischen Refraktion. In diesem Kapitel werden nur die verbleibenden troposphärischen Restfehler  $dT$  behandelt.

Entsprechend den Überlegungen bei der ionosphärischen Refraktion können die troposphärischen Restfehler in absoluten und relativen Einfluß aufgeteilt werden. Kleinräumige Störungen, lokale Anomalien

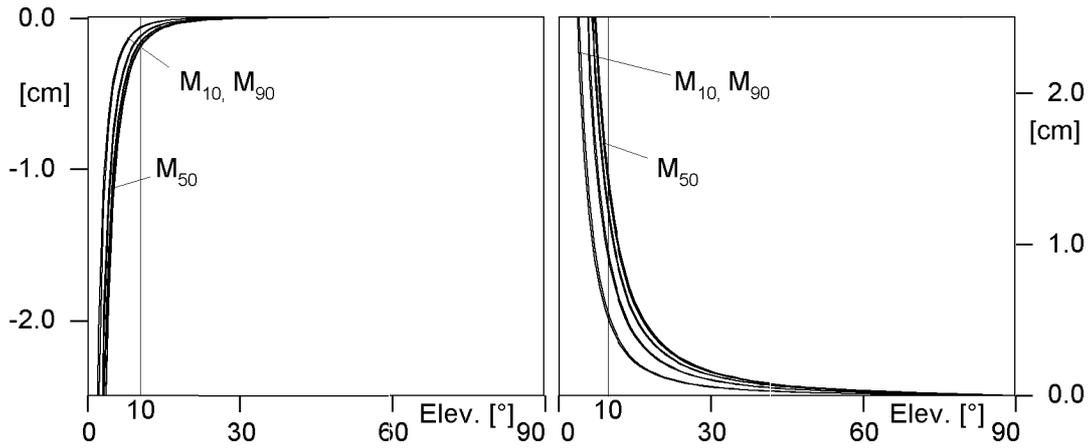


Abb. 4.10: Interpolationsfehler für Mobilstationen zwischen zwei 100 km entfernten Referenzstationen, für Satelliten in Basislinienrichtung und unter Verwendung der Niell-*Mapping*-Funktion für den hydrostatischen Fehleranteil. Links: Auswirkungen eines absoluten troposphärischen Restfehlers im Zenit von 0.2 m. Rechts: Auswirkungen eines relativen troposphärischen Restfehlers im Zenit von 0.1m / 100 km.

oder nicht erfaßte Höhenabhängigkeiten bleiben dabei außer Betracht. Ausgehend von Gl. (3.7) ergibt sich für die einfache Differenz zweier Beobachtungen:

$$\Delta dT_{AB} = m_{T,B} \cdot dT_B^z - m_{T,A} \cdot dT_A^z, \quad (4.23)$$

wobei die *Mapping*-Funktionen  $m_T$  Funktionen der Satellitenelevation am jeweiligen Standort sind. Komplexere *Mapping*-Funktionen, wie z.B. das Niell-Modell (Niell 1996), berücksichtigen auch die Stationskoordinaten (Breite und Höhe) und den Tag-des-Jahres. Führt man den absoluten troposphärischen Restzenitfehler  $dT^z$  und den relativen troposphärischen Restzenitfehler  $\delta dT^z$

$$dT^z = dT_A^z \quad (4.24)$$

$$\delta dT^z = (dT_B^z - dT_A^z) / l_{AB} \quad (4.25)$$

ein, ergibt sich

$$\Delta dT_{AB} = \underbrace{(m_{T,B} - m_{T,A}) \cdot dT^z}_{abs.} + \underbrace{m_{T,B} \cdot \delta dT^z \cdot l_{AB}}_{rel.} \quad (4.26)$$

Auf eine formelmäßige Herleitung der Linearität des absoluten troposphärischen Fehlers soll hier aufgrund der Komplexität der üblicherweise verwendeten *Mapping*-Funktionen verzichtet und auf die Ergebnisse der Simulationsrechnungen verwiesen werden. Für den relativen Fehler ergibt sich – ähnlich der Näherung (4.22) für den relativen ionosphärischen Fehler – näherungsweise

$$\Delta dT_{AB}^{rel.} \approx m_{T,A} \cdot \delta dT^z \cdot l_{AB}. \quad (4.27)$$

und damit ein Fehler proportional zum Abstand der Stationen.

Die maximalen Restfehler, die verbleiben, wenn satellitenindividuell und ohne Zenitreduktion relative troposphärische Fehler interpoliert werden, wurden in Simulationsberechnungen abgeschätzt, die entsprechend den Berechnungen für Orbitfehler und ionosphärische Fehler durchgeführt worden sind. Ausgehend von den Satellitenelevationen am Punkt A wurden die zugehörigen Elevationen am Punkt B und den verschiedenen Punkten M (siehe Abb. 4.4) mit Hilfe der Gleichung (A.7) iterativ berechnet, wobei davon ausgegangen wurde, daß der Satellit in Basislinienrichtung steht. Als *Mapping*-Funktion wurde das für den hydrostatischen Fehleranteil geltende Modell von Niell (1996) für mittlere Breiten (52°) und einer Stationshöhe von 100 m gewählt. Variationen des Tag-des-Jahres als Eingabeparameter des Niell-Modells hatten keinen Einfluß auf die Ergebnisse. Absoluter und relativer troposphärischer Fehler wurden sowohl für die Basislinie AB berechnet und dann für die Basislinie AM interpoliert als auch für AM direkt berechnet (Abb. 4.4). Die Differenzen (Interpolationsfehler) sind in Abb. 4.10 dargestellt. Es wurde von Extremwerten für den absoluten Restzenitfehler von 0,2 m und für den relativen Restzenitfehler von 0,1 m / 100 km ausgegangen.

Die Interpolationsfehler sind für höhere Elevationen verschwindend gering und nehmen für kleiner werdende Elevationen immer größere Werte an. Für einen extremen absoluten troposphärischen Restfehler übersteigen sie bei 10° Elevation 2,3 mm nicht und sind somit vernachlässigbar klein. Dagegen liegen sie für einen extremen relativen Restfehler unter ungünstigsten Umständen und 10° Elevation bei 1,3 cm. Die-

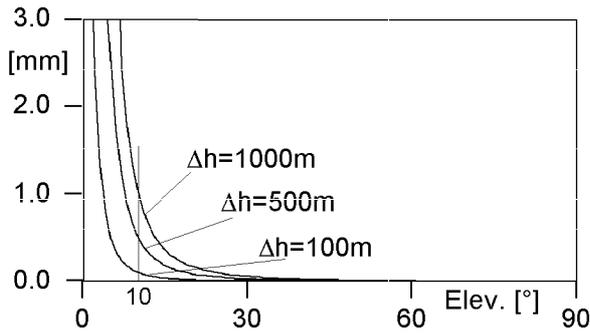


Abb. 4.11: Wirkung von Höhenunterschieden  $\Delta h$  auf den Einfluß eines absoluten troposphärischen Restzenitfehlers von 0,2 m.

ser Fehler durch lineare Interpolation satellitenindividueller Fehler ohne Zenitreduktion beträgt zwar nur 4 % des Fehlers, der unter gleichen Umständen bei der Bestimmung der Basislinien AM aufgetreten wäre (d.h. der Fehler wurde durch das gewählte Interpolationsverfahren um 96 % verringert), trotzdem kann er nicht immer vernachlässigt werden.

Er wird vollständig vermieden, wenn anstatt satellitenindividueller Fehlerinterpolation ein gemeinsames Modell der räumlichen Veränderungen der Restzenitfehler für alle Satelliten geschätzt wird. Dieser alternative Modellansatz führt zu einer Trennung von satelliten-individuell bestimmten Orbitfehlern und für alle Signale gemeinsam bestimmten troposphärischen Restfehlern. Es ist aber zu erwarten, daß bei einem Abstand der Referenzstationen von weniger als 100 km auf diesen erweiterten Modellansatz im allgemeinen verzichtet werden kann.

Zur Abschätzung des Einflusses eines Höhenunterschieds auf die Interpolationsfehler wurden die sich ergebenden Elevationen (Anhang B) und die Stationshöhen in das für den hydrostatischen Anteil gültige Niell-Modell eingeführt und einfache Differenzen gebildet. Es ergibt sich bei einem extremen absoluten Restzenitfehler von 0,2 m bei einer Elevation von  $10^\circ$  ein Effekt von 0,1 mm pro 100 m Höhendifferenz (Abb. 4.11). Dieser kann in den meisten Anwendungsfällen vernachlässigt werden.

### 4.3 Flächenhafte Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse

Die bisherigen Betrachtungen galten dem eindimensionalen Fall, bei dem zwei Referenzstationen und die Mobilstationen auf einer Geraden liegen. Dehnt man

dieses Konzept auf die Fläche aus, so sind mindestens drei Referenzstationen notwendig, um Interpolationsebenen zu bestimmen (Abb. 4.12). In Doppel-Differenz-Schreibweise ergeben sich folgende Beobachtungsgleichungen für die Residuen der Gl. (4.5) und (4.6):

$$\nabla \Delta r_{AB,I}^{ij} = a_{I,\Delta\phi}^j \cdot \Delta\phi_{AB} + a_{I,\Delta\lambda}^j \cdot \Delta\lambda_{AB} \quad [mm] \quad (4.28)$$

$$\nabla \Delta r_{AB,0}^{ij} = a_{0,\Delta\phi}^j \cdot \Delta\phi_{AB} + a_{0,\Delta\lambda}^j \cdot \Delta\lambda_{AB} \quad [mm] \quad (4.29)$$

mit Breiten- und Längendifferenzen

$$\Delta\phi_{AB} = \phi_B - \phi_A \quad [km] \quad (4.30)$$

$$\Delta\lambda_{AB} = \lambda_B - \lambda_A \quad [km] \quad (4.31)$$

und einem Basissatelliten  $i$ , für den gilt:

$$a_{I,\Delta\phi}^i = a_{I,\Delta\lambda}^i = a_{0,\Delta\phi}^i = a_{0,\Delta\lambda}^i = 0 \quad [ppm] \quad (4.32)$$

Dabei geben die Parameter  $a_{\Delta\phi}$  und  $a_{\Delta\lambda}$  [ppm] die Neigungen der Interpolationsebenen in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung an. Gl. (4.28) stellt das ionosphärische Modell dar und Gl. (4.29) das geometrische Modell, welches Orbit- und troposphärische Fehler erfaßt. Die Interpolationsebenen werden satellitenindividuell und epochenweise bestimmt.

Das Alternativmodell für den geometrischen Anteil beinhaltet die Trennung der Orbitfehler von den troposphärischen Restfehlern. Das Modell der Gl. (4.29) wird dann ersetzt durch

$$\nabla \Delta r_{AB,0}^{ij} = \underbrace{a_{o,\Delta\phi}^j \cdot \Delta\phi_{AB} + a_{o,\Delta\lambda}^j \cdot \Delta\lambda_{AB}}_{Orbit} + \underbrace{\nabla^{ij}([\delta dT_{\Delta\phi}^z \cdot \Delta\phi_{AB} + \delta dT_{\Delta\lambda}^z \cdot \Delta\lambda_{AB}] \cdot m_T)}_{tropo.} \quad (4.33)$$

wobei

- $\nabla^{ij}$  – Operator für eine einfache Differenz zwischen Satelliten,
- $\delta dT_{\Delta\phi}^z, \delta dT_{\Delta\lambda}^z$  – Gradienten des troposphärischen Restzenitfehlers in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung
- $m_T$  – troposphärische Mapping-Funktion

sind.

Aufgrund der geringen Entfernung zwischen den Stationen kann dabei von identischen Mapping-Funktionswerten für beide Stationen ausgegangen werden.

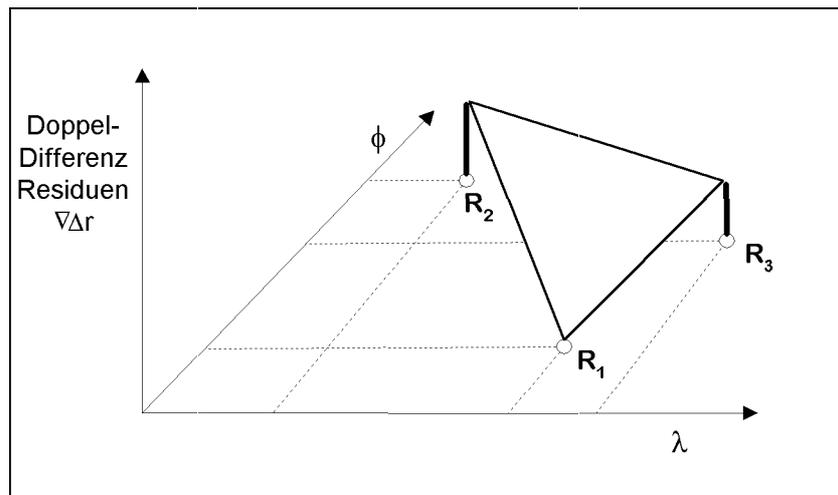


Abb. 4.12: Zweidimensionale lineare Modellierung dargestellt für Doppelte Differenzen.

Auch hier werden für die Orbitfehler satellitenindividuelle Interpolationsmodelle geschätzt. Die Modellierung der troposphärischen Restzeitfehler erfolgt dagegen nun in einem einzigen Modell für alle Satelliten. Es wird dabei nur der relative troposphärische Fehler in seinen Komponenten in Nord-Süd und Ost-West erfaßt. Bei größeren Netzausdehnungen ist es auch denkbar, einen weiteren Term einzufügen, der den verbleibenden Restfehler der absoluten troposphärischen Refraktion schätzt.

Bei größeren Höhenunterschieden zwischen den Referenzstationen muß damit gerechnet werden, daß aufgrund der in den eingesetzten Standardmodellen ungenügend erfaßten troposphärischen Höhenschichtung ein zusätzlicher höhendifferenzabhängiger Modellparameter in Gl. (4.29) oder Gl. (4.33) notwendig wird. Auf ihn wurde hier verzichtet, da in keinem der vorliegenden Datensätze, bei denen die Referenzstationen maximale Höhendifferenzen von 500 m (Harz) aufwiesen, ein entsprechender höhendifferenzabhängiger Troposphärenfehler nachgewiesen werden konnte. Auch bei einem solchen zusätzlichen Modellparameter wäre eine lineare Interpolation der troposphärischen Fehler sicherlich weitgehend erfolgreich. *Rührnöfl u.a. (1998)* zeigen dies an zwei Beispielen aus der Alpenregion. Während sie ihr Modell auf Koordinatenebene ansetzen, würde hier die Modellierung auf Messungsebene erfolgen.

Werden die Modellebenen aus einer Ausgleichung bestimmt, weil mehr als drei Referenzstationen vorliegen, so ist anhand der a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit bzw. der Verbesserungen für jede Beobachtung eine Qualitätskontrolle des Modells möglich. Eine zu große Standardabweichung der Gewichtseinheit (Testgrenze z.B. 2 cm bzw. 2 cm bezogen auf  $L_1$ ) deutet darauf hin, daß der lineare In-

terpolationsansatz in dieser Epoche nicht gültig ist. Es kann dann versucht werden, anhand der Verbesserungen den verursachenden Satelliten zu detektieren und ihn für diese Epoche von der Modellberechnung auszuschließen.

Operationen, bei denen alle Modellparameter gleichen Typs ( $a_{I,\Delta\phi}$ ,  $a_{I,\Delta\lambda}$ ,  $a_{0,\Delta\phi}$  und  $a_{0,\Delta\lambda}$  bzw. beim Alternativmodell mit separater Troposphärenmodellierung  $a_{o,\Delta\phi}$  und  $a_{o,\Delta\lambda}$ ) um den gleichen Betrag verändert werden, führen ausschließlich zu einer Veränderung des Empfängeruhrfehlers. Deswegen hat die Wahl des Basissatelliten bei der epochenweisen Bestimmung der Modellparameter keinen Einfluß auf die Positionierung. Beim Wechsel des Basissatelliten kommt es zu Unstetigkeiten, die die Aufdatierung aller Modellparameter notwendig machen. Insbesondere bei Echtzeit-Anwendungen mit begrenzter Datenübertragungskapazität ist es deshalb sinnvoller, die Parameter so zu schätzen, daß sie nur geringen Veränderungen unterliegen und somit selten aufdatiert werden müssen. Aus gleichem Grund sollten auch die Beträge der Modellparameter gering sein.

Deswegen werden für alle Modellparameter gleichen Typs folgende Bedingungen aufgestellt, deren Einhaltung keinen Einfluß auf die erzielbaren Positionierungsergebnisse hat, aber das zu übertragende Datenvolumen verringern. In der ersten Epoche einer Modellschätzung soll gelten:

$$\sum a \stackrel{!}{=} 0. \quad (4.34)$$

In jeder weiteren Epoche soll für diejenigen Modellparameter  $a$  gelten, die sowohl in der vorherigen Epoche  $t-1$  wie auch in der jetzigen Epoche  $t$  bestimmt wurden:

$$\sum (a_t - a_{t-1}) \stackrel{!}{=} 0. \quad (4.35)$$

Diese zweite Bedingung ist noch nicht ausreichend, um immer möglichst kleine Beträge der Modellparameter zu garantieren. Ein Wegdriften der Modellparameter vom Mittelwert 0 aufgrund systematischer Einflüsse wird durch folgende weitere Bedingung verhindert:

$$\sum a \cdot e^{-2|a|} \stackrel{!}{=} 0, \quad (4.36)$$

wobei die Einführung einer Gewichtung auf der Basis der  $e$ -Funktion den Einfluß großer Parameter bei auf- oder untergehenden Satelliten begrenzt. Die Bedingungen (4.35) und (4.36) stehen im Widerspruch zueinander, so daß sie nicht gleichzeitig vollständig erfüllt werden können. Sie werden deswegen gewichtet angewendet, wobei das Hauptgewicht auf Bedingung (4.35) liegt und (4.36) nur der langfristigen Beibehaltung kleiner Beträge der Modellparameter dient.

Die weitere Bearbeitung der Parameter-Zeitreihen durch Filterung zur Beseitigung hochfrequenter Störeinflüsse aufgrund von Mehrwegefehlern und Meßrauschen erfolgt nun satellitenindividuell und führt somit zu einer tatsächlichen Veränderung der erzielbaren Positionierungsergebnisse. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß ionosphärische Effekte Perioden in der gleichen Größenordnung aufweisen können, wie sie auch durch Mehrwegeeffekte erzeugt werden (10 bis 30 Minuten). Orbitfehler und troposphärische Restfehler sind dagegen langwelligerer Natur, so daß kürzerperiodische Mehrwegeeffekte herausgefiltert werden können. Weiterhin sind bei den Orbitfehlern mögliche Unstetigkeiten der Zeitreihen beim Wechsel der *broadcast*-Ephemeriden zu berücksichtigen.

Mit Hilfe der Modellparameter können nun in Abhängigkeit von Koordinatendifferenzen Beobachtungskorrekturen berechnet werden. Diese korrigieren relative Beobachtungsfehler (in einer Basislinie), aber keine absoluten Beobachtungsfehler. Die geometrischen Korrekturen werden auf alle Beobachtungsgrößen (Code und Phase, zwei Frequenzen) identisch angewendet. Bei der ionosphärischen Korrektur muß dagegen die unterschiedliche Wirkung der ionosphärischen Refraktion auf die Beobachtungsgrößen berücksichtigt werden.

## 4.4 Stationsabhängige Fehlerinflüsse

### 4.4.1 Mehrwegeausbreitung

Mehrwegeausbreitung kann als unkorreliert zwischen Satelliten und zwischen Referenzstationen angenommen werden. Dementsprechend wird sie wirksam verringert, wenn korrespondierende Messungen über (gleich- oder ungleichgewichtete) Mittelbildung zusammengefaßt werden. Für Phasendaten ist dabei Voraussetzung, daß die Phasenmehrdeutigkeiten auf Doppel-Differenz-Niveau bestimmt und beseitigt wurden und sich somit die Beobachtungen der unterschiedlichen Stationen auf gleichem Mehrdeutigkeitsniveau befinden. Weiterhin sollten bei regionalen oder großräumigen Stationsnetzen die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler durch Modellierung erfaßt und beseitigt worden sein. Die Verringerung der Mehrwegeausbreitung erfolgt für jede der vier Beobachtungsgrößen getrennt.

Die Verwendung eines gewichteten Mittels wird dann notwendig, wenn bekannt ist, daß die Mehrwegeinflüsse an den Referenzstationen stark unterschiedlich ausfallen. Ursache hierfür kann sowohl die Nutzung verschiedener Antennen- und Empfängertechnologien sein, wie auch mehr oder weniger günstige Reflexionsbedingungen in der Antennenumgebung. Es ist auch denkbar, daß man einzelne Stationen in vorgegebenen Azimut-Elevationsbereichen von der Mittelbildung ausschließt, wenn in diesen Bereichen eine besonders starke Mehrwegebeeinflussung nachgewiesen wurde.

### 4.4.2 Antennenphasenzentren

Antennenphasenzentrumsfehler können durch Beobachtungen auf mehreren Referenzstationen nicht verringert werden. Sie müssen durch Kalibrierungen erfaßt werden. Die Positionierung in Referenzstationsnetzen verstärkt die Problematik der Antennenphasenzentrumsfehler, da hierbei vermehrt mit unterschiedlichen Antennentypen gemessen werden wird (siehe Kapitel 3.5).

## 5 Virtuelle Referenzstationen

### 5.1 Das Konzept

Die Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen kann entweder in einer gemeinsamen Netzausgleichung der Referenz- und Mobilstationsdaten erfolgen oder nach dem Konzept der virtuellen Referenzstationen. Die erzielbaren Ergebnisse sind identisch, wenn gleiche Fehlermodellierungsansätze Verwendung finden. Es sei darauf hingewiesen, daß heute erhältliche GPS-Netzausgleichungsprogramme die in Kapitel 4 beschriebenen Fehlermodellierungsansätze nicht unterstützen, sondern (fast) ausschließlich vom Vorhandensein zufälliger Fehler ausgehen.

Die Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation werden unter Beachtung der Fehlermodellierungsansätze aus den Daten der real existierenden Referenzstationen berechnet. Die Positionierung einer Mobilstation erfolgt dann nur über die eine Basislinie zur virtuellen Referenzstation. Um die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse

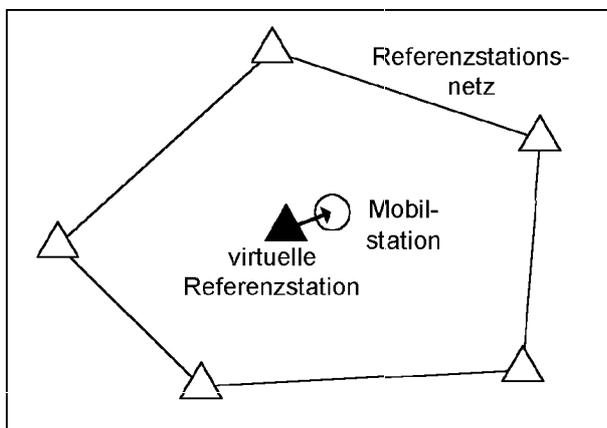


Abb. 5.1: Positionierung mit Hilfe einer virtuellen Referenzstation.

in dieser Basislinie möglichst gering zu halten, werden zur räumlichen Festlegung der virtuellen Referenzstation die Näherungskordinaten der Mobilstation genutzt. Eine Genauigkeit von 100 m ist dafür mehr als ausreichend und durch absolute GPS-Positionierung jederzeit erzielbar. Ebenso ist es möglich, eine virtuelle Referenzstation für ein Meßgebiet (mit einem maximalen Durchmesser von 2 bis 3 km) zu bestimmen. Die virtuellen Beobachtungen sollen ähnliche oder bessere Fehlereigenschaften aufweisen als Beobachtungen, die mit einer realen Referenzstation auf derselben Position erzielt werden könnten.

Das Konzept der virtuellen Referenzstationen hat einige Vorteile gegenüber einem Netzausgleichungsansatz:

**Geringerer Kommunikationsaufwand:** Die Datenübertragung zum Nutzer beschränkt sich auf einen (virtuellen) Beobachtungsdatensatz plus ggf. das geringe Datenvolumen der Korrekturmodelle. Sie ist damit wesentlich weniger aufwendig als bei einer Netzlösung, bei der die Beobachtungsdaten einiger Referenzstationen dem Nutzer übermittelt werden müssen.

**Geringerer Auswerteaufwand:** Voraussetzung für die Berechnung der Korrekturmodelle ist die Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstationsnetz. Bei Verwendung virtueller Referenzstationen muß diese nur einmal erfolgen, unabhängig von der Anzahl der Nutzer. Bei einer Netzlösung muß jeder Nutzer diesen Bearbeitungsschritt selbst durchführen.

**Qualitätskontrolle:** Gleichzeitig mit der Auswertung des Netzes der realen Referenzstationen kann eine durchgreifende Qualitätskontrolle der Beobachtungsdaten vorgenommen werden, so daß der Nutzer nur kontrollierte Beobachtungen zur Verfügung gestellt bekommt. Der Referenzstationsnetzbetreiber kann somit eine gewisse Qualität der von ihm gelieferten Daten garantieren. Im Falle der Netzlösung sind die Beobachtungsdaten nur auf der Ebene von Einzelstationslösungen und damit unvollständig auf grobe Fehler kontrolliert. Hierbei gelingt z.B. die Erkennung von Cycle-Slips nur unvollständig. Der Nutzer muß entsprechende Kontrollen selbst vornehmen. In Einzelfällen kann es dann auch vorkommen, daß er grob fehlerhafte Datensätze erhält (und bezahlt), die nicht verarbeitbar sind.

**Nutzung vorhandener Software:** Bei Verwendung einer virtuellen Referenzstation erfolgt die Positionierung über eine einzelne Basislinie, so daß existierende und weit verbreitete Softwarepakete dafür eingesetzt werden können.

### 5.2 Berechnung virtueller Beobachtungen

Die Erzeugung der Beobachtungen einer virtuellen Station erfolgt in zwei Stufen. Bei den Phasenbeobachtungen werden in der ersten Stufe die realen Referenzstationsdaten in folgende beiden Anteile zerlegt (linke Seite Abb. 5.2):

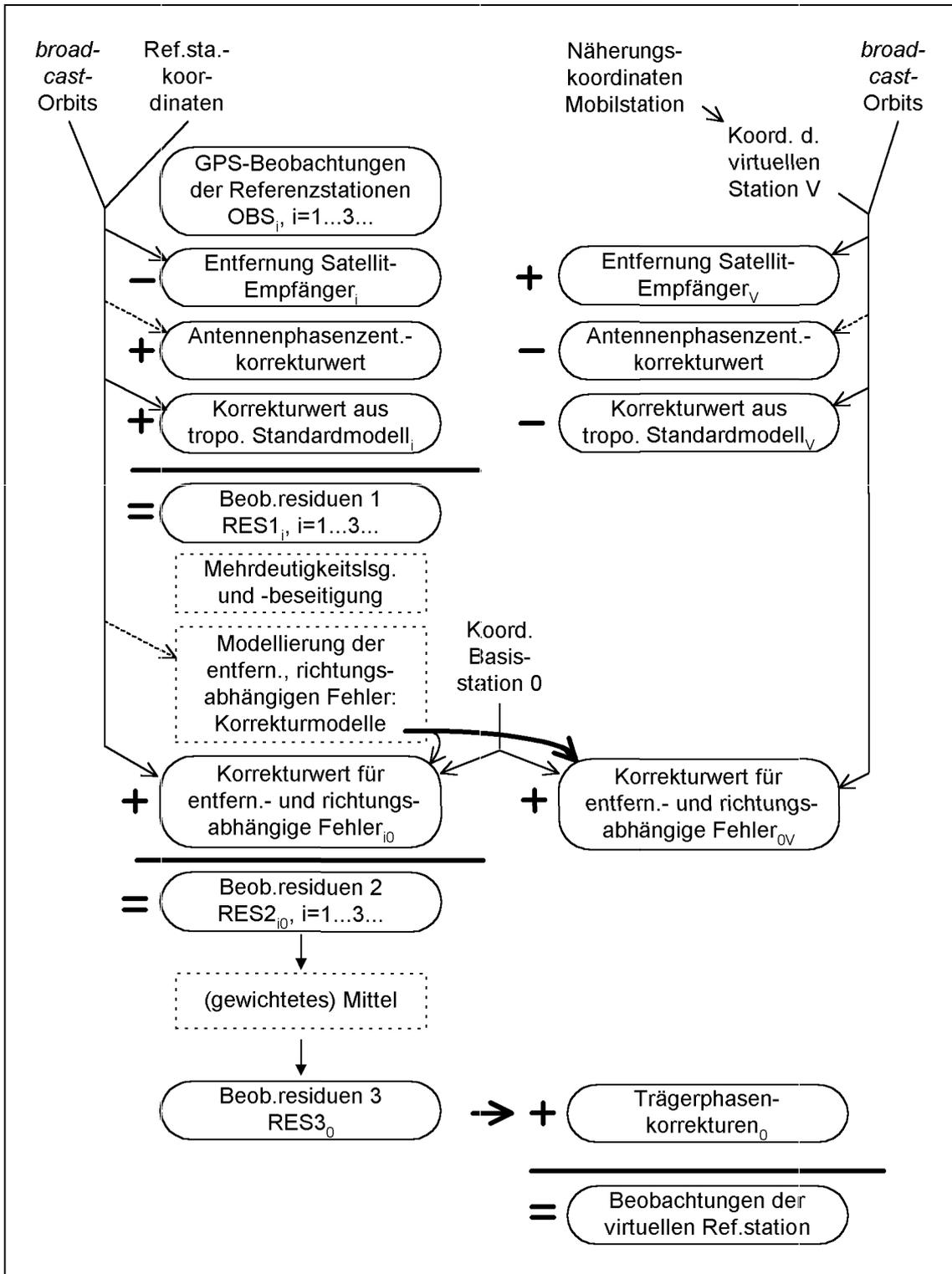


Abb. 5.2: Berechnung virtueller Phasenbeobachtungen.

- Korrekturmodelle, die die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler erfassen, und
- Beobachtungskorrekturen (Beobachtungsresiduen 3: RES<sub>30</sub>), die sich auf eine gewählte Position im Netz (hier Basisstation 0 genannt) beziehen.

In der zweiten Stufe werden diese Anteile zu einem virtuellen Beobachtungsdatensatz zusammengesetzt, der sich auf die gewählte Position der virtuellen Station bezieht (rechte Seite Abb. 5.2). Für die Codebeobachtungen ist die Berechnung verkürzt: es entfällt die Mehrdeutigkeitslösung und die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler. Die notwendigen Korrekturmodelle werden von den Phasendaten übernommen.

Die Berechnungen erfolgen vorteilhaft mit undifferenzierten Beobachtungen. Hierbei gelingt die korrekte Berücksichtigung der algebraischen Korrelationen im Referenzstationsnetz problemlos. Im einzelnen sind die im folgenden beschriebenen Berechnungsschritte durchzuführen. Die undifferenzierten Beobachtungen an den Referenzstationen werden um die Entfernung Satellit-Empfänger, wie sie sich aus den Referenzstationskoordinaten und *broadcast*-Bahnen ergibt, reduziert. Dies ist der entscheidende Schritt, um von Beobachtungen auf Beobachtungskorrekturen zu kommen.

Sind unterschiedliche Antennentypen auf den Referenzstationen im Gebrauch, müssen Antennenphasenzentrumskorrekturen angebracht werden. Alle Beobachtungsresiduen sollen sich auf einen Antennentyp beziehen. Relative Korrekturen sind daher in regionalen Netzen ausreichend. Will man nicht nur mittlere Antennenphasenzentrumsfehler, sondern auch elevationsabhängige (oder elevations- und azimutabhängige) Anteile berücksichtigen, müssen Satelliten-Elevationen (und -Azimute), die sich aus den Orbits und Stationskoordinaten berechnen lassen, in die Korrekturberechnung mit einfließen.

Die troposphärische Korrektur auf der Grundlage eines Standardmodells zur Verminderung höhendifferenzbedingter Refraktionsunterschiede ist Voraussetzung für die spätere rein flächenhafte Modellierung der troposphärischen Restfehler. Einfache Modelle verwenden Satellitenelevation und Stationshöhe als Eingabeparameter in das Modell. Komplexere Modelle benötigen zusätzlich die geographische Breite der Station und den Tag des Jahres.

Es ergibt sich ein erster Datensatz von Residuen (RES1), der zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz genutzt wird. Wie schon im Unterkapitel 4.1.1 diskutiert, ist die Erzeugung hochgenauer Korrekturmodelle nur nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung und -beseitigung

möglich. Beobachtungen mit ungelösten Mehrdeutigkeiten können für die Modellierung nicht verwendet werden und führen zu einer verminderten Verfügbarkeit der Korrekturmodelle.

Wird zur Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler der Ansatz gewählt, der ionosphärische und geometrische Fehlereinflüsse voneinander trennt, können die Modellparameter, wie in Unterkapitel 4.3 erläutert, nun epochenweise geschätzt werden. Will man zusätzlich Orbit- und Troposphärenrestfehler einzeln betrachten, muß hier auch die troposphärische *Mapping*-Funktion einfließen, die es erlaubt, die Beobachtungsfehler auf den troposphärischen Restzenitfehler zu reduzieren. Liegen Beobachtungen von mehr als drei Referenzstationen vor, werden ausgleichende Interpolationsebenen geschätzt und mit Hilfe der Überbestimmungen Ausreißer identifiziert und beseitigt.

Die so erhaltenen Korrekturmodelle werden auf die Referenzstationsdaten angewandt, um alle Beobachtungsresiduen auf die frei gewählte Position einer (virtuellen) Basisstation, z.B. im Netz-, „zentrum“, zu beziehen. Die damit erhaltenen Beobachtungsresiduen (RES2) sind also für korrespondierende Messungen (gleicher Meßzeitpunkt, gleicher Satellit) identisch bis auf Empfängeruhrfehler, stationsabhängige Fehlereinflüsse und Modellierungsfehler der angewandten Korrekturmodelle.

Wenn alle realen Referenzstationen in einer Meßepoche Beobachtungen zu den selben Satelliten aufweisen, können die korrespondierenden Beobachtungsresiduen nun gemittelt werden, um die stationsabhängigen Fehlereinflüsse zu verringern. Die resultierenden Beobachtungsresiduen weisen dann einen Empfängeruhrfehler auf, der dem Mittel der Empfängeruhrfehler der realen Beobachtungsresiduen entspricht.

Tatsächlich fehlen aber immer wieder Satellitenbeobachtungen bei einzelnen Stationen. In diesem Fall würde eine Mittelbildung über die verbleibenden Beobachtungen der restlichen Stationen einen falschen Empfängeruhrfehler dieser einen virtuellen Beobachtung erzeugen. Löscht man in einer solchen Meßepoche alle Beobachtungen dieser einen Station oder alle Beobachtungen dieses einen Satelliten, verliert man viele Informationen. Als Alternative bietet sich an, einen Basisatelliten zu wählen, der von allen Stationen aus beobachtet wurde. Seine Beobachtungen werden als Empfängeruhrfehler dieser Meßepoche betrachtet und alle Beobachtungen um sie reduziert. Diese Manipulation der Empfängeruhren hat keinerlei Auswirkungen auf die Positionierung. Die Bildung des (gewichteten) Mittels kann dann bei jedem einzelnen Satelliten mit der Anzahl tatsächlich vorhandener Beobachtungen durchgeführt werden.

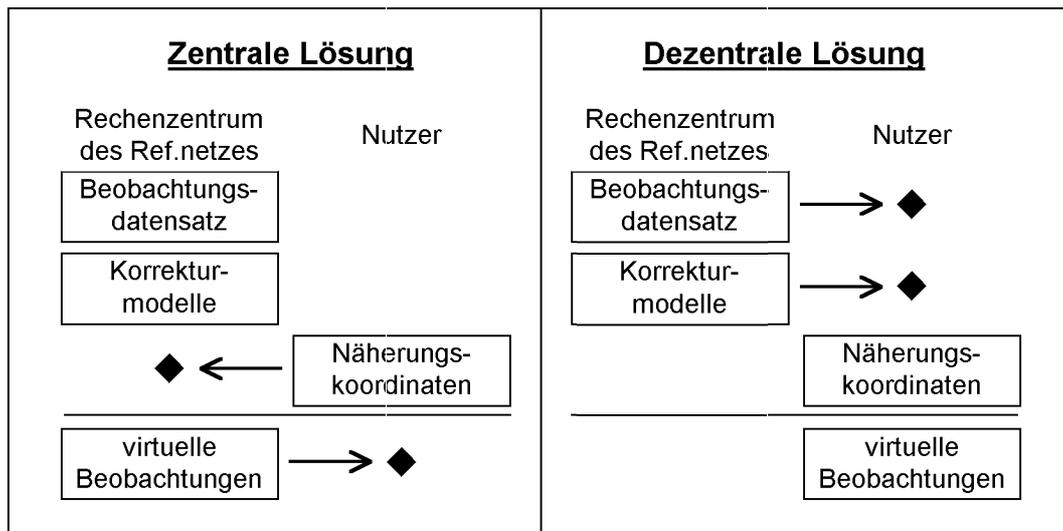


Abb. 5.3: Zentrale und dezentrale Berechnung virtueller Beobachtungen.

Gleichzeitig mit der Mittelbildung kann hier auch wieder eine Qualitätskontrolle der Beobachtungsdaten durchgeführt werden, wenn die Korrekturmodelle aus den Daten von mehr als drei Stationen berechnet wurden. Weicht eine Beobachtung zu stark vom Mittelwert ab, kann sie als Ausreißer identifiziert werden und wird von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen.

An diesem Punkt ist die Bearbeitung der realen Beobachtungen beendet. Als Bausteine, die zur Erstellung der virtuellen Beobachtungen genutzt werden, liegen vor (wie schon am Beginn dieses Unterkapitels erwähnt):

**Beobachtungskorrekturen**

(=Beobachtungsresiduen) für Code- und Phase, die sich auf die Position der Basisstation beziehen. Die darin enthaltenen stationsabhängigen Fehlereinflüsse (insbesondere Mehrwegefehler) sind geringer als bei einer einzelnen Referenzstation.

**Korrekturmodelle** der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse, die aus den Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen hergeleitet wurden.

Mit Hilfe der Korrekturmodelle können sowohl Code- wie auch Phasenkorrekturen von der Position der Basisstation auf die gewünschte Position der virtuellen Referenzstation übertragen werden. Um aus diesen Beobachtungskorrekturen nun wieder vollständige Beobachtungen zu errechnen, muß die troposphärische Korrektur aus dem gewählten Standardmodell rückgängig gemacht werden und die geometrische Entfernung Satellit – virtuelle Station hinzugerechnet werden. Eine Antennenphasenzentrumskorrektur

ist dann notwendig, wenn die virtuelle Station andere Fehlereigenschaften aufweisen soll, als der Antennentyp, auf den die realen Referenzstationsantennen hin korrigiert worden sind.

**5.3 Realisierungsarten**

Die Berechnung der Beobachtungen virtueller Referenzstationen kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, die in engem Zusammenhang zum Datenfluß innerhalb des Referenzstationssegments und zwischen Referenzstationssegment und Nutzersegment stehen.

Es soll hier nicht näher der Fall erörtert werden, daß sich der Nutzer die Beobachtungsdaten aller umliegenden Referenzstationen besorgt und selbst die Beobachtungen der für ihn geeigneten virtuellen Referenzstation berechnet. Hierbei ist weiterhin die Übertragung aller Referenzstationsdaten notwendig. Dieses Datenvolumen kann aber bei Vorprozessierung der Daten und Erstellen der Beobachtungen für die gewählte Position einer Basisstation und der Korrekturmodelle stark vermindert werden.

**5.3.1 Zentrale oder dezentrale Berechnung**

Liegen der virtuelle Beobachtungsdatensatz einer Basisstation und die Korrekturmodelle vor, so sind zwei grundsätzlich verschiedene Arten zur Berechnung virtueller Beobachtungen denkbar.

Bei einer zentralen Lösung übernimmt das Rechenzentrum des Referenzstationsnetzes die Berechnung

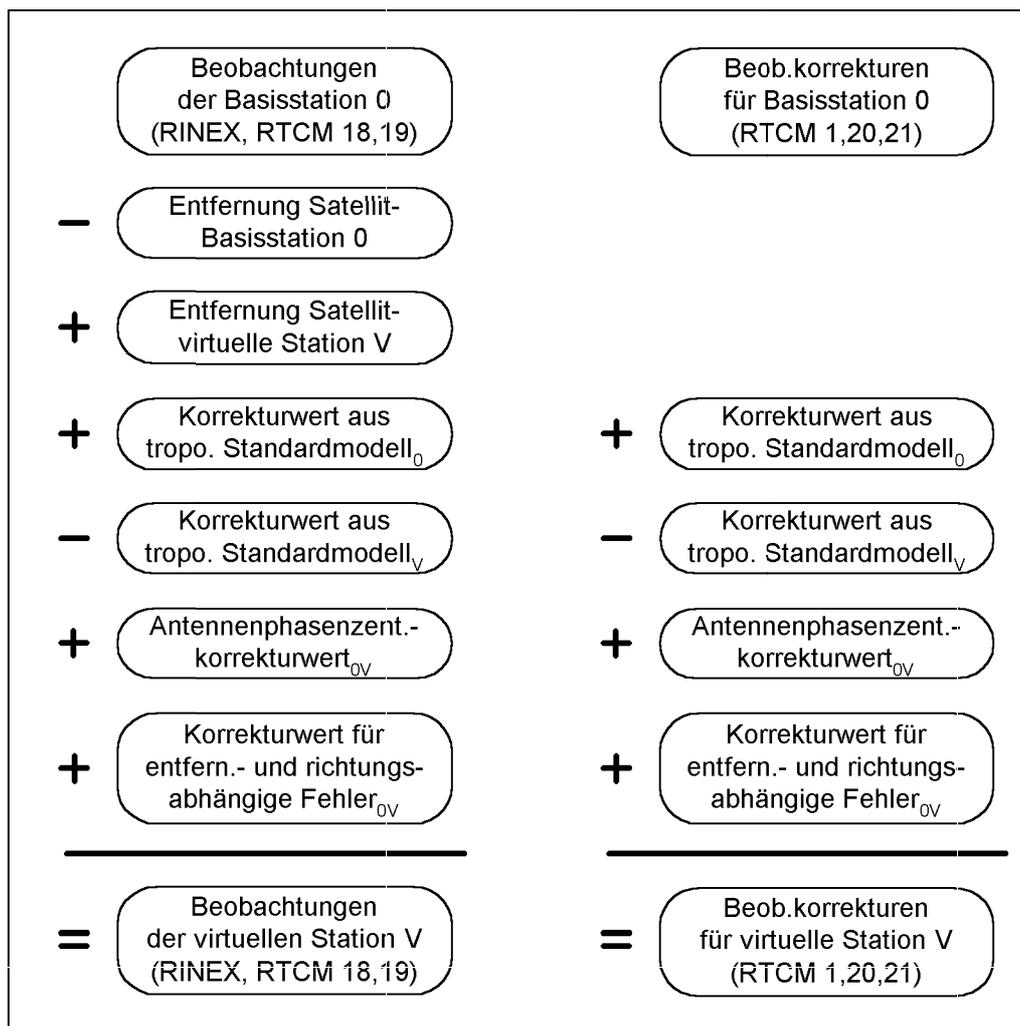


Abb. 5.4: Berechnung von virtuellen Beobachtungen bzw. Beobachtungskorrekturen aus entsprechenden Datensätzen einer Basisstation.

der virtuellen Beobachtungen (Abb. 5.3). Es benötigt dafür die Näherungskordinaten des Nutzers, die die Position der virtuellen Station festlegen, und den gewünschten Beobachtungszeitraum. Die virtuellen Beobachtungen können dann in Standarddatenformaten an den Nutzer abgegeben werden. Die Anzahl der gleichzeitig bedienbaren Nutzer dieser Lösung wird durch die Kapazität des zentralen Rechenzentrums begrenzt. Die Kommunikation Referenzsegment – Nutzer erfolgt individuell z.B. über Telefon und Modem. Die Kostenabrechnung für den Referenzstationsbetreiber ist über eine Nutzeridentifikation möglich.

Bei der dezentralen Lösung stellt der Referenzstationsbetreiber die vorausgewerteten Daten getrennt nach Beobachtungsdatensatz, der sich auf die Position der Basisstation bezieht, und Korrekturmodelle zur Verfügung. Der Nutzer selbst muß nun mit Hilfe seiner Näherungskordinaten und einer geeigneten

Software die Beobachtungen der für ihn gültigen virtuellen Station berechnen (Abb. 5.3). Hierbei entstehen keine Kapazitätsbeschränkungen auf der Referenzstationsseite. Die Beobachtungsdaten und Korrekturmodelle können über Funk und in Zukunft vielleicht auch über DAB (*Digital Audio Broadcast*) oder entsprechende Systeme ausgesendet werden, welches eine unbeschränkte Nutzeranzahl ermöglicht. Die Kostenabrechnung erfolgt auf der Nutzerseite z.B. in der Form des Nutzungspreises für einen Decoder, der die verschlüsselten Daten in ein für den Nutzer verwendbares Format wandelt.

### 5.3.2 Verwendung von Beobachtungen oder Beobachtungskorrekturen

Für den Datenaustausch haben sich in der geodätischen Praxis zwei Standardformate durchgesetzt.

Dies ist zum einen das *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), welches eine Beobachtungsspeicherung im ASCII-Format erlaubt (Gurtner 1998). Die Datenübertragung erfolgt in Dateien. Um das Datenvolumen zu verringern, werden Packprogramme verwendet. Eine Datenvolumenverringern ist zusätzlich mit dem außerhalb der eigentlichen RINEX-Definition entstandenen Hatanaka-Komprimierungsalgorithmus möglich. Im RINEX-Format werden vollständige Beobachtungsdatensätze abgespeichert.

Ein zweites Datenformat, welches zum internationalen Standard geworden ist, sind die *RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service* (RTCM 2.1, 1994), welche im folgenden kurz RTCM genannt werden sollen. Sie dienen der Echtzeit-Datenübertragung im Funkverkehr oder über andere Datenverbindungen. Mit der Version 2.1 von 1994 sind zwei Möglichkeiten gegeben, GPS-Beobachtungsgrößen zu übertragen: die eine verwendet Beobachtungskorrekturen (Datensatztypen 1, 20 und 21) und die andere, ähnlich RINEX, vollständige Beobachtungen (Datensatztypen 18, 19). Die RTCM-Beobachtungskorrekturen unterscheiden sich von den in Unterkapitel 5.2 definierten Beobachtungskorrekturen insbesondere in Bezug auf eine troposphärische Korrektur aus einem Standardmodell. Bei RTCM-Beobachtungskorrekturen darf eine solche Korrektur nicht angebracht worden sein.

Werden dem Nutzer der Beobachtungsdatensatz der Basisstation in einem der beiden Standardformate und zusätzlich die Korrekturmodelle in einem zu definierenden entsprechenden Format (dezentrale Lösung) übermittelt, so müssen die in Abb. 5.4 beschriebenen Berechnungsschritte durchgeführt wer-

den, um auf einen Datensatz der virtuellen Referenzstation im selben Datenformat zu kommen. Die Orbitdatensätze, die zur Berechnung der Entfernung Satellit – Empfänger verwendet werden, müssen mit denen übereinstimmen, für die Korrekturmodelle vorliegen. Auch die troposphärischen Korrekturen sollten mit dem Standardmodell gerechnet werden, welches für die Erzeugung der Korrekturmodelle Verwendung fand. Eine Antennenphasenzentrumskorrektur ist nur dann notwendig, wenn sich die virtuellen Beobachtungsdaten auf einen anderen Antennentyp beziehen sollen, als die Basisstationsdaten. Die Korrekturen der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler ergeben sich aus den übermittelten Korrekturmodellen und den Koordinatendifferenzen Basisstation - virtuelle Station.

Bei Verwirklichung einer zentralen Erzeugung virtueller Beobachtungen können die Berechnungen noch vereinfacht werden, wenn mit den Beobachtungsdifferenzen, wie sie in Abb. 5.2 definiert worden sind, gearbeitet wird. Die Berechnungsschritte ergeben sich dann aus der rechten Hälfte derselben Abbildung. Im Gegensatz zur Verwendung von RTCM-Beobachtungskorrekturen entfällt hier die Berechnung der troposphärischen Korrekturen für die Basisstation. Will man als Ergebnis RTCM-Beobachtungskorrekturen der virtuellen Referenzstation erhalten, so ist hier keine Berechnung der Satellitenelevationen an der Basisstation mehr notwendig. Als Parameter zur Berechnung der virtuellen Beobachtungskorrekturen werden die Koordinaten der Basisstation und der virtuellen Station sowie die Satellitenelevationen (je nach Art der Antennenphasenkorrektur ggf. auch die Satellitenazimute) am Beobachtungsort der Mobilstation benötigt.

## 6 Anwendungen und Ergebnisse

Die in den beiden letzten Kapiteln dargestellten Konzepte der Korrekturmodellierung und virtuellen Referenzstationen entstanden in enger Verzahnung mit ihrer software-technischen Realisierung. Es wurde das Softwarepaket Wa-Soft geschrieben, welches u.a. zur Auswertung von Referenzstationsnetzen und zur Erzeugung virtueller Beobachtungsdaten genutzt werden kann.

Als Testdaten standen im wesentlichen GPS-Beobachtungen aus dem Referenzstationsnetz von Sachsen-Anhalt zur Verfügung, welches seit 1996 mit 18 Stationen flächendeckend realisiert ist (*Patzschke und Leipholz 1996*). Der Abstand zwischen benachbarten Stationen beträgt 30 bis 50 km, so daß sich Subnetze mit drei, besser vier oder fünf Stationen für die Erzeugung von Korrekturmodellen eignen. Um neben den Referenzstationsbeobachtungen noch Beobachtungsdaten in höherer Punktdichte zu erhalten, wurden im Sommer 1996 in einer Netzschleife zwölf Punkte je 10 Stunden lang besetzt. Mit diesem Datenmaterial kann die Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen praxisnah ausgetestet werden (Unterkapitel 6.1).

Um darüber hinaus die Eignung der Auswertekonzepte auch unter extremen Fehlereinflüssen auszutesten, wurden Korrekturmodelle für drei Monate Daten aus der nördlichen Hälfte des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt berechnet und ausgewählte Datensätze näher untersucht (Unterkapitel 6.2).

Für den wirtschaftlichen Aufbau von Referenzstationsnetzen ist insbesondere die Frage von Bedeutung, wieviele Referenzstationen auf einer vorgegebenen Fläche notwendig sind, d.h. wie groß ihr maximaler Abstand sein darf, um schon nach kurzer Beobachtungszeit 1 cm Lagegenauigkeit auf Neupunkten zu erzielen. Eine Verringerung der Stationsanzahl würde nicht nur die Investitionskosten, sondern auch die laufenden Kosten, insbesondere der Kommunikation, senken. Um dieser Fragestellung näher nachzugehen, wurden Korrekturmodelle und virtuelle Beobachtungen für einen Referenzpunktabstand von 100 km näher untersucht (Unterkapitel 6.3).

### 6.1 Anwendungen in einer Referenzstations-Netzschleife

Um die Positionierung mit Hilfe der beschriebenen Korrekturmodelle und die Realisierung über virtuel-

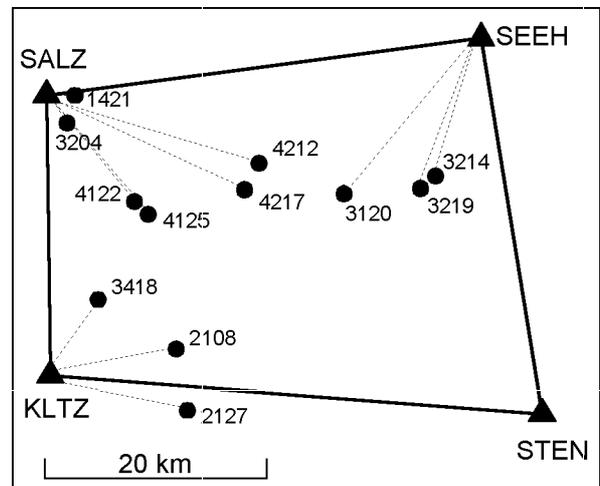


Abb. 6.1: Testgebiet mit 12 Mobilstationen in der nördlichsten Netzschleife (40 km x 30 km) des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt.

le Referenzstationen praxisnah auszutesten, wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen (254-256/1996) in der nördlichsten Netzschleife des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt Messungen durchgeführt. Es kamen jeweils vier mobile Trimble 4000 SSI-Empfänger auf für GPS gut geeigneten TPs in unterschiedlichen Entfernungen zu den Referenzstationen zum Einsatz (Abb. 6.1). Auf jedem Punkt wurde 10 Stunden lang beobachtet. Die Gesamtmenge der Beobachtungen wurde zur Berechnung von Sollösungen verwendet. Der eigentliche Test erfolgte mit 5 Minuten langen Teilstücken der Beobachtungen, also 120 Einzelbestimmungen für jeden Punkt. Somit konnten insgesamt 1440 Testberechnungen durchgeführt werden.

#### 6.1.1 Korrekturmodelle

Für alle Daten konnten die Mehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz problemlos und vollständig gelöst werden. Damit liegen für jede Referenzstation für 99,5 und mehr Prozent der vollständigen Originalbeobachtungen zu Satelliten über 10 Grad Elevation mehrdeutigkeitsbereinigte Residuen vor. Die fehlenden Messungen gehen auf Datenselektionen im Vorfeld der Mehrdeutigkeitslösung zurück.

Korrekturmodelle wurden für alle Beobachtungen derjenigen Epochen erzeugt, bei der Beobachtungen von mindestens drei der vier Referenzstationen vorlagen. Sie lassen eine Einschätzung der entfernungs- und richtungsabhängigen Beobachtungsfehler zu. Ab-

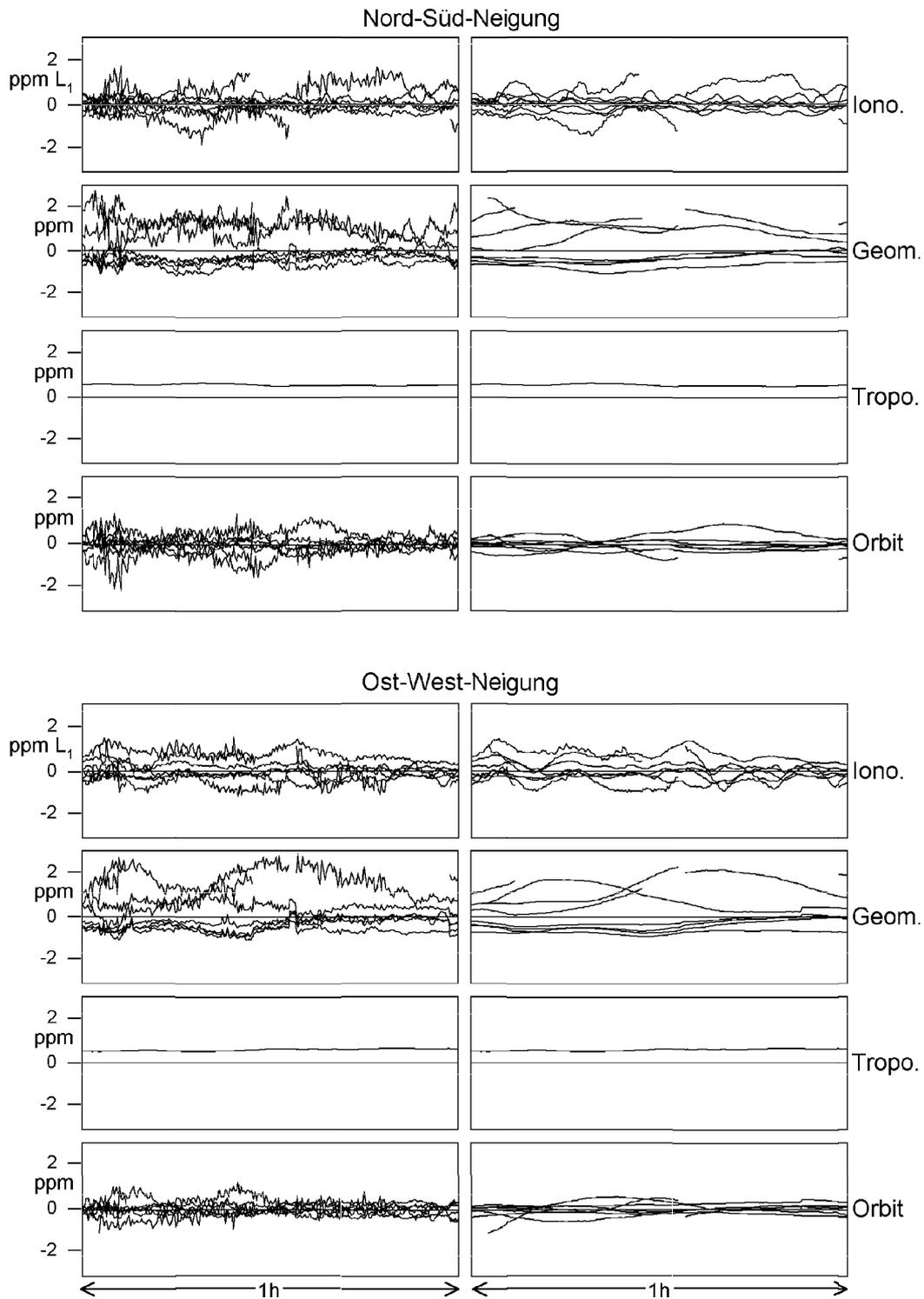


Abb. 6.2: Korrekturmodelle für einen Ausschnitt von einer Stunde, links: aus Einzelepochen bestimmte Modellwerte für ionosphärisches, geometrisches und Orbit-Modell, alle anderen Modellkoeffizienten beruhen auf gefilterten Daten.

bildung 6.2 zeigt einen Ausschnitt der Korrekturmodelle von einer Stunde. Es werden vier Modellarten dargestellt, wobei das geometrische Modell auch in troposphärischen Anteil und Orbitanteil aufgespalten wurde. Zur Korrektur werden also entweder das ionosphärische und das geometrische Modell gemeinsam genutzt oder das ionosphärische, das troposphärische und das Orbit-Modell. Wie in Unterkapitel 4.3 beschrieben, werden ionosphärisches, geometrisches und Orbit-Modell satellitenindividuell bestimmt. In jeder Epoche und für jeden Satelliten ergeben sich somit zwei Koeffizienten, die die Nord-Süd-Neigung und die Ost-West-Neigung der Korrekturebene beschreiben. Jede durchgezogene Linie in Abbildung 6.2 zeigt dementsprechend die zeitlichen Veränderungen der Modellkoeffizienten für einen Satelliten. Das troposphärische Modell wird dagegen für alle Satelliten gemeinsam geschätzt, so daß es durch ein Zahlenpaar pro Epoche beschrieben wird.

Da bei der epochenweisen Bestimmung der troposphärischen Gradienten diese nur schwach bestimmt sind, werden die Tiefpaßfiltereigenschaften eines Kalmanfilters genutzt, um verbesserte Modellkoeffizienten zu erhalten. Für die anderen drei Modellarten werden sowohl aus Einzelepochen berechnete wie auch gefilterte Modellkoeffizienten dargestellt (Abb. 6.2). Bei der Festlegung der Filterparameter muß darauf geachtet werden, daß in der flächenhaften Modellierung der ionosphärischen Refraktion kurzperiodischere Erscheinungen auftreten können als bei der Modellierung von troposphärischen Restfehlern oder von Orbitfehlern. Darüber hinaus muß beim Wechsel des Ephemeridendatensatzes mit Unstetigkeiten gerechnet werden, die im geometrischen Modell bzw. im Orbitmodell berücksichtigt werden müssen. Zur Festlegung der Filterparameter wurde hier von Gauß-Markov-Prozessen ausgegangen (*Brown und Hwang 1992*) und Korrelationszeiten von 10 Minuten für die Koeffizienten der ionosphärischen Modelle und 60 Minuten für die Koeffizienten der troposphärischen, Orbit- und geometrischen Modelle verwendet.

Der Einfluß der Wahl der Korrekturmodelle und der Filterung lassen sich am besten anhand von Positionierungsergebnissen aufzeigen. Eine repräsentative Auswahl von Koordinatengenauigkeiten bei kurzzeitigen statischen Beobachtungen (Tab. 6.1) zeigt, daß bei ungefilterten Koeffizienten keinerlei Unterschiede zwischen Anwendung des geometrischen Modells einerseits und Anwendung von troposphärischem und Orbit-Modell andererseits bestehen. Die Unterschiede sind auch nach einer Filterung so gering, daß auf die Aufspaltung des geometrischen Modells für den Zweck der Positionierung verzichtet wurde. Die verwendeten Filteransätze führten im allgemeinen zu Veränderungen in den Standardabweichungen im

Referenzstation Modelle	Filterung	$L_1$ Lage/Höhe [cm]	$L_0$ Lage/Höhe [cm]
nächste Ref. (12,2 km)	-	-	1,06/1,91
virtuelle Ref. Iono. + Geom.	nein	0,60/1,06	0,62/1,10
	ja	0,67/1,12	0,69/1,12
virtuelle Ref. Iono.+Tro.+Orb.	nein	0,60/1,06	0,62/1,10
	ja	0,67/1,12	0,69/1,12

Referenzstation Modelle	Filterung	$L_1$ Lage/Höhe [cm]	$L_0$ Lage/Höhe [cm]
nächste Ref. (13,2 km)	-	-	0,65/1,98
virtuelle Ref. Iono. + Geom.	nein	0,65/1,12	0,68/1,32
	ja	0,71/1,23	0,65/1,28
virtuelle Ref. Iono.+Tro.+Orb.	nein	0,65/1,12	0,68/1,32
	ja	0,71/1,20	0,65/1,28

Referenzstation Modelle	Filterung	$L_1$ Lage/Höhe [cm]	$L_0$ Lage/Höhe [cm]
nächste Ref. (13,0 km)	-	-	0,81/1,25
virtuelle Ref. Iono. + Geom.	nein	0,59/1,03	0,74/1,15
	ja	0,56/1,14	0,67/1,22
virtuelle Ref. Iono.+Tro.+Orb.	nein	0,59/1,03	0,74/1,15
	ja	0,56/1,14	0,67/1,22

Tab. 6.1: Standardabweichungen der Lage- und Höhenkomponenten für unterschiedliche Berechnungsvarianten bei Station/Tag des Jahres 4122/254, 2127/255, 3214/256. Die Genauigkeiten wurden für jeweils 120 Beobachtungsperioden von 5 Minuten Dauer mit Wa-Soft berechnet.

Submillimeterbereich und nur in Einzelfällen um bis zu 1,1 mm. Bei der ionosphären-freien Lösung traten sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen auf, während für Einfrequenz-Lösungen in den meisten Fällen leichte Genauigkeitsverluste zu erkennen sind.

Für die im weiteren vorgestellten Ergebnisse aus der nachträglichen Bearbeitung der Beobachtungsdaten wurde auf die Filterung der Modellkoeffizienten verzichtet. Für Echtzeit-Anwendungen ist die Filterung zur Überbrückung von Datenlücken und Verringerung der zu übertragenen Datenmenge für die Korrekturmodelle unverzichtbar. Datiert man die Modellkoeffizienten eines Satelliten immer dann auf, wenn sie sich um 0,02 ppm verändert haben, so ergeben sich für den hier verwendeten Datensatz von dreimal 10 Stunden Länge durchschnittliche Aufdatierungsabstände von ungefähr 30 Sekunden für die ionosphärischen Koeffizienten und ungefähr 60 Sekunden für die geometrischen Koeffizienten.

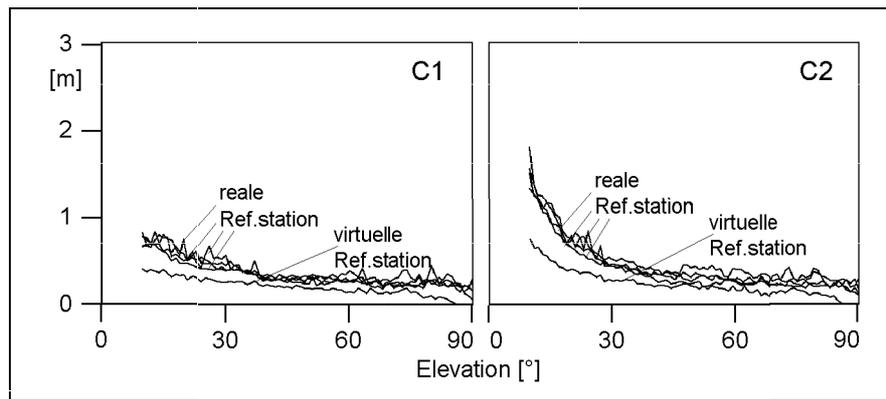


Abb. 6.3: Elevationsabhängige Darstellung von Codemehrwegefehlern und -meßrauschen.

### 6.1.2 Verringerung der Fehlereinflüsse

Durch die Verwendung der Korrekturmodelle und der Zusammenfassung der Beobachtungen mehrerer realer Referenzstationen zu einer virtuellen werden fast alle Fehlereinflüsse abgeschwächt. Für die Codebeobachtungen spielen die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse im Entfernungsbereich bis einige 100 km nur eine untergeordnete Rolle. Die Hauptfehlerinflüsse ergeben sich aus der Mehrwegeausbreitung und dem Meßrauschen. Die Summe beider Fehleranteile kann aus dem Vergleich mit Zweifrequenz-Phasenmessungen abgeschätzt werden (Rocken u.a. 1994).

Für die Testdatensätze ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgeführten Standardabweichungen für Einzelmessungen. Es ist zu erkennen, daß die Beobachtungen der Referenzstationen (auf Hausdächern) im Durchschnitt stärker beeinflusst sind als die der Mobilstationen. Faßt man die vier realen Referenzstationen zu einer virtuellen Station zusammen, so ergibt sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung (um 35%) der Pseudostreckenmessungen. Betrachtet man die Codefehler elevationsabhängig und stationsindividuell (Abb. 6.3), so ist zu erkennen, daß alle vier Referenzstationen recht ähnliche Fehlereinflüsse aufweisen. Die gleichgewichtete Mittelbildung zur Berechnung der virtuellen Beobachtungen ist hier al-

Code-Mehrwegeeffekte und -Rauschen [cm]	C1	C2
reale Referenzstationen	40	48
virtuelle Referenzstationen	26	32
Mobilstationen	32	47

Tab. 6.2: Code-Mehrwegeeffekte und -Rauschen aus Code-Trägerphasen-Vergleich berechnet, Standardabweichungen von Einzelmessungen für Codebeobachtungen auf der ersten (C1) und auf der zweiten (C2) Frequenz.

so gerechtfertigt. Bei Verwendung unterschiedlicher Mehrwegeunterdrückungstechniken auf den einzelnen Stationen ist aber die Anwendung eines ungleichgewichteten Mittels notwendig.

Bei den Phasenmessungen spielen die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlerquellen die größere Rolle. Ihre Verringerung wird am besten in der Darstellung von Doppel-Differenz-Residuen deutlich (Abb. 6.4). Während für die 14 km lange Basislinie zur nächsten realen Referenzstation die  $L_1$ -Residuen im quadratischen Mittel aufgrund ihrer ionosphärischen Beeinflussung größer ausfallen als die entsprechenden  $L_0$ -Residuen, ist dies bei Nutzung der virtuellen Referenzstation umgekehrt. Die entfernungsabhängigen Fehler konnten soweit gesenkt werden, daß nun Mehrwegeausbreitung und Meßrauschen stärker hervortreten und somit die  $L_0$ -Linearkombination größere Fehler aufweist als  $L_1$ . Vergleicht man die quadratischen Mittel der  $L_0$ -Residuen für die Basislinie zur nächsten realen Referenzstation (1,1 cm) mit denen der  $L_1$ -Residuen der Basislinie zur virtuellen Referenzstation (0,6 cm), so kann man in diesem Beispiel eine Verringerung der Fehlereinflüsse um über 40% feststellen.

Näherungslösung	Standardabweichung N/O/H [cm]
nächste Referenzstation	17/13/27
virtuelle Referenzstation	13/11/20

Tab. 6.3: Genauigkeit der Basislinien-Näherungslösungen bei jeweils 5 Minuten Beobachtungen aus kombinierter Code-Phasen-Auswertung in Nord/Ost/Höhe.

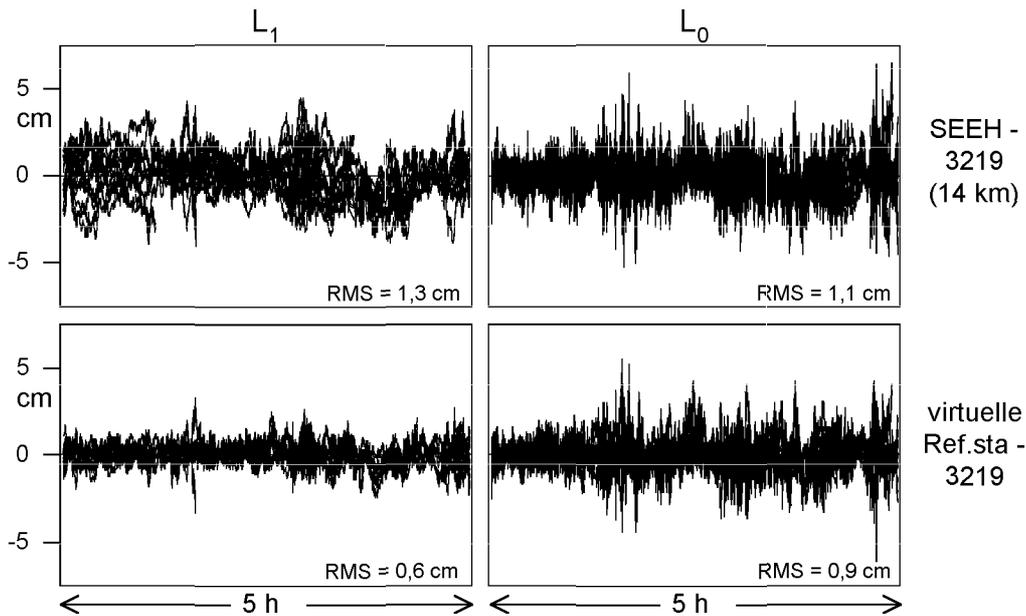


Abb. 6.4: Verringerung der Fehlereinflüsse durch Übergang von der Basislinie zur nächsten Referenzstation (14 km) zu der Basislinie zur zugehörigen virtuellen Referenzstation, dargestellt durch Doppel-Differenz-Residuen in allen Satellitenkombinationen für  $L_1$  und für  $L_0$ .

### 6.1.3 Positionierungsergebnisse

Eine möglichst genaue Näherungslösung der Basislinienkoordinaten ist Voraussetzung für die schnelle, erfolgreiche Mehrdeutigkeitslösung. Näherungslösungen basieren auf DGPS-Code-, auf *float*-Trägerphasen- oder kombinierten Lösungen.

Wie gezeigt, profitieren sowohl die Codebeobachtungen als auch die Phasenbeobachtungen von der Verwendung virtueller Referenzstationen. Eine Verringerung der stationsabhängigen Fehlereinflüsse bei den Codebeobachtungen gelingt natürlich nur für die Referenzstationen. Da die entsprechenden Fehlereigenschaften auf der Mobilstation unverändert bleiben, ist der Gesamtnutzen bei einer Basislinienlösung geringer als in Tab. 6.2 für einzelne Stationen angegeben.

Für alle 1440 5 Minuten-Blöcke des Testdatensatzes ergeben sich im quadratischen Mittel Steigerungen der Genauigkeit der Näherungslösungen beim Übergang von einer realen zur virtuellen Referenzstation von 20 bis 25 % (Tab. 6.3).

Präzise Lösungen mit Festsetzung der Mehrdeutigkeiten wurde zum einen mit Wa-Soft und zum anderen mit GPSurvey 2.20 berechnet. Die Ergebnisse werden unter folgenden Aspekten betrachtet:

- **Korrektheit** der Mehrdeutigkeitslösung: als korrekt werden diejenigen Lösungen betrachtet, für die das Auswerteprogramm die Mehrdeutigkeiten festsetzen konnte und deren Koordinaten

die Testgrenzen von 4 cm in der Lage und 8 cm in der Höhe nicht übersteigen.

- **Zuverlässigkeit** der Lösung: als zuverlässig gelten diejenigen Lösungen, die vom Auswerteprogramm als *fixed*-Lösungen betrachtet werden und die gleichzeitig als korrekt eingestuft wurden. Unzuverlässige Lösungen sind dementsprechend die Lösungen, die als *fixed* deklariert wurden, die aber Koordinatendifferenzen zur Solllösung aufweisen, die über den Testgrenzen liegen.
- **Koordinatengenauigkeit**: als Genauigkeitsmaß wird die einfache Standardabweichung in der Lage- bzw. Höhe aller als korrekt eingestuft Lösungen verwendet.

Wa-Soft besitzt zwei Algorithmen zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung. Beide bearbeiten Zweifrequenz-Phasemessungen (und zum Teil auch die Codemessungen) simultan. Für kurze Basislinien wird ein „*Extra Wide Lining*“-Ansatz genutzt. Die Koordinatenlösung wird aus  $L_1$ -Daten berechnet (Algorithmus KURZ). Notabene: die Mehrdeutigkeitslösung erfolgt immer mit den Daten beider Frequenzen. Kann die Ionosphäre nicht mehr ignoriert werden, so werden in einer ersten Stufe über die Codemessungen und parallel dazu rein aus Phasemessungen die *Widelane*-Mehrdeutigkeiten bestimmt und festgesetzt. Die *Widelane*-Koordinatenlösung dient als verbesserte Näherungslösung zur simultanen Zweifrequenz-Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Die Koordinatenlösung basiert am Ende auf der ionosphären-freien Linearkombination  $L_0$  (Algorithmus

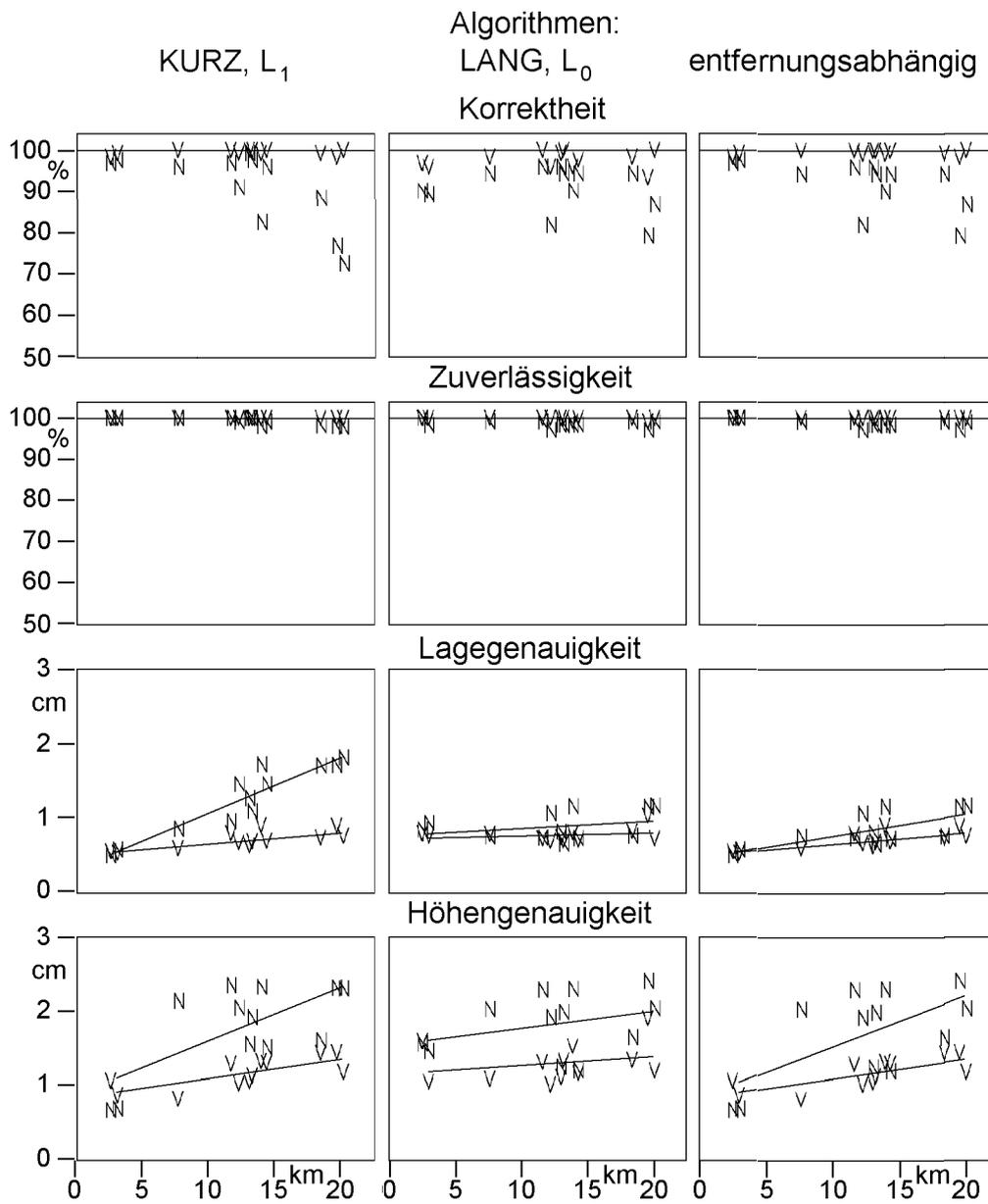


Abb. 6.5: Wa-Soft-Positionierungsergebnisse als Funktion der Entfernung zur nächsten Referenzstation und Verwendung der Beobachtungen von: N - nächste reale Referenzstation, V - virtuelle Referenzstation.

LANG). Die Grenzen des Algorithmus KURZ sind durch einen maximal verträglichen ionosphärischen Einfluß gegeben, die Grenzen des Algorithmus LANG dagegen durch eine notwendige Mindestbeobachtungsdauer. Die Algorithmen arbeiten mit einer so hohen Korrektheits- und Zuverlässigkeitsquote, daß bisher keine Notwendigkeit bestand, Mehrdeutigkeitssuchverfahren (siehe Unterkapitel 2.3) zu implementieren.

Mit beiden Algorithmen wurden alle 1440 Testdatensätze bearbeitet. In den ersten beiden Spalten der Abbildung 6.5 sind die Wa-Soft-Ergebnisse der Algorithmen KURZ und LANG dargestellt. Für die Ergebnisse der dritten Spalte ist der Algorithmus entsprechend der Basislinienlänge ausgewählt worden. Für Basislinienlängen über 5 km fand der Algorithmus LANG Anwendung. In allen anderen Fällen wurde der Algorithmus KURZ verwendet, also insbesondere bei Nutzung einer virtuellen Referenzstation.

Bei der Positionierung unter Verwendung der nächsten Referenzstation weisen die Ergebnisse des Algorithmus KURZ eine starke Entfernungsabhängigkeit auf. Während für Basislinien unter 5 km Länge sehr hohe Korrektheitsquoten (über 97%), 100%ige Zuverlässigkeit und sehr hohe  $L_1$ -Koordinatengenauigkeiten (0,5 cm in der Lage und 0,7 cm in der Höhe) erzielt werden konnten, verringert sich die Qualität der Ergebnisse mit steigender Basislinienlänge. Die Resultate des Algorithmus LANG sind kaum entfernungsabhängig, die Korrektheitsquote von im Durchschnitt nur 90% ist auf die kurze Beobachtungsdauer zurückzuführen. Die  $L_1$ -Koordinaten sind für Basislinienlängen unter 5 km aufgrund ihrer geringeren Beeinflussung durch Mehrwegeeffekte und Meßrauschen genauer als die der  $L_0$ -Lösungen. Für längere Basislinien ist es aufgrund der ionosphärischen Einflüsse umgekehrt. Aber auch die  $L_0$ -Lösungen unterliegen noch einer leichten Entfernungsabhängigkeit. Für die Basislinien mit 20 km Länge wurden Genauigkeiten von 1,0 cm in der Lage und 2,0 cm in der Höhe erzielt.

Beim Übergang auf virtuelle Referenzstationen erhält man mit dem Algorithmus KURZ und  $L_1$ -Koordinatenlösungen immer bessere Ergebnisse als mit dem Algorithmus LANG und  $L_0$ -Koordinatenlösungen. Dies beweist die hohe Genauigkeit des ionosphärischen Korrekturmodells. Gerade die Möglichkeit, nun auf  $L_1$ -Lösungen übergehen zu können, trägt zur Steigerung der Koordinatengenauigkeit beträchtlich bei. Alle Qualitätskriterien verbesserten sich mit Ausnahme der Höhengenaugkeit der beiden Stationen, die in sehr geringem Abstand zur nächsten Referenzstation liegen. Hier haben die Korrekturmodelle zusätzliche Fehler in die Beobachtungen hineingetragen.

Es liegt die Vermutung nahe, daß dies bei Verwendung von nur drei Referenzstationen vermieden werden kann. Durch den Modellierungsansatz erhält dabei eine nahe gelegene reale Referenzstation ein hohes Gewicht. Andererseits liegen bei nur drei Referenzstationen keine Überbestimmungen bei der Korrekturmodellbestimmung vor, so daß keine durchgreifende Zuverlässigkeitskontrolle der Beobachtungsresiduen mehr möglich ist und auch die Mehrwegeeffekte auf die Phasenmessungen nicht mehr verringert werden können. Weitere Nachteile bei nur drei Referenzstationen ergeben sich bei Beobachtungsausfällen einer einzelnen Station, die nun eine Korrekturmodellberechnung verhindert. Bei vier Stationen konnten mit den Beobachtungen der verbleibenden drei Stationen weiterhin Korrekturparameter ermittelt werden.

Die Ergebnisse von Testberechnungen mit jeweils drei Referenzstationen sind im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit vier Stationen erzielt wurden, dargestellt (Abb. 6.6). Auffällig sind die größeren Variationen in der Höhenkomponente im Vergleich zur Lage. Für die  $L_1$ -Resultate bestätigt sich die Vermutung der höheren Koordinatengenauigkeiten bei sehr kurzen Entfernungen zur nächsten Referenzstation. Bei größeren Entfernungen ist aber keine eindeutige Tendenz in Richtung Verbesserung (oder Verschlechterung) festzustellen. Bei den  $L_0$ -Lösungen gibt es eher eine leichte Tendenz zur Verschlechterung, welche auf die nun nicht mehr mögliche Verringerung der Mehrwegeeffekte zurückzuführen sein dürfte. Da insgesamt keine deutliche Verbesserung der Ergebnisse zu erkennen ist, erfolgen auch alle weiteren Berechnungen mit vier realen Referenzstationen.

Datenauswertungen mit der *Narrowlane*-Linearkombination  $L_N$  führten nicht zu höheren Genauigkeiten, wie man nach den Werten der Tabelle 2.1 hätte annehmen müssen. Sie lagen immer unter denen der  $L_1$ -Lösungen. Die Ursachen liegen in den ionosphärischen Restfehlern, die auf  $L_N$  stärker wirken als auf  $L_1$ , in der unter *Anti-Spoofing* zum Teil geringeren  $L_2$ -Qualität und in meßtechnisch bedingten Korrelationen der  $L_1$ - und  $L_2$ -Meßgrößen.

Die Auswertung derselben Daten mit GPSurvey 2.20 ergab in der Korrektheit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse bessere und in der Koordinatengenauigkeit leicht schlechtere Ergebnisse als mit Wa-Soft. Wie auch andere Untersuchungen zeigten, verfügt GPSurvey über einen sehr erfolgreichen Mehrdeutigkeitssuchalgorithmus. Selbst die Einführung der virtuellen Beobachtungen konnte Korrektheit und Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung nicht mehr verbessern. Dagegen profitierten die Genauigkeiten von der Einführung virtueller Beobachtungen deutlich (Abb. 6.7).

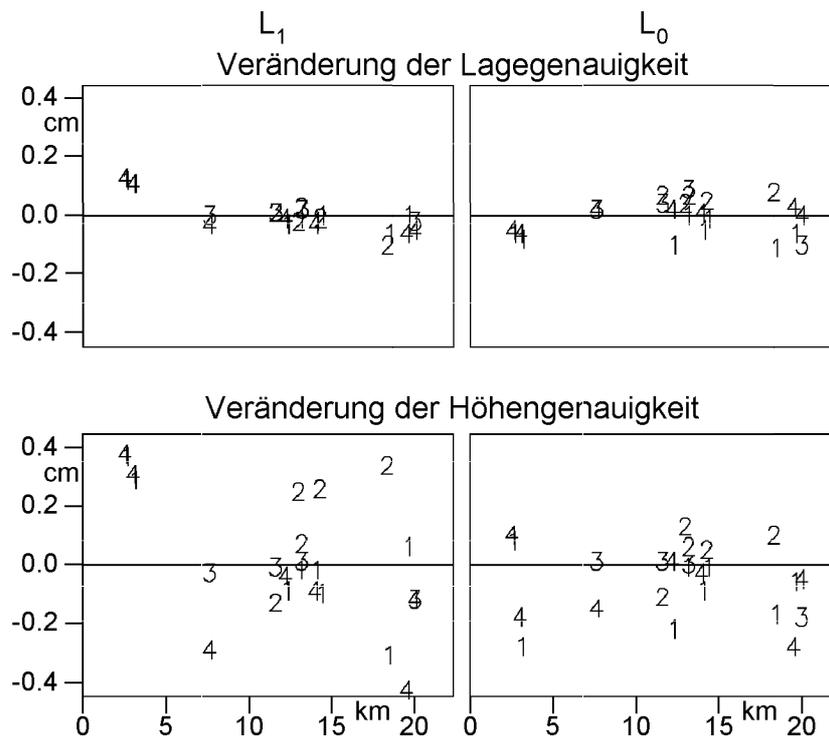


Abb. 6.6: Veränderungen der Koordinatengenauigkeiten beim Übergang von virtuellen Referenzstationen, die auf der Basis von vier realen Stationen berechnet wurden, auf virtuelle Referenzstationen, die auf der Basis von drei realen Stationen berechnet wurden. Für jeden Neupunkt sind Koordinatenberechnungen in den beiden Dreiecken durchgeführt worden, die den Neupunkt umschliessen. Die Kennziffern bezeichnen die Dreiecke: 1 – SALZ-SEEH-STEN, 2 – SEEH-STEN-KLTZ, 3 – STEN-KLTZ-SALZ, 4 – KLTZ-SALZ-SEEH. Im positiven Wertebereich wurden mit drei Referenzstationen geringere quadratische Mittel der Koordinatenfehler erzielt als mit vier Referenzstationen.

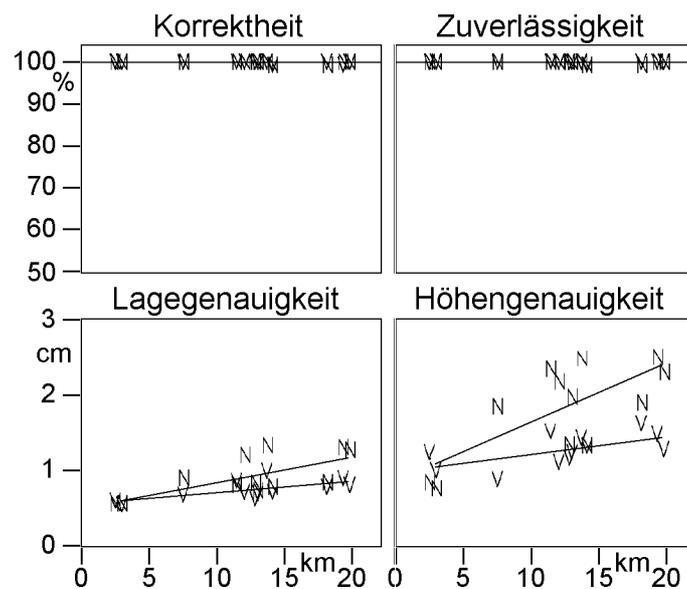


Abb. 6.7: GPSurvey-Positionierungsergebnisse als Funktion der Entfernung zur nächsten Referenzstation und Verwendung der Beobachtungen von: N - nächste reale Referenzstation, V - virtuelle Referenzstation.

Referenzstation / Programmsystem	Korrektheit %	Zuverlässigkeit %	Lagegenauigkeit cm	Höhen- genauigkeit cm
<b>nächste Ref.sta.:</b>				
Wa-Soft	91,7	98,6	0,9	1,8
GPSurvey	99,9	99,9	1,0	1,9
<b>virtuelle Ref.sta.:</b>				
Wa-Soft	99,4	100,0	0,7	1,2
GPSurvey	99,9	99,9	0,7	1,3

Tab. 6.4: Qualität der Mehrdeutigkeitsbestimmung und Koordinatenlösungen für eine Beobachtungsdauer von 5 Minuten im Vergleich der Softwarepakete Wa-Soft und GPSurvey 2.20 unter Verwendung aller Mobilstationen der Abb. 6.1, also bei insgesamt 1440 Testberechnungen.

Die mit GPSurvey erzielten Koordinatengenauigkeiten entsprechen exakt denen von Wa-Soft, wenn bei letzterem Programm gleichgewichtete Beobachtungsgrößen bei der Koordinatenschätzung Verwendung finden. Gewichtet man die Beobachtungen jedoch in Abhängigkeit der Satellitenelevation  $e$  mit

$$p = \sin^2(e), \quad (6.1)$$

wie es bei allen hier präsentierten Wa-Soft-Ergebnissen geschehen ist, so ergeben sich bei diesen Testdaten um im Durchschnitt 0,1 cm kleinere Standardabweichungen (Tab. 6.4).

### Zusammenfassung

Die Beispiele zeigen, daß die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse durch die vorgestellten Korrekturmodelle hochgenau erfaßt werden können. Die auf diesen Korrekturmodellen basierende Erzeugung virtueller Referenzstationsdaten wurde softwaretechnisch realisiert. Die virtuellen Beobachtungen entsprechen in ihren Eigenschaften realen Beobachtungen, so daß die Koordinaten von Neupunkten über die kurze Basislinie zur virtuellen Referenzstation mit beliebigen Auswerteprogrammen bestimmt werden können.

Im allgemeinen werden dabei höhere Genauigkeiten erzielt als bei der Positionierung relativ zur nächstgelegenen realen Referenzstation. Der Genauigkeitsgewinn ist insbesondere auch auf die nun gegebene Möglichkeit zurückzuführen, die Koordinatenlösungen ausschließlich mit  $L_1$ -Beobachtungen berechnen zu können.

Verminderte Genauigkeiten wurden nur in den Höhenkomponenten der beiden Punkte erzielt, die in

sehr geringen Entfernungen (2,1 und 3,0 km) zu einer der realen Referenzstationen gelegen sind. Bei geringer Entfernung zu einer realen Referenzstation kann die Fehlerelimination also zu besseren Ergebnissen führen als die Fehlermodellierung in einer 30 km x 40 km großen Netzschleife aus vier oder mehr Stationen. Optimistisch betrachtet kann festgestellt werden, daß der Einsatz virtueller Referenzstationen zu homogeneren Genauigkeiten in der gesamten Netzschleife führt. Die verminderten Genauigkeiten treten bei dem gewählten Modellierungsansatz nicht auf, wenn in Netzschleifen gearbeitet wird, die aus drei Referenzstationen bestehen. Dann ist aber eine Verringerung der Phasenmehrwegeneffekte nicht mehr möglich.

## 6.2 Untersuchungen extremer Fehlereinflüsse

Insgesamt drei Monate Beobachtungen (November 1996 – Januar 1997) der nördlichen Hälfte des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt (Abb. 6.8) wurden genutzt, um Korrekturmodelle zu erzeugen und auf Zeiten extremer Fehlereinflüsse hin zu untersuchen.

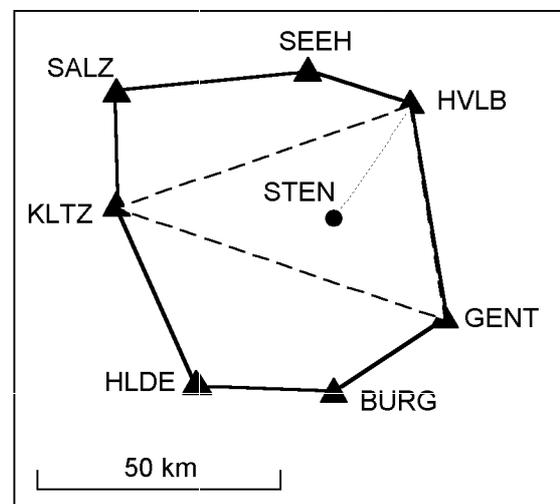


Abb. 6.8: Testgebiet im nördlichen Teil des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt (70 km x 70 km) mit der Station STEN als „Neupunkt“.

### 6.2.1 Korrekturmodelle

Die zur Korrekturmodellberechnung notwendige Mehrdeutigkeitsfestsetzung im Referenzstationsnetz gelang im *Post-processing* auch hier für über 98% aller vollständigen Zweifrequenz-Beobachtungen über

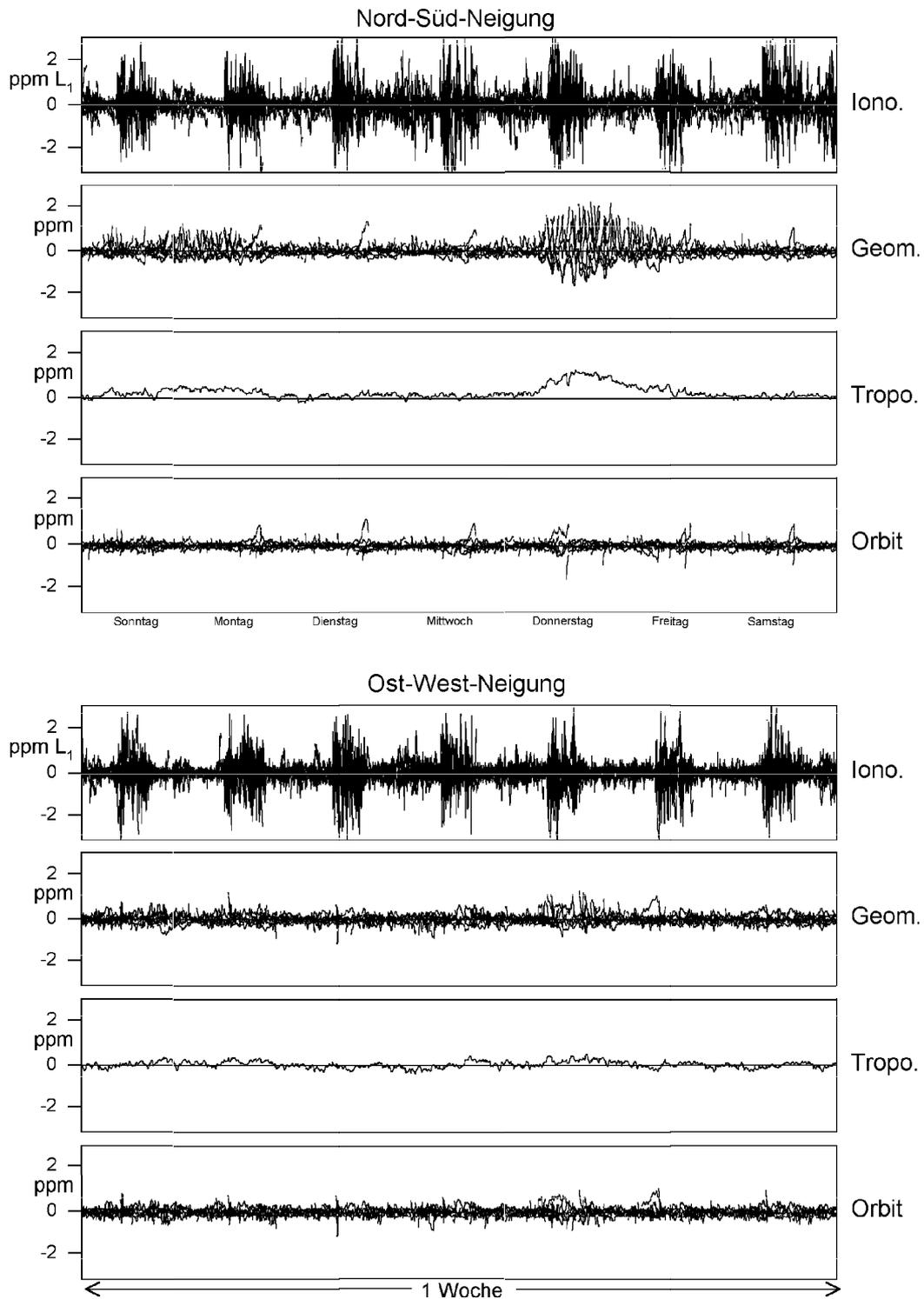


Abb. 6.9: Korrekturmodelle für eine ereignisreiche Woche. Es sind sowohl ionosphärische Störungen (jeden Tag um die Mittagszeit herum), troposphärische Störungen (Sonntag/Montag und insbesondere Donnerstag/Freitag) und große Orbitfehler (Freitag Vormittag) erkennbar.

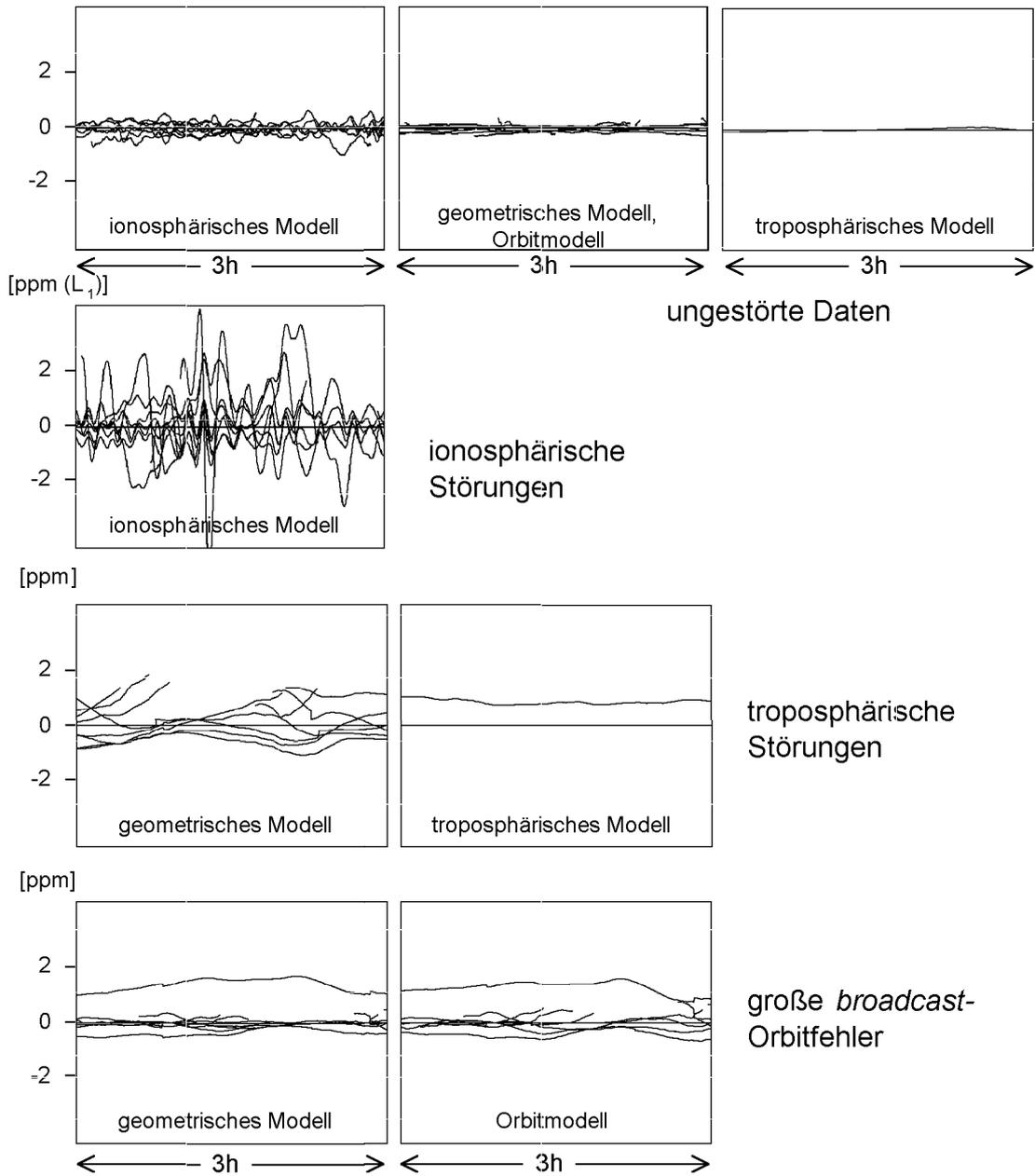


Abb. 6.10: Beispiele für Korrekturmodelle bei geringen und starken Fehlereinflüssen.

10 Grad Elevation. Dabei wurden zur Vorabverringerng der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse sowohl ein Modell des absoluten Elektronengehalts der Ionosphäre angewendet als auch Zusatzparameter zur Erfassung troposphärischer Refraktion mitgeschätzt (Unterkapitel 4.1). Trotzdem verbleibende einzelne Mehrdeutigkeiten betreffen im allgemeinen tiefstehende Satelliten mit wenigen Beobachtungen.

Zeitreihen der Modellkoeffizienten eignen sich hervorragend zur Identifizierung extremer ionosphärischer, troposphärischer oder Orbitfehlereinflüsse auf die relative Positionierung. In mancher Woche konnten extreme Einflüsse aller drei Fehlerarten entdeckt werden (Abb. 6.9). Ionosphärische Störungen traten im allgemeinen in der Form von wandernden Störungen mittlerer Größe (MSTIDs) auf, die in mittleren Breiten insbesondere in den Wintermonaten während der Tageslichtstunden anzutreffen sind (siehe Unterkapitel 3.2). Troposphärische Störungen werden durch Wetterfronten verursacht, die über das Meßgebiet hinwegziehen. Die im Beispiel der Abbildung 6.9 am Donnerstag und Freitag zu erkennende Störung ist die stärkste troposphärische Störung während der drei Monate. Große *broadcast*-Orbitfehler wurden im Durchschnitt für fast einen Satellitendurchgang pro Woche entdeckt. Bei dem am Freitag Vormittag insbesondere im Ost-West-Neigungs-Koeffizienten zu erkennenden Fehlereinfluß beträgt die Differenz zwischen *broadcast*- und präzisen IGS-Orbits bis zu 40 m.

Ausgewählte Beispiele für Zeitreihen von Korrekturkoeffizienten bei ungestörten und gestörten Daten werden in Abbildung 6.10 gegenübergestellt. Bei ungestörten Daten überschreiten die Korrekturwerte 0,5 ppm nicht. Maximale Werte werden bei ionosphärischen Störungen mit bis zu beobachteten 6 ppm (auf  $L_1$  bezogen) erreicht. Hier treten auch die schnellsten Veränderungen der Korrekturwerte mit der Zeit auf: sie erreichten bis zu 1,5 ppm ( $L_1$ ) pro Minute. Troposphärische Störungen und Orbitfehler sind dagegen sehr viel langperiodischer und erreichten bei allen gesichteten Daten im geometrischen Modell maximale Werte von 2 ppm. Die Veränderungen der Korrekturwerte mit der Zeit lagen immer unterhalb 0,1 ppm pro Minute. Bei der Realisierung von Echtzeit-Anwendungen ergibt sich daraus die Schlußfolgerung, daß die Modellarten getrennt übertragbar sein sollten, da das ionosphärische Modell in vielen Fällen häufiger aufdatiert werden muß als das geometrische Modell.

## 6.2.2 Positionierungsergebnisse

Die Positionierung der Station STEN wurde mit Hilfe ausgesuchter Beobachtungsdaten einer für seine

Näherungsposition berechneten virtuellen Referenzstation, welche aus den Daten der sieben umliegenden realen Referenzstationen abgeleitet wurde, durchgeführt. Wieder wurden 5 Minuten lange Beobachtungsstücke verwendet und die Qualität der Ergebnisse anhand der Kriterien Korrektheit der Mehrdeutigkeitslösung und Koordinatengenauigkeit betrachtet. Zum Vergleich dient die Positionierung von STEN über die kürzeste Basislinie zu einer realen Referenzstation, nämlich HVLB, welche 29 km von STEN entfernt liegt. Alle Berechnungen wurden mit GPSurvey 2.20 durchgeführt.

Es wurden Beobachtungszeiträume ausgesucht, die in die oben vorgestellten Kategorien ungestörte Daten, ionosphärische Störungen, troposphärische Störungen oder große Orbitfehler einzuordnen waren. Für die ungestörten Daten wurden drei volle Tage verwendet (864 5-Minuten-Stücke). Von den gestörten Beobachtungsdaten wurden jeweils etwa 10 Stunden ausgewählt.

Die Aufspaltung des geometrischen Modells in troposphärisches und Orbitmodell hat keinen Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Auch sind die Unterschiede zwischen gefilterten und ungefilterten Koeffizienten so gering, daß hier nur die Lösungen präsentiert werden, die auf ungefilterten Koeffizienten des ionosphärischen und geometrischen Modells beruhen.

Für die 29 km lange Basislinie HVLB-STEN und jeweils 5 Minuten Beobachtungen liegt die Quote korrekter Mehrdeutigkeitslösungen um 90% (Tab. 6.5). Wie die nähere Untersuchung der Daten mit großen Orbitfehlern ergab, erreicht sie hier wohl aufgrund einer überdurchschnittlich großen Satellitenanzahl einen deutlich höheren Wert. Die niedrigste Anzahl korrekter Lösungen ergab sich beim Auftreten ionosphärischer Störungen. Ansonsten wirkt sich das Vorhandensein von Störungen nicht erkennbar negativ auf die Mehrdeutigkeitslösung aus.

Bei der Berechnung der Basislinie virtuelle Referenzstation – STEN konnten in allen Datengruppen deutlich mehr korrekte Mehrdeutigkeitslösungen erzielt werden. Die Quote liegt hier zwischen 98 und 100%. Die nicht gelösten Restfälle sind zu einem großen Teil auf schlechte Satellitengeometrien zurückzuführen. Beim Auftreten ionosphärischer Störungen gibt es mit 96% weniger korrekte Lösungen, welches auf noch vorhandene Restfehler ionosphärischer Refraktion schließen läßt.

Beim Vergleich der Koordinatengenauigkeiten wurden für die Basislinie HVLB – STEN  $L_0$ -Lösungen verwendet, wodurch ionosphärische Störungen hier nicht zu erkennen sind. Ebenso kommen die großen Orbitfehler nicht zum Tragen, da sie nur einen Satelliten unter einer überdurchschnittlich großen Sa-

Basislinie	Dateneigenschaften	Anzahl Datensätze	Korrektheitsquote	Koordinatengenauigkeit Lage/Höhe [cm]	
				L <sub>1</sub>	L <sub>0</sub>
HVLB-STEN (29 km)	Ungestörte Daten	864	89%	–	1,3/2,5
	Iono. Störungen	119	87%	–	1,5/2,8
	Tropo. Störungen	106	89%	–	1,8/ <b>7,8</b>
	Große Orbitfehler	126	97%	–	1,5/2,7
Virt. Ref. Station – STEN	Ungestörte Daten	864	98%	1,1/1,9	1,2/2,4
	Iono. Störungen	119	96%	1,7/2,7	1,3/2,7
	Tropo. Störungen	106	100%	1,6/1,7	1,5/2,4
	Große Orbitfehler	126	99%	1,1/1,7	1,1/2,2

Tab. 6.5: Qualität der Mehrdeutigkeitslösung und Koordinatengenauigkeit bei 5 Minuten Beobachtungsdauer und Auswertung mit GPSurvey 2.20.

Code-Mehrwegeeffekte und -Rauschen [cm]	C1	C2
reale Referenzstationen (Mittel)	41	48
virtuelle Referenzstationen ...		
auf der Basis von 3 realen Stationen	28	31
auf der Basis von 4 realen Stationen	25	26
auf der Basis von 7 realen Stationen	17	20

Tab. 6.6: Code-Mehrwegeeffekte und -Rauschen aus Code-Trägerphasen-Vergleich berechnet, Standardabweichungen von Einzelmessungen für Codebeobachtungen auf der ersten (C1) und auf der zweiten (C2) Frequenz.

tellitenanzahl betreffen. Dagegen wirken sich die troposphärischen Störungen deutlich auf die Höhengenaugigkeit aus. Sie fällt um Faktor 3 schlechter (7,8 cm !) aus als bei den anderen Daten.

Beim Übergang auf die virtuelle Referenzstation sind in allen Koordinatenkomponenten Genauigkeitssteigerungen erkennbar. Besonders auffällig ist die Verbesserung der Höhenkomponente im Falle der troposphärischen Störungen. Sie liegt nun im üblichen Rahmen, d.h. daß die Störeinflüsse im geometrischen Modell erfaßt werden konnten. Nur bei den ionosphärischen Störungen ist die  $L_0$ -Lösung von höherer Genauigkeit als die  $L_1$ -Lösung. Ionosphärische Restfehler, die darauf zurückzuführen sind, daß der lineare Interpolationsansatz bei einer Netzausdehnung von über 50 km Störungen in der Form von MSTIDs zwar weitgehend, aber nicht vollständig erfassen kann, machen hier die Verwendung von Zweifrequenz-Korrekturen notwendig.

Die Testdaten wurden auch dazu verwendet, virtuelle Referenzstationen zu vergleichen, die auf den Daten unterschiedlicher Anzahlen von realen Stationen beruhen. Alle hier präsentierten Resultate verwendeten sieben Stationen. Entsprechende Berechnungen mit nur drei Stationen erbrachten zwar leicht unterschiedliche Ergebnisse. Sie waren aber bei keiner der Störungsarten erkennbar besser oder schlechter als

die schon dargestellten Resultate. Sicherlich hat aber eine Verwendung von mehr Empfängern einen Einfluß auf die Qualität der virtuellen Codemessungen. Ihre Genauigkeit steigt mit zunehmender Stationsanzahl (Tab. 6.6). Der praktische Nutzen für die relative Positionierung ist aber gering, weil die Qualität der Codebeobachtungen auf der Mobilstation unverändert bleibt.

## Zusammenfassung

Die in den Testdaten am häufigsten gefundenen extremen Fehlereinflüsse gehen auf die ionosphärische Refraktion zurück. Sehr viel seltener treten starke troposphärische Störungen aufgrund von durchziehenden Wetterfronten auf. Große Orbitfehler wurden für fast einen Satellitendurchgang pro Woche identifiziert.

Der lineare Interpolationsansatz konnte auch bei einer Netzschleifengröße von 70 km × 70 km extreme troposphärische Störungen und große Orbitfehler erfassen und beseitigen, da diese Fehlereinflüsse von ausreichend großräumiger Natur waren. Anders verhält es sich bei kleinräumigeren Anomalien, wie sie z.B. bei ionosphärischen Störungen mittlerer Größe aufgrund von MSTIDs auftreten. Diese Störungen haben eine räumliche Ausdehnung von 100 km und mehr und können daher bei der hier vorliegenden Ausdehnung des Referenzstationsnetzes zwar noch zum größten Teil, aber doch nicht vollständig beseitigt werden. Damit entfällt beim Auftreten ionosphärischer Störungen der Genauigkeitsvorteil, der ansonsten durch den Übergang von einer  $L_0$ - auf eine  $L_1$ -Koordinatenlösung erzielt werden konnte.

### 6.3 Anwendungen in einer großräumigen Referenzstations-Netzschleife

Für die Austestung der Korrekturmodelle in einem aufgedünnten Referenzstationsnetz (Stationsabstand 100 km) wurden vier geeignete Referenzstationen aus dem Netz von Sachsen-Anhalt ausgewählt (Abb. 6.11). Als „Neupunkte“ fanden andere Referenzstationen bzw. ein Teil des in Unterkapitel 6.1 beschriebenen Testdatensatzes Verwendung. Ebenso wurden ein Teil der von extremen Fehlereinflüssen betroffenen Daten aus Unterkapitel 6.2 hier wieder verwendet.

Die zur Korrekturmodellberechnung notwendige Mehrdeutigkeitsfestsetzung im Referenzstationsnetz gelang im *Post-Processing* auch hier für über 98% aller vollständigen Zweifrequenz-Beobachtungen über 10 Grad Elevation. Dabei wurden wieder zur Vorabverringering der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse sowohl ein Modell des absoluten Elektronengehalts der Ionosphäre angewendet als auch Zusatzparameter zur Erfassung troposphärischer Refraktion mitgeschätzt (siehe Unterkapitel 4.1). Auf den Einsatz präziser IGS-Orbits konnte verzichtet werden. Trotzdem verbliebene einzelne Mehrdeutigkeiten betreffen auch hier im wesentlichen tiefstehende Satelliten mit wenigen Beobachtungen.

Koordinatengenauigkeiten der Neupunkte abgeleitet aus 120 je 5 Minuten langen Beobachtungsstücken wurden sowohl für  $L_1$ -Lösungen als auch für  $L_0$ -Lösungen berechnet. Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung erfolgte dabei für die gesamten 10 Stunden Daten. Die Zerschneidung in 5 Minuten-Stücke wurde ausschließlich für die Koordinatenberechnung mit WaSoft durchgeführt.

Die Ergebnisse, dargestellt als Funktion des Abstandes zur nächsten realen Referenzstation (Abb. 6.12), stellen sich wie folgt dar und lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Die Entfernungsabhängigkeit der Koordinatengenauigkeiten konnte beim Übergang von der nächsten auf die virtuelle Referenzstation in allen Fällen stark gesenkt werden. Bei den  $L_0$ -Lösungen mit virtueller Referenzstation ist keine Entfernungsabhängigkeit mehr nachweisbar. Bei den  $L_1$ -Lösungen verbleibt noch ein Rest.
- Bei Verwendung virtueller Referenzstationen weisen die meisten  $L_1$ -Lösungen geringere Genauigkeiten auf als die entsprechenden  $L_0$ -Lösungen, d.h. daß die ionosphärische Modellierung nicht mehr die Qualität aufweist, die sie im kleinräumigen Netz hatte (Unterkapitel 6.1).

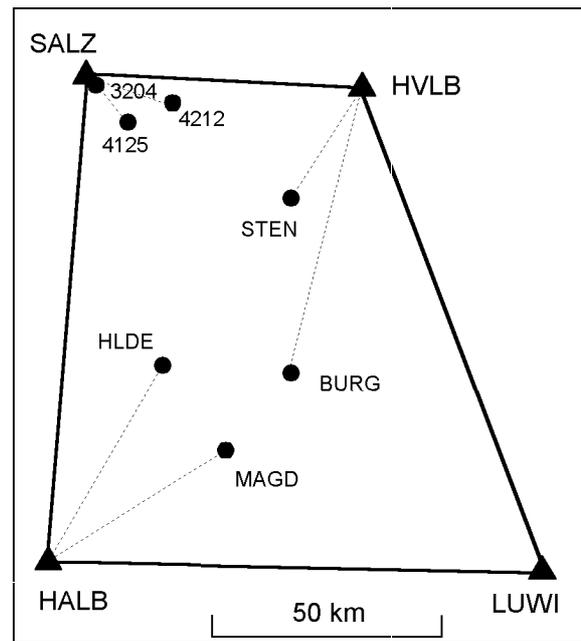


Abb. 6.11: Testgebiet im nördlichen und mittleren Teil des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt (100 km x 100 km).

- Die genauesten Lösungen bei sehr geringen Entfernungen zur nächsten Referenzstation (3,0 km) werden mit einer  $L_1$ -Lösung unter Verwendung der realen Beobachtungen erzielt. Die Fehlermodellierung im Viereck einer Referenzstationschleife kann die sowieso schon geringen Beobachtungsfehler nicht weiter verkleinern.

Für Zeiträume extremer Fehlereinflüsse wurden die Stationen STEN (Abstand von 29 km zur nächsten Referenzstation HVLB) und MAGD (46 km nach HALB) verwendet. Die Koordinatengenauigkeiten (Tab. 6.7) lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- **Ungestörte Daten:** sowohl  $L_1$ - als auch  $L_0$ -Lösungen konnten durch die Verwendung virtueller Referenzstationen einen Genauigkeitszuwachs erzielen. Die Lage wird beim Einsatz virtueller Referenzstationen mit  $L_0$  genauer als mit  $L_1$  bestimmt, während es in der Höhe – aufgrund deren geringerer Sensibilität auf ionosphärische Restfehler – umgekehrt ist.
- **Ionosphärische Störungen:** die  $L_1$ -Lösungen verschlechterten sich mehrheitlich in ihrer Genauigkeit beim Übergang auf virtuelle Referenzstationen. Deutlich wird dies auch besonders bei der Betrachtung der Beobachtungen in der Form Doppelter Differenzen (Abb. 6.13). Während die  $L_1$ -Beobachtungsfehler durch die Verwendung einer virtuellen Referenzstation aus dem 70 km x 70 km-Netz (Unterkapitel 6.2) verringert werden

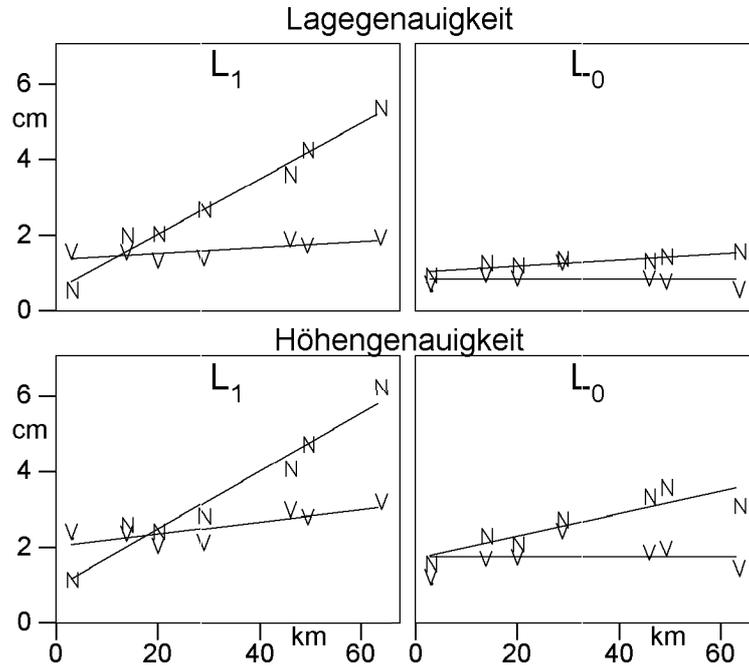


Abb. 6.12: Wa-Soft-Positionierungsergebnisse in großräumiger Netzschleife als Funktion der Entfernung zur nächsten Referenzstation und Verwendung der Beobachtungen von: N - nächste reale Referenzstation, V - virtuelle Referenzstation.

Basislinie	Dateneigenschaften	Anzahl Datensätze	Koordinatengenauigkeit Lage/Höhe [cm]	
			L <sub>1</sub>	L <sub>0</sub>
HVLB-STEN (29 km)	Ungestörte Daten	121	2,6/2,8	1,3/2,7
	Iono. Störungen	88	3,5/4,9	1,3/3,1
	Tropo. Störungen	107	2,3/6,5	1,8/7,6
	Große Orbitfehler	84	2,4/3,3	1,8/3,3
Virt. Ref. Station - STEN	Ungestörte Daten	121	1,4/2,1	1,2/2,4
	Iono. Störungen	88	4,1/8,2	1,3/2,9
	Tropo. Störungen	107	1,8/3,2	1,4/3,5
	Große Orbitfehler	84	1,8/2,9	1,4/3,0
HALB-MAGD (46 km)	Ungestörte Daten	121	3,6/4,1	1,3/3,3
	Iono. Störungen	88	5,3/9,3	1,3/3,1
	Tropo. Störungen	107	2,5/3,1	2,4/2,1
	Große Orbitfehler	84	3,8/4,6	2,8/3,7
Virt. Ref. Station - MAGD	Ungestörte Daten	121	1,8/3,0	0,8/3,3
	Iono. Störungen	88	4,5/9,9	0,9/2,0
	Tropo. Störungen	107	1,5/5,4	1,3/5,2
	Große Orbitfehler	84	2,8/3,4	1,3/3,5

Tab. 6.7: Koordinatengenauigkeit in großräumiger Netzschleife bei 5 Minuten Beobachtungsdauer und Auswertung mit Wa-Soft.

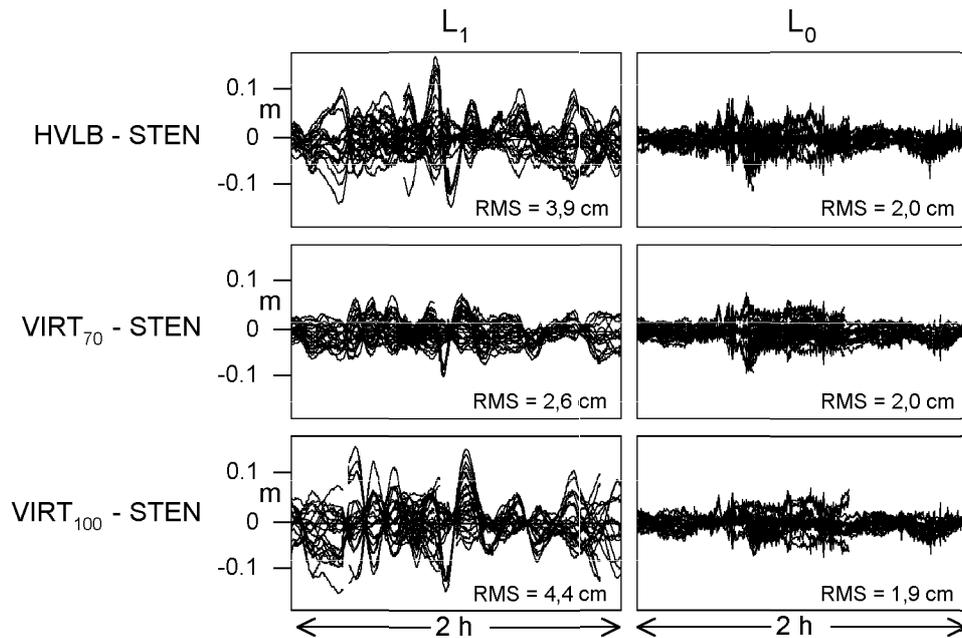


Abb. 6.13: Ausschnitt von Doppel-Differenz Residuen für  $L_1$  und  $L_0$  bei extremen ionosphärischen Fehlereinflüssen. Vergleich der Basislinie von STEN zur nächsten realen Referenzstation mit zwei unterschiedlichen Lösungen unter Verwendung virtueller Referenzstationen (VIRT<sub>70</sub> – 70 km x 70 km große Netzschleife, VIRT<sub>100</sub> – 100 km x 100 km große Netzschleife).

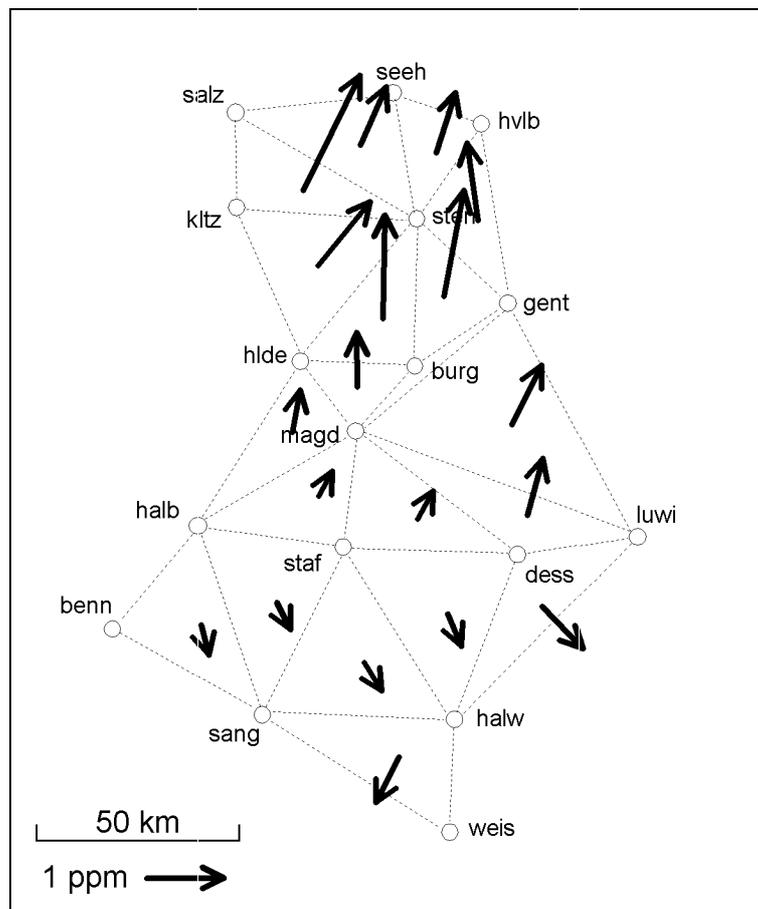


Abb. 6.14: Gradienten troposphärischer Restfehler in Dreiecksmaschen des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt am Tag 354/96 18:00 UT.

konnten, verstärken sie sich im 100 km x 100 km-Netz. Die  $L_0$ -Lösungen sind davon nicht betroffen.

Die Ionosphärenmodellierung ist hier also vollständig gescheitert. Die Beobachtungsfehler konnten nicht verringert werden, sondern sie werden noch verstärkt. Dies bedeutet, daß auch die Mehrdeutigkeitslösung in der Basislinie zum Neupunkt erschwert wird. Wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe können also bei einem Referenzstationsabstand von 100 km nicht mehr erfaßt werden.

- **Troposphärische Störungen:** Für die Basislinien zur Station STEN gelang die Verringerung der troposphärischen Fehler (Verbesserung der  $L_0$ -Höhengenauigkeit von 7,6 cm auf 3,5 cm), wenn auch nicht so gut wie im kleineren Netz (vgl. Tab. 6.5). Dagegen wurden bei der Station MAGD erst durch die Verwendung der virtuellen Station relative troposphärische Fehler in die Beobachtungen eingeführt (Verschlechterung der  $L_0$ -Höhengenauigkeit von 2,1 cm auf 5,2 cm).

Dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnis wird erklärlich, wenn die troposphärischen Gradienten im gesamten Referenzstationsnetz von Sachsen-Anhalt betrachtet werden (Abb. 6.14). Sie wurden für Stationsdreiecke beispielhaft für einen Zeitpunkt der verwendeten Beobachtungsperiode berechnet (troposphärisches Modell). Es ist eine Nord-Süd-Gliederung zu erkennen mit den stärksten Gradienten von über 1 ppm im nördlichen Netzteil bis zur Breite von HLDE-BURG-GENT. Es schließen sich südlich schwächere Gradienten mit ähnlicher Ausrichtung bis zur Breite von HALB-STAF-DESS-LUWI an. Die Gradienten im südlichen Netzteil sind weniger ausgeprägt und weisen in fast entgegengesetzte Richtung.

Für den gewählten Zeitpunkt ergibt sich in der 100 km x 100 km großen Netzschleife HALB-LUWI-HVLB-SALZ ein Gradient von 0.84 ppm mit einem Azimut von 15°. Dies entspricht den

Fehlern der Basislinien STEN-HVLB sehr viel mehr (Differenz der troposphärischen Zenitverzögerung: 2,7 cm bei 29 km Basislinienlänge (= 0,93 ppm), Basislinienazimut: 34°) als denen der Basislinie HALB-MAGD (Differenz der troposphärischen Zenitverzögerung: 0,6 cm auf 46 km Basislinienlänge (= 0,13 ppm), Basislinienazimut: 58°).

Die in diesem Beispiel durchziehende Wetterfront führt also zu troposphärischen Störungen, die kleinräumiger sind als der gewählte Abstand der Referenzstationen. Eine Verringerung der von ihr erzeugten relativen Beobachtungsfehler würde nur bei geringerem Abstand der Referenzstationen gelingen.

- **Große Orbitfehler:** die großen Orbitfehler eines einzelnen Satelliten spiegeln sich in den Koordinatengenauigkeiten nicht wider. Die Verwendung der virtuellen Referenzstation bewirkt eine Genauigkeitssteigerung der erzielten Ergebnisse.

### Zusammenfassung

Die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse gelingt in der 100 km x 100 km großen Netzschleife nicht mehr so gut wie bei einem geringeren Referenzstationsabstand. Die  $L_1$ -Lösungen sind nur noch bei wenigen Basislinien genauer als die  $L_0$ -Lösungen. Der Genauigkeitszuwachs, der sich durch den Übergang auf  $L_1$ -Lösungen aufgrund deren geringerer Beeinflussung durch Mehrwegeeffekte und Meßrauschen ergab, kann hier nicht mehr ausgenutzt werden.

Beim Auftreten extremer Fehlereinflüsse der Ionosphäre und Troposphäre gelingt deren Beseitigung unvollständig oder nicht mehr, da die Störeinflüsse geringere räumliche Ausdehnungen haben als der Abstand der gewählten Referenzstationen. Um auch solch extreme Einflüsse erfassen zu können, muß ein kleinerer Referenzstationsabstand gewählt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In konsequenter Weiterentwicklung der cm-genauen relativen GPS-Positionierung zu einem noch rationelleren und wirtschaftlicheren Meßverfahren werden mehr und mehr permanent arbeitende Referenzstationen aufgebaut. Sie erzeugen zum einen die Korrekturdaten, die für die relative Positionierung notwendig sind und stellen zum anderen den Bezug zum gewünschten geodätischen Datum her.

Aufgrund der entfernungsabhängig wirkenden Fehler (Orbitfehler, ionosphärische und troposphärische Refraktion) ist eine schnelle und zuverlässige Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten nur für kurze Entfernungen (Größenordnung 10 km) zur nächsten Referenzstation möglich. Auch die erzielbaren Koordinatengenauigkeiten sinken mit zunehmender Entfernung. Ein flächendeckender Aufbau eines Referenzstationsnetzes, bei dem ein 10 km-Abstand zur nächsten Referenzstation nicht überschritten wird, ist aufgrund der sehr großen Anzahl von notwendigen Stationen kostspielig. Kostengünstiger ist der Aufbau und Betrieb von weniger Stationen und dafür einer verbesserten Modellierung der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse.

Um die zu modellierenden Fehler mit mm-Genauigkeit bestimmen zu können, müssen die Phasenmehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz gelöst und festgesetzt worden sein. Aufgrund der mm-genau bekannten Stationskoordinaten ist dies wesentlich einfacher durchzuführen als für nur näherungsweise bekannte Basislinien. Auch wenn aus den GPS-Messungen abgeleitete Modelle des absoluten Elektronengehalts der Ionosphäre und der troposphärischen Refraktionsunterschiede zwischen den Stationen eingeführt werden, verbleiben z.T. einige wenige ungelöste Mehrdeutigkeiten meist niedrig stehender Satelliten mit wenigen Beobachtungen. Die Ursachen dafür liegen insbesondere bei Restfehlern der Refraktionsmodelle und bei Mehrwegfehlern. Für Beobachtungen mit ungelösten Mehrdeutigkeiten können keine präzisen Korrekturmodelle berechnet werden, so daß sie von der weiteren Datenauswertung ausgeschlossen werden sollten. Die Anzahl der hiervon betroffenen Beobachtungen ist bei einem Abstand der Referenzstationen in der Größenordnung von 50 km im allgemeinen so gering ( $\leq 0,5\%$ ), daß keine Einschränkung der Verfügbarkeit der GPS-Positionierung gegeben ist.

Durch Bildung entsprechender Linearkombinationen der Ursprungssignale gelingt die Trennung nach den Fehlerursachen ionosphärischer Refraktion auf der einen Seite sowie Orbitfehlern und troposphäri-

scher Refraktion auf der anderen. Eine weitere Aufspaltung in satellitenindividuelle Orbitfehler und troposphärische Zenitfehlerdifferenzen ist möglich, bringt aber für *Post-Processing*-Anwendungen keine weiteren Vorteile. Der Modellierungsansatz bestimmt satelliten- und epochenindividuell ionosphärische und geometrische Korrekturmodelle. Mindestens drei Referenzstationen sind notwendig, um flächenhaft Korrekturmodelle zur Verringerung der entfernungsabhängig wirkenden Fehler zu erzeugen.

Mittelt man zusätzlich die korrespondierenden Beobachtungen der Referenzstationen, werden auch die stationsabhängigen Fehler abgeschwächt. Insbesondere die Mehrwegeinflüsse auf die Codebeobachtungen können so verringert werden, was zu genaueren Näherungslösungen der zu bestimmenden Mobilstationen führt und damit zu einer schnelleren und zuverlässigeren Mehrdeutigkeitslösung in der Basislinie zur Mobilstation.

Die Verwendung der Korrekturmodelle und die Mittelung korrespondierender Beobachtungen führt zum Konzept der virtuellen Referenzstationen. Dabei werden für eine gewählte Position, die möglichst nah zur Position der Mobilstation liegen sollte, die Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation berechnet. Die cm-genaue Positionierung der Mobilstation erfolgt dann über die Basislinie zur virtuellen Station. Mit diesem Konzept können alle Vorteile eines Referenzstationsnetzes ausgenutzt werden und gleichzeitig vorhandene Algorithmen und Software zur Positionierung der Mobilstation angewandt werden. Je nach Realisierung des Konzepts ist das zur Mobilstation zu übertragende Datenvolumen genau so groß oder nur unwesentlich größer als bei Verwendung nur einer einzigen Referenzstation.

Umfangreiche *Post-Processing*-Datenauswertungen bestätigen das Auswertekonzept. In Netzschleifen mit Ausdehnungen in der Größenordnung von 50 km  $\times$  50 km gelang die weitgehende Erfassung und Beseitigung der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse sogar unter extremen Fehlerbedingungen. Dies verbesserte die Mehrdeutigkeitslösung und verringerte die Koordinatenfehler bei der Positionierung von Mobilstationen. Restfehler verblieben aber bei ionosphärischen Störungen mittlerer Größe, die durch die Korrekturmodelle nicht vollständig erfaßt werden konnten. Bei einem größeren Abstand der Referenzstationen (100 km) führt der gewählte Ansatz im allgemeinen auch zu guten Resultaten, er scheiterte aber beim Auftreten von ionosphärischen und troposphärischen Störungen. Von daher

scheint für die in Mitteleuropa vorherrschenden Refraktionsbedingungen ein maximaler Abstand der Referenzstationen von 50 km am besten geeignet zu sein, um mit einer möglichst geringen Anzahl von Referenzstationen flächendeckend cm-genaue GPS-Positionierung zu ermöglichen.

Die mit den Daten aus Sachsen-Anhalt erzielten Resultate können nicht direkt auf andere Regionen der Erde übertragen werden. Beim Vorliegen anderer Refraktionsbedingungen muß das Auswertekonzept erweitert werden (z.B. zur Erfassung der troposphärischen Höhenabhängigkeiten im Hochgebirge), muß der maximal zulässige Referenzstationsabstand geringer gewählt werden (z.B. beim Auftreten troposphärischer oder ionosphärischer Störungen geringerer räumlicher Ausdehnung) oder es muß sogar damit gerechnet werden, daß der Modellierungsansatz zeitweise vollständig scheitert (bei starken, kleinräumigen ionosphärischen Störungen in den

Polarregionen und in der Äquatorregion). Ebenso müssen die Ansätze einem erneuten Praxistest unterzogen werden, wenn aufgrund stärkerer Sonnenaktivität in den Jahren 1999 bis 2001 verstärkt ionosphärische Störungen auftreten werden.

Dagegen sind verbesserte Resultate zu erwarten, wenn es gelingt, die Phasenmehrwegeausbreitung auf den Referenzstationen durch ausgereifere Empfänger- und Antennentechnik oder durch stationenweise Mehrwege-Kalibrierung zu verringern.

Auch die Verwirklichung einer dritten Meßfrequenz, wie sie für die nächste GPS-Satellitengeneration geplant ist und die insbesondere die Mehrdeutigkeitslösung vereinfachen und zuverlässiger machen wird, wird Auswirkungen auf die Positionierung in regionalen GPS-Netzen haben. Eine präzise Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse wird aber auch dann notwendig bleiben.

## 8 Literatur

- Abe, Y., H. Tsuji (1994): A Nationwide GPS Array in Japan for Geodynamics and Surveying. *Geomatics Info Magazine*, 8:29-31.
- Augath, W. (1985): Lagenetze, In: Pelzer, H. (Hg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Konrad Wittwer, Stuttgart, 373-431.
- Augath, W., M. Fröhlich, H.-H. Kropp, W. Seifert, M. Strerath (1993): Aufbau von GPS-Permanentstationen in Niedersachsen - Status 1992/93. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, 43: 143-154.
- Axelrad, P., C. Comp, P. MacDoran (1994): Use of Signal-To-Noise Ratio for Multipath Error Correction in GPS Differential Phase Measurements: Methodology and Experimental Results. *Proc. of ION GPS-94, Salt Lake City, Utah*, 655-666.
- Beutler, G., W. Gurtner, I. Bauersima, M. Rothacher (1986): Efficient Computation of the Inverse of the Covariance Matrix of Simultaneous GPS Carrier Phase Difference Observations. *Manuscripta Geodaetica*, 11:249-255.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher (1987): Correlations between Simultaneous GPS Double Difference Carrier Phase Observations in the Multistation Mode: Implementation Considerations and First Experiences. *Manuscripta Geodaetica*, 12:40-44.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, A. Geiger (1988): Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations. In: Brunner, F.K.: *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements*. Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, 15-43.
- Beutler, G. (1996): GPS Satellite Orbits. In: Kleusberg, A., P.J.G Teunissen (Hg.): *GPS for Geodesy*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1996, 37-101.
- Bishop, G.J., D.S. Coco, P.H. Kappler, E.A. Holland (1994): Studies and Performance of a New Technique for Mitigation of Pseudorange Multipath Effects in GPS Ground Stations. *Proc. of ION 1994 National Technical Meeting, San Diego, Ca.*, 231-242.
- Black, H.D. (1978): An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction. *Journal of Geophysical Research*, 101:B4, 1825-1828.
- Braasch, M.S. (1996): Multipath Effects. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 547-568.
- Braun, J., B. Stephens, O. Ruud, C. Meertens (1997): *The Effect of Antenna Covers on GPS Baseline Solutions*. University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), Boulder, CO, 17.06.1997 ([http://unavco.ucar.edu/docs/science/dome\\_report](http://unavco.ucar.edu/docs/science/dome_report)).
- Breuer, B., J. Campbell, A. Müller (1993): GPS-Meß- und Auswerteverfahren unter operationellen GPS-Bedingungen. *SPN – Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, 2:82-90.
- Breuer, B., J. Campbell, B. Görres, J. Hawig, R. Wohlleben (1995): Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. *SPN – Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, 4:49-59.
- Brown, L.D., R.E. Daniell, M.W. Fox, J.A. Klobuchar, P.H. Doherty (1991): Evaluation of Six Ionospheric Models as Predictors of Total Electron Content. *Radio Science*, 26:1007-1015.
- Brown, R.G., P.Y.C. Hwang (1992): *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. 2. Auflage, John Wiley & Sons, New York.
- Bruyninx, C. und 11 Koautoren (1997): The Use of the EUREF Permanent GPS Network for the Maintenance of the European Terrestrial Reference Frame. In: Brunner, F.K. (Hg.): *Advances in Positioning and Reference Frames. Proc. of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, 1997*, 18-26.
- Erickson, C. (1992): An Analysis of Ambiguity Resolution Techniques for Rapid Static GPS Surveys Using Single Frequency Data. *Proc. of ION GPS-92, Albuquerque, NM*, 453-462.
- Francisco, S.G. (1996): GPS Operational Control Segment. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 1, 435-465.
- Fröhlich, M. (1995): *Zur Entwicklung eines Hochpräzisen Permanenten Positionierungsservice (HPPS)*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 211, Hannover.
- Garin, L., J.-M. Rousseau (1997): Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier. *Proc. of ION GPS-97, Kansas City, Mo.*, 559-568.
- Gendt, G., G. Dick, C. Reigber (1995): Das IGS-Analysezentrum am GFZ Potsdam: Verarbeitungssystem und Ergebnisse. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 120:438-448.
- Georgiadou, Y., A. Kleusberg (1988a): On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning. *Manuscripta Geodaetica*, 13:1-8.
- Georgiadou, Y., A. Kleusberg (1988b): On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning. *Manuscripta Geodaetica*, 13:172-179.
- Goad, C.C., L. Goodman (1974): A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. Präsentiert auf dem *AGU Annual Fall Meeting*, San Francisco, CA, Abstract: EOS, 55:1106.

- Goad, C.C. (1985):** Precise Relative Position Determination Using Global Positioning System Carrier Phase Measurements in a Nondifference Mode. *First Int. Symp. on Positioning with the Global Positioning System, Rockville*, 347-356.
- Gurtner, W. (1998):** *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2*. Astronomisches Institut, Universität Bern, März 1998.
- Han, S., C. Rizos (1996):** GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring System. *Proc. of ION GPS-96, Kansas City, Mo.*, 1827-1836.
- Han, S. (1997):** *Carrier Phase-Based Long-Range GPS Kinematic Positioning*. UNISURV S-49, School of Geomatic Engineering, Sydney.
- Han, S., C. Rizos (1997a):** An Instantaneous Ambiguity Resolution Technique for Medium-Range GPS Kinematic Positioning. *Proc. of ION GPS-97, Kansas City, Mo.*, 1789-1800.
- Han, S., C. Rizos (1997b):** Comparing GPS Ambiguity Resolution Techniques. *GPS World*, Oktober 1997, 54-61.
- Hankemeier, P., I. Engel, S. Koch (1998):** SAPOS - ein aktives Bezugssystem für multifunktionale Anwendungen. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **123**:149-156.
- Hatch, R.R. (1982):** The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. *Proc. of the Third Inter. Geodetic Symp. on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, NM*, Band 2, 1213-1232.
- Hatch, R.R., H.-J. Euler (1994):** Comparison of Several AROF Kinematic Techniques. *Proc. of ION GPS-94, Salt Lake City, Utah*, 363-370.
- Hatch, R.R., R.G. Keegan, T.A. Stansell (1997):** Leica's Code and Phase Multipath Mitigation Techniques. *Proc. of ION 1997 National Technical Meeting, Santa Monica*, 217-225.
- Heiskanen, W.A., H. Moritz (1967):** *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, London.
- Herring, T.A. (1992):** Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. In: Munck, J.C. de, Spoelstra, T.A.Th. (Hg.): *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Nr. 36, 157-164.
- ICD-GPS-200 (1997):** *Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, Revision C*. ARINC Research Corporation, El Segundo, Ca..
- IGS (1997):** International GPS Service for Geodynamics: Terms of Reference. In: Zumbege, J.F., Fulton, D.E., Neilan, R.E. (Hg.): *IGS 1996 Annual Report*. IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Ca., 3-8.
- Jahn, C.-H. (1996):** *Präzise 'near-online' Bestimmung in der Landesvermessung mit Hilfe eines Netzes permanent messender GPS-Empfänger auf Referenzstationen*. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Abt. Landesvermessung, Hannover, Juli 1996.
- Kee, C., B. Parkinson (1994):** Calibration of Multipath Errors on GPS Pseudorange Measurements. *Proc. of ION GPS-94, Salt Lake City, Utah*, 353-362.
- Kee, C. (1996):** Wide Area Differential GPS. In: Parkinson, B.W., J.J. Spilker (Hg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Band 2, 81-114.
- Klobuchar, J.A. (1977):** Ionospheric time delay corrections for advanced satellite ranging systems. *AGARD Conference Proc. 209, Propagation Limitations of Navigation and Positioning Systems*, 3-1 - 3-13.
- Kouba, J., Y. Mireault (1997):** Analysis Coordinator Report. In: Zumbege, J.F., Fulton, D.E., Neilan, R.E. (Hg.): *IGS 1996 Annual Report*. IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Ca., 55-100.
- Lanyi, G.E., T. Roth (1988):** A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Science*, **23**:483-492.
- MacMillan, D.S. (1995):** Atmospheric Gradients from Very Long Baseline Interferometry Observations. *Geophysical Research Letters*, **22**:1041-1044.
- Mannucci, A.J., B.D. Wilson, C.D. Edwards (1993):** A New Method for Monitoring the Earth's Ionospheric Total Electron Content Using the GPS Global Network. *Proc. of ION GPS-93, Salt Lake City, Utah*, 1323-1332.
- Melbourne, W.G. (1985):** The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems. *First Inter. Symp. on Positioning with the Global Positioning System, Rockville*, 373-386.
- Mendes, V.B., R.B. Langley (1994):** A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. In: Cannon, M.E., G. Lachapelle (Hg.): *Proc. of the Inter. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 94)*, Banff, 87-98.
- Mueller, T. (1994):** Wide Area Differential GPS. *GPS World*, Juni 1994, 36-44.
- Niell, A.E. (1996):** Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, **101**:B2, 3227-3246.
- Patzschke, S., T. Leipholtz (1996):** GPS-Referenzstationen im Land Sachsen-Anhalt. *Zeitschrift für das Öffentliche Vermessungswesen in Sachsen-Anhalt (LSA Verm)* 2/96, 140-155.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1992):** *Numerical Recipes in FORTRAN*. Cambridge University Press, 2. Auflage, Cambridge, NY.
- Raquet, J.F. (1996):** Multiple Reference GPS Receiver Multipath Mitigation Technique. *Proc. 52nd Annual Meeting of ION, Cambridge, Mass.*, 681-690.
- Rocken, C., J. Johnson, J. Braun, C. Meertens, S. Perry (1994):** *UNAVCO Facility GPS Receiver*

- Tests*. University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), Boulder, Colo..
- Rothacher, M., S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler (1995):** Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data. In: G. Gendt, G. Dick (Hg.): *Special Topics and New Directions, 1995 IGS Workshop*. Potsdam, 205-220.
- Rothacher, M., L. Mervart (1996):** *The Bernese GPS Software Version 4.0 User Manual*. Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern.
- Rothacher, M., T.A. Springer, S. Schaer, G. Beutler (1997):** Processing Strategies for Regional GPS Networks. In: Brunner, F.K. (Hg.): *Advances in Positioning and Reference Frames. Proc. of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, 1997*, 93-100.
- RTCM 2.1 (1994):** *RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service, Version 2.1*. Radio Technical Commission For Maritime Services, Special Committee No. 104, 3. Januar 1994.
- Rührnößl, H., F.K. Brunner, M. Rothacher (1998):** Modellierung der troposphärischen Korrektur für Deformationsmessungen mit GPS im alpinen Raum. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, **105**:14-20.
- Santerre, R. (1989):** *GPS Satellite Sky Distribution: Impact on the Propagation of Some Important Errors in Precise Relative Positioning*. Doktorarbeit, TR 145, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Kanada.
- Saastamoinen, J. (1973):** Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction, Part II. *Bulletin Géodésique*, **107**:13-34.
- Sardón, E., N. Zarraoa (1997):** Estimation of Total Electron Content Using GPS Data: How Stable are the Differential Satellite and Receiver Instrumental Biases?. *Radio Science*, **32**:1899-1910.
- Schaer, S., G. Beutler, L. Mervart, M. Rothacher, U. Wild (1995):** Global and Regional Ionosphere Models Using the GPS Double Difference Phase Observable. In: G. Gendt, G. Dick (Hg.): *Special Topics and New Directions, 1995 IGS Workshop*. Potsdam, 77-92.
- Schupler, B.R., T.A. Clark (1991):** How Different Antennas Affect the GPS Observable. *GPS World*, November/Dezember 1991, 32-36.
- Slater, J.A., S. Malys (1997):** WGS84 – Past, Present and Future. In: Brunner, F.K. (Hg.): *Advances in Positioning and Reference Frames. Proc. of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, 1997*, 1-7.
- Sleewaegen, J.M. (1997):** Multipath Mitigation, Benefits from Using the Signal-to-Noise Ratio. *Proc. of ION GPS-97, Kansas City, Mo.*, 531-540.
- Teunissen, P.J.G. (1995):** The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: a Method for Fast GPS Integer Ambiguity Resolution. *Journal of Geodesy*, **70**:65-82.
- Teunissen, P.J.G., A. Kleusberg (1996):** GPS Observation Equations and Positioning Concepts. In: Kleusberg, A., P.J.G. Teunissen (Hg.): *GPS for Geodesy*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 175-217.
- The White House (1996):** *Fact Sheet: U.S. Global Positioning System Policy*. The White House, Office of Science and Technology Policy, National Security Council, 29. März 1996.
- Townsend, B., D.J.R. von Nee, P. Fenton, K. Van Dierendonck (1995):** Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop. *Proc. of ION 1995 National Technical Meeting, Anaheim, Ca.*, 277-283.
- USCG (1995):** *Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification*. U.S. Coast Guard (USCG), Navigation Center (NAVCEN), 2. Auflage, 2. Juni 1995.
- Van Dierendonck, A.J., P. Fenton, T. Ford (1992):** Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver. *Proc. of ION 1992 National Technical Meeting, San Diego, Ca.*, 115-124.
- Vaníček, P., D.E. Wells, A. Chrzanowski, A.C. Hamilton, R.B. Langley, J.D. McLaughlin, B.G. Nickerson (1983):** The Future of Geodetic Networks. *Proc. of the IAG, IUGG 18th General Assembly, Hamburg*, Band 2, 372-379.
- Wanninger, L. (1993):** Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **118**:25-36.
- Wanninger, L. (1994):** *Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 201, Hannover.
- Wanninger, L. (1995a):** Enhancing Differential GPS Using Regional Ionospheric Error Models. *Bulletin Géodésique*, **69**:283-291.
- Wanninger, L. (1995b):** Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. *Proc. of ION GPS-95, Palm Springs, Ca.*, 55-62.
- Wanninger, L. (1996):** Fehlermodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen. *41. DVW-Fortbildungseminar: GPS-Anwendungen und Ergebnisse '96, Potsdam*, DVW-Schriftenreihe 28/1997, 206-218.
- Wanninger, L. (1997a):** Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. In: Brunner, F.K. (Hg.): *Advances in Positioning and Reference Frames. Proc. of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, 1997*, 86-92.
- Wanninger, L. (1997b):** Virtuelle Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen. *46. DVW-Fortbildungseminar: GPS-Praxis und Trends '97, Frankfurt am Main*, DVW-Schriftenreihe 35/1999, 199-212.
- Weber, L., A. Tiwari (1995):** DGPS Architecture Based on Separating Error Components, Virtual Reference Stations, and FM Subcarrier Broadcast. *Proc. 51st Annual Meeting of ION, Colorado Springs, Co.*, 191-200.
- Webster, I., A. Kleusberg (1992):** Regional Modelling of the Ionosphere for Single Frequency Users of the Global Positioning System. *Sixth Inter. Geodetic Symp. on Satellite Positioning, Columbus, Ohio*, 230-239.

- Weill, L.R. (1997):** Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. *GPS World*, April 1997, 59-66.
- Wells, D. (Hg.) (1986):** *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, Kanada.
- Wild, U., G. Beutler, W. Gurtner, M. Rothacher (1989):** Estimating the Ionosphere Using One or More Dual Frequency GPS Receivers. *Fifth Inter. Geodetic Symp. on Satellite Positioning, Las Cruces, N.M.*, 724-736.
- Wilson, B.D., A.J. Mannucci (1993):** Instrumental Biases in Ionospheric Measurements Derived from GPS Data. *Proc. of ION GPS-93, Salt Lake City, Utah*, 1343-1351.
- Wu, J.T. (1994):** Weighted Differential GPS Method for Reducing Ephemeris Error. *Manuscripta Geodae-tica*, **20**:1-7.
- Wübbena, G. (1985):** Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI-4100 Code and Carrier Measurements. *First Inter. Symp. on Positioning with the Global Positioning System, Rockville*, 402-412.
- Wübbena, G. (1988):** GPS Carrier Phases and Clock Modeling. In: Groten, E., R. Strauß (Hg.): *GPS-Techniques applied to geodesy and surveying*. Proc. Inter. GPS-Workshop, Darmstadt, April 1988, Springer Verlag, Heidelberg, 381-392.
- Wübbena, G. (1989):** The GPS Adjustment Software Package GEONAP – Concepts and Models. *Fifth Inter. Geodetic Symp. on Satellite Positioning, Las Cruces, N.M.*, 452-461.
- Wübbena, G. (1991):** *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover 1991.
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996a):** A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. *Proc. of ION GPS-96, Kansas City, Mo.*, 1205-1214.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996b):** Reducing Distance Dependent errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. *Proc. of ION GPS-96, Kansas City, Mo.*, 1845-1852.
- Yunck, T.P. (1993):** Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. *Environmental Effects on Spacecraft Positioning and Trajectories*. Geophysical Monograph 73, IUGG Volume 13, 1-16.
- Zielinski, J.B. (1988):** Covariances in 3D Network Resulting from Orbital Errors. In: Groten, E., R. Strauß (Hg.): *GPS-Techniques applied to geodesy and surveying*. Proc. Inter. GPS-Workshop, Darmstadt, April 1988, Springer Verlag, Heidelberg 1988, 504-514.

## Anhang A: Differenzen der Satellitenelevationen aufgrund des Stationsabstandes

Für die Abschätzung der Wirkung von Orbitfehlern sowie der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion auf die einfache Differenz der Beobachtungen zweier Stationen sind die Satellitenelevationen bei simultanen Messungen von Bedeutung. Es soll hier die Differenz der Satellitenelevationen einer Station B aus der gegebenen Elevation der Station A hergeleitet werden. Es wird der Sonderfall betrachtet, daß sich die Stationen A und B und der Satellit in einer Ebene befinden. Bei diesem Sonderfall sind die Elevationsdifferenzen maximal.

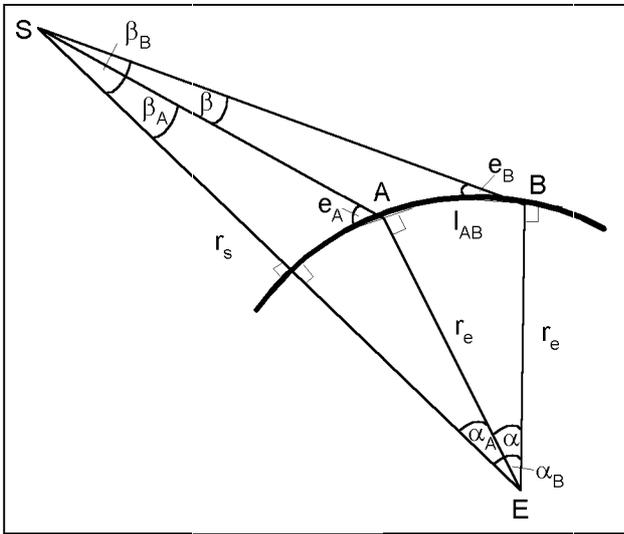


Abb. A.1: Geometrische Beziehungen in der Ebene, die durch die Stationen A und B mit Abstand  $l_{AB}$  und dem Satelliten  $S$  festgelegt wird.

Im Dreieck Satellit  $S$  – Erdmittelpunkt  $E$  – Station  $A$  gilt folgende Beziehung (vgl. Abb. A.1):

$$\frac{\sin \beta_A}{r_e} = \frac{\sin(e_A + \pi/2)}{r_s}. \quad (\text{A.1})$$

Sie kann entsprechend auch für den Punkt  $B$  aufgestellt werden. Löst man nach den Winkeln  $\beta_A$  bzw.  $\beta_B$  auf, so ergibt sich:

$$\beta_A = \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_A\right) \quad (\text{A.2})$$

$$\beta_B = \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_B\right). \quad (\text{A.3})$$

Gleichzeitig gilt in den Dreiecken  $SEA$  und  $SEB$ :

$$\alpha_A = \pi/2 - e_A - \beta_A \quad (\text{A.4})$$

$$\alpha_B = \pi/2 - e_B - \beta_B \quad (\text{A.5})$$

und bei Anwendung der Bogenformel erhält man für

$$\alpha = \alpha_B - \alpha_A = \frac{l_{AB}}{r_e}. \quad (\text{A.6})$$

Bildet man die Differenz von (A.5) und (A.4), setzt man (A.6), (A.2) und (A.1) ein und löst nach dem  $e_B$ -Term auf, so bekommt man:

$$e_B = e_A - \frac{l_{AB}}{r_e} + \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_A\right) - \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_B\right). \quad (\text{A.7})$$

Da der letzte Term auf der rechten Seite eine Funktion von  $e_B$  darstellt, kann  $e_B$  nur iterativ bestimmt werden. Verwendet man als Startwert die ersten beiden Terme der rechten Seite, erhält man schon nach wenigen Iterationen für die oben beschriebenen Anwendungen ausreichend genaue Ergebnisse.

Der Winkel  $\beta$ , der für die Abschätzung der Orbitfehler von Bedeutung ist, kann dann folgendermaßen aus den Elevationswinkeln berechnet werden:

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_B - \beta_A \\ &= e_A - e_B - \alpha = e_A - e_B - \frac{l_{AB}}{r_e}. \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

## Anhang B: Differenzen der Satellitenelevationen aufgrund des Höhenunterschieds zwischen zwei Stationen

Für die Abschätzung der Wirkung von Orbitfehlern sowie der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion auf die einfache Differenz der Beobachtungen zweier Stationen in unterschiedlicher Höhe sind die Satellitenelevationen bei simultanen Messungen von Bedeutung. Es sollen hier die Satellitenelevationen an einer Station B aus den gegebenen Elevationen der um  $\Delta h_{AB}$  tiefer liegenden Station A hergeleitet werden.

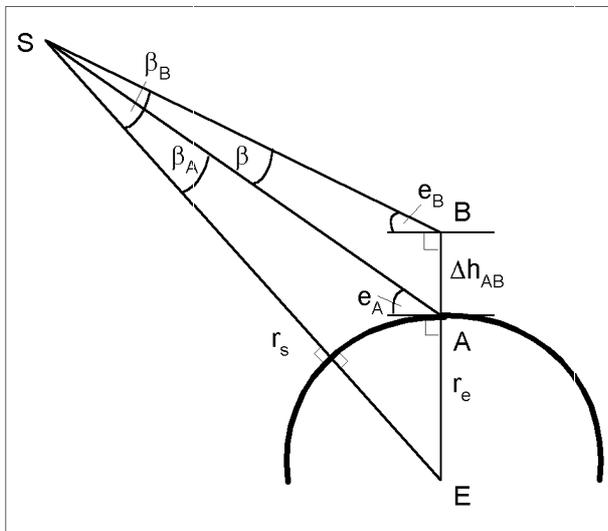


Abb. B.1: Geometrische Beziehungen in der Ebene, die durch die Stationen A und B mit der Höhendifferenz  $\Delta h_{AB}$  und dem Satelliten S gegeben ist.

Durch die geometrischen Beziehungen in den Dreiecken Satellit S – Erdmittelpunkt E und Station A bzw. Station B ergeben sich (Abb. B.1):

$$\beta_A = \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_A\right) \quad (\text{B.1})$$

$$\beta_B = \arcsin\left(\frac{r_e + \Delta h_{AB}}{r_s} \cdot \cos e_B\right). \quad (\text{B.2})$$

Gleichzeitig gilt:

$$\beta = \beta_B - \beta_A = e_A - e_B. \quad (\text{B.3})$$

Löst man nun (B.3) nach  $e_B$  auf und ersetzt die Winkel  $\beta_A$  und  $\beta_B$  durch (B.1) und (B.2), erhält man:

$$e_B = e_A + \arcsin\left(\frac{r_e}{r_s} \cdot \cos e_A\right) - \arcsin\left(\frac{r_e + \Delta h_{AB}}{r_s} \cdot \cos e_B\right). \quad (\text{B.4})$$

Da der letzte Term auf der rechten Seite eine Funktion von  $e_B$  darstellt, kann  $e_B$  nur iterativ bestimmt werden. Verwendet man als Startwert für  $e_B$  die Elevation  $e_A$ , ergeben sich schon nach wenigen Iterationen für die oben beschriebenen Anwendungen ausreichend genaue Ergebnisse.

Für die Berechnung der Elevationsdifferenzen wurden verwendet:

$$\begin{aligned} r_e &= 6380 \text{ km} \\ r_s &= 26600 \text{ km}. \end{aligned}$$

Bei 1000 m Höhendifferenz ergibt sich eine maximale Elevationsdifferenz von 0,0023° bei 13° Elevation (Abb. B.2).

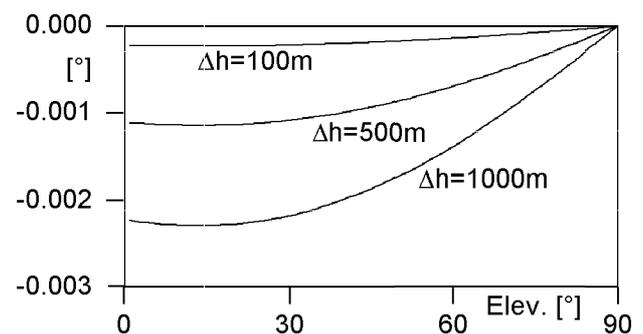


Abb. B.2: Satellitenelevationsdifferenzen für verschiedene Elevationen und Höhenunterschiede  $\Delta h_{AB}$ .