

# Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa

Lambert Wanninger

Institut für Erdmessung  
Universität Hannover  
Nienburger Str. 6  
30167 Hannover

## Einleitung

Ein Blick ins Kleingedruckte von Werbeprospekten für geodätische GPS-Empfänger und GPS-Auswertesysteme macht deutlich, daß die Ionosphäre einer der genauigkeitsbeschränkenden Einflußfaktoren bei der präzisen relativen Positionierung darstellt (Abb. 1). Trotzdem waren solche Hinweise bis ungefähr 1990 in den Prospekten nicht aufgetaucht. Denn die Erfahrungen mit Daten aus den USA und aus Mitteleuropa aus der zweiten Hälfte der 80er Jahre deuteten darauf hin, daß bei Entfernungen bis 20 km und Beobachtungszeiten von einer bis vielen Stunden die Ionosphäre bei Zweifrequenz-Messungen keinen störenden Einfluß hätte und bei Einfrequenz-Messungen selten Koordinatenfehler von mehr als 1 ppm der Basislinienlänge verursacht.

Diese Erfahrungen stammten aus einer Zeit geringer Sonnenaktivität. Diese folgt einem ungefähr elfjährigen Zyklus (Abb. 3) und das ionosphärische Verhalten steht mit ihr im engen Zusammenhang. Der absolute Elektronengehalt der Ionosphäre und die Stärke und Anzahl von ionosphärischen Störungen erreichen ihr Maximum in den Jahren eines Sonnenaktivitätsmaximums. Erst als zwischen 1989 und 1992 das erste Sonnenaktivitätsmaximum im Zeitalter des präzisen relativen GPS auftrat, konnte die genauigkeitsbeschränkende Wirkung der Ionosphäre vollständig erkannt werden.

Einige ionosphärische Störungen mittlerer Größe spielen bei langer Beobachtungsdauer kaum eine Rolle, da ihre Wirkung auf die relative Positionierung periodischen Charakter hat und sich herausmittelt, wenn die Beobachtungsdauer deutlich länger ist als die Perioden der Störung. Erst mit der Entwicklung und Einführung von

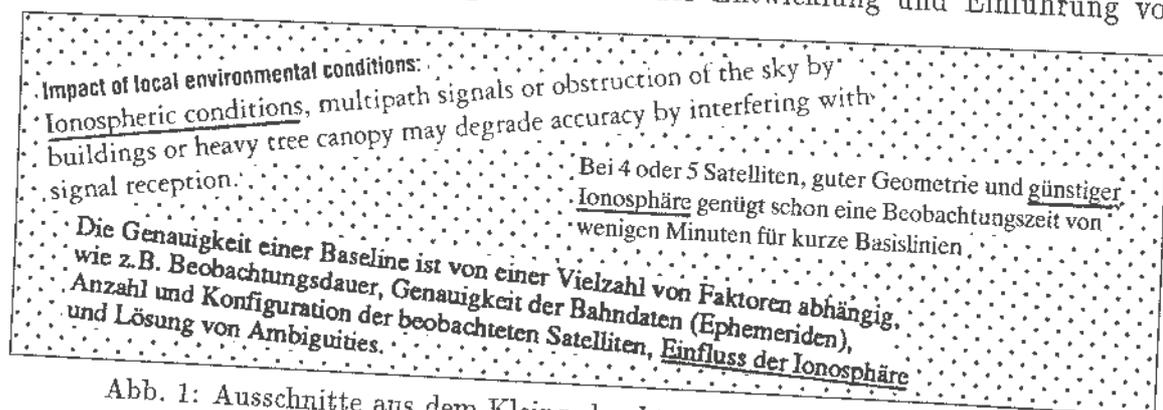


Abb. 1: Ausschnitte aus dem Kleingedruckten von GPS-Werbeprospekten.

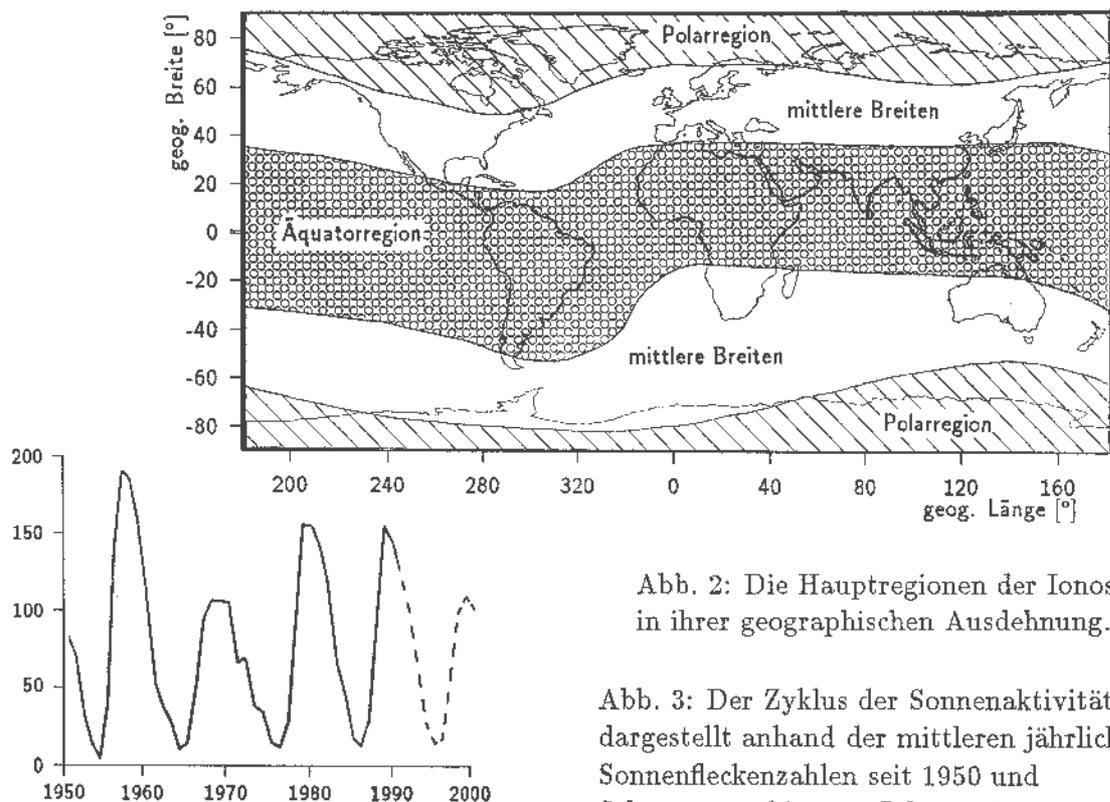


Abb. 2: Die Hauptregionen der Ionosphäre in ihrer geographischen Ausdehnung.

Abb. 3: Der Zyklus der Sonnenaktivität dargestellt anhand der mittleren jährlichen Sonnenfleckenzahlen seit 1950 und Schätzungen bis zum Jahr 2000.

„Rapid-Static“ und präzisen kinematischen Beobachtungsverfahren wurde ihr negativer Einfluß auf die Mehrdeutigkeitslösung erkannt.

Weiterhin spielt die Breitenabhängigkeit der ionosphärischen Eigenschaften eine große Rolle (Abb. 2). Die Gebiete, in denen die relative GPS-Positionierung entwickelt und erprobt wurde, also in den USA und in Mitteleuropa, gehören zu den mittleren Breiten und damit zu den ionosphärisch gemäßigten Breiten der Erde. In der Äquatorregion (bis zu  $\pm 30^\circ$  magnetischer Breite) dagegen findet man das globale Maximum des Elektronengehalts und auch die stärksten Störungen (Wanninger 1993b). Hier können kleinräumige Störungen eine solche Stärke annehmen, daß trans-ionosphärischer Funkverkehr im GHz-Bereich zeitweilig unmöglich werden kann und somit auch die GPS-Positionierung nicht ununterbrochen zur Verfügung steht. In den Polarregionen (ab  $\pm 65^\circ$  magnetischer Breite) ist der Elektronengehalt dagegen sehr gering, aber die Elektronenverteilung oft sehr inhomogen, was die relative Positionierung beeinträchtigen kann.

Aber auch in den mittleren Breiten kann die Ionosphäre die präzise relative Positionierung erschweren. Die folgende Darstellung wird sich auf diese Region beschränken. Von den vielen Anwendungsmöglichkeiten des GPS soll hier vornehmlich auf die präzise relative Positionierung mit Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten im Entfernungsbereich bis 20 km eingegangen werden. Eine umfassende Darstellung der Einflüsse der Ionosphäre auf GPS findet man in Wanninger 1994a.

Aus den Hinweisen der Herstellerprospekte, daß die Ionosphäre genauigkeitsbeschränkenden Einfluß auf die relative Positionierung haben kann, ergeben sich für den Nutzer einige Fragen: Welche ionosphärischen Eigenschaften beeinflussen die präzise relative Positionierung? In welcher Form wird sie beeinflusst? Welche GPS-Meßverfahren sind davon besonders betroffen? Wann und wo treten diese Beeinträchtigungen

auf? Und wie können sie frühzeitig erkannt und vermieden werden? Dieser Beitrag versucht, diese Fragen zu beantworten.

## Ionosphärische Refraktion

Die Ionosphäre ist definiert als der Bereich der oberen Atmosphäre, in dem ausreichende Ionisierung bestehen kann, um elektromagnetische Wellen zu beeinflussen. Somit liegt die Ionosphäre zwischen 50 km und mehreren Erdradien. Die maximale Elektronendichte wird in einer Höhe von 250 – 500 km erreicht.

Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium, d.h. der Brechungsindex ist frequenzabhängig. Für ein monochromatisches Signal mit einer Frequenz  $f$  von über 100 MHz gilt der Phasenbrechungsindex:

$$n_{ph} = 1 - 40,3 \cdot \frac{N_e}{f^2} \pm \dots \quad (1)$$

Sein Term erster Ordnung ist nur von einer Eigenschaft der Ionosphäre abhängig und zwar von der Elektronendichte  $N_e$ . Die Terme höherer Ordnung, die bei dieser Betrachtung außer acht gelassen werden können, werden zusätzlich vom Erdmagnetfeld beeinflusst. Je höher die Frequenz des Signals, um so geringer der ionosphärische Einfluß: so liegt der Brechungsindex des GPS- $L_1$ -Signals näher bei 1 als der für das  $L_2$ -Signal. Außerdem kann aus simultanen Zweifrequenz-Messungen eine Korrektur der ionosphärischen Laufzeitfehler 1. Ordnung berechnet werden.

Für inhomogene Medien gilt ein Brechungsindex nicht für den gesamten Ausbreitungsweg, sondern er ist eine Funktion des Weges. Ein durch den Term erster Ordnung verursachter Entfernungsfehler  $\delta R_I$  ist proportional zur integrierten Elektronendichte entlang des Signalweges Satellit  $S$  - Empfänger  $R$ :

$$\delta R_I = -\frac{40,3}{f^2} \int_R^S N_e(s) ds = -\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC. \quad (2)$$

Die integrierte Elektronendichte entspricht dem Elektronengehalt TEC („Total Electron Content“). Dieser ist definiert als die Anzahl der freien Elektronen in einer Säule, die eine Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> hat und den Signalweg umschließt. Er wird in Einheiten von Elektronen pro m<sup>2</sup> (also m<sup>-2</sup>) angegeben. Satellitensignale, die unter einem niedrigen Elevationswinkel empfangen werden, erfahren aufgrund ihres längeren Weges durch die Ionosphäre einen stärkeren Refraktionseinfluß als Signale aus Zenitrichtung: bei 15° Elevationswinkel ist er ungefähr 2,5 mal so groß wie bei vertikal einfallenden Signalen.

## Einfluß der ionosphärischen Refraktion auf die relative Positionierung

Die ionosphärische Refraktion wirkt auf die relative Positionierung mit GPS auf zweifache Weise. Zum einen verursacht sie bei Einfrequenz-Messungen Koordinatenfehler.

Signal	n	m	$\lambda$ [cm]	$V_I$	$V_I/\lambda$ [1/m]
$L_1$	1	0	19,0	0,779	4,1
$L_2$	0	1	24,2	1,283	5,3
$L_W$	1	-1	86,2	-1,000	-1,2
$L_N$	1	1	10,7	1,000	9,3
$L_{43}$	4	-3	11,4	0,070	0,6
$L_{54}$	5	-4	10,1	-0,055	-0,5
$L_{97}$	9	-7	5,4	0,004	0,1
$L_0$	77	-60	0,6	0,000	0,0

Tabelle 1: Die wichtigsten ganzzahligen Linearkombinationen der Trägerphasen.

Zum anderen kann sie die Cycle-Slip-Bestimmung und die Mehrdeutigkeitslösung in Doppelten Differenzen erschweren oder in manchen Anwendungsfällen sogar verhindern.

Der ionosphärische Einfluß hängt nicht nur von den ionosphärischen Bedingungen ab, wie sie in den nächsten Abschnitten beschrieben werden, sondern auch von der Basislinienlänge und den verwendeten Signalen. Je länger die Basislinie, um so unterschiedlicher sind die ionosphärischen Verhältnisse, die auf die Signale eines Satelliten auf ihren Wegen zu den Empfangsantennen Einfluß nehmen, um so stärker ist der ionosphärische Einfluß auf die relative Positionierung.

Den Einfluß der Ionosphäre auf die Koordinatenlösung gibt der ionosphärische Verstärkungsfaktor  $V_I$  an (*Wübbena 1991*). Er ist in Tabelle 1 für die wichtigsten Linearkombinationen der GPS Trägerphasen, die ganzzahlige Koeffizienten  $n$  und  $m$  besitzen, gegeben.  $V_I$  ist so skaliert, daß er für die Widelane  $L_W$  und die Narrowlane  $L_N$  den Betrag 1 annimmt. Die Vorzeichen sind dabei aber unterschiedlich. Liegen nur Einfrequenz-Messungen vor, werden die Koordinatenergebnisse entsprechend einem  $V_I$  von 0,779 beeinflusst. Koordinaten, die nur mit den Messungen der zweiten Frequenz berechnet würden, wären stärker beeinflusst ( $V_I = 1,283$ ), da  $L_2$  eine niedrigere Frequenz hat. Bei Zweifrequenz-Messungen kann der ionosphärische Einfluß erster Ordnung vollständig erfaßt und eliminiert werden. Für die Koordinatenberechnung kann dann die ionosphären-freie Linearkombination  $L_0$  ( $V_I = 0,000$ ) verwendet werden.

Der Einfluß auf die Cycle-Slip-Bestimmung und Mehrdeutigkeitslösung ergibt sich, wenn man den Verstärkungsfaktor  $V_I$  durch die Wellenlänge  $\lambda$  des jeweiligen Signals teilt (*Wanninger 1994a*). Während bei Einfrequenz-Messungen mit einem  $V_I/\lambda$  von 4.1 gearbeitet werden muß, stehen bei Zweifrequenz-Messungen auch andere Signale zur Verfügung, die geringer beeinflusst werden (mit einem  $V_I/\lambda$  um oder unter 1).

Bei Zweifrequenz-Messungen und einer Koordinatenlösung mit  $L_0$ , ergibt sich das Problem, daß mit  $L_0$  Cycle-Slips- und Mehrdeutigkeiten nicht direkt gelöst werden können, weil dessen Wellenlänge nur 0,6 cm beträgt. Man behilft sich damit, aus den bestimmten Mehrdeutigkeiten zweier beliebiger anderer Linearkombinatio-

nen die Mehrdeutigkeiten von  $L_0$  zu berechnen. Auch wenn starke ionosphärische Einflüsse eine Mehrdeutigkeitslösung mit den Originalsignalen nicht mehr zulassen, ist sie mit der Widelane meist noch möglich. Als zweites Signal muß dann auf eins mit geringem ionosphärischen Einfluß zurückgegriffen werden ( $L_{43}$ ,  $L_{54}$ ,  $L_{97}$ ), die alle den Nachteil kurzer Wellenlängen von 11 cm und kürzer haben, was die Bestimmung ihrer Mehrdeutigkeiten erschwert. Also gilt auch bei der Verwendung von Zweifrequenz-Phasendaten, daß die Cycle-Slip- und Mehrdeutigkeitsbestimmung durch starke ionosphärische Einflüsse erschwert oder sogar verhindert werden kann. Andererseits ist sie aber auch noch in vielen Fällen möglich, in denen eine Einfrequenz-Mehrdeutigkeitslösung undurchführbar ist.

## Die störungsfreie Ionosphäre

Es lassen sich zwei Eigenschaften der störungsfreien Ionosphäre unterscheiden, die auf die Koordinatenlösung und Mehrdeutigkeitsbestimmung Einfluß haben: der absolute Elektronengehalt und großräumige horizontale Gradienten des Elektronengehalts.

Der absolute, konstante vertikale Elektronengehalt der Ionosphäre führt zu systematischen Fehlern in der Differenz der Messungen zwischen Stationen, weil die Station, die sich näher zum Satelliten befindet, das Signal unter einem größeren Elevationswinkel empfängt als die weiter entfernte Station (Abb. 4). Ein größerer Elevationswinkel ist gleichbedeutend mit einem kürzeren Weg des Signals durch die Ionosphäre und damit geringerer Refraktion. Der entstehende Fehler ist in erster Näherung proportional zum vertikalen Elektronengehalt der Ionosphäre und auch zur Basislinienlänge. Weitere Einflußfaktoren sind der Elevationswinkel des Satelliten und der Winkel zwischen der Richtung zum Satelliten und der Basislinienrichtung (*Wanninger 1994a*).

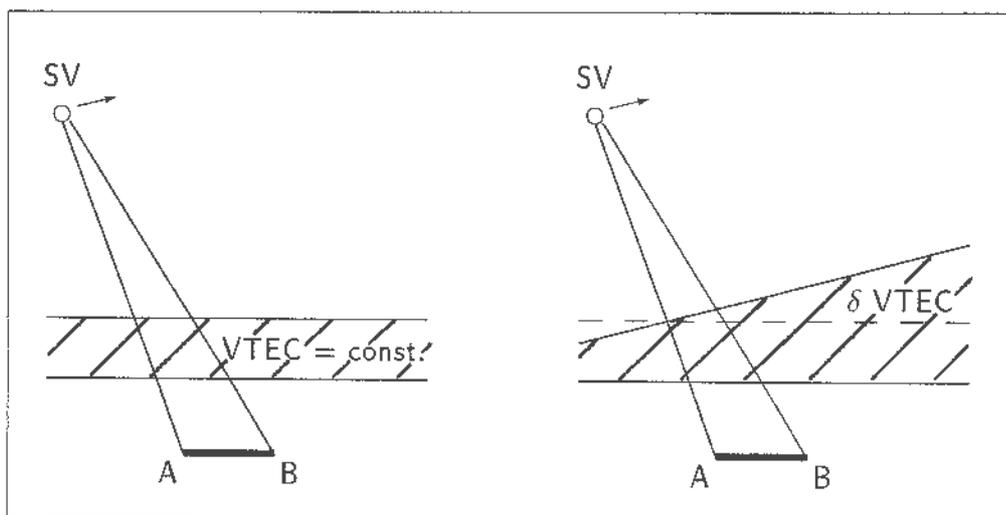


Abb. 4: Schematische Darstellung des ionosphärischen Einflusses auf die relative Positionierung aufgrund des absoluten Elektronengehaltes (links) und großräumiger, horizontaler Gradienten (rechts).

Region	Ionosphärische Verhältnisse	$VTEC$ $10^{16} m^{-2}$	$\Delta\delta R_{I,abs}$ $cm$	$\delta VTEC$ $\frac{10^{16} m^{-2}}{100 km}$	$\Delta\delta R_{I,rel}$ $cm$
mittlere Breiten:	durchschnittlicher Wert	20	1,0	0,2	0,6
	durchschnittliches Tagesmaximum	30	1,5	0,4	1,2
	extreme Verhältnisse	80	4	2	6
Äquator- region:	globales Maximum	200	10	30	90

Tabelle 2: Beispielswerte für die Differenzen der ionosphärischen Entfernungsfehler zweier Stationen in  $L_1$ : 10 km Basislinie, 30° Elevationswinkel, Satellit steht in Richtung der Basislinie, Gradient  $\delta VTEC$  parallel zur Basislinie.

Den stärksten vertikalen Elektronengehalt findet man im Bereich der äquatorialen Anomalie ( $\pm(10^\circ - 20^\circ)$  magnetischer Breite) zu Zeiten des Sonnenaktivitätsmaximums. Er kann dann in Einzelfällen bis zu  $200 \cdot 10^{16} m^{-2}$  annehmen. In den mittleren Breiten liegt er im Durchschnitt bei ungefähr  $20 \cdot 10^{16} m^{-2}$ , wobei Sonnenaktivitätszyklus, jahreszeitliche und tageszeitliche Effekte starke Schwankungen verursachen. Beispielswerte für die Auswirkungen des absoluten Elektronengehalts auf die Differenz zwischen Stationen sind in Tabelle 2 gegeben. In den mittleren Breiten übersteigen die Werte die Grenze von 1 bis 2 cm bei 10 km Basislinienlänge kaum und sind somit bei der Mehrdeutigkeitslösung ohne Bedeutung. Modellrechnungen zeigen, daß dieser absolute Ionosphärenfehler bei  $L_1$ -Phasenmessungen eine Basislinienverkürzung von  $0,6 - 0,7 ppm/10 \cdot 10^{16} m^{-2}$  verursacht (Santerre 1991). Für Einfrequenz-Nutzer muß also in Jahren des Sonnenaktivitätsminimums mit Fehlern um 1 ppm und in den Jahren des Maximums mit Fehlern von 2 - 3 ppm gerechnet werden.

**Großräumige horizontale Gradienten** in der Ionosphäre entstehen zum einen durch den Tagesgang des Elektronengehalts (OW-Gradienten). Die stärksten Gradienten sind aber NS-Gradienten, die durch die Breitenabhängigkeit des Elektronengehalts verursacht werden. So wurden NS-Gradienten von bis zu  $30 \cdot 10^{16} m^{-2}/100 km$  im Bereich der äquatorialen Anomalie mit GPS beobachtet (Wanninger 1994a). Dies verursacht bei einer 10 km Basislinie in NS-Richtung (30° Elevationswinkel,  $L_1$ ) einen relativen Ionosphärenfehler von 90 cm, also mehr als 4  $L_1$ -Zyklen (Tabelle 2). Dies entspricht einem Einfluß auf die Widelane von mehr als einem Zyklus. Eine korrekte Mehrdeutigkeitsfestsetzung ist hier also mit Einfrequenz-Daten ausgeschlossen und auch mit Zweifrequenz-Daten kaum möglich.

Die maximalen Gradienten in den mittleren Breiten liegen aber um eine Größenordnung niedriger, die durchschnittlichen Gradienten sogar um mehr als zwei Größenordnungen. Der relative Ionosphärenfehler beträgt hier im allgemeinen weniger als 1 cm und in extremen Fällen um einige cm bei 10 km Basislinienlänge (Tab. 2). Die Mehrdeutigkeitslösung wird bei kurzen Basislinien in den mittleren Breiten nicht durch großräumige Gradienten beeinträchtigt. Die Einfrequenz-Koordinatenfehler lie-

gen in der Größenordnung von 1 ppm und in Ausnahmefällen bei sehr starken Gradienten bis maximal wenigen ppm.

## Ionosphärische Störungen

Ionosphärische Störungen sind lokale oder regionale Inhomogenitäten in der Elektronenverteilung der Ionosphäre (Abb. 5). Für die relative Positionierung in den mittleren Breiten haben dabei „Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances“ (Wandernde Störungen mittlerer Größe) die größte Bedeutung. Global betrachtet schränken dagegen ionosphärische Szintillationen, die durch kleinräumige Störungen entstehen, die Nutzung von GPS am meisten ein.

**Wandernde ionosphärische Störungen** (Travelling Ionospheric Disturbances, TIDs) sind relativ großräumige, wellenförmige Strukturen in der Elektronenverteilung der Ionosphäre. TIDs mittlerer Größe (MSTIDs) haben Perioden von 12 bis etwa 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.

Nach *van Velthoven 1990* wurden in Europa 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. Sonnenaktivitätszyklus) 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 sie 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.

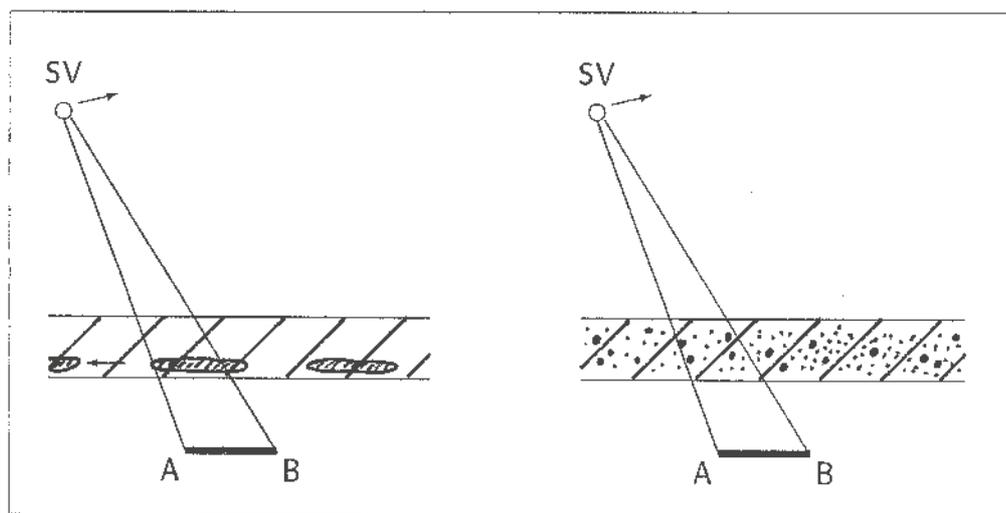


Abb. 5: Schematische Darstellung des Einflusses ionosphärischer Störungen auf die relative Positionierung: wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe (MSTIDs, links) und kleinräumigen Störungen (rechts).

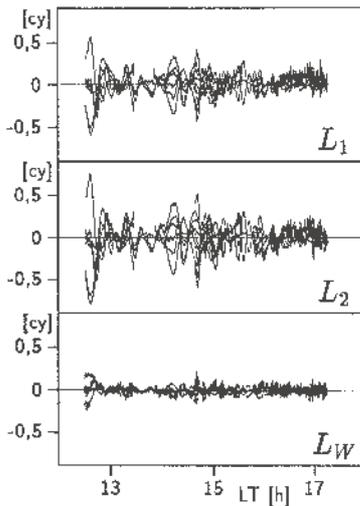
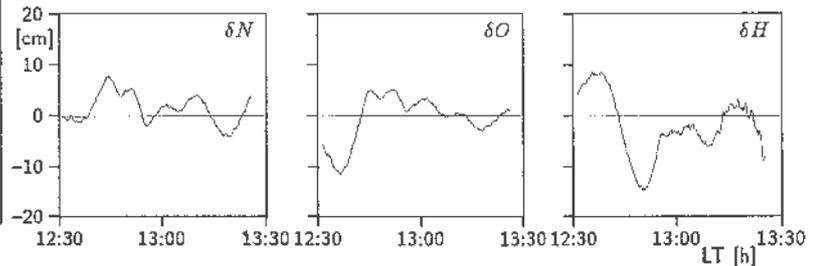


Abb. 6: Einfluß von MSTIDs:  
Phasenresiduen  $L_1$  und  $L_2$   
einer 7,6 km langen Basislinie.

Abb. 7: Einfluß von MSTIDs: Koordinatenfehler einer  
Einfrequenz-Auswertung einer 7,6 km langen Basislinie.



Diese Beschreibung entspricht den Erfahrungen des Autors mit GPS-Daten der letzten Jahre. In den Jahren nach dem Maximum des 22. Sonnenaktivitätszyklus (1991-1993) konnten MSTIDs insbesondere in den Wintermonaten und ausschließlich während der Tagesstunden mit GPS beobachtet werden. Eine systematische Analyse auf der Basis von permanenten GPS-Beobachtungen steht aber noch aus.

Die Auswirkungen von MSTIDs auf die Mehrdeutigkeitslösung sollen 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 der Signale  $L_1$  und  $L_2$ . Nach Lösung aller Mehrdeutigkeiten wurden sie für alle Satellitenkombinationen gerechnet und in jeweils ein Bild gezeichnet. Die durch die MSTIDs ausgelösten periodischen Veränderungen des Elektronengehalts zeigen sich deutlich über die gesamte Zeit. Der ionosphärische Einfluß auf Doppelte Differenzen erreicht zeitweilig über 0,5 Zyklen (also etwa 10 cm auf  $L_1$ ).

Da diese 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 der GPS-Anwendung 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 Doppelten Differenzen vorhanden sind. Gerade auf dieser Annahme beruht ihre große Effektivität bei der Auswertung von Zweifrequenz-Beobachtungen. 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.

Um die Auswirkungen der MSTIDs auf die Koordinatenschätzung mit Ein-

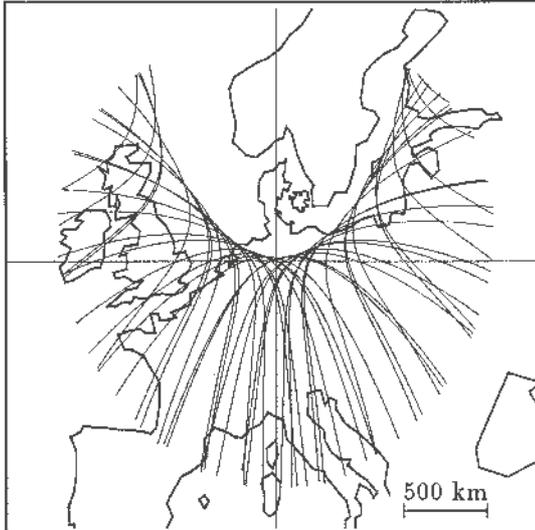


Abb. 8:  
 Ionosphärische Satellitenbahnen:  
 Schnittpunkte der Satellitensignale  
 mit einer „Single-Layer“-Ionosphäre  
 (Höhe 400 km) für Empfangsort  
 Hannover im Schnittpunkt der  
 Geraden, Elevationsmaske 10°.

frequenz-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 Differenzen 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. 12:33-12:39 UT oder 12:48-12:54 UT). Erst bei deutlich längerer Meßdauer als den MSTID-Perioden mitteln sich deren Effekte heraus.

**Kleinräumige Störungen**, deren Größe von wenigen Metern bis zu wenigen Kilometern reichen, verändern das sie durchdringende Signal. Dabei treten sowohl Beugungs- (Diffraktion) als auch Brechungserscheinungen (Refraktion) auf, die Szintillationen erzeugen, d.h. Veränderungen von u.a. Signalstärke (Amplitude) und Phase. Dementsprechend wird zwischen Amplitudenszintillationen und Phasenszintillationen unterschieden. Je höher die Frequenz des Signals, um so geringer sind die Auswirkungen der Störungen.

Die stärksten Szintillationen werden im Bereich der äquatorialen Anomalien beobachtet, wobei ihr Auftreten deutlichen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt und auf einen Zeitraum von ungefähr einer Stunde nach Sonnenuntergang bis in die frühen Morgenstunden beschränkt ist. Sie können so stark sein, daß GPS-Empfänger die Signale nicht mehr mit ausreichender Signalstärke empfangen und so Messungsunterbrechungen auftreten (*Wanninger 1994a*).

Die in den Polarregionen auftretenden Szintillationen sind deutlich schwächer als die äquatorialen, wobei die Bereiche der Aurora Ovale ( $\pm(65^\circ - 70^\circ)$  magnetischer Breite) meist mehr betroffen sind als die Regionen an den Polen selbst. Ihr Auftreten ist nicht auf bestimmte Jahres- oder Tageszeiten beschränkt. Im Bereich der Aurora Ovale ist aber ein ausgeprägtes Maximum um Mitternacht zu erkennen. Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zum elfjährigen Zyklus der Sonnenaktivität. Die Stärke ihres Auftretens ist insbesondere von magnetischen Stürmen abhängig. Außerdem gilt, daß je stärker die magnetische Aktivität, um so weiter dehnen sich

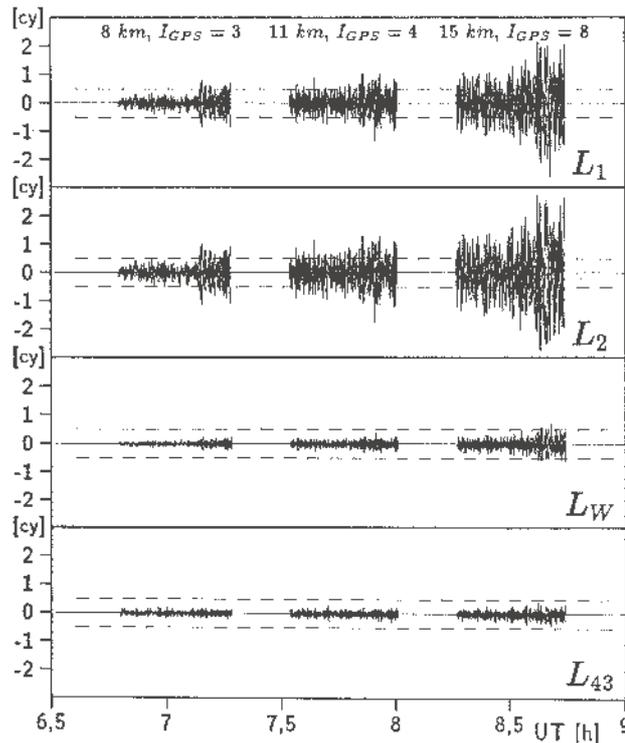


Abb. 9:  
 Tripel-Differenz-Phasen-  
 residuen dreier Basislinien  
 für ausgewählte Signale,  
 Epochenabstand 15 Sekunden,  
 Antarktis, die gestrichelten  
 Linien zeigen die  $\pm 0,5$   
 Zyklen-Grenzen.

die Aurora Ovale äquatorwärts aus. Bei sehr schweren magnetischen Stürmen können die kleinräumigen Störungen bis tief in die mittleren Breiten vordringen. Sie 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.

Bei geringer bis mäßiger magnetischer Aktivität ist für GPS-Messungen in Mitteleuropa die Südgrenze der Szintillationen des Aurora Ovals von Bedeutung. Sie kann sich nachts bis über Südkandinavien nach Süden verschieben. Während des Tages liegt die Grenze deutlich nördlicher. Betrachtet man die ionosphärischen Satellitenbahnen in Abbildung 8, so fällt auf, daß sich aufgrund der Inklination der GPS-Orbits von  $55^\circ$  direkt nördlich der Meßstation niemals Satelliten befinden. Ionosphärische Störungen in diesem Bereich sind für die Messungen ohne jede Bedeutung. Nur noch Endstücke der Satellitenbahnen in Nordwest- und Nordostrichtung von der Beobachtungsstation können dann durch Phasenszintillationen gestört werden. Aufgrund der Breitenabhängigkeit gilt auch, daß in Süddeutschland gemessene GPS-Daten seltener und schwächer von diesen kleinräumigen Störungen betroffen sind als Beobachtungen aus Norddeutschland.

Phasenszintillationen können bei der Cycle-Slip-Bestimmung zu Problemen führen. Verändert sich der Einfluß der ionosphärischen Refraktion auf Doppelte Differenzen zwischen zwei Meßepochen um mehr als 0,5 Zyklen eines Signals, kann ein Cycle-Slip mit diesem Signal nicht mehr korrekt bestimmt werden. Da Phasenszintillationen in mittleren Breiten selten und meist nachts auftreten, ist es dem Autor bisher nicht gelungen, ein Beispiel aus dieser Region zu erhalten. Deswegen muß auf Daten aus der Antarktis zurückgegriffen werden, um diesen Effekt zu verdeutlichen.

Die in Abbildung 9 gezeigten Epochendifferenzen von Doppelten Differenz (Tripel-Differenzen) für unterschiedliche Basislinienlängen und Phasenszintillationsstärken

(beschrieben durch den Störungsindex  $I_{GPS}$ , siehe nächsten Abschnitt) übersteigen in  $L_1$  und  $L_2$  und in Einzelfällen auch in der Widelane die 0,5 Zyklen-Grenze. Bei Einfrequenz-Messungen ist so nicht immer eine Cycle-Slip-Bestimmung möglich. Bei Zweifrequenz-Messungen kann auf Linearkombinationen ausgewichen werden, die weniger durch die Ionosphäre beeinflusst sind und – zumindest solange die Tripel-Differenz-Residuen der Widelane die 0,5 Zyklen-Grenze nicht übersteigen – mit ihnen sicher bestimmt werden. Das Problem der erschwerten Cycle-Slip-Bestimmung wäre in diesem Beispiel nicht aufgetreten, wenn mit einer deutlich höheren Aufzeichnungsrate (1 oder wenige Sekunden) gemessen worden wäre. Dies setzt aber voraus, daß mit Phasenzintillationen gerechnet wird bzw. diese aktuell mit GPS beobachtet wurden.

## Beobachtung ionosphärischer Störungen

Wie aus den letzten Abschnitten deutlich wurde, werden in den mittleren Breiten die hauptsächlichsten Auswirkungen der Ionosphäre auf die relative Positionierung im Entfernungsbereich bis 20 km durch ionosphärische Störungen verursacht. In diesem Abschnitt wird ein Weg aufgezeigt, der die Erkennung dieser Störungen schon in den Daten einer einzelnen Station ermöglicht.

Aus der Differenz simultaner Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen ergibt sich der ionosphärische Elektronengehalt entlang des Signalweges TEC (Total Electron Content) nach (*Wanninger 1994a*):

$$S \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) = TEC + C + \epsilon, \quad (3)$$

wobei der Skalierungsfaktor  $S$  zur Umrechnung von metrischen Einheiten in Einheiten von Elektronen pro  $m^2$  dient:

$$S = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = 9,52 \cdot 10^{16} m^{-3}. \quad (4)$$

Dabei beziehen sich die Indizes 1 und 2 auf die beiden GPS-Signale,  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  [m] stellen die Phasenmessungen dar,  $f_1$  und  $f_2$  die Frequenzen. Die Kalibrierungskonstante  $C$  faßt die Phasenmehrdeutigkeiten und die instrumentellen Phasenverzögerungsdifferenzen zusammen. Der  $\epsilon$ -Term steht für die weiteren Fehleranteile, die neben den zufälligen Meßfehlern Mehrwegeausbreitungseinflüsse und Phasenzentrumsdifferenzen umfassen.

Ein Weg, die Kalibrierungskonstante  $C$  zu eliminieren, ist die Differenzbildung zwischen Epochen  $t_1$  und  $t_2$ :

$$S \cdot \left( (\Phi_1 - \Phi_2)_{t_2} - (\Phi_1 - \Phi_2)_{t_1} \right) = \delta TEC + \delta \epsilon. \quad (5)$$

Zur Vereinheitlichung aller Berechnungen und Darstellungen sollen hier nur Epochendifferenzen über 1 Minute gebildet werden. Dieser Epochenabstand ist in der Regel das kleinste gemeinsame Vielfache der bei Vermessungsarbeiten gewählten Aufzeichnungsrate. Damit gehen zwar in Einzelfällen Informationen über hochfrequente

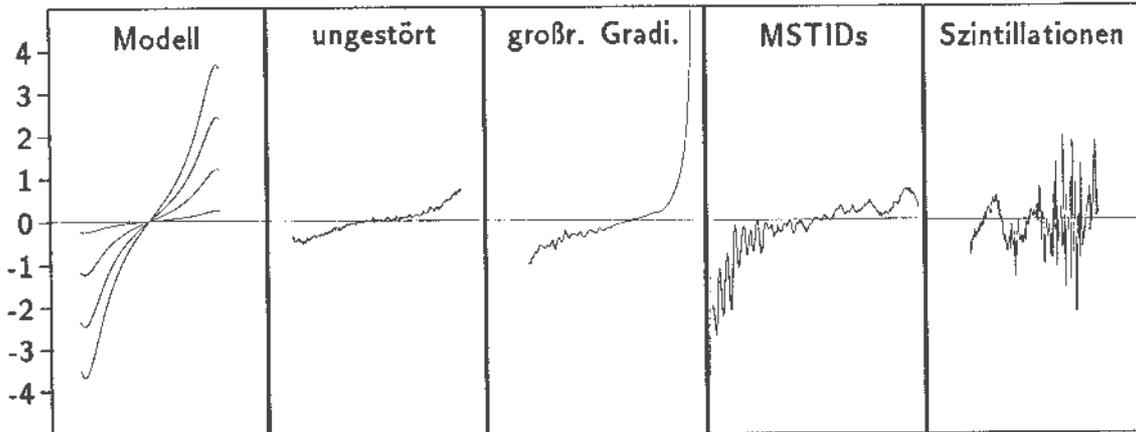


Abb. 10: RoT-Kurven vollständiger Satellitendurchgänge (in  $10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ).

Störungen verloren, die Interpretierbarkeit der Daten wird aber trotzdem nicht eingeschränkt. Diese Beobachtungsgröße wird hier als „Rate of TEC“ (RoT) bezeichnet, wobei

$$RoT = \delta TEC_{\Delta t=1 \text{ min}} \quad [10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}]. \quad (6)$$

Voraussetzung für die Bildung dieser Beobachtungsgröße sind Zweifrequenz-Phasendaten. Es macht keinen Unterschied, ob diese auf  $L_2$  mit voller Wellenlänge (Code-Korrelations- oder Kreuzkorrelations-Kanäle) oder mit halber Wellenlänge (Quadriertechnik) gemessen werden. Es spielt auch keine Rolle, ob der Empfänger statisch oder kinematisch betrieben wird. Hauptfehlerquelle kann die Mehrwegeausbreitung darstellen. Aber auch in einer stark reflektiven Umgebung sind deren Auswirkungen viel geringer als die von ionosphärischer Störungen.

RoT-Zeitreihen vollständiger Satellitendurchgänge finden sich in Abbildung 10. Die Modellkurven beziehen sich auf einen konstanten vertikalen Elektronengehalt von 10, 50, 100 bzw.  $150 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  und wurden für einen typischen Satellitendurchgang berechnet. Der RoT-Kurvenverlauf wird insbesondere durch die Veränderung des Elevationswinkels bestimmt. Der Verlauf ist kontinuierlich, beginnt mit einem negativen Wert, endet mit einem positivem Wert, hat eine Nullstelle, läßt bei starkem Elektronengehalt bei etwa  $15^\circ$  Elevation Maximum und Minimum erkennen, welche um so größere Werte annehmen je stärker der Elektronengehalt ist. Abweichungen von diesem Modellverlauf werden durch großräumige Gradienten oder ionosphärische Störungen verursacht. Letztere sind leicht an den periodischen Schwingungen der Kurve (MSTIDs) oder an den Unstetigkeiten aufgrund von abrupten Refraktionsänderungen (Szintillationen) zu erkennen.

Die detaillierte Untersuchung des Auftretens von Störungen wird durch Bilden eines Störungsindex aus den RoT-Werten erleichtert. In einem ersten Bearbeitungsschritt werden die langperiodischen Anteile der RoT-Zeitreihen herausgefiltert, wie sie durch den absoluten Elektronengehalt der Ionosphäre bzw. durch großräumige Gradienten entstehen. Die Stärke der Störung wird als Wurzel des mittleren Quadrats

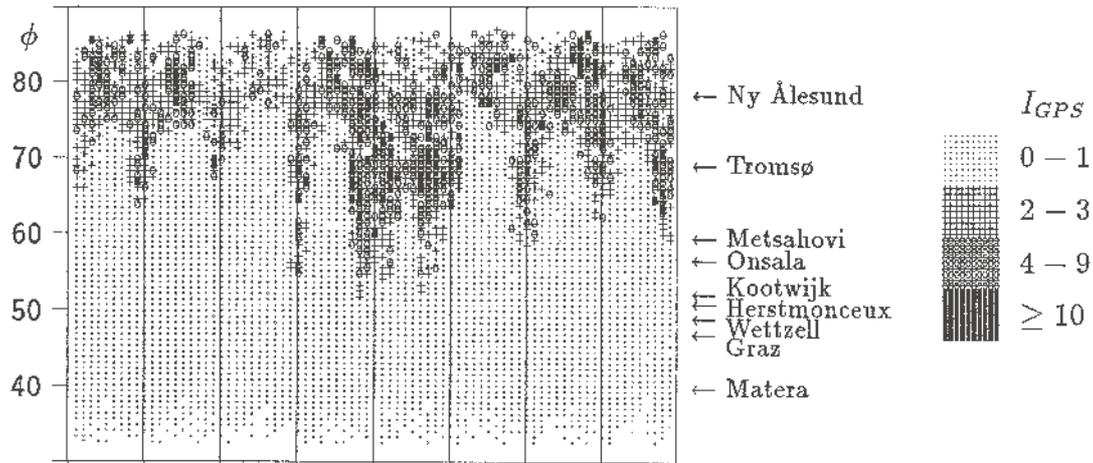


Abb. 11a: Mittlere Störungsindizes  $I_{GPS}$  für Europa im Zeitraum 1.4.-8.4.1993.

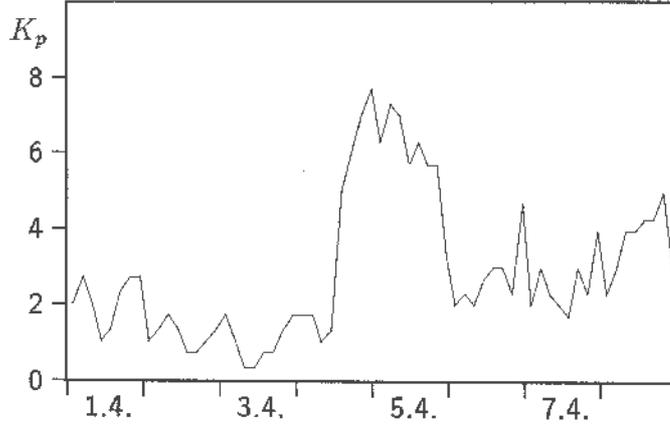


Abb. 11b: 3 Stunden-Werte  $K_p$  für den Zeitraum 1.4.-8.4.1993.

der verbleibenden Anteile der RoT-Werte ( $\overline{RoT}$ ) in  $n$  Epochen berechnet:

$$I_{GPS} = 10 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{Epoch.} \overline{RoT}^2}. \quad (7)$$

Eine automatisierte Unterscheidung von MSTIDs und kleinräumigen Störungen kann anhand ihrer typischen Perioden (MSTIDs: 10 - 20 Minuten, Szintillationen: bis 1 Minute) vorgenommen werden (Wanninger 1993a). Eine räumliche Zuordnung der Indexwerte erfolgt über die Schnittpunkte der GPS-Signalwege mit einer „Single-Layer“-Modellionosphäre (Höhe z.B. 400 km).

Die Beobachtungsgröße RoT und der Störungsindex  $I_{GPS}$  ermöglichen mit einfachen Mitteln die Analyse des augenblicklichen Ionosphärenzustandes. Diese könnte schon während der Messung im GPS-Empfänger erfolgen und dem Nutzer Hinweise auf ionosphärische Beeinträchtigungen der relativen Positionierung geben und ihn zur Modifikation des Meßaufbaus veranlassen (je nach Art der Störung: längere Beobachtungsdauer, höhere Aufzeichnungsrate, kürzere Basislinien). Die Analyse des ionosphärischen Zustands als vorbereitender Schritt der Datenauswertung gibt wichtige Hinweise auf eventuelle Probleme bei der Datenprozessierung und auf zu wählende geeignete Auswertalgorithmen, die – bis zu einem gewissen Grad – einen ionosphärischen Einfluß bei der relativen Positionierung verkraften können.

Eine weitere nicht minder wichtige Anwendung der Analysealgorithmen ist die Ionosphärenforschung. Nur wenn sehr viel mehr über das Auftreten ionosphärischer Störungen bekannt wird, ist eine Vorhersage des Ionosphärenverhaltens möglich. Eine wichtige Frage betrifft das Vordringen kleinräumiger Störungen von den Polarregionen

in die mittleren Breiten: Wieweit können diese Störungen bei einem magnetischen Sturm in Richtung Äquator vordringen? Der stärkste Sturm der letzten Jahre ereignete sich im März 1989. Dabei drangen kleinräumige Störungen bis tief in die mittleren Breiten vor und erzeugten bei GPS-Empfängern Probleme, Messungen durchzuführen (Klobuchar 1991). Stürme dieser Stärke ereignen sich aber nur wenige Male in einem elfjährigen Sonnenzyklus.

Am Beispiel eines deutlich schwächerer Sturm, aber der stärkste im Jahr 1993, soll gezeigt werden, wie GPS zur Ionosphärenforschung eingesetzt werden kann. Aus den GPS-Daten von neun IGS-Stationen (Stationen des International GPS Geodynamics Service) in Europa wurden Störungsindizes  $I_{GPS}$  berechnet und im Koordinatensystem von geographischer Breite  $\phi$  und Ortszeit dargestellt (Abb. 11a). Die Entwicklung des Sturmes ist anhand der 3 Stunden-Werte des planetaren Index geomagnetischer Aktivität  $K_p$  (Abb. 11b) erkennbar. An den Tagen vor und nach dem Sturm ist die Tageszeitabhängigkeit des Auftretens kleinräumiger Störungen im Bereich des Aurora Ovals (GPS-Station Tromsø) deutlich. Während in Polnähe (Ny Ålesund, Spitzbergen) ganztägig Störungen auftraten, sind die Tagesstunden im Bereich des Aurora Ovals störungsfrei. Gegen Mitternacht dringen sie dann bis weit über Skandinavien nach Süden.

Während des Sturmes liegt der Schwerpunkt der Störungen im Bereich des Aurora Ovals. Mit den Daten der Station Tromsø ist keine präzise Positionierung mit GPS mehr durchführbar. Die Anzahl der Cycle-Slips bei einer Elevation über  $15^\circ$  beträgt am 5.4.1993 über 230, während sie an ungestörten Tagen für diese Station bei 10 bis 20 liegt. Einzelne Störungen dringen bis Mitteleuropa vor und beeinflussen dort die präzise Positionierung mit GPS. Trotzdem sind ihre Auswirkungen dort gering, da aufgrund der Inklination der GPS-Satellitenbahnen in mittleren Breiten eine gewisse Immunität des Systems gegen polare kleinräumige Störungen besteht. Nur wenn diese äquatorwärts weiter vordringen als die geographische Breite der Meßstation, können gravierende Probleme auftreten.

## Schlußfolgerungen

Die Ionosphäre wirkt auf zweifache Weise auf die präzise Positionierung mit GPS. Zum einen kann sie die Cycle-Slip- und Mehrdeutigkeitslösung erschweren oder sogar verhindern und zum anderen erzeugt sie Koordinatenfehler bei Einfrequenz-Auswertungen. Dabei spielt in den mittleren Breiten und bei Entfernungen bis 20 km nicht die ungestörte Ionosphäre (absoluter Elektronengehalt, großräumige Gradienten des Elektronengehalts) die entscheidende Rolle, sondern ionosphärische Störungen mittlerer Größe (wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe: MSTIDs) und kleinräumige Störungen, die zu Phasenzintillationen führen.

MSTIDs treten insbesondere während der Tagesstunden der Wintermonate in den Jahren nach einem Sonnenaktivitätsmaximum auf und können bei kurzen Beobachtungsperioden (unter 15 Minuten) ab wenige km Basislinienlänge die Mehrdeutigkeitslösung beeinträchtigen und bei Einfrequenz-Koordinaten Fehler von über 15 ppm der Basislinienlänge erzeugen. Kleinräumige Störungen dringen aus den Polarregio-

nen bei schweren magnetischen Stürmen und auch nachts bis in die mittleren Breiten vor und können in seltenen, extremen Fällen zu Messungsunterbrechungen führen. Häufiger erschweren Phasenzintillationen die Cycle-Slip-Bestimmung.

Die Stärke und Häufigkeit aller ionosphärischer Störungen ist von der Sonnenaktivität abhängig. In den nächsten Jahren ist mit geringer Sonnenaktivität und dementsprechend mit schwächeren bzw. selteneren Störungen zu rechnen. Erst gegen Ende dieses Jahrzehnts werden wieder stärkere und häufigere Störungen erwartet.

Ionosphärischen Störungen können mit einfachen Mitteln schon aus den Daten einer einzelnen GPS-Station erkannt werden. Diese Erkenntnisse sollten genutzt werden, um den Meßaufbau zu modifizieren (je nach Art der Störung: längere Beobachtungsdauer, höhere Aufzeichnungsrate, kürzere Basislinien), einen Auswertalgorithmus zu wählen, der den ionosphärischen Einfluß verkraftet, und durch Interpretation langer Meßreihen die Ionosphärenforschung zu unterstützen, die langfristig die Vorhersage solcher Störungen ermöglichen sollte.

**Dank** Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützte diese Arbeit im Rahmen einer Sachbeihilfe.

## Literatur

- Klobuchar, J.A. (1991):** Ionospheric Effects on GPS, *GPS World*, April 1991.
- Santerre, R. (1991):** Impact of GPS Satellite Sky Distribution, *manuscripta geodaetica*, 16:28-53, 1991.
- van Velthoven, P.F.J. (1990):** *Medium Scale Irregularities in the Ionospheric Electron Content*, Doktorarbeit, Technische Universiteit Eindhoven, Utrecht 1990.
- Wanninger, L. (1993a):** Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 118:25–36, 1993.
- Wanninger, L. (1993b):** Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS, *GPS World*, Juli 1993.
- Wanninger, L. (1994a):** *Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 201, Hannover 1994.
- Wanninger, L. (1994b):** Beobachtung kleinräumiger ionosphärischer Störungen mit GPS und ihre Vermeidung bei GPS-Messungen, *SPN*, 3:102-107, 1994.
- Wübbena, G. (1991):** *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover 1991.