

Der Einfluß der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS

(Zeitschrift für Vermessungswesen, 125:8-16, Januar 2000)

Lambert Wanninger, Volker Frevert, Steffen Wildt

Zusammenfassung

Die Beugung der GPS-Signale an Objekten in der Empfangsantennenumgebung kann zu Phasenfehlern von einigen Zentimetern bis im Extremfall wenigen Dezimetern führen. Bei kurzen Basislinien und kurzer Beobachtungsdauer stellt sie in der Vermessungspraxis häufig die dominante Fehlerquelle dar. Durch Gewichtungsansätze, die auf den Signal-Rausch-Verhältnissen der GPS-Beobachtungsgrößen basieren, kann der Einfluß der Signalbeugung auf die Koordinatenergebnisse deutlich verringert werden.

Summary

GPS signal diffraction occurs whenever the direct GPS signal is obstructed but nevertheless a diffracted signal is received and processed. The longer propagation time of a diffracted signal causes carrier phase errors of up to several cm or even a few tens of cm. Diffraction effects are a common and often dominant error source in rapid static or kinematic GPS positioning. Their effect on coordinate estimation is reduced, if the observations are weighted according to a special algorithm based on the signal-to-noise values of the GPS observables.

Key Words

GPS, Signalbeugung, Signal-Rausch-Verhältnis, Beobachtungsgewichtung

1 Einleitung

Auch wenn ein Sichthindernis den direkten Weg des GPS-Signals vom Satelliten zur Empfangsantenne versperrt, kann aufgrund der Beugung des Signals am Hindernis dieses mit einem immer noch ausreichenden Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) empfangen werden, welches dem GPS-Empfänger die Durchführung von Code- und Phasenmessungen ermöglicht. Aufgrund des zusätzlichen Signalweges um das Hindernis herum ergeben sich dabei Meßfehler von Zentimetern oder sogar wenigen Dezimetern. Bei kinematischen oder kurzzeitig statischen Anwendungen der präzisen relativen Positionierung führt dies zu einer erschwerten Mehrdeutigkeitslösung und großen Koordinatenfehlern.

Obwohl die Fehlerquelle der Signalbeugung für viele Anwendungen der cm-genauen GPS-Positionierung von entscheidender Bedeutung ist, wurde sie bisher in der geodätischen Literatur weitgehend ignoriert. Während das Auftreten der Beugung von Signalen im GHz-Frequenzbereich an Objekten am Erdboden allgemein bekannt ist (CCIR 1982, auch zitiert in ALLNUTT 1989), wird die Bedeutung der damit einhergehenden Laufzeitverzögerung von GPS-Signalen erst langsam deutlich. Einige Studien berücksichtigen zwar Signalbeugung als Fehlerquelle (GOMEZ u.a. 1995, WALKER UND KUBIK 1996), doch daß diese nicht nur bei Spezialanwendungen auftritt, sondern ein Problem vieler präziser GPS-Anwendungen ist, wurde erst durch die Arbeiten von HARTINGER UND BRUNNER (1998), BRUNNER u.a. (1999) deutlich. Sie schlugen gleichzeitig einen Lösungsansatz vor, der durch eine spezielle Gewichtung der Phasenmessungen unter Verwendung der S/N-Informationen (Sigma- Δ -Gewichtung) die Auswirkungen auf die Koordinatenschätzung stark verringert.

Wir haben unser GPS-Auswerteprogrammpaket Wa-Soft um die Verarbeitung von S/N-Informationen erweitert. Dies beinhaltet die Übernahme der vollständigen Signal-Rausch-Verhältnisse (S/N) zuerst in die Beobachtungsdateien im RINEX-Format (RINEX Version 2.10, GURTNER UND ESTEY 1999) und anschließend in die Wa-Soft-interne Datendarstellung. Die S/N-Werte können nun zur De-

tektierung von Beugungserscheinungen und zur Gewichtung der undifferenzierten Phasenbeobachtungen verwendet werden.

Umfangreiche Datensätze, die zum größten Teil aus älteren Meßkampagnen unterschiedlicher Zielsetzungen stammen, wurden im Hinblick auf Signalbeugungseinflüsse neu analysiert. Einige zusätzliche Datensätze wurden speziell im Hinblick auf diese Fehlerquelle gesammelt. Alle Daten stammen von Trimble 4000 SSE- bzw. SSI-Empfängern. Der Sigma- Δ -Gewichtungsansatz wurde an die speziellen Trimble-Verhältnisse angepaßt. Zusätzlich wurden weitere Verbesserungen des Algorithmus getestet.

Im folgenden Abschnitt werden die besonderen Eigenschaften der Signalbeugungseffekte erläutert und mit denen der Mehrwegeausbreitung verglichen. Die verwendeten Gewichtungs- und Eliminationsansätze werden in Abschnitt 3 beschrieben. Sie werden anschließend sowohl auf epochenweise Auswertung langfristig statischer Messungen wie auch auf kurzzeitig statische Messungen angewandt und die deutliche Verbesserung der Koordinatengenauigkeiten diskutiert.

2 Beugungserscheinungen bei GPS-Signalen

Auf einer idealen GPS-Empfangsstation ohne irgendwelche Sichthindernisse oberhalb des Antennenhorizonts können die Signale aller Satelliten mit Elevationen über 0° direkt empfangen werden. Zum Teil werden die direkten Signale von am Boden reflektierten Signalen überlagert (Mehrwegeeffekte). Im Falle eines Sichthindernisses sind je nach geometrischer Anordnung von Empfangsantenne, Sichthindernis und Satellit folgende Einzelfälle zu unterscheiden (WALKER UND KUBIK 1996): befindet sich die Empfangsantenne in den Gebieten A, B oder C (Abb. 1), so ist der direkte Empfang des Satellitensignals gegeben. Unterschieden werden muß aber nach der Herkunft von reflektierten indirekten Signalen, die zu Mehrwegeeffekten führen: A - insbesondere Reflexionen vom Boden vor dem Hindernis und am Hindernis selbst, B - kaum Reflexionen zu erwarten, C - insbesondere Reflexionen am Boden hinter dem Hindernis.

Im Gebiet D ist nach den Gesetzen der geometrischen Optik das direkte Signal abgeschattet (geometrische Schattenzone) und auch am Boden oder am Hindernis reflektierte Signale können die Empfangsantenne nicht erreichen. Werden trotzdem die Signale des Satelliten empfangen, so kann vermutet werden, daß es sich um am Hindernis gebeugte Signale handelt. Existieren mehrere Hindernisse, so ist in seltenen Einzelfällen der Empfang reflektierter Signale auch im Gebiet D denkbar.

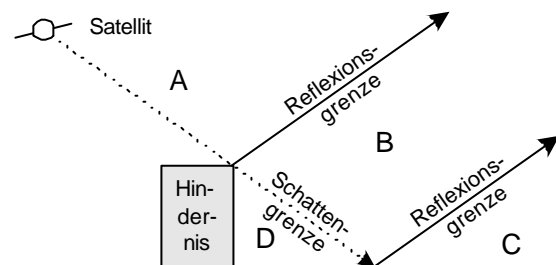


Abb. 1: Signalausbreitung bei Vorhandensein eines Hindernisses.

Zwei Beispiele sollen die Auswirkungen der Signalbeugung auf die GPS-Signale verdeutlichen. In beiden Fällen sind folgende vier Informationen als Funktion des Azimuts dargestellt (Abb. 2):

- die Satellitenelevation aus der Sicht der Empfangsantenne,
- die Elevation des Umrisses des Sichthindernisses (Gebäude bzw. Bäume) aus der Sicht der Empfangsantenne,
- das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) für die L_1 -Beobachtungen in empfängertypspezifischen Einheiten (Trimble 4000 SSI),
- und der Meßfehler der L_1 -Phase, welcher aus Doppel-Differenz-Residuen einer kurzen Basislinie (10 m bzw. 250 m) abgeleitet wurde.

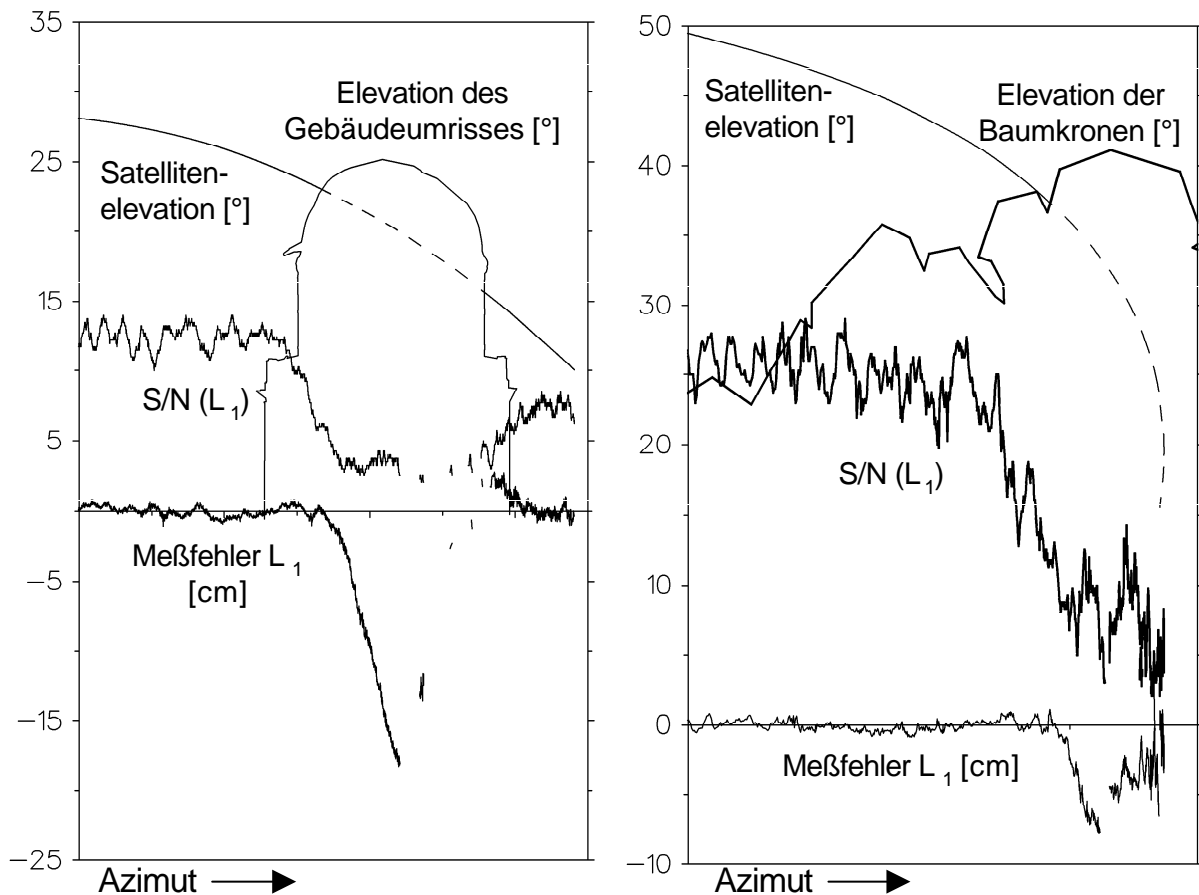


Abb. 2: Zwei Beispiele für Beugungserscheinungen: aufgrund eines Gebäudes (Sternwartenkuppel der TU Dresden) und aufgrund von Bäumen.

In beiden Fällen handelt es sich um einen untergehenden Satelliten, der in den geometrischen Schatten eines Hindernisses eintritt, welches sich in einer Schrägentfernung zur Empfangsantenne von 35 bzw. 40 m befindet. Schon kurz vor dem Eintritt in den Schatten ist ein deutlicher S/N-Verlust zu beobachten, wie er bei Kantenbeugung erwartet werden kann (ALLNUTT 1989). Er setzt sich nach Eintritt in den Schatten fort und erreicht dann zum Teil so niedrige Werte, daß Messungsunterbrechungen auftreten. Im Beispiel der Sternwartenkuppel erreichen die S/N-Werte kurze Zeit nachdem der Satellit den geometrischen Schatten wieder verlassen hat das für die entsprechende Elevation übliche Niveau. Im Beispiel der Bäume dringen Signalanteile durch das Laub hindurch und ermöglichen trotz S/N-Verlusten noch lange die Durchführung von Messungen.

Phasenfehler sind ab dem Augenblick des Eintritts in den geometrischen Schatten zu erkennen. Im Beispiel der Sternwartenkuppel erreichen sie bei maximaler Umweglänge 20 cm. Im Beispiel der Bäume ist zu vermuten, daß das Signal bis zu einem ersten Signalabbruch und Meßfehlern von bis zu 8 cm an den Baumkronen gebeugt wird. Aber auch bei den weiteren Messungen, bei denen Signalanteile durch das Laub hindurchkommen, deuten Meßfehler von bis zu 5 cm auf Beugungserscheinungen hin.

Zum besseren Verständnis der Signalbeugung sind Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Vergleich zu Mehrwegeeffekten in Tabelle 1 zusammengestellt. Besonders hervorzuheben ist, daß aufgrund der Überlagerung von direktem und reflektierten Signalen die maximalen theoretischen Meßfehler bei der

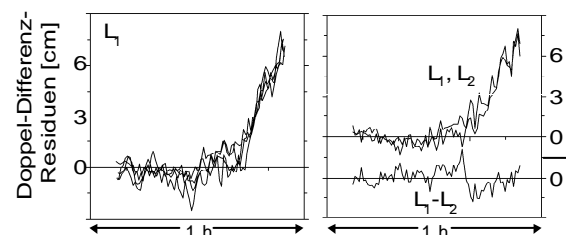


Abb. 3: Eigenschaften der Meßfehler aufgrund von Signalbeugung: Wiederholbarkeit an vier aufeinanderfolgenden Tagen bei unveränderter Empfängerumgebung nach jeweils 24 Stunden minus 4,2 Minuten (links), Frequenzunabhängigkeit (rechts).

Mehrwegeausbreitung ein Viertel der Signalwellenlängen betragen (GEORGIADOU UND KLEUSBERG 1988). In der Praxis übersteigen sie 2 bis 3 cm nur in seltenen Ausnahmefällen. Erst in Linearkombinationen wie der ionosphären-freien sind größere Fehler möglich. Bei der Signalbeugung gibt es dagegen keine Überlagerung unterschiedlicher Signale, weil das direkte Signal abgeschattet wird und nur das gebeugte Signal empfangbar ist. Die Meßfehler entsprechen hier dem tatsächlichen Umweg, den das Signal genommen hat und der mehrere Zentimeter oder sogar wenige Dezimeter erreichen kann. Deswegen existiert auch keine Frequenzabhängigkeit der Meßfehler. Die geometrie-freie Linearkombination (L_1 - L_2) ist frei von Beugungseinflüssen (Abb. 3). Gerade bei kurzen Basislinien, bei denen die Koordinatenlösungen vielfach allein auf den L_1 -Phasenmessungen beruhen, können Signalbeugungen also größere Fehler verursachen als Mehrwegeeffekte. In der Praxis sind sie häufig die dominante Fehlerquelle.

Bei sich wiederholender Empfänger-Satelliten-Geometrie und unveränderter Meßumgebung wiederholen sich Meßfehler aufgrund der Signalbeugung (Abb. 3). Alle Auswertemethoden, die die tägliche Wiederholung der Mehrwegefehler ausnutzen, können hier also genauso angewandt werden.

Die vom GPS-Empfänger bestimmten S/N-Werte, bei Trimble-Empfängern in empfängertypspezifischen Einheiten, spielen bei der Detektierung von Beugungserscheinungen und bei der Datenverarbeitung mit Gewichtungsansätzen eine entscheidende Rolle. Die S/N-Werte liefern im wesentlichen Informationen über das zu erwartende Meßrauschen (LANGLEY 1997). Es besteht aber darüber hinaus auch die Möglichkeit, anhand des S/N andere Fehlerursachen zu diagnostizieren und zum Teil sogar zu therapieren.

Die neben der Signalbeugung wichtigsten Einflußfaktoren auf das gemessene S/N sind:

- die Satellitenelevation: je geringer die Elevation, um so geringer fällt insbesondere aufgrund der Empfangseigenschaften der Antenne aber in geringerem Maße auch aufgrund der stärkeren Dämpfung bei längerem Signalweg das Signal-Rausch-Verhältnis aus.
- Mehrwegeeffekte führen zu S/N-Fluktuationen, die versuchsweise schon dafür genutzt wurden, Mehrwegphasenfehler zu bestimmen und zu korrigieren (COMP UND AXELRAD 1996). Diese Fluktuationen fallen sehr viel geringer aus als S/N-Verluste durch Beugungserscheinungen.
- Elektromagnetische Störungen führen zu S/N-Verlusten und damit zu einer Verstärkung des Meßrauschens. Im Extremfall sind die Verluste so stark, daß eine Verarbeitung des Satellitensignals

Tab. 1: Vergleich zwischen Signalbeugung und Mehrwegeausbreitung.

	Signalbeugung	Mehrwegeausbreitung
Unterschiede	<ul style="list-style-type: none"> • „Sichtverbindung“ zum Satelliten unterbrochen, nur gebeugtes Signal (Umwegsignal) wird empfangen, • frequenzunabhängig: kein Einfluß auf geometrie-freie Linearkombination, • maximaler Fehler: dm-Größenordnung, • verringertes Signal-Rausch-Verhältnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Überlagerung von direktem Signal und reflektierten (indirekten) Signalen, • frequenzabhängig: Detektierung in geometrie-freier Linearkombination möglich, • maximale theoretische Fehler: 4.8 cm L_1, 6.1 cm L_2, 21.4 cm ionosphären-frei, • fluktuierendes Signal-Rausch-Verhältnis
Gemeinsamkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig von der Empfangsumgebung, • Wiederholung bei selber Satellitengeometrie und unveränderter Umgebung, • keine Verminderung durch relative Positionierung, • Einfluß auf Koordinatenergebnis verringert sich bei statischer Punktbestimmung mit zunehmender Beobachtungsdauer, • verringerter Einfluß bei bewegter Antenne durch schnelle Veränderung der Empfangsumgebung und Filterung. 	

nicht mehr möglich ist. Elektromagnetische Störungen betreffen besonders häufig das L_2 -Signal (BUTSCH 1997).

- Kleinräumige ionosphärische Störungen, wie sie insbesondere in der Äquatorregion auftreten, führen zu S/N-Fluktuationen, die als Indikator für ionosphärisch bedingte Phasenfehler genutzt werden können. Im Extremfall sind auch hier die Verluste so stark, daß eine Verarbeitung des Satellitensignals nicht mehr möglich ist (WANNINGER 1993).
- Fehler bei der S/N-Bestimmung treten bei einigen Trimble 4000 SSE/SSI-Empfängern für L_1 und hochstehende Satelliten auf. Bei L_2 sind häufig fehlerhafte S/N-Werte bei niedrigen Elevationen zu beobachten. Hier sind Verbesserungen notwendig, wenn S/N-Werte in die standardmäßige Datenauswertung einfließen sollen.
- Die verringerte Sendeleistung eines GPS-Satelliten führt zu geringeren S/N-Werten. Dies trat z.B. beim Satelliten PRN 28 in den Jahren 1996/97 auf.

Zur Interpretation der S/N-Werte muß ihre Elevationsabhängigkeit berücksichtigt werden. Bei der Detektierung von Beugungserscheinungen waren dementsprechend Darstellungen der Elevationsabhängigkeit der S/N-Werte besonders hilfreich (Abb. 4). Bei den von uns analysierten Daten aus mehreren GPS-Meßkampagnen zeigte sich, daß starke S/N-Verluste fast immer auf Beugungserscheinungen zurückzuführen sind. Der Nachweis gelingt bei kurzen (ionosphärisch kaum beeinflussten) Basislinien im allgemeinen anhand der Doppel-Differenz-Phasenresiduen in L_1 , wenn diese einige cm übersteigen und somit Mehrwegeinflüsse und elektromagnetische Störungen als Fehlerursachen ausgeschlossen werden können.

Um Abweichungen der gemessenen S/N-Werte von elevationsabhängigen Sollwerten quantifizieren zu können, wurden ähnlich wie bei BRUNNER u.a. (1999) frequenzspezifische Templates bestimmt, welche die zu erwartenden S/N-Werte in Abhängigkeit von der Satellitenelevation e angeben (Abb. 4). Jedes Template tem wird durch drei Parameter (a_0, a_1, a_2) festgelegt, wobei gilt:

$$tem(e) = a_0 + a_1 \cdot e + a_2 \cdot e^2 \quad \text{für } e \leq 60^\circ$$

$$tem(e) = a_0 + a_1 \cdot 60 + a_2 \cdot 60^2 \quad \text{für } e > 60^\circ.$$

Die Bestimmung der Parameter erfolgt iterativ, wobei S/N-Werte, die mehr als 5 Einheiten von einer Templatekurve abweichen, bei der folgenden Iteration unberücksichtigt bleiben.

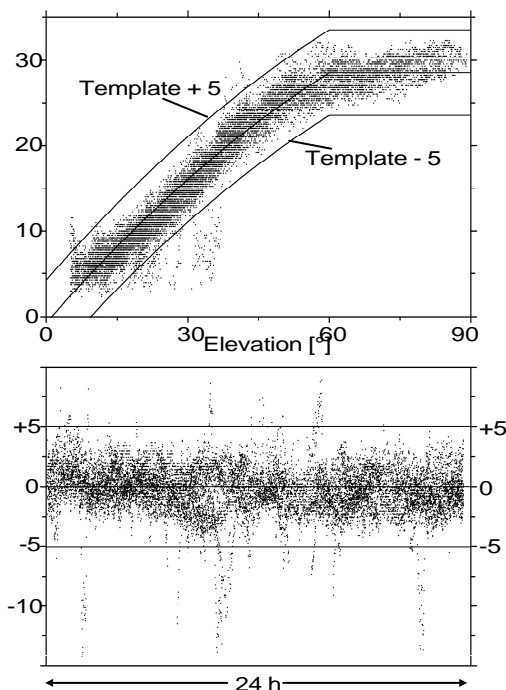


Abb 4: Elevationsabhängigkeit der S/N(L_1)-Werte in empfängertypspezifischen Einheiten mit Template-Kurven (oben), S/N-Werte minus zugehörigen Template-Werten in empfängertypspezifischen Einheiten dargestellt als Funktion des Meßzeitpunkts (unten). S/N-Werte unterhalb der „Template-5“-Kurve lassen Beugungserscheinungen vermuten.

Testmessungen mit 5 Trimble 4000 SSE bzw. SSI-GPS-Empfängern, 5 geodätischen Trimble GPS-Antennen und 12 Antennenkabeln von unterschiedlicher Stärke und Länge ergaben, daß die Templatekurven sich im Vergleich zwischen individuellen Empfängern und individuellen Antennen zum Teil deutlich unterscheiden, während die individuelle Charakteristik der Antennenkabel - zu unserer Überraschung - einen geringen Einfluß auf die S/N-Werte hatte. In der praktischen Anwendung von Templatekurven ist es also notwendig, für Paare von Trimble-Empfängern und -Antennen frequenzspezifische Templateparameter zu bestimmen. Nach unseren Erfahrungen reicht dafür eine Beobachtungsdauer von 30 bis 60 Minuten aus. Wichtig ist die Überdeckung aller Elevationsbereiche durch Meßwerte. Spezielle Kalibrierungsmessungen sind im allgemeinen nicht notwendig, vorhandene Meßdaten können hierfür genutzt werden.

3 Gewichtungs- und Eliminationsansätze für Trimble-Phasenbeobachtungen

Da Beugungseinflüsse systematische Fehler großer Amplitude erzeugen, liegt es nahe, fehlerbehaftete Messungen zu identifizieren und von der Auswertung auszuschließen. Zur Identifizierung bieten sich die S/N-Werte an, die bei großer Abweichung von den Template-Sollwerten Beugungseinflüsse vermuten lassen. Bei kinematischen und kurzzeitig statischen Messungen schwächt die vollständige Elimination einzelner Messungen aber die Empfänger-Satelliten-Geometrie, so daß sich die Koordinatengenauigkeiten aufgrund dieser Elimination oft sogar verschlechtert.

Ebenso ist es möglich, Beugungseinflüsse anhand der Beobachtungsresiduen zu detektieren. Dies setzt voraus, daß keine anderen Fehlereinflüsse auftreten, die zu Residuen von mehr als wenigen Zentimetern führen, welches bei kurzen Basislinien gegeben ist. Die Residuenanalyse setzt die genaue Kenntnis (sub-Zentimeter) der Basislinienkoordinaten voraus. Dies gelingt - insbesondere wenn mit großen Beugungseinflüssen gerechnet werden muß - nur bei ausreichend langer statischer Meßdauer und Satellitenanzahl, also nicht bei der Auswertung kinematischer oder kurzzeitig statischer Beobachtungen. Bei längerer Beobachtungsdauer (30 Minuten und länger bei kurzen Basislinien) gelingt eine Identifizierung der Beugungseinflüsse anhand der Residuen problemlos. Die Elimination fehlerbehafteter Phasenmessungen schwächt aufgrund der langen Beobachtungsdauer dann im allgemeinen auch nicht die Empfänger-Satelliten-Geometrie.

Da die vollständige Elimination einzelner Messungen bei kinematischen oder kurzzeitig statischen Messungen die Empfänger-Satelliten-Geometrie oft bedeutend schwächt, ist ein Gewichtungsansatz in der Praxis eher geeignet, die Koordinatengenauigkeit zu verbessern. Dabei muß darauf geachtet werden, daß die Gewichtung in Relation zum zu erwartenden Phasenfehler steht.

Während einige Auswerteprogramme immer noch den Ansatz gleichgewichteter Beobachtungen verwenden, hat in den letzten Jahren eine elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen weite Verbreitung gefunden. Vielfach wird mit dem einfachen Ansatz

$$p(e) = \sin^2 e$$

gearbeitet. Bei Trimble-Phasenmessungen von kurzen Basislinien gibt dieser Ansatz bei Elevationsmasken von über 10 Grad das Meßrauschen mit ausreichender Genauigkeit wieder. Unterhalb von 10 Grad Elevation werden die Beobachtungen aber im allgemeinen zu gering gewichtet (Abb. 5).

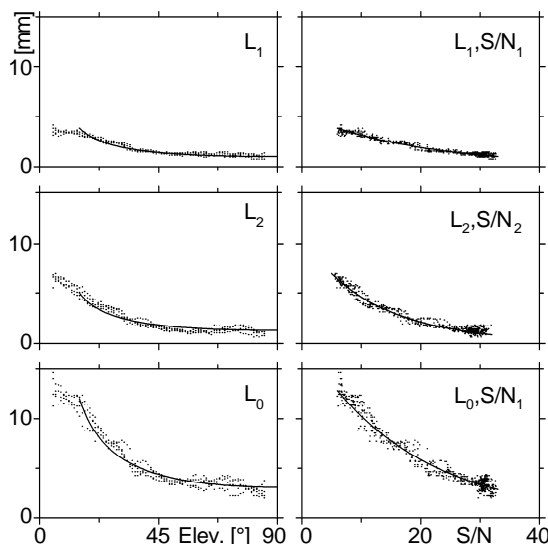


Abb. 5: Phasenmeßrauschen (einfache Standardabweichung) als Funktion der Elevation (links) und als Funktion der S/N-Werte (rechts) abgeleitet aus mehreren Trimble-Testdatensätzen kurzer Basislinien. Die Linien stellen Standardabweichungen dar, die aus den zugehörigen bestangepassten Gewichtungsfunktionen (siehe Text) berechnet wurden.

Für eine Gewichtung von Trimble-Beobachtungen als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses verwendete GIANNIOU 1996 sowohl für Code- wie auch für Phasenmessungen einen Exponentialansatz. Wir folgen diesem Vorschlag hier mit

$$p(S/N) = e^{-\frac{S/N}{A}},$$

wobei der Parameter A empirisch für die einzelnen Frequenzen bestimmt wurde. Verwendung finden die Werte 10 bei L₁, 6 bei L₂ und 9 bei der ionosphärenfreien Linearkombination L₀. In der tatsächlichen Implementierung wird die Gewichtung so normiert, daß sie für hohe Elevationen (S/N_{max}) den Wert 1 annimmt.

Da auch die S/N-abhängige Gewichtung Beugungseinflüsse noch nicht ausreichend berücksichtigt, wurde ein weiterer Ansatz ausgetestet, der sich an der von BRUNNER u.a. 1999 vorgeschlagenen Sigma- Δ -Gewichtung orientiert. Viele ähnliche Ansätze wurden dabei an einer Reihe von Testdatensätzen erprobt. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn der Abstand des tatsächlichen S/N-Wertes einer Beobachtung von der „Template + 5“-Kurve bestimmt und der tatsächliche S/N-Wert um diesen Differenzbetrag verringert wird (Abb. 6):

$$\Delta = \text{tem}(e) + 5 - S/N$$

$$S/N_{\Delta} = S/N - \Delta.$$

Für alle Beobachtungen werden dann S/N_{Δ} -Werte in den S/N-abhängigen Gewichtungsansatz eingeführt. Somit werden insbesondere die Beobachtungen, die von Beugungseinflüssen betroffen sind, gering gewichtet. Je größer der S/N-Verlust durch Signalbeugung, um so größer ist im allgemeinen der Phasenfehler und ein um so geringeres Gewicht bekommt die betroffene Einzelmessung.

Neben den Gewichtungsansätzen wurde auch untersucht, ob eine zusätzliche Elimination einzelner Messungen die Koordinatengenauigkeit weiter erhöhen kann (Tab. 2). Bei der epochenweisen (kinematischen) Auswertung blieben die Beobachtungen unberücksichtigt, die einen S/N-Wert kleiner „Template -5“ aufwiesen, wenn mehr als 5 Satelliten in dieser Epoche zur Verfügung standen. Bei kurzzeitig statischen Messungen wurde ein erstes Koordinatenergebnis auf der Grundlage der Sigma- Δ -Gewichtung erzeugt. Anschließend wurden die 5 % der undifferenzierten Beobachtungen eliminiert, die die größten Doppel-Differenz-Residuen verursachten, und die Basislinienkoordinatenberechnung wurde wiederholt.

4 Test unterschiedlicher Auswertansätze

Die beschriebenen Gewichtungs- und Eliminationsansätze wurden auf eine Reihe von Beobachtungen angewandt. Repräsentativ sollen hier die Ergebnisse zweier Datensätze diskutiert werden. Beim ersten Datensatz handelt es sich um eine 3 km lange, statisch gemessene Basislinie, bei der die Satellitensignale an einer Station wiederholt durch Beugungserscheinungen beeinflusst wurden. Die Auswertung erfolgte hier epochenweise, also quasi-kinematisch, mit einer Elevationsmaske von 10 Grad. Von den mehrere Tage andauernden Messungen wurde ein vier Stunden langer Zeitraum herausgesucht, in dem vier unabhängige Beugungsereignisse an Signalen unterschiedlicher Satelliten erkennbar sind. In drei Fällen sind sie auf Bäume zurückzuführen, in einem Fall auf ein Gebäude.

Der S/N-Verlust fällt bei den vier Beugungsereignissen unterschiedlich stark aus. Im Falle des Gebäudes ist er besonders stark ausgeprägt (Abb. 7). Die maximalen Phasenfehler vor einem Signalabriß betragen hier 7 cm, in den drei anderen Fällen aber sogar 8 bis 9 cm. Von der Stärke des S/N-Verlustes allein kann also nur begrenzt auf die Länge des Signalumwegs geschlossen werden.

Die epochenweise Darstellung der Koordinatenfehler läßt insbesondere in der Lage aber auch in der Höhe die Beugungsbeeinflussung erkennen (Abb. 7). Im

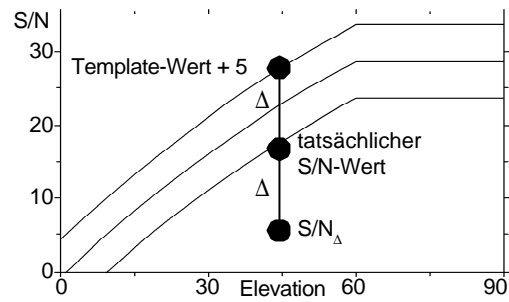


Abb. 6: Berechnung des S/N_{Δ} -Wertes für die Sigma- Δ -Gewichtung.

Tab.2: Beschreibung der verwendeten Auswertalgorithmen.

Abk.	Algorithmusbeschreibung
A	Gleichgewichtung
B	elevationsabhängige Gewichtung
C	S/N-abhängige Gewichtung
D	Sigma- Δ -Gewichtung
DK	epochenweise Auswertung: Elimination aller Beobachtungen mit $S/N < \text{Template}-5$, Sigma- Δ -Gewichtung,
DS	statische Anwendungen: Sigma- Δ -Gewichtung, Elimination der 5 % Beobachtungen, die die größten Doppel-Differenz-Residuen verursachen.

Vergleich zur gleichgewichteten Auswertung (Algorithmus A) führt schon die Verwendung einer elevations- oder S/N-abhängigen Gewichtung (B bzw. C) zu Genauigkeitssteigerungen. Der Sigma- Δ -Gewichtungsansatz (D) wirkt sich besonders positiv auf die Höhenkomponente aus. Die Standardabweichung des Höhenfehlers verringert sich um 30% im Vergleich zur S/N-abhängigen Gewichtung. Geringfügige Verbesserungen sind aber auch dann noch durch Elimination der am stärksten durch S/N-Verluste betroffenen Messungen zu erzielen. Insgesamt führt die Verwendung der S/N-Informationen in diesem vierstündigen Datensatz zu einer Genauigkeitssteigerung der epochenweisen Koordinaten von über 35%. Die maximalen Fehler verringerten sich von 4,6 auf 2,5 cm in der Lage und von 7,6 auf 3,4 cm in der Höhenkomponente.

Das zweite Beispiel umfaßt 55 Punkte eines lokalen Vermessungsnetzes von 5 x 6 km² Größe, die durch kurzzeitig statische Messungen jeweils doppelt bestimmt wurden. Das Meßgebiet im ländlichen Raum weist die in der Vermessungspraxis üblichen Sichthindernisse durch Bäume und Gebäude auf. Die tatsächliche Messungsdauer pro Punkt betrug 20 bis 40 Minuten, wobei durch eine Vorplanung auf ausreichende Satellitensignalverfügbarkeit geachtet wurde. Die Elevationsmaske der Messungsaufzeichnung betrug 15 Grad. Für diesen Test wurden nur die jeweils ersten 10 Minuten der Beobachtungen jeder Punktbesetzung verwendet. Zwei temporäre Permanentstationen wurden während der gesamten Meßdauer betrieben (Abb. 8).

Voruntersuchungen mit Hilfe der S/N-Werte ergaben, daß die Messungen auf 11 der 55 Punkte durch starke Beugungseinflüsse beeinträchtigt sind. Die Mehrdeutigkeitslösung mit jeweils 10 Minuten Daten erfolgte durch Wa-Soft problemlos und fehlerfrei. In diesen Arbeitsschritt wurden die Beobachtungen gleichgewichtet eingeführt. Die vorhandenen Beugungsfehler scheinen die Mehrdeutigkeitslösung nicht beeinträchtigt zu haben.

Standardabweichungen der Koordinatendifferenzen zwischen den doppelten Punktbesetzungen lassen auf die erzielten Positionierungsgenauigkeiten schließen (Tab. 3). Dabei wurde eine Trennung in zwei Punktgruppen vorgenommen: mit und ohne starke Beugungseinflüsse. Bei Verwendung gleichgewichteter Beobachtungen (Algorithmus A) liegen die maximalen Differenzen zwischen Doppelmessungen bei 6 cm in der Lage und 7 cm in

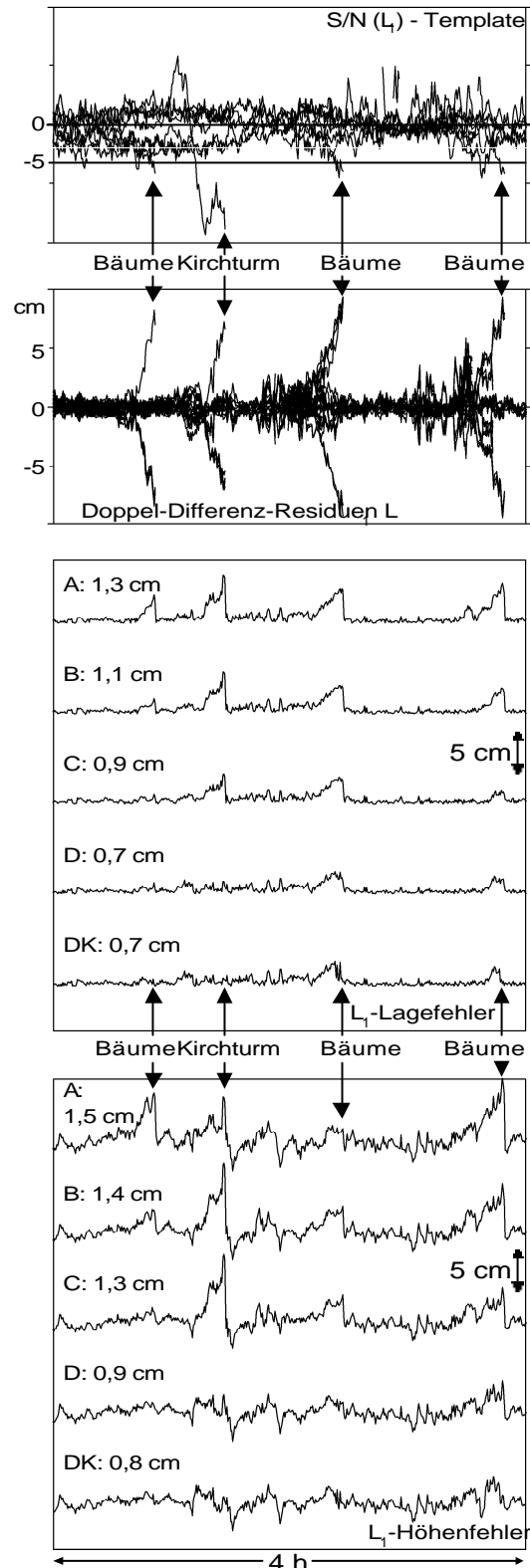


Abb. 7: Vier Signalbeugungsereignisse innerhalb von vier Stunden Beobachtungsdauer. Epochenweise Darstellung von „S/N(L1) minus Template“-Werten in empfangertypspezifischen Einheiten. Die epochenweise dargestellten Doppel-Differenz-Residuen für alle Satellitenpaare und der Koordinatenfehler stammen von einer 3 km langen Basislinie. Für jede Lösung sind Standardabweichungen der Koordinatenfehler angegeben.

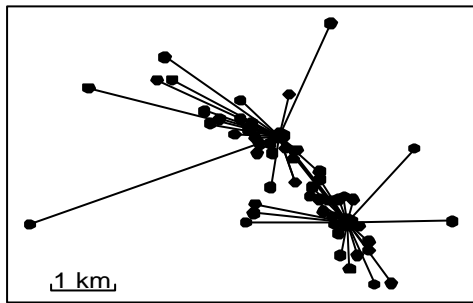


Abb. 8: Vermessungsnetz aus 55 Punkten, wobei auf zwei Punkten permanent beobachtet wurde.

der Höhe. Schon die elevationsabhängige Gewichtung (Algorithmus B) lieferte im allgemeinen eine deutliche Genauigkeitssteigerung. Der Übergang auf die S/N-abhängige Gewichtung (C) ergibt eine weitere Genauigkeitssteigerung. Erst die Verwendung der Sigma- Δ -Gewichtung (D) verursacht aber bei den beeinflussten Punkten eine deutliche Genauigkeitsverbesserung in Lage und Höhe. Die Elimination der 5 % Beobachtungen, die die größten Doppel-Differenz-Residuen verursachen, kann alle Ergebnisse noch einmal leicht verbessern.

Tab. 3: Standardabweichungen [cm] der Koordinatendifferenzen zwischen statischen Doppelmessungen (je 10 Minuten Beobachtungsdauer, Zweifrequenz-Mehrdeutigkeitslösung, L_1 -Koordinatenlösungen).

Algorithmus	11 Punkte mit starken Beugungseinflüssen		44 Punkte ohne starke Beugungseinflüsse	
	Lage	Höhe	Lage	Höhe
A	2,4	1,9	1,4	2,2
B	2,1	2,1	1,0	1,9
C	1,9	2,0	1,0	1,8
D	1,4	1,7	0,9	1,6
DS	1,3	1,6	0,9	1,4

Die Genauigkeitssteigerung, die durch Berücksichtigung der S/N-Werte erzielt werden kann, beträgt in diesem Beispiel zwischen 10% (Lagekomponente bei Punkten ohne starke Beugungseinflüsse) und 40% (Lagekomponente bei Punkten mit starker Beeinträchtigung). Bei keinem Punkt überschreiten die Differenzen zwischen Doppelmessungen nun 2 cm in der Lage und 5 cm in der Höhe. Aber auch beim Algorithmus DS, der die genauesten Ergebnisse liefert, schneiden die durch Signalbeugung beeinflussten Punkte

schlechter ab, als die nicht beeinträchtigten Punkte. So scheint eine weitgehende, aber doch nicht vollständige Beseitigung der Beugungseinflüsse bei kurzzeitig statischen Messungen möglich.

5 Schlußfolgerungen

Die Signalbeugung der GPS-Signale in der Empfangsantennenumgebung führt häufig zu Phasenfehlern von einigen Zentimetern bis im Extremfall wenigen Dezimetern. Bei kurzen Basislinien und kurzer Beobachtungsdauer stellt sie in der Vermessungspraxis häufig die dominante Fehlerquelle dar.

Durch die Gewichtung der undifferenzierten Phasenbeobachtungen in Abhängigkeit von tatsächlichem und dem bei entsprechender Satellitenelevation zu erwartenden S/N-Wert kann der Einfluß der Signalbeugungsfehler auf die Koordinatenschätzung stark verringert werden. Die vorgestellten Ansätze sind für kinematische und kurzzeitig statische Messungen zu empfehlen. Hierbei sind die Auswirkungen der Beugungserscheinungen auf die Koordinatenergebnisse am größten und eine Detektierung großer Beobachtungsfehler aus den Phasendaten selbst am schwersten erfolgreich durchzuführen.

Eine standardmäßige Verarbeitung der S/N-Informationen bei der GPS-Datenverarbeitung setzt voraus, daß diese Beobachtungsgrößen mit ausreichender Qualität vom GPS-Empfänger zur Verfügung gestellt werden. Dies ist bei Trimble 4000 SSE/SSI-Empfängern bisher nicht immer der Fall. Zusätzlich geht bisher diese Information bei der Wandlung der Beobachtungsdaten in das empfängerunabhängige RINEX-Format fast vollständig verloren. Es ist zu empfehlen, die Erweiterungen der RINEX Version 2.10 zu nutzen und die vollständigen S/N-Werte abzuspeichern. Auch für präzise Echtzeitanwendungen sollte über eine Übertragung der (vollständigen) S/N-Informationen nachgedacht werden.

Dank

Ulf Jakisch, Torsten Hentschel und Henning Wagner waren an Sammlung und Auswertung eines Teils der verwendeten Meßdaten beteiligt. Der Studentenjahrgang 1995 des Studiengangs Geodäsie an der TU Dresden sammelte im Rahmen der Hauptvermessungsübung 2 und im Auftrag des Landesvermessungsamtes Sachsen die statisch ausgewerteten Beobachtungen. Die Autoren danken für diese Unterstützung.

Literatur

- ALLNUTT, J.E.: Satellite-to-Ground Radiowave Propagation. IEE Electromagnetic Wave Series 29, Peter Peregrinus Ltd., London 1989.
- BUTSCH, F.: Elektromagnetische Störungen bei GPS. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 104:178-183, 1997.
- BRUNNER, F.K., H. HARTINGER, L. TROYER: GPS Signal Diffraction Modelling: the Stochastic SIGMA- Δ Model. Journal of Geodesy, 73:259-267, 1999.
- CCIR (International Radio Consultive Committee): Propagation by Diffraction, Report 715-1, Recommendations and Reports of the CCIR, Volume 5, Propagation in Non-Ionized Media, Genf, 1982.
- COMP, C., P. AXELRAD: An Adaptive SNR-Based Carrier Phase Multipath Mitigation Technique, Proceed. of ION GPS'96, 683-697, 1996.
- GEORGIADOU, Y., A. KLEUSBERG: On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning. Manuscripta Geodaetica, 13:1-8, 1988.
- GIANNIOU, M.: Genauigkeitssteigerung bei kurzzeit-statischen und kinematischen Satellitenmessungen bis hin zur Echtzeitanwendung. Deutsche Geodätische Kommission, C458, 1996.
- GOMEZ, S., R. PANNETON, P. SAUNDERS, S. HWU, B. LU: GPS Multipath Modeling and Verification Using Geometrical Theory of Diffraction, Proceed. of ION GPS'95, 195-204, 1995.
- GURTNER, W., L. ESTEY: RINEX Version 2.10 Modifications. IGS Electronic Mail Nr. 2363 vom 12. Juli 1999.
- HARTINGER, H., F.K. BRUNNER: Signal Distortion in High Precision GPS Surveys, Survey Review, 34:531-541, 1998.
- LANGLEY, R.: GPS Receiver System Noise. GPS World, Juni 1997, 40-45, 1997.
- WALKER, R.A., K. KUBIK: Numerical Modelling of GPS Signal Propagation. Proceed. of ION GPS '96, 709-717, 1996.
- WANNINGER, L.: Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS. GPS World, Juli 1993, 48-54, 1993.

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. Lambert Wanninger, Dr.-Ing. Volker Frevert, Dipl.-Ing. Steffen Wildt
Geodätisches Institut
TU Dresden
D-01062 Dresden