

Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa

Von Lambert Wanninger, Hannover

Zusammenfassung: Nicht nur GPS-Messungen aus äquatorialen oder polaren Gebieten sind von ionosphärischen Störungen betroffen, sondern auch Messungen in mittleren Breiten. Insbesondere Medium Scale TIDs und Szintillationen führen dazu, daß die präzise Bestimmung auch kurzer Basislinien beeinträchtigt wird. Die Mehrdeutigkeitslösung wird erschwert oder sogar unmöglich. Koordinatendifferenzen aus Einfrequenz-Messungen zeigen Fehler von über 15 ppm der Basislinienlänge. GPS-Monitorstationen werden einen wichtigen Beitrag leisten, die ionosphärischen Störungen zu erforschen und den GPS-Nutzer bei ihrem Auftreten zu warnen.

Summary: GPS measurements are affected by ionospheric disturbances not only in the equatorial and polar regions but as well in the mid-latitudes. Medium Scale TIDs and scintillations complicate the precise determination of coordinate differences even for short baselines. Ambiguity resolution becomes more difficult or impossible to perform. Results based on single frequency measurements show errors of more than 15 ppm of the baseline length. The measurements of GPS monitor stations will be useful to examine ionospheric disturbances and to warn GPS users of their occurrence.

1. Einleitung

Die Ionosphäre kann als der Teil der hohen Erdatmosphäre bezeichnet werden, in dem Elektronen und Ionen in genügender Anzahl vorhanden sind, um die Ausbreitung von Radiowellen zu beeinflussen. Nach dieser Definition dehnt sich die Ionosphäre von 50 km bis zu mehreren Erdradien aus. Einer der Einflüsse der freien Ladungsträger ist die Veränderung der Laufzeit der Signale. Beim Global Positioning System (GPS) wird die dispersive Wirkung der Ionosphäre genutzt, in dem durch die Kombination gleichzeitiger Messungen auf zwei Frequenzen (1575,42 MHz und 1227,60 MHz) die sogenannten ionosphärischen Effekte erster Ordnung beseitigt werden können. Die Restfehler betragen in der Regel deutlich weniger als 1 cm (Seeber 1989).

Bei der Basislinienmessung mit GPS sind nicht die absoluten Laufzeitverzögerungen der Signale durch den Elektronengehalt der Ionosphäre von Bedeutung, sondern nur die Differenzen dieser Einflüsse auf die Signale gleicher Satelliten. Für kurze Basislinien (kürzer als 10 km) wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß diese Differenz so gering ist, daß auch mit Einfrequenz-Messungen und Mehrdeutigkeitslösung cm-Genauigkeit erreicht werden kann. Dies gilt aber nicht mehr, sobald ionosphärische Störungen mit starken Gradienten in der Elektronenverteilung auftreten.

Auch bei der Nutzung von Zweifrequenz-Phasendaten sind nicht alle Probleme gelöst, die durch die Ionosphäre entstehen. Um cm-Genauigkeiten auch bei kurzen Beobachtungsperioden zu erreichen, müssen die Phasenmehrdeutigkeiten der Doppelten Differenzen gelöst werden. Doppelte Differenzen werden aus den simultanen Beobachtungen von zwei Stationen zu je zwei Satelliten gebildet. Neben den Ursprungssignalen können auch Linearkombinationen zwischen den Beobachtungen auf beiden Frequenzen zur Mehrdeutigkeitslösung verwendet werden. Eine Mehrdeutigkeitslösung mit Linearkombinationen, die nur sehr wenig von der Ionosphäre beeinflußt werden, kann aber an deren sehr kurzen Wellenlängen von 11 cm und weniger scheitern (Wanninger und Jahn 1991). Eine Ausnahme bildet nur die sogenannte Widelanen L_w mit einer Wellenlänge von 86 cm. Deswegen werden für die Mehrdeutigkeitslösung oft auch die Ursprungssignale eingesetzt. Diese sind aber nicht frei von ionosphärischen Effekten. Extreme ionosphärische Bedingungen können die Mehrdeutigkeitslösung erschweren oder sogar verhindern.

Verzichtet man auf die Mehrdeutigkeitsbestimmung, weil die dabei erreichbare Genauigkeitssteigerung nicht verlangt ist, oder wurde so lange gemessen (viele Stunden), daß kaum noch eine Genauigkeitssteigerung durch Mehrdeutigkeitsfestsetzung erreicht werden kann, sind diese Probleme ohne Bedeutung. Auch unter extremsten Bedingungen sind die mit der „ionosphärenfreien“ Linearkombination L_0 berechneten Koordinatendifferenzen praktisch frei von ionosphärischen Effekten.

2. Extreme ionosphärische Bedingungen

Unter extremen ionosphärischen Bedingungen im Zusammenhang mit GPS sollen solche Zustände der Ionosphäre verstanden werden, die nicht in jedem Fall eine Bestimmung von Koordinatendifferenzen durch Zweifrequenz-Messungen mit der Genauigkeit zulassen, die man aus Zeiten oder von Orten ohne solche Bedingungen gewohnt ist.

Die Genauigkeitseinschränkungen ergeben sich zum einen durch Schwierigkeiten bei der Cycle-Slip-Bestimmung und der Lösung der Mehrdeutigkeiten der Doppelten Differenzen. Andererseits kann aber auch das Meßverhalten der Empfänger betroffen sein. Extrem starke und hochfrequente Störungen führen bei allen heute verwendeten Empfängertypen nicht nur zu einer erhöhten Anzahl von Cycle-Slips, sondern auch zu totalen Meßausfällen. Diese betreffen dann natürlich nicht nur hochgenaue Anwendungen, sondern auch z. B. die Navigation mit GPS.

Zu den extremen ionosphärischen Bedingungen gehören:

- Kleinräumige Störungen, die zu Phasenzintillationen und Amplitudenzintillationen führen können. Als Phasenzintillationen bezeichnet man die abrupte Veränderung der ionosphärischen Refraktion, die im allgemeinen das Empfängerverhalten nicht negativ beeinflusst, aber die Bestimmung der Cycle-Slips bei den üblichen Datenraten von 20, 30 oder mehr Sekunden erschwert oder unmöglich macht. Damit einher gehen Amplitudenzintillationen, die zu einer Verschlechterung der Signalstärke führen und dadurch Meßausfälle verursachen können. Die stärksten Szintillationen findet man in der Äquatorregion ($\pm 30^\circ$ um den geomagnetischen Äquator). Sie treten aber auch in den Aurora Ovalen ($\pm 64^\circ$ – 70° geomagnetischer Breite) und in den Polregionen auf. Im Falle sehr starker magnetischer Stürme werden sie auch in mittleren Breiten beobachtet.
- Wandernde Störungen mit Perioden von einigen Minuten bis zu einer Stunde sind bei der Mehrdeutigkeitsschätzung problematisch, wenn die Meßdauer kürzer ist als die Periode der Störung. Sie treten auch in den mittleren Breiten auf und werden unter der Abkürzung MSTID (Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbance) zusammengefaßt.
- Großräumige starke horizontale Gradienten in der Ionosphäre treten im Bereich der äquatorialen Anomalie ($\pm 30^\circ$ um den geomagnetischen Äquator) auf. Auch sie führen zu Problemen bei der Mehrdeutigkeitsschätzung (Wanninger und Jahn 1991).
- Ein sehr hoher Elektronengehalt der Ionosphäre führt zu systematischen Fehlern in den Doppelten Differenzen, weil die Station, die sich näher zum Satelliten befindet, das Signal unter einem größeren Elevationswinkel empfängt als die weiter entfernte Station. Ein größerer Elevationswinkel ist gleichbedeutend mit einem kürzeren Weg des Signals durch die Ionosphäre und damit geringerer Refraktion. So bleiben auch in den Differenzen der Signale systematische Restfehler (Georgiadou und Kleusberg 1988). Nur in der Äquatorregion kann der Elektronengehalt so stark werden, daß die Mehrdeutigkeitslösung kurzer Basislinien beeinträchtigt wird.

Diese Liste muß zur Zeit als noch unvollständig angesehen werden. Erst nach einer intensiven Analyse weltweiter Daten aus mindestens einem ganzen Sonnenfleckenzyklus wird es möglich sein, alle extremen ionosphärischen Bedingungen zu erfassen und zu klassifizieren.

3. Ionosphärische Störungen in Europa

Wie aus obiger Liste ersichtlich, treten mit Abstand die meisten ionosphärischen Störungen im Bereich des geomagnetischen Äquators, der Polargebiete und der Gebiete der Aurora Ovale

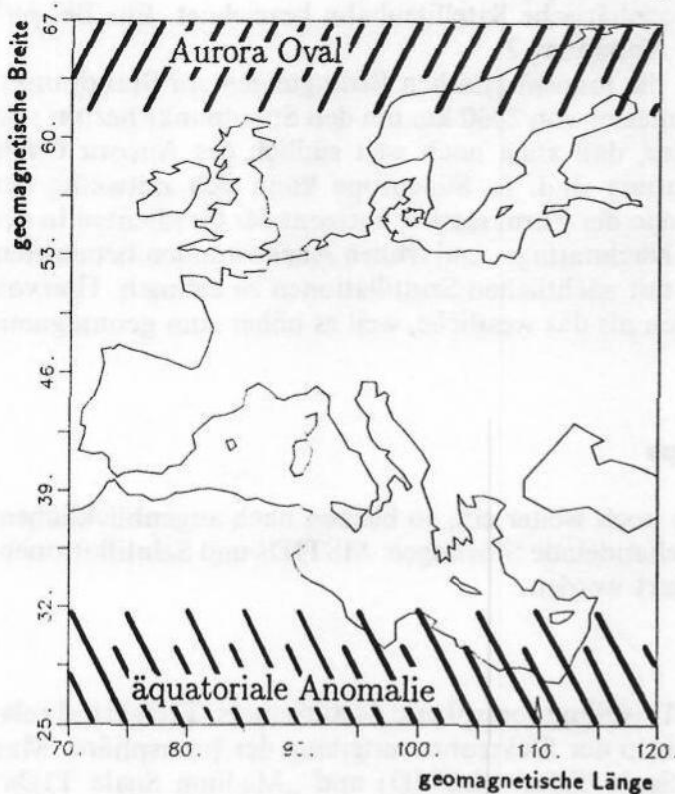


Abb. 1. Mitteleuropa ist eingegrenzt von Gebieten häufiger starker ionosphärischer Störungen im Norden und Süden (Darstellung der Küstenlinien in geomagnetischen Koordinaten).

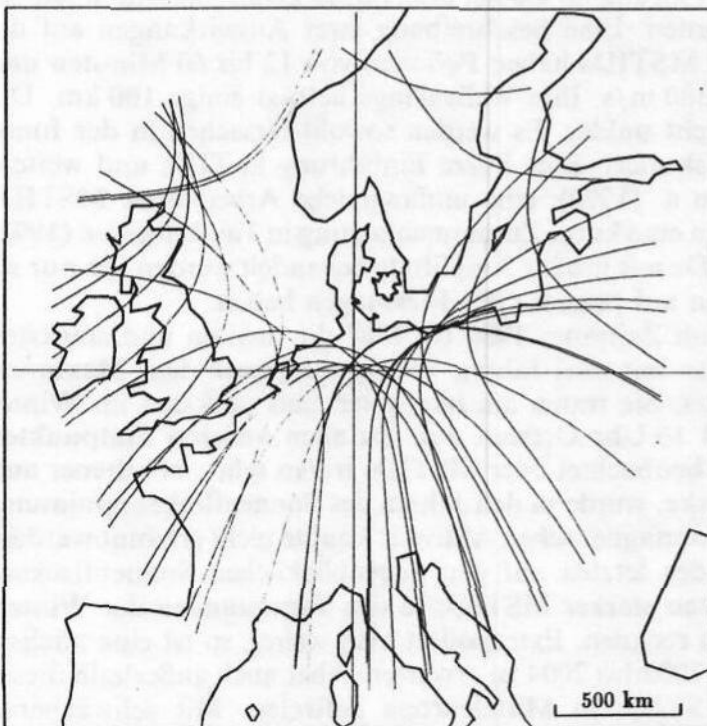


Abb. 2. Ionosphärische Satellitenbahnen für Beobachtungsort Hannover (im Schnittpunkt der Geraden), November/Dezember 1991, Elevationsgrenze 10° , mit ionosphärischer Mittelhöhe von 400 km berechnet.

auf. Als einzige Teile Europas gehören Nordskandinavien und Island in eine dieser Regionen und zwar in den Bereichen des Nördlichen Aurora Ovals.

Doch sind nicht nur Störungen in der Ionosphäre direkt über der GPS-Antenne von Bedeutung. Diese beeinflussen nur die Signale der im Zenit stehenden Satelliten. Satellitensignale, die unter niedrigeren Elevationswinkeln empfangen werden, schneiden die Ionosphäre bis zu 1000 km vom Standpunkt entfernt (bei 15° Elevationswinkel und einer ionosphärischen Mittelhöhe von 400 km). Diese Schnittpunkte werden als ionosphärische Punkte und alle Schnitt-

punkte eines Satellitendurchgangs als ionosphärische Satellitenbahn bezeichnet. Ein Beispiel für ionosphärische Satellitenbahnen zeigt Abbildung 2.

Für die Messungen sind also nicht nur die ionosphärischen Bedingungen am Standpunkt, sondern in einem Gebiet mit einem Durchmesser von 2000 km um den Standpunkt herum von Bedeutung. Für Nordeuropa bedeutet dies, daß auch noch weit südlich des Aurora Ovals Störungen aus diesem Gebiet von Bedeutung sind. In Südeuropa kann sich zeitweilig der nördliche Rand der äquatorialen Anomalie in der Form starker horizontaler Gradienten in der Elektronenverteilung insbesondere in den Nachmittags- und frühen Abendstunden bemerkbar machen. Ebenso ist dort von Zeit zu Zeit mit nächtlichen Szintillationen zu rechnen. Hiervon ist das östliche Mittelmeer stärker betroffen als das westliche, weil es näher zum geomagnetischen Äquator liegt.

4. Ionosphärische Störungen in Mitteleuropa

Engt man den zu betrachtenden Raum noch weiter ein, so bleiben nach augenblicklichem Kenntnisstand für Mitteleuropa zwei zu behandelnde Störungen: MSTIDs und Szintillationen. Diese sollen im folgenden detailliert erörtert werden.

4.1 Medium Scale TIDs

Wandernde ionosphärische Störungen (Travelling Ionospheric Disturbances, TIDs) sind relativ großräumige, wellenförmige Strukturen in der Elektronenverteilung der Ionosphäre. Man klassifiziert sie üblicherweise in „Large Scale TIDs“ (LSTID) und „Medium Scale TIDs“ (MSTID) abhängig von der Periodenlänge, der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit. LSTIDs haben vermutlich ihren Ursprung im Gebiet des Aurora Ovals. Sie sind auch bei GPS-Messungen schon beobachtet worden. Eine Beschreibung ihrer Auswirkungen auf die Datenauswertung steht aber noch aus. MSTIDs haben Perioden von 12 bis 60 Minuten und Phasengeschwindigkeiten von 100 bis 300 m/s. Ihre Wellenlänge beträgt einige 100 km. Die Quellen der MSTIDs sind bis heute recht unklar. Es werden sowohl Ursachen in der Ionosphäre als auch in der Troposphäre diskutiert. Eine kurze Einführung in TIDs und weitere Quellenangaben findet man bei Putz u. a. (1990); eine umfangreiche Arbeit über MSTIDs stammt von Van Velthoven (1990), wovon eine kurze Zusammenfassung in Van Velthoven (1992) erschienen ist. Es sollen hier nur MSTIDs mit großer Amplitude behandelt werden, da nur sie erkennbare und störende Auswirkungen auf präzise GPS-Messungen haben.

Nach Van Velthoven (1990) wurden im Zeitraum 1980 bis 1988 die meisten und stärksten MSTIDs in den Jahren 1982–1984 (also mit zwei Jahren Verzögerung nach dem Maximum des 21. Sonnenfleckenzyklus) beobachtet. Sie traten am häufigsten und stärksten im Winter (November bis März) zwischen 8 und 16 Uhr Ortszeit auf. Zu allen anderen Zeitpunkten wurden entweder schwächere MSTIDs beobachtet oder MSTIDs traten sehr viel seltener auf. Das Minimum in Anzahl, wie auch Stärke, wurde in den Jahren des Sonnenfleckenminimums registriert. Eine Abhängigkeit von der geomagnetischen Aktivität konnte nicht erkannt werden.

Extrapoliert man diese Erkenntnis des letzten auf den augenblicklichen Sonnenfleckenzyklus, so ist mit dem häufigen Auftreten starker MSTIDs in den Tagesstunden der Wintermonate in den Jahren 1991 bis 1993 zu rechnen. Extrapoliert man weiter, so ist eine nächste Periode starker MSTIDs in den Jahren 2002 bis 2004 zu erwarten. Aber auch außerhalb dieser Zeiträume können einzelne starke MSTIDs in Mitteleuropa auftreten. Mit schwächeren MSTIDs ist sehr viel häufiger zu rechnen.

4.2 Szintillationen

Kleinräumige Störungen in der Ionosphäre mit Wellenlängen von wenigen Metern bis zu wenigen Kilometern verursachen Szintillationen sowohl in der Phase als auch in der Amplitude des durchdringenden Signals (Aarons 1978). Die Stärke und Häufigkeit des Auftretens dieser Störungen im Aurora Oval wächst sowohl mit stärkerer Sonnenaktivität wie auch mit stärkerer magnetischer Aktivität.

Bei geringer bis mäßiger magnetischer Aktivität ist für GPS-Messungen in Mitteleuropa die Südgrenze der Szintillationen des Aurora Ovals von Bedeutung. Sie schiebt sich nachts bis über Südsandinavien nach Süden. Während des Tages liegt diese Grenze deutlich nördlicher. Betrachtet man die ionosphärischen Satellitenbahnen in Abbildung 2, so fällt auf, daß sich aufgrund der Inklination der Satellitenbahnen von 55° (Block II-Satelliten) und 63° (Block I-Satelliten) direkt nördlich der Meßstation niemals Satelliten befinden. Ionosphärische Störungen in diesem Bereich sind für die Messungen ohne jede Bedeutung.

Nördlich dieses Gebietes erkennt man vereinzelte Satellitenbahnen über Skandinavien. Sie stammen von Block I-Satelliten, die sich über dem Nordpazifik befinden. Aufgrund der höheren Inklination ihrer Bahnen sind sie wenige Stunden lang bei Elevationen von über 15° von Norddeutschland aus zu beobachten. Sie weisen zumindest bei der starken Sonnenaktivität der letzten beiden Jahre nachts regelmäßig leichte Phasenszintillationen auf. Durch die fortlaufende Außerbetriebnahme der Block I-Satelliten werden in Zukunft höchstens noch kleine Endstücke der Block II-Satellitenbahnen betroffen sein. Das Problem verliert somit mehr und mehr an Bedeutung.

Völlig anders ist die Situation beim Auftreten sehr schwerer magnetischer Stürme (*Klobuchar* 1991). Diese ereignen sich zwar nur sehr selten, aber dann dringen die kleinräumigen Störungen aus dem Aurora Oval bis tief in die mittleren Breiten vor. Die Störungen können dann auch in Mitteleuropa so stark sein, daß neben starken Phasenszintillationen auch häufige Meßunterbrechungen auftreten. Magnetische Stürme dieser Art ereignen sich nur wenige Male pro elfjährigem Sonnenzyklus. Sie können aber dann den Einsatz von GPS für jeweils ein bis zwei Tage empfindlich einschränken.

5. Beobachtungen des Ionosphärenverhaltens mit GPS

Zweifrequenz-GPS-Phasenmessungen werden durch extreme ionosphärische Bedingungen nicht nur gestört, sondern sie sind auch hervorragend geeignet, diese Störungen zu beobachten und zu erforschen. Eine Interpretation des Ionosphärenverhaltens aus GPS-Daten ist mit Abstand die beste Quelle, um die Auswirkung auf GPS-Messungen zu beurteilen. Eine Interpretation der Beobachtungen anderer geophysikalischer Meßsysteme kann als Unterstützung sehr hilfreich sein, läßt aber kaum genaue Aussagen über die negativen Einflüsse auf GPS zu.

Eine der wichtigen Aufgaben von GPS-Monitorstationen, wie sie augenblicklich weltweit in großer Anzahl entstehen, wird es sein, das Verhalten der Ionosphäre zu beobachten. Ionosphärische Störungen können räumlich und zeitlich lokalisiert werden. Je nach ihrer Stärke lassen sich Warnungen an GPS-Nutzer geben. Diese können dann entscheiden, ob sie ihre Messungen aufschieben oder ihre Meßstrategie ändern (z. B. längere Beobachtungsdauer, kürzere Basislinien).

Die Beobachtung ionosphärischer Störungen wird für fast alle präzisen GPS-Anwendungen von größerer Bedeutung sein als die zur Verfügungstellung von Ionosphärenmodellen. Ist ein Nutzer auf sehr hohe Genauigkeiten angewiesen, so wird er diese sicherer und schneller mit Zweifrequenz-Phasenmessungen erreichen als sich auf Ionosphärenmodelle zu verlassen. Zweifrequenz-Phasenmessungen werden auch bei allen implementierten Restriktionen des GPS-Betriebs immer durchführbar bleiben.

Eine zuverlässige Vorhersage des Ionosphärenverhaltens wird nur nach vielen weiteren Jahren der intensiven Forschung möglich sein. GPS und GPS-Monitorstationen können dabei einen großen Beitrag leisten. Aber auch dann ist zu erwarten, daß die Zuverlässigkeit von Wetterberichten nicht übertroffen wird.

Um so wichtiger ist, daß der Nutzer möglichst schnell über die aktuelle Ionosphäre informiert wird. Schneller als jede Monitorstation ist es, wenn jeder Zweifrequenz-GPS-Empfänger schon während der Messungen das Ionosphärenverhalten interpretiert und beim Auftreten von Störungen das Bedienungspersonal darauf hinweist.

Voraussetzung für die Beobachtung der Ionosphäre sind Zweifrequenz-Phasendaten. Es macht keinen Unterschied, ob diese auf L_2 mit voller Wellenlänge (Code-Korrelations-Kanal) oder mit halber Wellenlänge (Quadriertechnik) gemessen wurden. Es spielt auch keine Rolle, ob der Empfänger statisch oder kinematisch betrieben wird.

5.1 Rate of TEC und Störungsindex

Die ionosphärische Refraktion wirkt in Abhängigkeit von der Frequenz der Signale. Die ionosphärische („geometriefreie“) Linearkombination L_f berechnet sich aus der Differenz der Phasenmessungen ϕ_1 auf L_1 und ϕ_2 auf L_2 , skaliert mit ihren Wellenlängen. Daraus kann der entlang des Signalweges integrierte Elektronengehalt TEC_ϕ (Total Electron Content) abgeleitet werden:

$$TEC_\phi = S \cdot ((\phi_1 + N_1) \cdot \lambda_1 - (\phi_2 + N_2) \cdot \lambda_2) \quad [\text{el}/\text{m}^2] \quad (1)$$

mit

$$S = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = 9.52 \cdot 10^{16} \quad [\text{el}/\text{m}^3]. \quad (2)$$

Dabei stellen N_1 und N_2 die unbekannten Phasenmehrdeutigkeiten dar, λ_1 und λ_2 die Wellenlängen der Signale, f_1 und f_2 deren Frequenzen. Die Konstante S dient der Umwandlung von metrischen Einheiten in Einheiten des Elektronengehalts $[\text{el}/\text{m}^2]$. Als Einheit des Elektronengehalts wird oft auch

$$1 \text{ TECU} = 1 \cdot 10^{16} \text{ el}/\text{m}^2$$

verwendet.

Ein Weg, das Problem der Mehrdeutigkeit zu beseitigen, ist die Differenzbildung von TEC_ϕ -Werten zweier Epochen:

$$\begin{aligned} \text{RoT}(t_2, \Delta t_{12}) &= TEC_\phi(t_2) - TEC_\phi(t_1) \\ &= S \cdot ((\phi_1(t_2) - \phi_1(t_1)) \cdot \lambda_1 - (\phi_2(t_2) - \phi_2(t_1)) \cdot \lambda_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Diese abgeleitete Beobachtungsgröße Rate of TEC (RoT) kann ohne großen rechnerischen Aufwand aus Zweifrequenz-Phasenmessungen berechnet werden. Voraussetzung für die Elimination der Mehrdeutigkeiten ist, daß diese in beiden Epochen t_1 und t_2 identisch sind, d. h. daß zwischenzeitlich kein Cycle-Slip aufgetreten ist. Eine Bestimmung von Cycle-Slips ist nicht notwendig, wohl aber ihre Erkennung. Gerade RoT-Zeitreihen sind dazu geeignet, Cycle-Slips in den Daten zu erkennen, da diese meistens als grobe Ausreißer erscheinen und – solange keine hochfrequenten ionosphärischen Störungen vorliegen – leicht erkannt werden können. Sofern ein Cycle-Slip aufgetreten ist, wird RoT zu diesem Zeitpunkt nicht gebildet.

Zur Vereinheitlichung aller RoT-Berechnungen und -Darstellungen werden nur Differenzen über einen Epochenabstand von 60 Sekunden gebildet. 60 Sekunden sind in der Regel das kleinste gemeinsame Vielfache der bei Vermessungsarbeiten gewählten Aufzeichnungsraten. Damit gehen zwar in einzelnen Fällen Informationen über hochfrequente Störungen verloren, trotzdem wird die Interpretierbarkeit der Daten nicht eingeschränkt.

Bei der Bildung der ionosphärischen Linearkombination fallen alle frequenzunabhängigen Fehlereinflüsse (Uhrfehler, troposphärische Refraktion) heraus. Als größte Fehlerquelle verbleibt der frequenzabhängige Anteil der Mehrwegeausbreitung. Dieser kann in extremen Fällen bis zu 0.3 TECU/min erreichen und erscheint in der RoT-Zeitreihe als hochfrequente Störung. Das Meßrauschen der Phasenmessungen pflanzt sich in die RoT-Werte fort. Es erreicht dort aber nur Werte von 0.03–0.07 TECU/min (Wanninger 1992).

Der einzelne RoT-Wert hat kaum Aussagekraft. Erst Zeitreihen der RoT eines gesamten Satellitendurchgangs oder von Teilen davon enthalten Informationen über den absoluten Elektronengehalt der Ionosphäre, über großräumige, regionale und lokale Gradienten in der Elektronenverteilung, kurz über alle extremen ionosphärischen Bedingungen. Bei der Interpretation ist immer der sich verändernde Elevationswinkel des Satelliten und die ionosphärische Satellitenbahn zu berücksichtigen.

Zur Automation der Interpretation ist es sinnvoll, einen Störungsindex zu entwickeln. Erste Vorschläge eines Phasenszintillationsindex für GPS stammen von Beutler u. a. (1988) und Wild u. a. (1990). Er beruht auf Epochendifferenzen des ionosphärischen Signals und dient der Entwicklung stochastischer Modelle der Ionosphäre. Ofstad u. a. (1991) nutzen dagegen das ionosphärische Signal direkt. Dabei müssen dann die Cycle-Slips (näherungsweise) bestimmt werden, was bei starken Szintillationen Probleme bereitet. Der hier vorzustellende Störungsindex I_{GPS} wird aus RoT-Werten berechnet und beruht damit auf Epochendifferenzen. Er liefert

zum einen die Stärke der Störung und trennt gleichzeitig Szintillationen von MSTIDs. Er gibt Auskunft darüber, wie sich ionosphärische Störungen auf GPS-Messungen in der Umgebung der Beobachtungsstation auswirken.

In einem ersten Bearbeitungsschritt werden die langperiodischen Anteile in den RoT-Zeitreihen herausgefiltert. Sie entstehen durch den absoluten Elektronengehalt der Ionosphäre bzw. durch großräumige Gradienten (z. B. durch den Tagesgang der Elektronenverteilung) im Zusammenhang mit der sich verändernden Länge des Signalweges durch die Ionosphäre aufgrund des ansteigenden und fallenden Elevationswinkels. Die Stärke der Störung wird als Wurzel des mittleren Quadrats der verbleibenden Anteile der RoT-Werte berechnet. Eine Klasseneinteilung in Szintillationen und MSTIDs kann anhand des Amplitudenspektrums vorgenommen werden (Tabelle 1).

RoT-Zeitreihen vollständiger Satellitendurchgänge über Mitteleuropa finden sich in Abbildung 3. Sie zeigen Beispiele für ungestörte Ionosphäre, Phasenszintillationen und MSTIDs. Ein ruhiger, langsam ansteigender Verlauf der Kurve deutet auf ungestörte Ionosphäre hin. Bei Szintillationen liegen die zu erwartenden Perioden unter 1 Minute. Da aber nur Minutendifferenzen verarbeitet werden, sind diese im Amplitudenspektrum nicht mehr zu erkennen. Es

Stärke der Störung [TECU/min]	Störungsindex I_{GPS}		
	Szintillationen	MSTIDs	keine Zuordnung möglich
0.00 – 0.09	.	.	.
0.10 – 0.19	1	A	+
0.20 – 0.29	2	B	
0.30 – 0.39	3	C	
0.40 – 0.49	4	D	
etc.	etc.	etc.	

Tabelle 1. Definition des Störungsindex I_{GPS} : Die ionosphärischen Störungen werden entsprechend ihrer Stärke (Wurzel aus dem mittleren Quadrat der kurzperiodischen Anteile von RoT) und entsprechend ihrer Perioden (kleiner als 10 Minuten, 10–30 Minuten) in Klassen eingeteilt. Bei Werten kleiner als 0,10 TECU/min liegen keine Störungen vor.

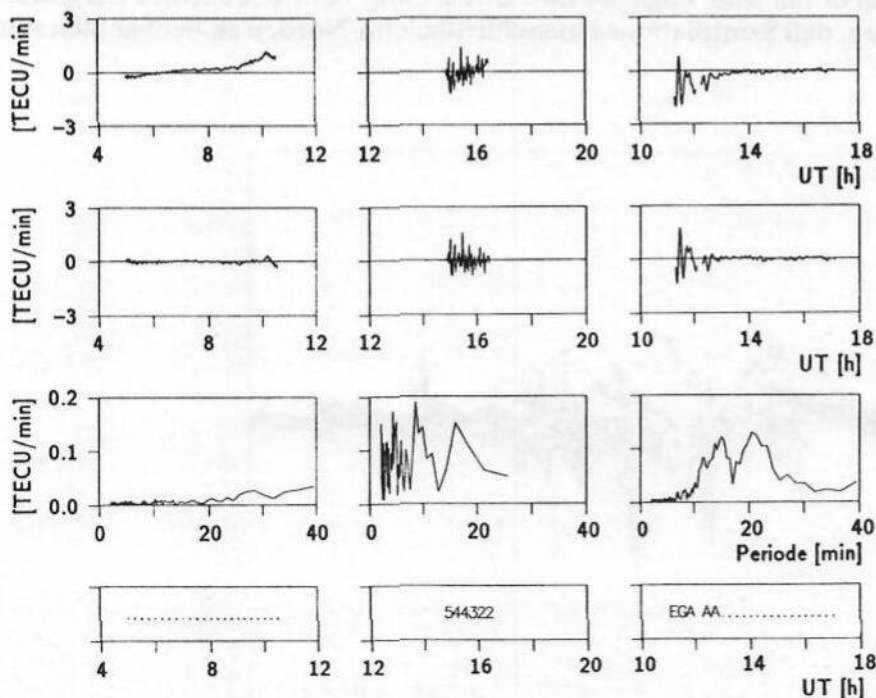


Abb. 3. Linke Spalte: ungestörter Satellitendurchgang; mittlere Spalte: Satellitendurchgang mit Szintillationen; rechte Spalte: in den ersten zwei Stunden des Satellitendurchgangs Störungen durch MSTIDs. Erste Zeile: Rate of TEC; zweite Zeile: Rate of TEC, langperiodische Anteile beseitigt; dritte Zeile: Amplitudenspektrum; vierte Zeile: Störungsindex.

ergibt sich ein Bild starker Amplituden im Bereich kurzer Perioden. Beim Vorhandensein von MSTIDs sind deutliche Maxima bei Perioden von 10 bis 30 Minuten zu erkennen. Eine Zuordnung der auftretenden Störungen ist ab einer bestimmten Stärke und Dauer der Störung ohne Probleme möglich. Sollten in Zukunft weitere ionosphärische Störungen anderer Ursachen und Eigenschaften in mittleren Breiten erkannt werden, muß der hier genannte Kriterienkatalog für eine Klassifizierung der Störungen erweitert werden.

5.2 Beispiel: Ionosphärische Störungen im November und Dezember 1991

Vom 22. November bis 4. Dezember wurden vom Institut für Erdmessung (IfE), Universität Hannover, permanente GPS-Beobachtungen in Hannover durchgeführt. Eine Analyse der Daten des 3. Dezember 1991 soll hier exemplarisch gezeigt werden. Diese Daten wurden gewählt, weil von diesem Tag auch Basislinienmessungen vorliegen.

Abbildung 4 zeigt die RoT-Zeitreihen aller Satelliten in einer Darstellung. Diese eignet sich, um auf einen Blick die Existenz von Störungen zu erkennen. Die RoT-Kurven entfernen sich in den Mittagsstunden weiter von der Nulllinie als in den Nachtstunden. Dies ist auf den stärkeren absoluten vertikalen Elektronengehalt der Ionosphäre in den Tagesstunden zurückzuführen. Das Minimum um 5 UT beträgt etwa 8 TECU und das Maximum um 13 UT etwa 40 TECU. MSTIDs sind an den periodischen Schwingungen einiger Kurven zwischen 8 und 18 UT zu erkennen. Szintillationen erscheinen als starkes Rauschen und sind besonders deutlich zwischen 15 und 20 UT.

Viertelstunden-Werte des Störungsindex für jeden Satelliten sind in Tabelle 2 dargestellt. Die genauere Analyse der RoT-Werte bestätigt, daß MSTIDs nur während der Tagesstunden auftraten und teilweise sehr stark waren (SV18 und SV19). Leichte Szintillationenaktivität ist den ganzen Tag zu beobachten. Das Maximum liegt am Nachmittag.

Dieselben Störungsindizes in räumlicher Zuordnung zeigt Abbildung 5. Die ionosphärischen Punkte wurden mit einer ionosphärischen Mittelhöhe von 400 km berechnet. Für MSTIDs ist aber davon auszugehen, daß diese unterhalb der Mittelhöhe auftreten (*Van Velthoven* 1990). Szintillationen können sowohl unterhalb als auch oberhalb der Mittelhöhe ihren Ursprung haben (*Aarons* 1978). Solange die Höhen der Störungen an diesem Tag aber nicht bekannt sind, kann zwar ihre Richtung, aber nur sehr ungenau ihre Entfernung vom Beobachter dargestellt werden. Deutlich ist zu sehen, daß Szintillationen ausschließlich im Norden zu beobachten sind

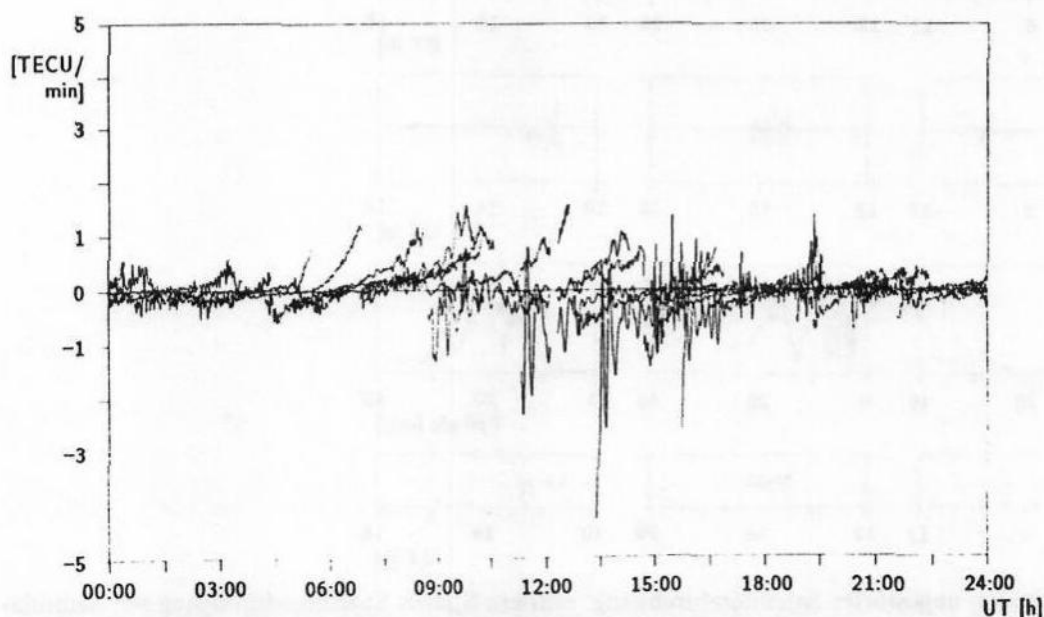


Abb. 4. Rate of TEC aller Satellitendurchgänge, Hannover, 03. 12. 1991, Elevationsgrenze 10°, Messungsunterbrechung zum Überspielen der Daten von 12:06–12:17 UT. Ortszeit = UT + 1 Stunde.

schiedlichen Stärke der Szintillationen konnte aus den vorliegenden Daten nicht erkannt werden. Zum Vergleich: im Aurora Oval erreicht der Index bei Daten der letzten beiden Jahre häufig Werte von 5 bis 9. Die nächtlichen äquatorialen Szintillationen sind noch weit stärker.

6. Auswirkungen auf präzise GPS-Messungen

Bei der Beschreibung der Auswirkungen ionosphärischer Störungen in Mitteleuropa auf präzise GPS-Messungen beschränkten wir uns hier auf kurze Basislinien (kürzer als 10 km). In diesem Entfernungsbereich wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß in mittleren Breiten die ionosphärische Refraktion keinerlei Probleme verursacht. Dementsprechend gelten häufig Einfrequenz-Empfänger als ausreichend. Wenn Zweifrequenz-Phasenmessungen genutzt werden, dann nur im Hinblick auf eine schnellere Mehrdeutigkeitslösung unter der Voraussetzung einer vernachlässigbaren ionosphärischen Refraktion.

Wie stark sich ionosphärische Störungen, wie sie in Einzelstationsmessungen erkannt werden können, auf präzise Basislinienmessungen auswirken, hängt von vielerlei Faktoren ab. Hauptfaktor ist die Basislinienlänge: je länger die Basislinie, um so unterschiedlicher ist der Einfluß der Störungen auf die Messungen an beiden Stationen und um so stärker wirken sie sich auf die Differenz der Messungen aus. Weitere Faktoren sind: die räumliche Ausdehnung, Position und Ausbreitungsbewegung der Störung; das Azimut der Basislinie; Richtungen und Geschwindigkeiten der ionosphärischen Satellitenbahnen.

6.1 Auswirkung auf die Mehrdeutigkeitslösung

Die Auswirkungen von MSTIDs auf die Mehrdeutigkeitslösung soll anhand eines Beispiels einer 7,6 km langen Basislinie gezeigt werden. Sie wurde am 03. 12. 1991 im Raum Bremen gemessen. Abbildung 6 zeigt die Residuen der Doppelten Differenzen (DD) der Signale L_1 und L_2 . Nach Lösung aller Mehrdeutigkeiten wurden die DD aller Satellitenkombinationen gerechnet und in jeweils ein Bild gezeichnet.

Die durch die MSTIDs ausgelösten periodischen Veränderungen des Elektronengehalts zeigen sich deutlich über die gesamte Zeit. Nach 15 UT sind auch die hochfrequenten aber hier schwächeren Störungen durch Szintillationen zu erkennen (vergleiche Tabelle 2). Aufgrund der Signalfrequenzen wirkt sich ionosphärische Refraktion auf L_2 -Phasen immer um den Faktor 1,28 ($= f_1/f_2$) stärker aus als auf L_1 -Phasen. Dieser Faktor gilt für volle Wellenlängen L_2 . Bei Empfängern mit Quadriertechnik verdoppelt sich der Faktor auf 2,56. Deutlich geringere Effekte wirken auf die Linearkombination L_w (Widelane), die auch bei ionosphärisch

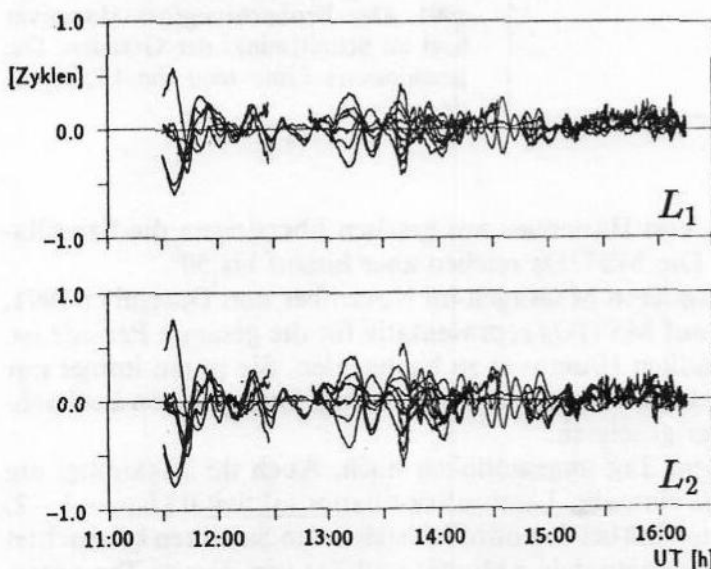


Abb. 6. Phasenresiduen der Doppelten Differenzen für L_1 und L_2 , Basislinienlänge: 7,6 km, Elevationsgrenze 15° , Norddeutschland, 03. 12. 1991.

schwierigen Daten für die Mehrdeutigkeitslösung geeignet ist. Einige andere Linearkombinationen, welche durch die Ionosphäre auch nur wenig beeinflußt werden, haben den Nachteil kurzer Wellenlängen (Wanninger und Jahn 1991). Liegt der systematische Einfluß der Ionosphäre auf die DD eines Signals über wenigen Zehntel Zyklen, ist eine Mehrdeutigkeitslösung mit diesem Signal nicht mehr möglich. Um eine präzise Lösung mit der „ionosphärenfreien“ Linearkombination L_0 erzeugen zu können, müssen die Mehrdeutigkeiten in zwei Signalen gelöst worden sein.

Da die systematischen Störungen durch MSTIDs mit Perioden von 10 bis 30 Minuten um Null schwanken, stellen sie kein Problem bei der Mehrdeutigkeitslösung dar, wenn deutlich länger als eine Periode gemessen wurde. Die Tendenz in den GPS-Anwendungen geht aber hin zu immer kürzeren Meßperioden von nur wenigen Minuten.

Viele Auswertelgorithmen zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung gehen davon aus, daß keine systematischen Effekte durch die Ionosphäre in den DD vorhanden sind. Gerade auf dieser Annahme beruht ihre große Effektivität bei der Auswertung von Zweifrequenz-Beobachtungen (Hatch 1989, Frei 1991). Liegen nun aber ionosphärische Störungen in der hier gezeigten Form vor und wurde nur wenige Minuten beobachtet, ist mit diesen Algorithmen eine Mehrdeutigkeitslösung nicht möglich. Bei Einfrequenz-Daten und weniger als vier ungestörten Satellitensignalen ist eine Mehrdeutigkeitslösung undurchführbar. Bei Zweifrequenz-Daten ist sie bei wesentlich größerem Rechenaufwand (andere Algorithmen) zumindest noch denkbar.

Für die praktische Anwendung von Rapid-Static-Methoden im Entfernungsbereich über 3 km bedeutet dies, daß das Auftreten ionosphärischer Störungen frühzeitig bekannt sein muß, um den Messungsplan darauf abzustimmen (längere Meßdauer, kürzere Entfernungen). Unproblematisch ist die Auswertung kürzerer Basislinien, weil sich dort die lokalen ionosphärischen Gradienten nur sehr viel schwächer auswirken.

6.2 Auswirkungen auf die Koordinatenschätzung mit Einfrequenz-Daten

Um die Auswirkungen der MSTIDs auf die Koordinatenschätzung mit Einfrequenz-Daten zu veranschaulichen, wurde die erste Stunde der 7,6 km langen Basislinie kinematisch ausgewertet, d. h. eine der Stationen wurde als stationär und die andere als bewegt angenommen. In dieser Stunde wurden konstant 4 Satelliten beobachtet (PDOP kleiner 5). Alle Mehrdeutigkeiten sind korrekt gelöst. Abbildung 7 zeigt die Differenz zu den Sollkoordinaten aus der statischen Zweifrequenz-Lösung der Basislinie. Die maximalen Fehler erreichen in der Höhe bis zu 15 cm und in der Lage bis zu 11,5 cm, was 20 bzw. 15 ppm der Basislinienlänge entspricht. Selbst wenn über mehrere Minuten statisch gemessen und ausgewertet wurde, können immer noch Fehler von 15 ppm vorliegen (z. B. 11:33–11:39 UT oder 11:48–11:54 UT). Erst bei deutlich längerer Meßdauer als den MSTID-Perioden mitteln sich deren Effekte heraus.

Problematisch bei Einfrequenz-Messungen ist besonders, daß es bei der Datenauswertung nicht möglich ist, einen systematischen Einfluß der Ionosphäre auf die Koordinatenschätzung zu verifizieren oder zu widerlegen. Man ist auf Zweifrequenz-Daten angewiesen (z. B. von einer Monitorstation), um die Ursachen für auftretende Koordinatenfehler zu erklären. Für präzise

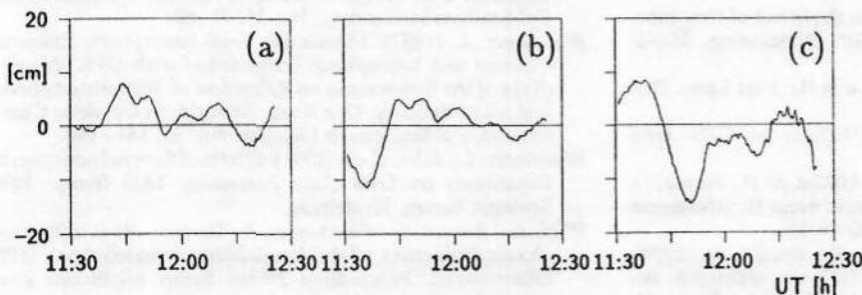


Abb. 7. Koordinatenfehler einer kinematischen Einfrequenz-Auswertung in (a) Nordrichtung, (b) Ostrichtung und (c) in der Höhe; Basislinienlänge 7,6 km, Elevationsgrenze 15°, Norddeutschland, 03. 12. 1991.

GPS-Anwendungen sollten Einfrequenz-Empfänger nur im Entfernungsbereich bis 3 km eingesetzt werden, um auch beim Auftreten von starken MSTIDs die erwarteten Genauigkeiten erreichen zu können.

7. Schlußfolgerungen

Präzise geodätische Messungen in Mitteleuropa können durch extreme ionosphärische Bedingungen, wie z. B. MSTIDs oder Szintillationen, beeinträchtigt werden.

Mit starken MSTIDs muß nach heutigem Erkenntnisstand in den Tagesstunden der Wintermonate der Jahre nach einem Sonnenfleckenmaximum gerechnet werden. Dann ist die schnelle Mehrdeutigkeitslösung mit Algorithmen, die für ungestörte ionosphärische Verhältnisse entwickelt wurden, auch bei Zweifrequenz-Daten nicht möglich. Die Koordinatenfehler für Einfrequenz-Messungen können bei Basislinien von 5 bis 10 km Länge mehr als 15 ppm erreichen.

Mit starken Szintillationen ist nur im Zusammenhang mit sehr schweren magnetischen Stürmen zu rechnen, d. h. seltener als einmal im Jahr. Durch Phasenszintillationen und häufige Meßunterbrechung muß dann jeweils für ein bis zwei Tage mit empfindlichen Einschränkungen in der präzisen Anwendung von GPS gerechnet werden.

Das frühzeitige Erkennen solcher Störungen schon während der Messung bzw. durch Mitteilung von Monitorstationen ermöglichen es dem Anwender, durch Veränderung des Messungsaufbaus zu reagieren bzw. seine Messungen aufzuschieben. GPS-Monitorstationen werden einen wichtigen Beitrag zur Erforschung dieser Störungen leisten. Eine automatisierte Auswertesoftware sollte die Daten auf ionosphärische Störungen hin untersuchen und je nach Ergebnis adäquate Auswertealgorithmen verwenden.

Dank: Mein Dank gilt all den Personen und hinter ihnen stehende Institutionen, die ohne zu zögern und unbürokratisch GPS-Meßdaten zur Verfügung gestellt haben. Herr Dr. W. Augath und Herr M. Strerath vom Niedersächsischen Landesverwaltungsamt, Abt. Landesvermessung, unterstützten diese Untersuchungen mit Basisliniendaten. Darüber hinaus wurden Beobachtungen von drei GPS-Permanentstationen in Europa ausgewertet. Obwohl die Ergebnisse nicht direkt in diese Veröffentlichung einfließen, waren sie von großer Wichtigkeit für das Verständnis der MSTIDs. Es ist zu danken Herrn H. Friedhoff (IfAG) für Daten aus Wettzell und Mr. W. D. Starr (Jet Propulsion Laboratory, Kalifornien) für Daten aus Kootwijk und Madrid.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützte diese Arbeit im Rahmen der Sachbeihilfe Se 313/12-1.

Literatur

- Aarons, J. (1978): Ionospheric Scintillations: An Introduction. AGARD Lecture Series No. 93.
- Beutler, G., Gurtner, W., Hugentobler, U., Rothacher, M., Schildknecht, T., Wild, U. (1988): Ionosphere and GPS Processing Techniques. Paper presented at the Chapman Conference on the Use of GPS for Geodynamics, Ft. Lauderdale.
- Frei, E. (1991): Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 44, Schweizerische Geodätische Kommission.
- Georgiadou, Y., Kleusberg, A. (1988): On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning. Manuscripta Geodaetica 13, 1–8.
- Hatch, R. (1989): Ambiguity Resolution in the Fast Lane. Proceedings of ION GPS-89, 45–52.
- Klobuchar, J. A. (1991): Ionospheric Effects on GPS. GPS World, April 1991, 48–51.
- Ofstad, A. E., Berggraf, Ø., Odden, V., Mildal, K. D., Hoppe, U. P., Hansen, T. L. (1991): GPS in Arctic Areas II. Norwegian Hydrographic Service, Report GEO 91-10.
- Putz, E., Leitinger, R., Hartmann, G. K., Bencze, P. (1990): Simultane Beobachtungen von TID's an mehreren Beobachtungsstationen. Kleinheubacher Berichte, Band 33, 113–119, Deutsche Bundespost Telekom.
- Seeber, G. (1989): Satellitengeodäsie. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Van Velthoven, P. F. J. (1990): Medium Scale Irregularities in the Ionospheric Electron Content. Doktorarbeit, Technische Universiteit Eindhoven.
- Van Velthoven, P. F. J. (1992): Climatology of Phase Errors due to Ionospheric Acoustic-Gravity Waves Observed by the Westerbork Radio Synthesis Telescope. Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Den Haag, Netherlands Geodetic Commission, Publications in Geodesy, No. 36, 77–80.
- Wanninger, L. (1992): Monitoring Total Ionospheric Electron Content and Ionospheric Irregularities with GPS. Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Den Haag, Netherlands Geodetic Commission, Publications in Geodesy, No. 36, 141–146.
- Wanninger, L., Jahn, C.-H. (1991): Effects of Severe Ionospheric Conditions on GPS Data Processing. IAG Symp. 109, Springer Verlag, Heidelberg.
- Wild, U., Beutler, G., Fankhauser, S., Gurtner, W. (1990): Stochastic Properties of the Ionosphere estimated from GPS Observations. Proceedings 2nd Int. Symp. on Precise Pos. with GPS, Ottawa, 411–428.