

Identifikation von Mehrwegeeeinflüssen in GPS-Referenzstationsbeobachtungen

Lambert Wanninger und
Steffen Wildt, Dresden

1. Einleitung

Während cm-genaue relative Positionierung mit GPS noch dabei ist, sich als ein Standardmeßverfahren in der Vermessungspraxis durchzusetzen, steht sie schon vor bedeutenden Veränderungen. Augenblicklich muß ein Nutzer mindestens zwei GPS-Empfänger simultan betreiben, um cm-genaue Relativkoordinaten zu erhalten. In Zukunft kann er mit einem Empfänger auskommen, wenn er sich relativ zu einer oder mehreren GPS-Referenzstationen positioniert. Dutzende solcher Stationen sind durch die Landesvermessungsämter in Deutschland schon in Betrieb genommen worden (HANKEMEIER, 1995). In wenigen Jahren werden sie flächendeckend das Land überziehen.

Den wirtschaftlichen Einsparungen auf der Nutzerseite, die sich bei der Verwendung von Referenzstationsdaten aus dem geringeren eigenen Aufwand für Personal und GPS-Empfänger ergeben, werden Nutzungsgebühren an die Betreiber der Referenzstationen gegenüberstehen. Die Erhebung von Gebühren verpflichtet diese ganz besonders, GPS-Meßdaten höchster Qualität zur Verfügung zu stellen. Qualitätsaspekte müssen sowohl beim Aufbau einer Permanentstation (Standortwahl, Empfängerwahl) berücksichtigt werden, wie auch dann im laufenden Betrieb durch die kontinuierliche und lückenlose Kontrolle der Beobachtungsdaten.

Der wichtigste stationsabhängige Fehlereinfluß ist die Mehrwegeaus-

breitung. Ihre Auswirkungen werden durch die Empfangsantennenumgebung, die verwendete Empfängermeßtechnologie und die eingesetzte Antenne bestimmt. Während Referenzstationsbeobachtungen besonders geringe Mehrwegeeeinflüsse aufweisen sollten, werden diese Stationen in Deutschland fast ausschließlich auf Hausdächern und damit in hochreflektiver Umgebung installiert. Die Überprüfung der Meßdaten solcher Stationen auf Mehrwegefehler hin ist also zwingend notwendig.

Bei der Analyse von Referenzstationsdaten stießen wir bei einzelnen der schon existierenden Stationen auf überraschend starke Einflüsse von Mehrwegeausbreitungen, die die Qualität der Daten deutlich verschlechtern (WANNINGER, 1996). Da die anfängliche Datenanalyse sehr zeitintensiv war, wurde ein Algorithmus entwickelt und in Software umgesetzt, der eine automatisierte Detektierung und Analyse von Mehrwegeeeinflüssen ermöglicht. Die wichtigsten Bedingungen an den Algorithmus waren,

- daß er den Einfluß der Mehrwegeausbreitung auf die Phasemessungen betrachtet, da diese die entscheidenden Meßgrößen für cm-Genauigkeit darstellen,
- daß er mit den Meßdaten aus dem laufenden Betrieb der Permanentstationsnetze auskommt, also keine zusätzlichen Messungen benötigt werden und
- daß er eine eindeutige Erkennung der gestörten Stationen und Si-

gnale ermöglicht, so daß die Signalreflektoren identifiziert werden können.

Im folgenden werden nach einer kurzen Einführung in die wichtigsten Eigenschaften der Mehrwegeausbreitung der entwickelte Algorithmus vorgestellt und Ergebnisse von Datenanalysen präsentiert.

2. Auswirkungen der Mehrwegeausbreitung

Mehrwegefehler entstehen dadurch, daß nicht nur das direkte Satellitensignal die Antenne erreicht, sondern auch Umwegsignale, die in der Antennenumgebung einmal oder mehrmals reflektiert wurden und das direkte Signal überlagern. Als Folge ergeben sich Laufzeitmeßfehler bei der Pseudostreckenmessung bis in eine Größenordnung von mehreren Metern, Phasenmeßfehler von bis zu mehreren Zentimetern und eine Veränderung der Signalamplitude. Aufgrund der Satellitenbewegung verändert sich die Geometrie Satellit-Reflektor-Empfangsantenne ständig und alle drei genannten Fehler treten als periodische Störeinflüsse auf. Die dabei zu beobachtenden Perioden sind insbesondere eine Funktion des Abstandes Reflektor-Empfangsantenne und können zwischen Stunden (Abstand von weniger als einem Meter) und wenigen Minuten (Abstand von mehreren Metern) schwanken. Da Mehrwegefehler stationsabhängig sind, fallen sie bei Relativmessungen nicht heraus, sondern verstärken sich im ungün-

stigsten Falle noch. Aufgrund der sich alle 24 Stunden minus 4 Minuten wiederholenden Satellitengeometrie wiederholen sich auch die Mehrwegefehler entsprechend (BISHOP u.a., 1985; GEORGIADOU und KLEUSBERG, 1988; THIEL 1995).

Für einige Linearkombinationen der Originalmeßgrößen ergeben sich zum Teil deutlich größere Mehrwegeinflüsse: so beträgt der Fehler bei der ionosphären-freien Linearkombination der Phasenmessungen bis zum Vierfachen der Fehler bei den Originalmessungen (Abb. 1).

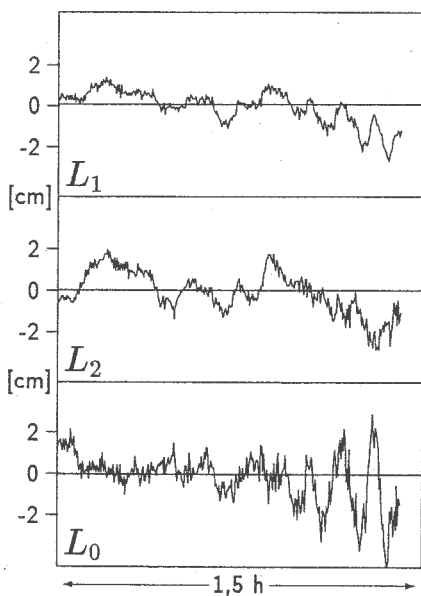


Abb. 1: Doppel-Differenz-Residuen einer 34 km langen Basislinie zwischen Referenzstationen, in L_1 , L_2 und der ionosphären-freien Linearkombination L_0 , Beispiel für starke Mehrwegeinflüsse mit Perioden zwischen 6 und 9 Minuten, in L_1 und L_2 auch ionosphärische Einflüsse erkennbar.

3. Identifikation von Mehrwegeausbreitung

Für cm-genaue Positionierung mit GPS sind wir vornehmlich an den Fehlereinflüssen auf die Phasenmessungen interessiert. Die Erkennungsmethoden von Mehrwegeinflüssen nutzen jedoch vielfach den Mehrwegeeinfluß auf den Code (EVANS, 1986) oder die Signalstärke (AXELRAD u. a., 1994), so daß nur indirekt auf die Trägerphasenbeeinflussung geschlossen werden kann.

Beide indirekte Verfahren haben den Vorteil, daß mit den Daten einer einzelnen Station und eines einzelnen Satelliten gearbeitet werden kann, so daß eine eindeutige Identifikation der betroffenen Signale direkt gegeben ist. Beide Verfahren haben aber Nachteile, die ihre Verwendungsmöglichkeiten deutlich einschränken. Die Erkennung von Code-Mehrwegeinflüssen aus dem Vergleich von Code- und Phasenmessungen scheitert vielfach an der unzureichenden Trennbarkeit von Codemeßrauschen und Mehrwegefehlern. Die Interpretation der Signalstärke setzt entsprechende Meßwerte voraus, welche aber in aller Regel spätestens nach der Wandlung in das empfängerunabhängige RINEX-Format verlorengegangen sind.

Für die Identifikation der Mehrwegefehler in Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen verwenden GEORGIADOU und KLEUSBERG (1988) die ionosphärische Linearkombination. Da bei deren Bildung Uhrenfehler und weitere Fehlereinflüsse eliminiert werden, kann prinzipiell Mehrwegeausbreitung in den Daten einer einzelnen Station identifiziert werden. Nachteil ist aber, daß beim Auftreten ionosphärischer Störungen diese von den Mehrwegeeffekten nur schwer getrennt werden können. Aufgrund der Nachteile der genannten Verfahren haben wir einen Algorithmus entwickelt, der die Mehrwegefehler in den Doppel-Differenz-Residuen der Phasenbeobachtungen erkennt, also aus den simultanen Messungen mehrerer Stationen. Die Doppel-Differenz-Bildung der Beobachtungen ist notwendig, um andere Fehlerquellen (insbesondere Uhr-, Orbit- und Refraktionsfehler) zu eliminieren oder zu verringern. Man handelt sich aber damit das Problem der eindeutigen Identifizierung des gestörten Signals ein, weil die Doppelten Differenzen aus den Messungen zweier Stationen und zweier Satelliten gebildet werden. Der Mehrwegeerkennungsalgorithmus muß also nicht nur den Fehlereinfluß erkennen, sondern

auch das einzelne gestörte Signal identifizieren können.

Der von uns angewandte Algorithmus nutzt die ionosphären-freie Linearkombination der Phasendaten, die bei Entfernungen über wenige km Länge zur Koordinatenberechnung eingesetzt wird und besonders stark durch Mehrwegefehler beeinflusst wird. Wir gehen davon aus, daß es oberhalb des Antennenhorizonts keine Reflektoren gibt und somit starke Mehrwegefehler nur bei niedrig stehenden Satelliten auftreten. Dies ermöglicht uns, das Signal des jeweilig höchststehenden Satelliten als weitgehend ungestört zu betrachten und ihn als Basissatelliten bei der Doppel-Differenz-Bildung zu verwenden. Weiterhin setzen wir voraus, das nur eine Minderheit der gleichzeitig zu testenden Referenzstationen durch starke Mehrwegefehler beeinflusst werden, weil sonst eine sichere Identifikation der gestörten Signale kaum möglich ist. Mindestens drei Stationen müssen gleichzeitig getestet werden, um eine Stationsidentifikation zu gewährleisten. Ferner setzen wir voraus, daß die dominanten Perioden der Mehrwegefehler weniger als 30 Minuten betragen, so daß die Meßdaten in Blöcken von 15 Minuten nach folgender Vorgehensweise bearbeitet werden können:

1. Berechnung von undifferenzierten Residuen der ionosphären-freien Linearkombination (Reduktion der Phasenmessungen um die geometrische Entfernung Empfangsantenne-Satellit, den Korrekturwert aus einem Troposphärenmodell und den beiden näherungsweise bestimmten Größen Empfängeruhrfehler und Phasenmehrdeutigkeit).
2. Bilden von 15-Minuten-Blöcken von Beobachtungsdaten von niedrig stehenden Satelliten aller Stationen, die in den Schritten 3–5 einzeln getestet werden.
3. Berechnung von Doppelten Differenzen zwischen den zu testenden Beobachtungen, den Beobachtungen des am höchsten ste-

henden Satelliten und den entsprechenden Beobachtungen anderer Stationen. Es ergeben sich $(n-1)$ Vektoren von Doppel-Differenz-Beobachtungen, wenn n die Anzahl der Stationen ist.

4. Nach der Reduktion um den Mittelwert, der insbesondere den Mehrdeutigkeitsterm, aber auch langperiodische Fehlereinflüsse beinhaltet, wird für jeden Vektor eine Standardabweichung berechnet. Nur wenn ein Großteil der Standardabweichungen einen festgelegten Grenzwert (von z. B. 15 mm) überschreitet, besteht der Verdacht auf Mehrwegeeinfluß.
5. Korrelation der Vektoren in allen Kombinationen. Nur wenn ein Großteil der Korrelationskoeffizienten einen festgelegten Grenzwert (von z. B. 0,8) überschreitet, liegt ein Fehlereinfluß vor, der auf ein einzelnes Signal zurückgeht. Der Verdacht auf Mehrwegeausbreitung erhärtet sich.
6. Verifizierung der Ergebnisse durch Vergleich mehrerer Meßtage.

An einem Beispiel soll der Algorithmus verdeutlicht werden. Die Pha-

senbeobachtungen eines tiefstehenden Satelliten auf der Station A sollen auf Mehrwegeeinflüsse hin getestet werden. Dafür werden Doppel-Differenz-Residuen der ionosphären-freien Linearkombination L_0 der Beobachtungen dieses Satelliten auf der Station A mit dem höchststehenden Satelliten und weiteren Stationen (B-H) gebildet (Abb. 2). Diese werden in 15 Minuten-Blöcken einzeln getestet. Da die Standardabweichungen eine Testgrenze von 15 mm überschreiten, liegt der Verdacht auf starken Mehrwegeeinfluß vor und die Doppel-Differenz-Vektoren werden miteinander korreliert (Tab. 1). Von den 21 berechneten Korrelationskoeffizienten liegen 16 (76 %) über 0,80, so daß davon ausgegangen werden kann, daß der Störeinfluß einzig und allein auf das getestete Signal zurückzuführen ist und damit Mehrwegefehler die wahrscheinliche Ursache sind. Die Verifikation erfolgt mit den Beobachtungen weiterer Meßtage.

In diesem Beispiel weisen die Doppelten Differenzen des Stationspaares A-G die geringste Standardabweichung und auch die geringsten Korrelationen mit den anderen Vektoren auf. Die nähere Unters-

suchung ergab, daß das zu testende Signal auch auf der Station G durch Mehrwegeeinflüsse betroffen ist und beide Effekte sich teil-

weise aufheben. Dies zeigt, daß der Algorithmus beim Vorhandensein mehrerer gestörter Stationen nicht mehr einwandfrei arbeiten kann. Deswegen wenden wir ihn in zwei Stufen an. In der ersten Stufe werden alle Stationen eines Netzes gemeinsam getestet, um wenig gestörte und stark gestörte Stationen voneinander zu unterscheiden. In der zweiten Stufe werden dann alle wenig gestörten Stationen gemeinsam und die stark gestörten Stationen einzeln mit einigen der wenig gestörten zusammen bearbeitet.

4. Anwendung des Algorithmus

Die Mehrwegeerkennung wurde für 25 Referenzstationen in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt durchgeführt. Einige Stationen wurden wiederholt getestet, da nach ihrer räumlichen Verlegung mit anderen Ergebnissen zu rechnen war. Alle Empfangsantennen sind auf Gebäuden montiert. Als GPS-Empfangssysteme werden ausschließlich Trimble 4000 SSE/SSI-Empfänger mit geodätischen Standardantennen und Grundplatten genutzt. Potentielle Signalreflektoren oberhalb des Antennenhorizonts kommen so gut wie nicht vor. Reflexionen von unterhalb des Antennenhorizonts können die Antenne wohl nur aufgrund von Beugungserscheinungen an der Grundplattenkante erreichen.

Für alle Stationen erstellten wir Azimut-Elevations-Darstellungen, in denen diejenigen Sektoren der

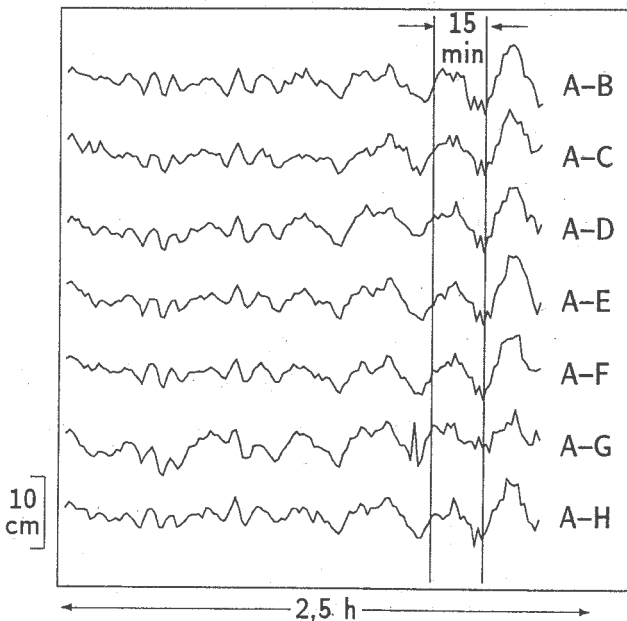


Abb. 2: Doppel-Differenz-Residuen der ionosphären-freien Linearkombination, gebildet aus den Phasenbeobachtungen zweier Satellitensignale der Station A mit den entsprechenden Beobachtungen sieben weiterer Stationen (B-H).

Stationen	Stdab. [mm]	Korrelationskoeffizienten					
		A-C	A-D	A-E	A-F	A-G	A-H
A-B	22	0,87	0,90	0,81	0,86	0,77	0,79
A-C	17	-	0,95	0,93	0,94	0,82	0,91
A-D	18	-	-	0,93	0,97	0,80	0,94
A-E	17	-	-	-	0,95	0,71	0,91
A-F	17	-	-	-	-	0,70	0,92
A-G	12	-	-	-	-	-	0,71
A-H	16	-	-	-	-	-	-

Tab. 1: Standardabweichungen und Korrelationskoeffizienten der in Abb. 2 gekennzeichneten 15-Minuten-Abschnitte von Doppel-Differenz-Beobachtungen.

Einfallswinkel gekennzeichnet sind, die durch Mehrweegeinfluß gestörte Signale aufweisen. Die Darstellungen weisen in Nordrichtung (also am linken und rechten Rand) niemals Störungen auf, da aus diesem Einfallswinkel in Mitteleuropa keine Signale die Antenne erreichen, Störungen also nicht identifiziert werden können und müssen.

Die meisten Beobachtungsdaten der getesteten Referenzstationen können als mehrweegefrei bzw. nur gering beeinflusst eingestuft werden. Wir identifizierten aber fünf Stationen, deren Daten als stark gestört gelten müssen. Die Azimut-Elevations-Darstellung von vier dieser Stationen sind in Abbildung 3 wiedergegeben. Sie sollen kurz interpretiert werden.

Die Beispiele 1 bis 3 waren für uns überraschend. Es handelt sich in allen drei Fällen um bituminierte Dachoberflächen (Dachpappe). Daten anderer Referenzstationen mit entsprechendem Oberflächenmaterial sind nicht gestört. Im Beispiel 1 liegen leichte Dachneigungen in zwei Richtungen vor. Die stärksten Störungen sind im Elevationsbereich bis 25 Grad zu finden. Die Ursache für die Störungsfreiheit im Azimutbereich von 210 bis 240 Grad konnte noch nicht endgültig geklärt werden. Im zweiten Beispiel ist das Dach einseitig nach Süden leicht geneigt, wobei die Antenne an der Nordkante des Gebäudes auf einem Pfeiler montiert ist. Es ergibt sich eine V-Form des Störbereichs mit im niedrigen Elevationsbereich (unter 30 Grad) fast völlig ungestörten Bereichen im Osten und Westen und maximalen Störungen in Südrichtung. Im dritten Beispiel ist das Dach nicht geneigt, aber von einer Mauer umgrenzt. Wahrscheinlich führt diese zu den starken Störungen im Elevationsbereich bis 25 Grad. Dem schließt sich nach oben hin ein so gut wie störungsfreier Bereich an, während Satellensignale mit Einfallselevationen von über 35 Grad dann wieder leicht gestört sind. Das vierte Beispiel

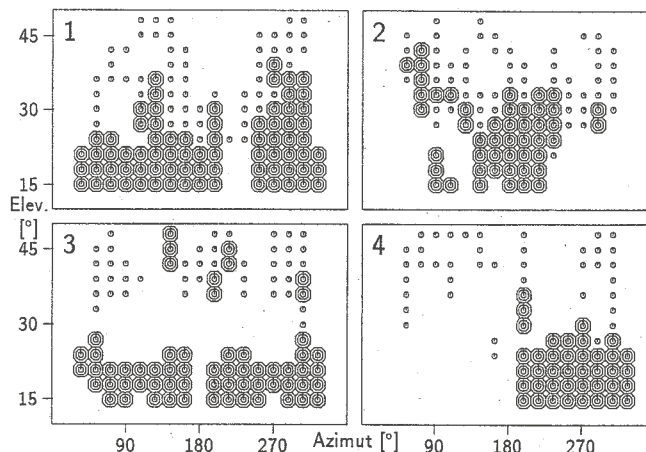


Abb. 3: Vier Beispiele für Azimut-Elevations-Diagramme bei starker Mehrweegebeeinflussung. Große (kleine) Symbole: durchschnittliche Standardabweichung der Doppel-Differenz-Residuen über 15 mm (5 mm).

zeigt die Wirkung einer teilweise (Westrichtung) mit Blechen verkleideten Dachoberfläche. In Ostrichtung unter 30 Grad sind keinerlei Störungen erkennbar, während für höhere Elevationen leichte Störungen bestehen.

5. Schluß

In den Beobachtungen von GPS-Referenzstationen können Mehrweegeinflüsse auf die Phasemessungen erkannt und zu Azimut-Elevations-Darstellungen verarbeitet werden. Die Überprüfung eines Großteils (25) der augenblicklich existierenden Referenzstationen in Deutschland ergab, daß einige (20%) stark von Mehrweegeinflüssen betroffen sind. Die Verwendung verbesserter Empfängermeßtechnik bzw. verbesserter Antennen oder die Verlagerung dieser Stationen wird ihre Datenqualität deutlich erhöhen können.

Dank:

Den Landesvermessungsämtern in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sei vielmals für die Zurverfügungstellung von Daten ihrer Permanentstationen gedankt.

Literatur

AXELRAD, P., COMP, C., MACDORAN, P.: Use of signal-to-noise ratio for multipath error correction in GPS differential phase measurements: methodology and experimental results, Proc. ION GPS '94, Salt Lake City, 655-666 (1994).

BISHOP, G. J., KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H.: Multipath effects on the determination of absolute ionospheric time delay from GPS signals, Radio Science, 20:388-396 (1985).

EVANS, A. G.: Comparison of GPS pseudorange and biased Doppler range measurements to demonstrate signal multipath effects, Proc. 4th Int. Geod. Sym. Sat. Pos., Austin, 573-587 (1986).

GEORGIADOU, Y., KLEUSBERG, A.: On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning, Manuscripta Geodaetica, 13:172-179 (1988).

HANKEMEIER, P.: DGPS-Dienste der Vermessungsverwaltungen, SPN 3/95, S. 80-88 (1995).

THIEL, K.-H.: Einfluß von Mehrweege signalen, SPN 3/95, S. 107-109 (1995).

WANNINGER, L.: Präzise GPS-Positionierung in regionalen Netzen permanenter Referenzstationen, Zeitschrift für Vermessungswesen, 121: 441-454.

Anschrift der Verfasser: Dr.-Ing. LAMBERT WANNINGER, Dipl.-Ing. STEFFEN WILDT, Geodätisches Institut, TU Dresden, 01062 Dresden.

Zusammenfassung

Da GPS-Referenzstationen häufig auf Gebäudedächern und damit in hochreflektiver Umgebung installiert werden, können ihre Beobachtungsdaten von Mehrweegeinflüssen gestört sein. Wir präsentieren einen Algorithmus zur Erkennung solcher Störungen in GPS-Phasenbeobachtungen und zeigen Teilergebnisse der Überprüfung von 25 deutschen Referenzstationen.