

# Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung

*Gerhard Wübbena*

## 1 Einleitung

Das GPS blickt inzwischen auf eine über 20 jährige Geschichte zurück. Präzise Positionsbestimmungen mit geodätischer Genauigkeit werden seit Mitte der 80er Jahre erfolgreich durchgeführt. Seit dieser Zeit haben sich das GPS-System, die Technik, die Verfahren und die Algorithmen zur Modellierung der GPS Beobachtungen ständig weiterentwickelt und verfeinert. Der Nutzer des Systems erkennt das beispielsweise daran, daß sich die notwendige Beobachtungszeit zur Erreichung einer Genauigkeit im cm-Bereich für bestimmte Anwendungen von mehreren Stunden auf einige Minuten bzw. Sekunden reduziert hat.

Die Qualität der GNSS-Positionsbestimmungen (GNSS=Global Navigation Satellite System) wird gemessen an den Kriterien Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit. Durch eine hohe Anzahl von Satelliten (GPS z.Z. 27) ist die Verfügbarkeit auch in teilweise abgeschatteten Bereichen sehr gut. Bei stärkeren Abschattungen kann jedoch oft auf den Einsatz bzw. die Integration weiterer Meßtechniken nicht verzichtet werden.

Für Genauigkeiten im Bereich von Zentimetern und Millimetern liegt ein Kernproblem immer noch in der Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten. Die Methoden und Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung haben sich zwar sehr stark verbessert, jedoch wird die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Positionslösungen durch das Mehrdeutigkeitsproblem immer noch eingeschränkt.

Neben den statischen Anwendungen treten immer mehr kinematische Anwendungen in den Vordergrund, bei denen hochgenaue Positionslösungen erforderlich sind.

Moderne Kommunikationstechniken erlauben zunehmend eine kostengünstige Datenübertragung, so daß Echtzeitanwendungen auch für größere Stationsentfernungen vermehrt zum Einsatz kommen. Während präzise Echtzeitanwendungen, als sog. RTK-Verfahren, in den letzten Jahren auf kurze Entfernungen und zwei Stationen (Basislinien) begrenzt waren, werden immer mehr Referenzstationsnetze aufgebaut, deren Daten in Echtzeit für verschiedene Anwendungen prozessiert werden. Die Verarbeitung von Zustandsinformationen anstelle von Beobachtungskorrekturen stellt hier ein neues Verfahren dar.

Durch die oben genannten Entwicklungen entstehen neue Anforderungen an die Modellierung und Auswertung der Meßdaten.

Ausgehend von der Beobachtungsgleichung für Code- und Trägerphasenbeobachtungen sollen in diesem Beitrag einige Fragen der Modellbildung angesprochen und diskutiert werden. Die Darstellung ist nicht vollständig und geht auf verschiedene Bereiche unterschiedlich stark ein.

## 2 Die Beobachtungsgleichung

Die GNSS-Beobachtungsgleichung für Pseudoentfernungsmessungen auf Code- und Träger-signalen lautet:

$$PR_{s,i}^j = \left| \vec{R}_i^j \right| + \delta t^j + \delta d_s^j + \frac{\vec{R}_i^j}{\left| \vec{R}_i^j \right|} \vec{\delta o}^j + \delta S_{f,i}^j \pm \delta I_{s,i}^j + \delta T_i^j + \delta M_{s,i}^j + \delta A_{f,i}^j + \delta d_{s,i} + \delta t_i + \lambda_s^j N_{s,i}^j + \epsilon_{s,i}^j$$

Hierin ist

- $i$  - der Index für die beobachtende Station (Empfänger)
- $j$  - der Index für den beobachteten Satelliten,
- $s$  - der Index für das beobachtete Signal (P-Code, C/A-Code, L1-Phase, L2-Phase..),
- $f$  - der Index für die Frequenz des Signals (L1, L2),
- $\vec{R}_i^j$  - der Radiusvektor von der Empfangsantenne zur Satellitenantenne,
- $\delta t^j$  - der Uhrfehler am Satelliten,
- $\delta d_s^i$  - der Einfluß der Laufzeitverzögerung des Signals  $s$  in der Satellitenhardware,
- $\vec{\delta o}^j$  - der Bahnfehlervektor des Satelliten,
- $\delta S_{f,i}^j$  - der Fehler durch Phasenzentrumsvariationen der Satellitenantenne,
- $\delta I_{f,i}^j$  - der ionosphärische Einfluß für das Signals, positiv für Codes, negativ für Phasen,
- $\delta T_i^j$  - der troposphärische Einfluß,
- $\delta M_{s,i}^j$  - der Einfluß von Mehrwegeausbreitungen,
- $\delta A_{f,i}^j$  - der Einfluß durch Phasenzentrumsvariationen der Empfangsantenne,
- $\delta d_{s,i}^j$  - der Einfluß der Laufzeitverzögerung des Signals in der Empfängerhardware,
- $\delta t_i$  - der Einfluß des Uhrfehlers des Empfängers,
- $\lambda_s^j$  - die Wellenlänge des Signals für den beobachteten Satelliten (GLONASS),
- $N_{s,i}^j$  - die Mehrdeutigkeit der Phasenmessungen (i.d.R. nur für Trägerphasenmessungen) und
- $\epsilon_{s,i}^j$  - der zufällige Meßfehler.

Alle Größen sind unterschiedlich stark zeitabhängig. Die Koordinaten der Empfangsantenne verbergen sich im ersten Term der rechten Seite der Gleichung. Es ist

$$\vec{R}_i^j = \vec{X}_c^j - \vec{X}_i$$

mit

- $\vec{X}_c^j$  - den, z.B. aus den sog. „Broadcast-Ephemeriden“, berechneten Koordinaten der Satellitenantenne zum Sendezeitpunkt des Signals und
- $\vec{X}_i$  - den Koordinaten der Empfangsantenne zum Meß- bzw. Empfangszeitpunkt.

Die Genauigkeit einer Positionsbestimmung mit GNSS für kinematische Anwendungen läßt sich mit der Formel

$$\sigma_p = PDOP\sigma_l$$

abschätzen. Hierin ist  $\sigma_l$  die Genauigkeit einer Pseudoentfernungsmessung inklusive aller in der Beobachtungsgleichung nicht erfaßten Fehleranteile, PDOP (Position Dilution Of Precision) der Faktor, der die Geometrie der beobachteten Satellitenkonstellation beschreibt, und  $\sigma_p$  die zu erwartende 3D Positionsgenauigkeit.

### 3 Undifferenzierte und differenzierte Beobachtungen

Die hochgenaue Positionsbestimmung ist nur möglich, wenn die Mehrdeutigkeit der Phasemessung gelöst, d.h. der ganzzahlige Wert der Unbekannten N ermittelt wird. Ein Problem in diesem Zusammenhang liegt darin, daß eine lineare Abhängigkeit zwischen den Uhrparametern und Laufzeitverzögerungen der Hardware sowie den Mehrdeutigkeiten selbst besteht. Für ein bestimmtes Signal s treten diese Parameter jeweils immer mit dem gleichen Koeffizienten in der Beobachtungsgleichung auf. Das System der Beobachtungsgleichungen ist deshalb singular und nicht ohne weiteres lösbar.

Grundsätzlich sind verschiedene Verfahren zur Lösung dieses Problems denkbar. Das in der Praxis am weitesten verbreitete Verfahren ist das der Differenzbildung. Die sog. „Einfache Differenz“ der Meßgrößen zwischen zwei Stationen (Empfängern) eliminiert, unter der Voraussetzung gleichzeitiger Messungen, den Einfluß der Satellitenuhr und der Laufzeitverzögerungen in der Satellitenhardware. Die „Doppelte Differenz“, d.h. die Differenz zweier einfacher Differenzen zwischen zwei Satelliten, eliminiert weiterhin den Uhrfehler des Empfängers sowie die Laufzeitverzögerungen durch die Empfängerhardware.

Alternativ zur Differenzbildung läßt sich die Singularität des Gleichungssystems dadurch lösen, daß über bestimmte Uhr- bzw. Mehrdeutigkeitsparameter verfügt wird. Es muß hierbei darauf geachtet werden, daß die Anzahl der Verfügungen die Singularität gerade aufhebt und der ganzzahlige Charakter der verbleibenden Mehrdeutigkeiten erhalten bleibt. Mit dieser Methode kann eine Auswertung der undifferenzierten Beobachtungen erfolgen, die einige Vorteile gegenüber der Differenzbildung aufweist.

Die Differenzbildung führt dazu, daß die Uhrfehler und Laufzeitverzögerungen der Hardware vollständig eliminiert werden. Theoretisch kommt dieses einer Modellierung bzw. Schätzung der eliminierten Parameter gleich, bei der eine unabhängige Unbekannte für jede Meßepoche eingeführt wird. Die Uhrparameter und Laufzeitverzögerungen werden durch die Differenzverfahren somit prinzipiell als weißes Rauschen mit unendlicher Varianz modelliert. Eine andere Möglichkeit der Modellierung besteht bei den Differenzverfahren nicht.

Bei der undifferenzierten Auswertung kann für die Uhrparameter und Laufzeitverzögerungen hingegen jedes sinnvolle Modell angewandt werden. Insbesondere die Laufzeitverzögerungen in der Hardware ändern sich mit der Zeit nur geringfügig, so daß eine entsprechende Modellierung zu einem deutlichen Informationsgewinn im Vergleich zu den Differenzmethoden führt. Nach Abschaltung des S/A-Effektes für GPS können die Satellitenuhrfehler wieder durch ein Atomuhrmodell beschrieben werden.

Die Differenzbildung eliminiert nicht nur die Uhrfehler und Laufzeitverzögerungen der Hardware, sondern wirkt auch auf alle anderen Einflüsse. Das hat zur Folge, daß alle absolu-

ten Fehlereinflüsse eliminiert werden und nur die Differenzen im System verbleiben. Die Modellierung solcher Differenzen gestaltet sich jedoch deutlich schwieriger als die Modellierung der undifferenzierten Effekte. Einige Fehlerkomponenten, wie z.B. ionosphärische und troposphärische Laufzeiteinflüsse oder Mehrwegeeffekte, lassen sich in Form stochastischer Prozesse beschreiben. Ein- oder mehrdimensionale individuelle Prozesse lassen sich dabei mit gängigen Filterverfahren beim undifferenzierten Ansatz relativ einfach modellieren, während die doppelte Differenz solcher Prozesse theoretisch und praktisch nur schwer zu beschreiben ist. Weiterhin ist mit der Differenzbildung ein deutlicher Informationsverlust verbunden.

Dieses führt bei den Differenzverfahren in der Praxis oft zu vereinfachenden Annahmen, um überhaupt eine Möglichkeit der Schätzung entsprechender Parameter zu erhalten. Jedoch verhindern solche Vereinfachungen häufig den Erfolg neuer Modellansätze.

#### **4 DGNSS: Beobachtungsraum oder Zustandsraum?**

Im Gegensatz zu einer simultanen Auswertung der Daten zweier oder mehrerer GNSS-Empfänger wird bei den differentiellen oder DGNSS-Verfahren nach dem Korrekturprinzip vorgegangen. D.h. daß auf einer Referenzstation die Summe aller dort wirkenden Fehlereinflüsse ermittelt und als Korrekturwert an den Nutzer übertragen wird. Dieser korrigiert damit seine eigene Beobachtung und führt mit dieser verbesserten Meßgröße eine Positionsbestimmung durch. Die so bestimmten Koordinaten stellen eine absolute Position dar, für den Fall, daß die Referenzstationskoordinaten im globalen Bezugssystem des GNSS bekannt sind. Die Methode kann als DGNSS-Verfahren im Beobachtungsraum betrachtet werden, da eine Korrektur der Meßgrößen vorgenommen wird.

Das Prinzip der DGNSS-Verfahren im Zustandsraum arbeitet hingegen anders. Statt die Beobachtungen zu korrigieren, wird der Zustand der einzelnen Fehlerkomponenten ermittelt und dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Sind die Zustandsgrößen mit hinreichender Genauigkeit bestimmt, so kann der Nutzer entsprechende Fehlerterme aus der Beobachtungsgleichung eliminieren. Zu den Zustandsparametern können die meisten der Terme gehören, die in der Beobachtungsgleichung aufgeführt sind. In der Praxis sind diejenigen Zustandsgrößen sinnvoll, die globalen oder großräumigen Charakter haben. Als Beispiel für die Verwendung von Zustandsparametern sei die Nutzung der sog. präzisen Ephemeriden im Postprocessing genannt.

Der Vorschlag, im Echtzeitbereich mit Verfahren im Zustandsraum zu arbeiten, wurde bereits vor einigen Jahren unterbreitet (Wübbena u.a. 1996a, 1997, Wübbena 1998). Hier wurde das Prinzip des GNSS-SMART (State Monitoring And Representation Technique) für DGNSS- und RTK-Anwendungen vorgestellt. Statt, wie im Beobachtungsraum, nur eine Korrektur für das Gesamtsignal auf einer Referenzstation zu ermitteln, wird aus den Beobachtungen eines Netzes von Referenzstationen der Zustand des Systems, getrennt nach den einzelnen Fehlerkomponenten, ermittelt. Diese Informationen werden dann in geeigneter Form dem Nutzer übermittelt, so daß er, unter Berücksichtigung dieser Daten, eine präzise absolute Positionsbestimmung durchführen kann.

Entsprechende Netze sind bereits im praktischen Einsatz für präzise Echtzeitmessungen. Die Übertragung der Zustandsinformation erfolgt derzeit jedoch noch über vereinfachte Ansätze (Flächenkorrekturparameter FKP oder virtuelle Referenzstationen VRS), da keine internationalen Standards für die Übermittlung solcher Daten zur Verfügung stehen. Der RTCM-Standard erlaubt z.B. nur eine Nutzung des Beobachtungsraums, so daß die Zustandsinformation

auf eine Beobachtungsinformation zurückgeführt werden muß. Je nach Ausdehnung der Netze ist weiterhin zu berücksichtigen, daß die Zustandsinformationen nur eine regionale Gültigkeit besitzen.

Ähnliche Ansätze werden inzwischen auch von anderen Stellen verfolgt. So versucht das Jet Propulsion Laboratory (JPL) die Bahn- und Uhrfehler der Satelliten in Quasi-Echtzeit zu erfassen und diese Zustandsinformation in Form von Verbesserungen an die Broadcast-Ephemeriden und Uhrparametern anzubringen (Muellerschoen u.a. 2001). Hierdurch wird mit Zweifrequenzempfängern im kinematischen Betrieb angeblich global eine absolute Genauigkeit im Bereich von 2 dm für die Höhe und 1 dm für die Lage erreicht.

Die Ermittlung der Zustandsinformationen in einem GNSS-SMART-System muß nicht unbedingt in einem Guß erfolgen. Denkbar sind z.B. Szenarien, bei denen Parameter mit globalem Charakter, wie z.B. Satellitenbahnen- und -uhren, aus einem globalen Netz, Parameter mit regionalem Charakter, wie z.B. großräumige ionosphärische Laufzeiteinflüsse, aus regionalen Netzen und Parameter mit begrenzter räumlicher Gültigkeit, wie kleinräumige ionosphärische Störungen und troposphärische Einflüsse, aus lokalen Netzen abgeleitet werden. Ein Problem bei einer solchen Vorgehensweise ist die zu gewährleistende Konsistenz der Daten. Aufgrund der teilweise hohen Korrelation verschiedener Parameter ist diese nicht ohne weiteres erreichbar. Nur durch Definition und Verwendung geeigneter Standards, z.B. für die troposphärische Refraktionskorrektur, erscheint dieser Lösungsansatz sinnvoll.

## 5 Absolute und relative Positionsbestimmung

Eine absolute Positionsbestimmung im globalen Bezugssystem des GNSS ist nur mit der Genauigkeit möglich, mit der die Summe aller Fehleranteile der Beobachtungsgleichung bekannt ist. Das Meßrauschen eines geodätischen GNSS Empfängers liegt für Trägerphasen im Bereich von 1 mm und darunter. Eine kinematische Positionsgenauigkeit von 1 mm ist dann erreichbar, wenn die Summe aller externen Fehlereinflüsse mit entsprechend höherer Genauigkeit ermittelt werden kann (DOP-Faktoren).

Dieses ist jedoch gegenwärtig noch nicht absolut möglich. Mit GPS Code-Messungen werden ohne den S/A-Einfluß bei Zweifrequenzmessungen absolute Genauigkeiten im Bereich von 1 - 2 m erreicht.

Zur Erreichung höherer Genauigkeiten werden bisher die sog. RTK-Verfahren eingesetzt, die entweder mit Code- und Phasenkorrekturen einer Referenzstation arbeiten, oder eine Simultanauswertung der Meßgrößen einer Referenz- und Mobilstation durchführen. Es handelt sich dabei also um Verfahren, die im Beobachtungsraum arbeiten und relative Positionierungen durchführen.

Der Einsatz der oben genannten Verfahren im Zustandsraum (GNSS-SMART) wird in Zukunft verstärkt zu absoluten Positionierungen auch mit höchster Genauigkeit führen. Statt einer relativen Positionierung, bezogen auf Korrektur- oder Referenzdaten einzelner Refe-

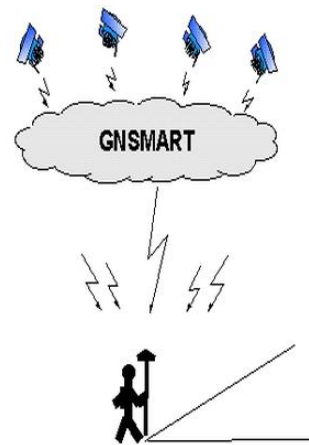


Abb. 1: Absolute Positionierung im Zustandsraum

renzstationen (Beobachtungsraum), werden verstärkt absolute Positionierungen, bezogen auf Zustandsinformationen aus Netzen von Monitorstationen, durchgeführt.

Abbildung 1 verdeutlicht dieses Prinzip. Der Nutzer beobachtet die Signale der einzelnen Satelliten und erhält über einen Dienstanbieter die Zustandsinformationen über Satelliten- und Atmosphärenparameter. Mit diesen Daten führt er eine absolute Positionsbestimmung durch. Ein direkter Bezug zu einer oder mehreren Referenzstationen wird nicht hergestellt.

## 6 Trennung von Fehlereinflüssen

Ein grundsätzliches Problem bei der Behandlung der verschiedenen Fehlerterme besteht darin, daß eine Trennung der einzelnen Anteile schwierig ist, da zum Teil hohe Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Parametern bestehen. Diese Problematik wird noch verstärkt, wenn mit Differenzmethoden gearbeitet wird.

Als Beispiel sei das Problem der absoluten und relativen Phasenzentrumsvariationen (PCV) für Sende- und Empfangsantennen genannt. Im IGS wurde Anfang der 90er Jahre festgelegt, daß innerhalb des globalen Netzes mit ihren unterschiedlichen Antennen relative Kalibrierungswerte (PCV) berücksichtigt werden sollten. Als Bezugsantenne wurde die Antenne vom Typ „Dorne Margolin T“ gewählt. Für diese Antenne wurden, abgesehen von Höhenoffsets für die L1/L2 Phasenzentren, die absoluten PCV zu Null gesetzt. Mit diesen Annahmen wurden bis heute alle operationellen Auswertungen im IGS vorgenommen. Alle Lösungen waren dabei konsistent, auch im Vergleich mit anderen Meßverfahren, wie z.B. VLBI. Erst nach dem Start neuer Satelliten des Typs Block IIR wurden Unstimmigkeiten festgestellt. Untersuchungen deuten darauf hin, daß die Vernachlässigung der absoluten PCV für die Empfangsantennen, aufgrund der hohen Korrelation mit den Parametern für Troposphäre, Stationshöhen und Satellitenbahnen, bis zu diesem Zeitpunkt nicht zu Inkonsistenzen in den Lösungen geführt hat. Für den neuen Satelliten kann eine konsistente Lösung jedoch nur durch künstliche Veränderung des Offsets der Antenne vom Massenschwerpunkt des Satelliten erreicht werden. Der anzusetzende Wert für diesen Offset ist aber unrealistisch (Rothacher 2000). Die Einführung absoluter PCV für die Empfangsantennen in den IGS-Netzen führt hingegen zu Inkonsistenzen bezüglich des globalen Maßstabs im Vergleich zu VLBI. Eine Auflösung dieser Problematik liegt vermutlich in der Einführung nadirdistanzabhängiger PCV für die Satellitenantennen. Die Antennen der Block IIR Satelliten sind gegenüber den älteren Satelliten modifiziert. Es wurde im IGS eine Arbeitsgruppe zur Untersuchung der Charakteristik der Satellitenantennen eingerichtet.

Das Beispiel zeigt, daß eine Trennung der unterschiedlichen Fehleranteile unter bestimmten Bedingungen nicht gelingt. Eine Veränderung der Meßanordnungen oder Meßbedingungen (neuer Satellitentyp) kann jedoch neue Möglichkeiten bieten bzw. eine Trennung der Effekte erforderlich machen.

## 7 Satellitenparameter

Die Bestimmung präziser Satellitenbahnen wurde bereits frühzeitig intensiv verfolgt. Im Rahmen des IGS-Netzes werden international an verschiedenen Stellen permanente Auswertungen vorgenommen, aus denen u.a. präzise Bahndaten gewonnen werden. Diese Berechnungen liefern konsistente Lösungen bis in den Zentimeterbereich.

Da die Bahnbestimmung meistens mit Programmsystemen erfolgt, bei denen „doppelte Differenzen“ verwendet werden, wurde eine Bestimmung präziser Satellitenuhren lange Zeit nicht

durchgeführt. Unter Verwendung undifferenzierter Code-Beobachtungen werden jedoch seit einigen Jahren auch präzise Uhrparameter berechnet. Solche Informationen stehen auf einer operationellen Basis mit kurzen Verzögerungen für „Postprocessing“-Anwendungen zur Verfügung.

Die Laufzeitverzögerungen in der Satellitenhardware sind in einem absoluten Sinn nicht bekannt. Für die Verzögerung des L1-C/A-Codes wird für jeden Satelliten von dem Start ein sog. „Group Delay“-Parameter (TGD) bestimmt. Dieser wird in der Satellitenmessage an die Nutzer übermittelt und ist für den Einsatz von Einfrequenzempfängern gedacht. Entsprechende Parameter für die L1-L2 Code-Differenzen werden nicht ermittelt, da ein solcher Effekt durch die Auswerteprozeduren des Kontrollsegments in die Satellitenuhr hineingerechnet wird. Im IGS werden jedoch Parameter zur Beschreibung der relativen Verzögerungen zwischen dem C/A- und P-Code auf L1 bestimmt. Dieses ist mit Hilfe von Empfängern, die beide Signale gleichzeitig messen können, möglich.

Die fehlende Kenntnis der Gruppenverzögerungen zwischen den Codes auf L1 und L2 führt dazu, daß eine absolute Ionosphäre nicht direkt aus den Meßgrößen abgeleitet werden kann. Vielmehr ist hierzu ein zusätzliches Ionosphärenmodell erforderlich.

Es ist erstaunlich, daß bisher praktisch nichts über den Effekt der Phasenzentrumsvariationen an der Satellitenantenne bekannt ist. Korrekturmodelle, die z.B. eine nadirdistanzabhängiger Korrektur der Phasemessungen erlauben, sind somit nicht verfügbar. Die Satellitenantenne besteht aus einem Feld von insgesamt 12 Antennenelementen, die in zwei konzentrischen Ringen angeordnet sind. Hierdurch werden die Anforderungen an eine breitbandige und gerichtete Abstrahlcharakteristik erreicht. Aus den Untersuchungen von Empfangsantennen ist bekannt, daß die PCV-Charakteristik erhebliche Variationen bis zu einigen cm aufweisen kann. Es ist deshalb zu erwarten, daß ähnliche Effekte auch am Satelliten auftreten.

## **8 Ionosphäre**

Die Ionosphäre spielt eine wesentliche Rolle in vielen Anwendungen. Bei Verwendung von Zweifrequenzbeobachtungen läßt sich der Laufzeiteinfluß 1. Ordnung ermitteln und korrigieren. Es ergibt sich jedoch, insbesondere bei kurzzeitigen Beobachtungen und Echtzeitanwendungen, das Problem, daß vor der Zweifrequenzkorrektur die Trägerphasenmehrdeutigkeiten gelöst werden müssen. Die Mehrdeutigkeitslösung ist nicht unabhängig vom ionosphärischen Einfluß, der vielmehr mit hinreichender Genauigkeit bekannt sein oder modelliert werden muß, um zu ganzzahligen Mehrdeutigkeitslösungen zu kommen. Über größere Entfernungen gestaltet sich diese Lösung teilweise sehr schwierig, so daß für großräumige und globale Netze oft auf ganzzahlige Mehrdeutigkeitslösungen verzichtet wird. Man arbeitet dann mit der sog. ionosphärenfreien Linearkombination  $L_0$ . Hohe Genauigkeiten werden damit jedoch erst nach ausreichend langer Beobachtungszeit erreicht.

Aufgrund der Mehrdeutigkeitsproblematik stellt die Ionosphäre für viele Anwendungen den wichtigsten begrenzenden Faktor dar. Dieses gilt insbesondere in der gegenwärtigen Phase hoher Sonnen- und Ionosphärenaktivität.

Die für das GPS-System angekündigte dritte Trägerfrequenz wird hier eine deutliche Verbesserung bringen. Sowohl die schnelle Mehrdeutigkeitsbestimmung über größere Entfernungen als auch die Berücksichtigung von Termen höherer Ordnung werden dadurch möglich wer-

den. Ein vollständiges absolutes Zustandsmodell wird dadurch ebenfalls unterstützt und erreichbar.

## 9 Troposphäre

Die troposphärische Refraktion bildet einen weiteren limitierenden Faktor für präzise Anwendungen, insbesondere für die Höhenbestimmung. Für präzise statische Anwendungen werden Troposphärenparameter praktisch seit Beginn der Entwicklungen modelliert. Dadurch wird auch für die Höhenkomponente eine hohe Genauigkeit erreicht. Für kinematische Anwendungen hingegen unterbleibt eine solche Modellierung in der Regel, da das System eine zu starke Aufweichung erfährt und die Genauigkeit der Höhenbestimmung entsprechend reduziert wird.

Eine Verringerung der Elevationsmaske führt zur einer Verbesserung der Geometrie, jedoch auch zu verstärkten troposphärischen Fehlereinflüssen. Hier läßt sich durch verbesserte Troposphärenbehandlung in Form funktionaler und stochastischer Modelle und ggf. durch Verwendung meteorologischer Zusatzinformationen eine Verbesserung erreichen.

In Referenzstationsnetzen spielt die Troposphäre eine wichtige Rolle. Von den entfernungsabhängig wirkenden Fehlern stellt sie diejenige Komponente dar, die eine stark veränderliche räumliche und zeitliche Korrelationslänge aufweist und nicht direkt, sondern nur über längere Zeiträume aus den Meßgrößen bestimmbar ist.

Unabhängig von den Verfahren im Beobachtungsraum und Zustandsraum muß die Troposphäre mit einer ausreichenden räumlichen Dichte erfaßt werden. Wird im Zustandsraum gearbeitet, so ergeben sich jedoch Vorteile, da die Information nicht auf einzelne Satelliten bezogen ist und somit auf andere Satelliten übertragen werden kann, bei denen eine Lösung im Beobachtungsraum nicht möglich ist.

Neben der Notwendigkeit den troposphärischen Fehleranteil zu ermitteln, um präzise Positionsbestimmungen durchführen zu können, liefern die entsprechenden Parameter wertvolle Hinweise über den meteorologischen Zustand der unteren Atmosphäre. Die Ergebnisse sind deshalb z.B. für Wetterdienste von Interesse, insbesondere dann, wenn sie in Echtzeit vorliegen.

## 10 Mehrwegeausbreitungen

Der Einfluß von Mehrwegeausbreitungen stellt für viele Anwendungen den größten genauigkeitsbegrenzenden Faktor dar. Statt des Begriffes Mehrwegeausbreitung wird im folgenden auch der englische Ausdruck „Multipath“ oder die Abkürzung MP sowohl für den Effekt selbst als auch für den daraus resultierenden Fehler verwendet.

Der durch Mehrwegeausbreitung hervorgerufene Fehler ist abhängig von der Umgebung der Empfangsantenne, d.h. von der Geometrie und Art reflektierender Gegenstände, der Antenne selbst sowie der Signalverarbeitung in der Antenne und im Empfänger. Neben Reflexionen können auch Beugungserscheinungen zu den Mehrwegeausbreitungen gezählt werden. Auch Reflexionen des abgestrahlten Signals am Satelliten sind hierzu zu zählen.

Für Trägerphasen hat der MP-Fehler einen stark lokalen Charakter. Dieses liegt darin begründet, daß er aus der Überlagerung des direkten mit den reflektierten Signalen resultiert. Aufgrund der Wellenlänge von ca. 20 cm ändern sich die relativen Phasen dieser Signale bei ge-



ringen Bewegungen der Empfangsantenne entsprechend stark, so daß auch der Fehlereinfluß stark variiert.

Die zeitlichen Variationen des MP sind dagegen bei statischen Messungen teilweise gering, da die Geometrie der Umwegsignale sich nur mit der Bewegung der Satelliten verändert. Die Winkelgeschwindigkeit der Satelliten ist für eine Empfangsantenne auf der Erdoberfläche sehr gering, so daß sich die Geometrie des Umwegsignals nur langsam ändert. Ändert sich der Umweg um eine Wellenlänge, so erhält man einen vollständigen Zyklus des Fehlereinflusses, solange sich die Reflexionseigenschaften nicht verändern. Typische Periodenlängen liegen im Bereich von wenigen Minuten. Die Periodenlänge nimmt proportional mit der Entfernung der Reflektoren ab.

Verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems der Mehrwegeausbreitungen sind vorhanden und werden von verschiedenen Stellen untersucht. Hierzu gehören

- Signalverarbeitungstechniken,
- die Nutzung der räumlichen Variationen,
- die Nutzung der zeitlichen Variationen,
- die Nutzung und Kombination von Meßgrößen.

Während verschiedene Signalverarbeitungstechniken eine Reduktion des MP bei Code-Messungen ermöglichen, gibt es bisher für Trägerphasen keine Lösung des Problems.

Die räumlichen Variationen können in kleinen Bereichen entweder durch mehrere Antennen oder Antennenfelder („Antennen-Arrays“) oder durch Bewegung einer Antenne erfaßt werden. Unter der Annahme, daß alle anderen Fehlerquellen an diesen Orten gleich wirken und die relativen Meßpositionen bekannt sind, kann der differentielle Einfluß der Mehrwegeausbreitung gemessen werden. Liegen Messungen an genügender Anzahl von Positionen vor, so kann theoretisch, unter gewissen Modellannahmen, der absolute Einfluß des MP bestimmt werden (Ray 2000) .

Wird gleichzeitig an mehreren eng benachbarten Antennenpositionen gemessen, so kann nicht davon ausgegangen werden, daß der MP sich wie bei einzelnen Antennen verhält, jedoch ist für eine entsprechende Meßeinrichtung eine Kalibrierung denkbar. Wird an zeitlich aufeinanderfolgenden Punkten mit bewegter Antenne gemessen, ist eine präzise Messung der relativen Positionen mit anderen Mitteln erforderlich. Die Bewegung muß schnell ausgeführt werden können, um den Einfluß der zeitlichen Variation des MP zu minimieren. In allen Fällen sind solche Meßanordnungen mit stark erhöhtem Aufwand und Kosten in Form spezieller Hardware verbunden, so daß ein operationeller praktischer Einsatz z. Z. nur in Sonderfällen, wie z.B. für die Kalibrierung von permanenten Referenzstationen, sinnvoll erscheint. Jedoch können wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten des MP gewonnen werden.

Die Bewegung einer Empfangsantenne im Bereich einer Wellenlänge des Signals führt wie bereits erwähnt zu einer vollständigen Schwingung des MP-Fehlers. Diese Tatsache kann benutzt werden, um z.B. die Initialisierung einer RTK-Lösung in Umgebungen mit starkem MP zu beschleunigen und zu stabilisieren. Eine statische Aufstellung kann dort aufgrund des systematischen Fehlereinflusses zu längeren Initialisierungszeiten und fehlerhaften Mehrdeutigkeitsfestsetzungen führen. Durch die Bewegung der Antenne erhält der Mehrwegeeinfluß einen eher zufälligen Charakter. Der Nachteil der geringeren Redundanz bei kinematischen Messungen wiegt hier oft deutlich geringer.

Die zeitlichen Variationen des MP sind eher gering. Eine vollständige Periode ist frühestens nach wenigen Minuten für einzelne Satelliten verstrichen. Für verschiedene Satelliten ist mit unterschiedlichen Perioden zu rechnen, so daß ein erfolgreiche Reduzierung des Fehleranteils durch Mittelung erst nach längeren Beobachtungszeiten erreicht wird.

Die langsame Variation, d.h. die hohe zeitliche Korrelation der Mehrwegeeffekte, kann hingegen genutzt werden, um kleine Bewegungen über kurze Zeiträume von Sekunden auch mit hohen Taktraten hochgenau zu bestimmen. Langsame Bewegungen lassen sich hingegen nicht von Mehrwegeeffekten befreien, so daß sie schlechter detektierbar sind.

Mehrwegeeffekte sind wiederholbar, unter der Voraussetzung, daß sich die Umgebung einer Empfangsantenne nicht verändert. D.h. zwei im gleichen Azimut und unter gleicher Elevation beobachteten Satelliten erfahren den gleichen Fehlereinfluß. Beim GPS wiederholt sich die Satellitenkonstellation nach Ablauf eines siderischen Tages. Das bedeutet, daß sich auch die Fehler durch Mehrwegeausbreitungen an aufeinanderfolgenden Tagen wiederholen. Diese Tatsache kann man sich zunutze machen, um z.B. kleine Positionsänderungen zwischen zwei Meßtagen hochgenau zu ermitteln. Verschiedene Untersuchungen zeigen, daß damit Genauigkeiten im Submillimeter-Bereich möglich sind.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer kinematischen Auswertung einer an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführten statischen Messung. Dargestellt ist die Höhenkomponente der RTK-Lösung, die mit einer geringen Zeitkonstanten gefiltert ist. Die mit dreieckigen Symbolen gekennzeichneten Graphen zeigen die Lösungen für die beiden Tage. Diese zeigen

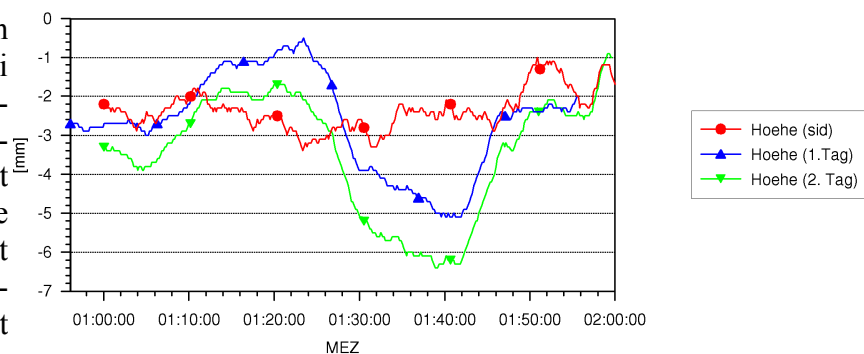


Abb. 2: Multipath-Reduzierung mit siderischen Differenzen im Beobachtungsraum

Variationen in einer Größenordnung von ca. 5 mm, die dem Einfluß von Mehrwegeausbreitungen zuzuordnen sind. Die mit dreieckigen Symbolen gekennzeichnete Kurve zeigt die aus siderischen Phasen-Differenzen abgeleitete Höhenänderung zwischen den beiden Meßtagen. Die Änderung der Höhe des Punktes zwischen den Meßtagen von etwa 2 mm kann dadurch mit einer Genauigkeit von deutlich besser als  $\pm 1$  mm abgeleitet werden.

Die Verwendung siderischer Tagesdifferenzen mit der damit verbundenen Elimination von Mehrwegefehlern wurde auch benutzt, um das Verfahren zur absoluten Feldkalibrierung von GPS-Antennen zu entwickeln (Wübbena u.a. 1996b).

Eine Kalibrierung statischer Antennenaufstellungen scheint unter diesen Annahmen möglich. Ein Problem ergibt sich jedoch durch die dynamische Veränderung der Umgebung einer Empfangsantenne durch unterschiedliche meteorologische Bedingungen und den daraus resultierenden Veränderungen der Reflexionseigenschaften.

Die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung des MP wird dadurch erschwert, daß eine Trennung des Fehleranteils von anderen Größen nur mit aufwendigen Meßanordnungen mög-

lich ist. Die vielfach verwendete einfache Analyse von statischen doppelten Differenzen erlaubt eine Zuordnung der beobachteten Fehler zu einzelnen Stationen und Satelliten nur unter gewissen Annahmen. Oft wird angenommen, daß z.B. hochstehende Satelliten frei von Fehlern durch MP sind (Wanninger 2000). Diese Annahme trifft jedoch auf Referenzstationen, in deren Nachbarschaft z.B. Schrägdächer anzutreffen sind, häufig nicht zu. Aufgrund der Reflexionsgeometrie sind hochstehende Satelliten in diesen Fällen oft stärker betroffen als tiefstehende. Da bei doppelten Differenzen immer zwei Stationen beteiligt sind, ist eine eindeutige Zuordnung zu einer Station ebenfalls nicht möglich. Hier wird vielfach die Annahme getroffen, daß bestimmte Stationen oder bestimmte Stationsmittel frei von MP sind. Die Übertragung der Information auf andere Stationspaare erscheint hier fraglich.

Der durch MP hervorgerufene Fehler ist abhängig vom verwendeten Signal. Diese Tatsache kann benutzt werden, um den Fehleranteil direkt aus den Meßgrößen abzuleiten (Ray 2000). Bei der Kombination von Code- und Trägerphasenmessungen ergibt sich jedoch das Problem, daß insbesondere die Codemessungen durch nicht bekannte Algorithmen in den sog. „Tracking-Loops“ der Empfänger stark modifiziert werden. Der Fehlereinfluß durch Mehrwegeausbreitung ist somit nicht mehr originär enthalten. Die Kombination der L1/L2 Trägerphasenmessungen bietet auch nur eingeschränkte Möglichkeiten des Rückschlusses auf Mehrwegeeffekte, da eine Trennung von ionosphärischen Einflüssen schwierig ist.

Als weitere Meßinformation eines GNSS Empfängers kann das Signal-Rausch-Verhältnis (C/N) genutzt werden. Theoretische und praktische Betrachtungen zeigen, daß die C/N-Werte sich unter Mehrwegeeinfluß verändern. Im Vergleich zu Messungen ohne Mehrwegeeinfluß ergibt sich folgendes Verhalten. Bei maximalem Fehlereinfluß durch Mehrwegeausbreitung verändert sich der C/N-Wert gegenüber Messungen ohne Mehrwegeeinfluß nicht. Beim minimalen Fehlereinfluß verändert sich der C/N-Wert maximal. Letztere Situation tritt z.B. ein, wenn das Umwegsignal die gleiche Phasenlage wie das direkte Signal hat. Die Signale addieren sich in diesem Fall, so daß sich der gemessene C/N-Wert entsprechend vergrößert. Ein Fehler in der Phasenmessung entsteht jedoch nicht. Sind die beiden Phasen um  $180^\circ$  verschoben, so verringert sich der C/N-Wert, jedoch bleibt auch hier die Phasenmessung fehlerfrei. Ansätze, die eine Gewichtung der Beobachtungen über C/N-Werte vornehmen mit dem Ziel, den Einfluß von Messungen mit Mehrwegeeinfluß zu minimieren, scheinen aufgrund obiger Ausführungen zweifelhaft. Ein solcher Ansatz führt theoretisch nur bei längeren statischen Messungen zum Erfolg, wenn z.B. aufgrund der durch Mehrwegeausbreitung hervorgerufenen zeitlichen Variationen der C/N-Werte eine einheitliche Gewichtung aller Beobachtungen eines Satelliten vorgenommen wird. Bei kinematischen Anwendungen und statischen Kurzzeit-Messungen versagen solche Ansätze.

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist eine Meßgröße, die nicht standardisiert ist. Je nach Hersteller bzw. Empfängermodell ist hier mit deutlichen Unterschieden bei der Messung der C/N-Werte zu rechnen. Hierdurch gestaltet sich die Verwendung dieser Meßgrößen zusätzlich schwierig.

## **11 Antennen**

Das Problem der Phasenzentrumsvariationen für Empfangsantennen ist grundsätzlich für hohe Genauigkeitsansprüche ( $PCV < 1 \text{ mm}$ ) gelöst (Wübbenau.a. 2000b) und wird in diesem Band von Schmitz (2001) ausführlich diskutiert.

## 12 Empfängerparameter

Hierzu gehören im wesentlichen die Laufzeitverzögerungen in der Hardware und die Uhr des Empfängers. Sog. „Interchannel Biases“, wie sie früher bei einigen Gerätetypen vorlagen, treten heute aufgrund der weitgehend digitalen Signalverarbeitung praktisch nicht mehr auf. Dort wo noch unterschiedliche Hardware-Bausteine an der Signalverarbeitung beteiligt sind, führen die Geräte selbständig eine Kalibrierung durch, so daß eine Weiterverarbeitung ohne Berücksichtigung entsprechender Terme auskommt.

Bei der Betrachtung verschiedener Signale ist jedoch allgemein ein entsprechender Bias zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere bei der Verarbeitung der Signale auf verschiedenen Frequenzen. Aus diesem Grunde ist z.B. eine absolute Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung mit Code-Messungen nur eingeschränkt möglich.

Die Oszillatoren zur Generierung der Referenzsignale und Empfängerzeit besitzen allgemein eine gute Kurzzeitstabilität, aber keine Langzeitstabilität. Ein entsprechendes Uhrmodell führt somit nur zu einem geringen Informationsgewinn. Praktisch führt das dazu, daß für präzise Anwendungen pro Meßepoche eine neue Uhrbekannte zu bestimmen ist. Eine andere Situation ergibt sich, wenn der Empfängeroszillator über eine externe Atomuhrfrequenz gestützt wird.

## 13 Zusammenfassung

Auch nach 20 Jahren GPS und mehr als 15 Jahren intensiver geodätischer Anwendung existieren noch eine Reihe offener Fragen und Probleme, deren Lösung zu einer weiteren Optimierung des Einsatzes von GNSS-Verfahren für die präzise Positionsbestimmung erforderlich sind. Für Echtzeitanwendungen zeichnet sich ein Übergang von Verfahren, die im Beobachtungsraum arbeiten, zu Verfahren, die im Zustandsraum arbeiten, ab.

## 14 Literaturverzeichnis

- Muellerschoen, Ronald J., Bar-Sever, Yoaz E., Bertiger, William I., Stowers, David A. (2001). NASA's Global DGPS for High-Precision Users, GPS World, January 2001.
- Ray, J.K. (2000). Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System. UCGE Reports Number 20136, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary. Calgary, Alberta, Canada.
- Rothacher, M. (2000a). Phasenzentrumsvariationen: Regionale und globale Aspekte 2. Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Rothacher, M. (2000b). Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. IGS Analysis Workshop 2000, Proceedings Vorabdruck, IGS Electronic Mail, 20. Nov., Message Number 3107. Auch eingereicht bei GPS Solutions.
- Schmitz, M. (2001). Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 239. Festschrift Prof. Seeber zum 60. Geburtstag. Hannover.
- Wanninger, L., May, M. (2000). Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-00, Salt Lake City, Utah.

- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996a). Reducing Distance Dependant Errors for Realtime Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1205-1214.
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996b). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1205-1214.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (1997a). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Navigation, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 44, No. 2, 247-256.
- Wübbena, G., A. Bagge (1997): Neuere Entwicklungen zu GNSS-RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit: Referenzstationsnetze und Multi-stations-RTK-Lösungen. 46. DVW-Seminar „GPS-Praxis und -Trends '97“, 29.9.-1.10.97, Frankfurt am Main.
- Wübbena, G. (1998): GNSS-SMART: Echtzeit-GPS genauer als 1 Zentimeter. Vorträge des 1. SAPOS-Symposiums am 11. und 12. Mai 1998, Hamburg.
- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000a). Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen, Ergebnisse. 2. Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000b). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-00, Salt Lake City, Utah.