

Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen¹

Lambert Wanninger
Geodätisches Institut
TU Dresden

1. Einleitung

Der ionosphärische Laufzeitfehler ist einer der bedeutendsten Fehlereinflüsse bei der relativen Positionierung mit GPS. Zwar wird er durch Zweifrequenz-Messungen praktisch vollständig eliminiert, doch werden bei der Bildung der ionosphären-freien Linearkombination andere Fehlerquellen (Mehrwegeeinflüsse, Meßrauschen) deutlich verstärkt. Außerdem erschwert er auch bei Zweifrequenz-Messungen die Lösung der Phasenmehrfachdeutigkeiten. Somit sind andere Methoden gefragt, die ionosphärischen Laufzeitfehler zu minimieren. Die wirkungsvollste Methode ist die relative Positionierung mit Hilfe kurzer (maximal wenige km langer) Basislinien. Hierbei wirkt die Ionosphäre auf die simultan gemessenen Signale eines Satelliten so ähnlich, daß sie in der Differenz der Messungen fast vollständig herausfällt.

Damit wären für mittlere geographische Breiten, in denen sich die Ionosphäre am gemäßigtsten verhält, die Probleme der ionosphärischen Refraktion praktisch gelöst, wenn sich nicht durch den Aufbau von Referenzstationsnetzen neue Schwierigkeiten, aber auch neue Lösungsansätze ergeben würden. Aufgrund von wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann der Punktabstand innerhalb eines flächendeckenden Referenzstationsnetzes für cm-genaue Positionierung kaum kleiner als 30 - 60 km gewählt werden. Der Abstand zu Neupunkten im Netz kann also bis zu 40 km betragen, so daß die ionosphärischen Laufzeitfehler einen starken Einfluß auf die Qualität der Positionierung erhalten. Wenn aber nun simultane Beobachtungen eines ganzen Netzes von Referenzstationen vorliegen, ergeben sich neue Arten von Korrekturmodellen, die es im allgemeinen ermöglichen, relative ionosphärische Laufzeitfehler weitgehend zu eliminieren.

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften der Ionosphäre erläutert und die Methoden zur Verringerung des Einflusses der ionosphärischen Laufzeitfehler auf die relative Positionierung dargestellt. Anschließend wird die Problematik der ionosphärischen Laufzeitfehler im Hinblick auf Referenzstationsnetze betrachtet, die dort verwendeten Korrekturmodelle vorgestellt und ihre Qualität anhand von Testdatensätzen diskutiert.

2. Einfluß der ionosphärischen Refraktion auf die relative Positionierung

Die Eigenschaften der Ionosphäre sollen hier nur im Hinblick auf cm-genaue relative Positionierung betrachtet werden, wobei sich auf schnelle statische (bis einige Minuten Meßdauer) bzw. kinematische Meßmodi mit Datenauswertung im *Post-Processing* oder in Echtzeit (RTK: *Real Time Kinematic*) konzentriert wird. Bei diesen Arten der Positionierung werden die Phasenmessungen als primäre Beobachtungsgrößen verwendet und die Phasenmehrfachdeutigkeiten müssen in einem Vorverarbeitungsschritt auf ihre wahren ganzen Werte festgesetzt werden.

Nur eine physikalische Eigenschaft der Ionosphäre ist für die Betrachtung von Signallaufzeitfehlern (1. Ordnung) von Bedeutung: die Elektronendichte und daraus aus Integration entlang des Signalweges resultierend der Elektronengehalt TEC (*Total Electron Content*) in Einheiten von Elektronen pro m². Mit Hilfe einfacher Modellansätze kann dieser auf die Vertikale reduziert werden. Es ergibt sich der vertikale Elektronengehalt VEC (*Vertical Electron Content*). Viele Korrekturmodelle liefern VEC-Werte, die unter Verwendung der Sa-

¹ In: Bayerisches Landesvermessungsamt (Hg.): 3. SAPOS-Symposium, 23./24. Mai 2000, München, S.129-140.

tellitenelevation auf TEC-Werte umgerechnet und dann entsprechend der Signalfrequenz skaliert werden, um Korrekturwerte in metrischen Einheiten zu erhalten.

Der ionosphärische Elektronengehalt sowie das Auftreten von ionosphärischen Störungen (kleinräumige Variationen des Elektronengehalts) unterliegen starken räumlichen und zeitlichen Variationen. Die räumlichen Variationen sind im wesentlichen breitenabhängig. In der Äquatorregion findet man den stärksten absoluten Elektronengehalt, die stärksten großräumigen Gradienten und auch die stärksten kleinräumigen Störungen. Über den Polarregionen ist der Elektronengehalt gering, aber häufig durch kleinräumige Variationen gestört. Die mittleren Breiten sind ionosphärisch betrachtet gemäßigte Breiten, in denen sowohl absoluter Elektronengehalt wie auch ionosphärische Störungen in Stärke und Häufigkeit keine Extremwerte annehmen. Nur die Ionosphäre der mittleren Breiten soll im folgenden behandelt werden.

Die deutlichsten zeitlichen Variationen besitzen tages- oder jahreszeitliche Perioden. Hinzu kommt der Einfluß des 11-jährigen Sonnenaktivitätszyklus. Die mittlere monatliche bzw. jährliche Anzahl der Sonnenflecken steht in direktem Zusammenhang zur Stärke des Elektronengehalts und auch zur Häufigkeit und Stärke von ionosphärischen Störungen. Seit Ende 1998 befinden wir uns in einer Periode verstärkter Sonnenaktivität (Abb. 1). Diese wird bis ungefähr 2003 fort dauern. In diesem Zeitraum ist mit verstärkten ionosphärisch bedingten Problemen bei der relativen GPS-Positionierung zu rechnen.

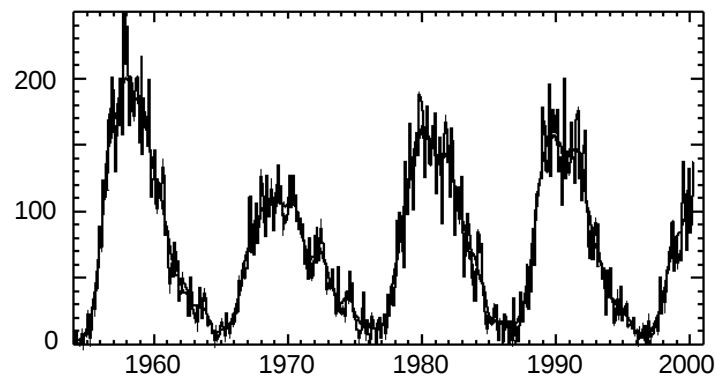


Abb. 1: Monatlicher Sonnenfleckenindex R_f [SIDC, 2000].

Bei der relativen Positionierung sind nur die Unterschiede der ionosphärischen Laufzeitfehler der Signale

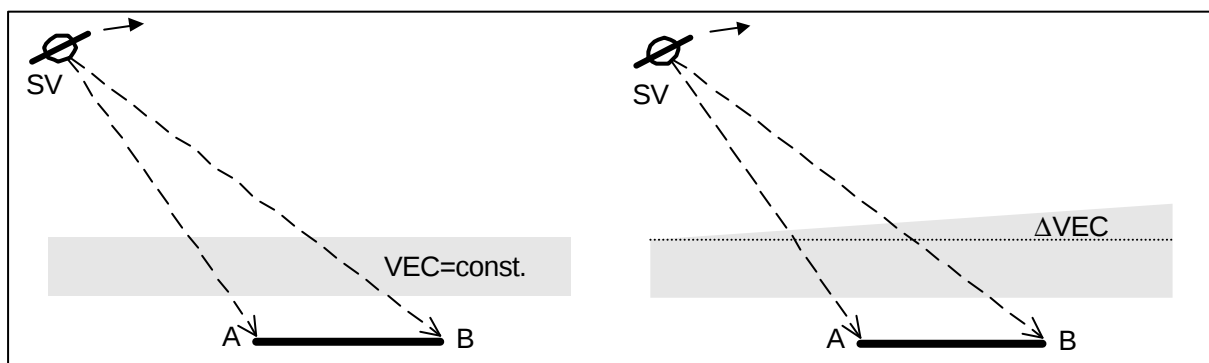


Abb. 2: Einfluß eines konstanten vertikalen Elektronengehalts (links) bzw. von großräumigen Gradienten (rechts) auf die relative Positionierung.

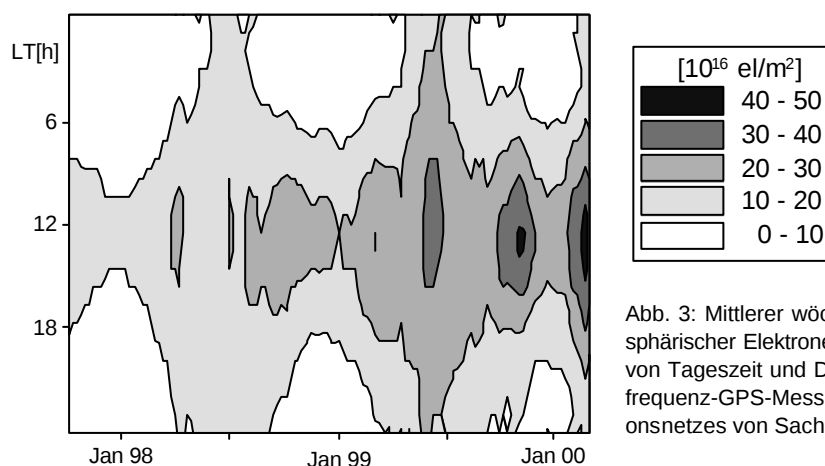


Abb. 3: Mittlerer wöchentlicher vertikaler ionosphärischer Elektronengehalt VEC als Funktion von Tageszeit und Datum, bestimmt aus Zweifrequenz-GPS-Messungen des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt.

eines Satelliten auf dem Weg zu den zwei beteiligten Stationen von Interesse. Solche relativen ionosphärischen Laufzeitfehler entstehen auch durch die ungestörte Ionosphäre, die durch einen absoluten, konstanten vertikalen Elektronengehalt und großräumige horizontale Gradienten gekennzeichnet ist (Abb. 2) [Wanninger 1995a].

Der absolute Elektronengehalt der Ionosphäre führt zu relativen Laufzeitfehlern, 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 geringeren Laufzeitfehlern. Der Relativfehler ist in erster Näherung proportional zum VEC und auch zur Basislinienlänge. Maximale VEC-Werte in Mitteleuropa sind um die Mittagszeit (Sonnenhöchststand) in den Monaten der Tagundnachtgleichen und auch im Monat der längsten Sonnenscheindauer zu finden (Abb. 3). Aufgrund des elfjährigen Sonnenaktivitätszyklus haben sich die VEC-Maximalwerte im Zeitraum 1997 bis 2000 mehr als verdreifacht.

Großräumige horizontale Gradienten führen direkt zu Laufzeitdifferenzen, wie aus Abbildung 2 ersichtlich. Der durch sie verursachte Relativfehler ist in erster Näherung proportional zu ihrer Stärke und auch zur Basislinienlänge. Die Nord-Süd-Gradienten zwischen den hohen VEC-Werten der Äquatorregion und den niedrigen VEC-Werten in der Nordpolarregion fallen stärker aus als die durch den Sonnengang verursachten Ost-West-Gradienten. Beide Arten Gradienten sind in Abbildung 4 zusammengefaßt. Die Zeiträume maximaler Gradienten stehen in direktem Zusammenhang zu den Zeiträumen maximaler VEC-Werte. Sie sind meist vormittags in den Monaten der Tagundnachtgleichen und auch im Monat der längsten Sonnenscheindauer zu finden (Abb. 4). Aufgrund des elfjährigen Sonnenaktivitätszyklus haben sich die Maximalwerte der Gradienten im Zeitraum 1997 bis 2000 mehr als vervierfacht.

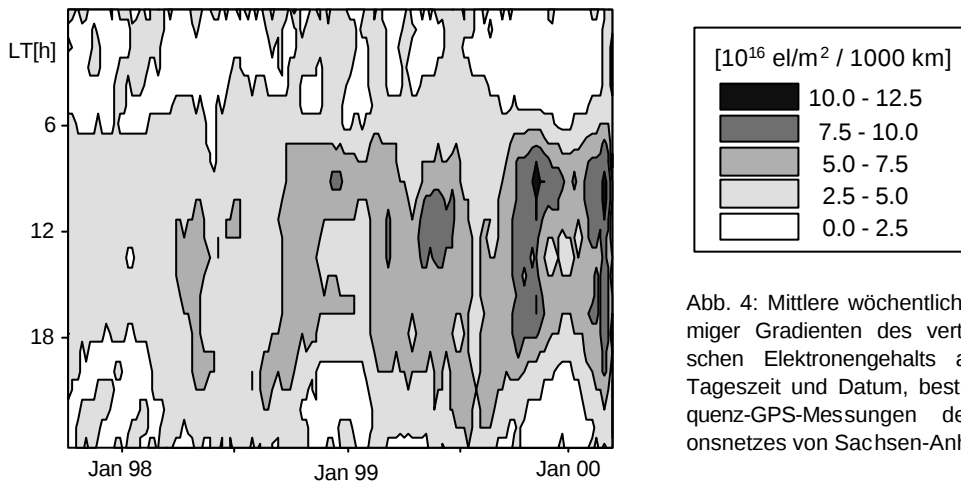


Abb. 4: Mittlere wöchentliche Stärke großräumiger Gradienten des vertikalen ionosphärischen Elektronengehalts als Funktion von Tageszeit und Datum, bestimmt aus Zweifrequenz-GPS-Messungen des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt

Bei der gestörten Ionosphäre kann man zwischen Störungen mittlerer Größe und kleinräumigen Störungen unterscheiden (Abb. 5). Letztere treten in mittleren Breiten nur selten auf und sollen somit hier nicht behandelt werden. In die Gruppe der Störungen mittlerer Größe gehören insbesondere die wandernden Störungen mittlerer Größe (*Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances* - MSTIDs), die in mittleren Breiten recht häufig anzutreffen sind. Sie haben horizontale Ausdehnungen in der Größenordnung von einigen 100 km und

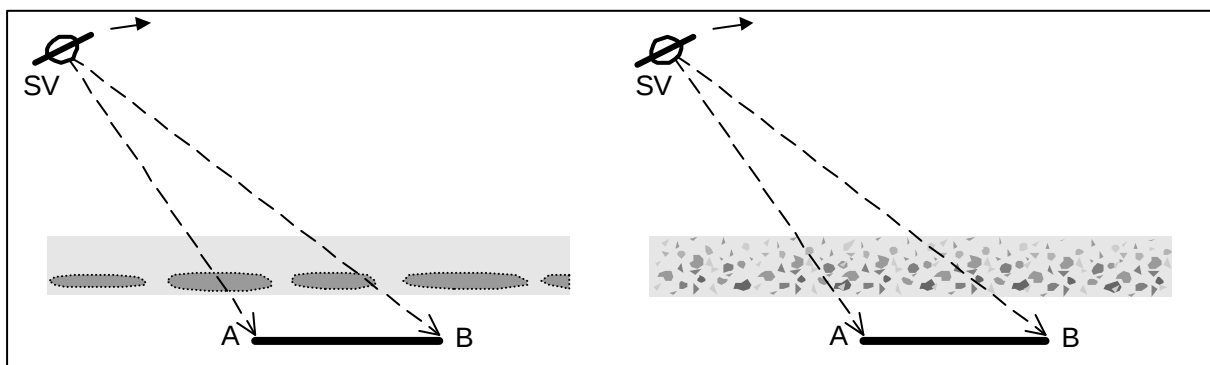


Abb. 5: Einfluß ionosphärischer Störungen mittlerer Größe (MSTIDs, links) bzw. kleinräumiger Störungen (rechts) auf die relative Positionierung.

scheinbare Perioden von 10 Minuten bis eine Stunde. Ihr Auftreten in mittleren Breiten ist im wesentlichen auf die Tagesstunden der Wintermonate in den Jahren starker Sonnenaktivität beschränkt [van Velthoven 1992, Jacobsen u.a. 1995]. Schon ab wenige Kilometer Stationsabstand verursachen sie so große relative ionosphärische Laufzeitfehler, daß sie das Hauptproblem bei schneller statischer oder kinematischer cm-genaue Positionierung darstellen. Bei statischen Beobachtungen von über 30 Minuten Dauer mitteln sie sich aufgrund ihres periodischen Charakters weitgehend heraus [Wanninger 1995a].

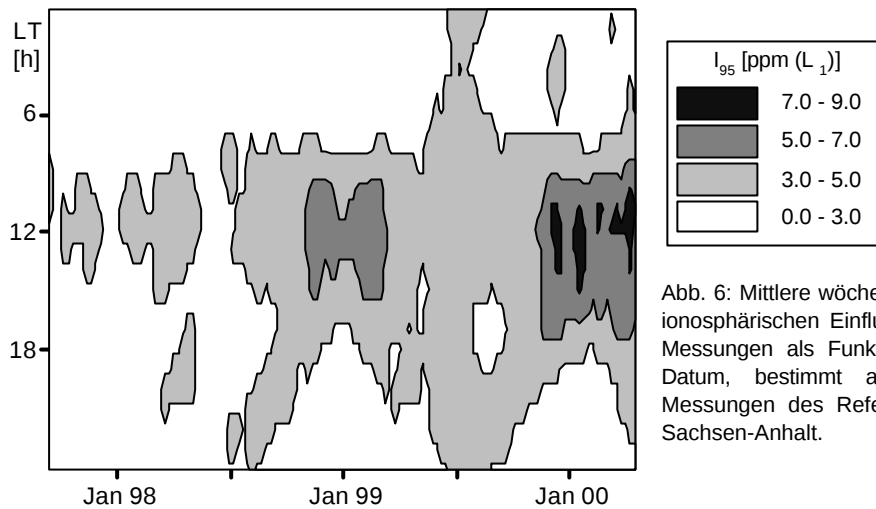


Abb. 6: Mittlere wöchentliche Index-Werte des ionosphärischen Einflusses auf relative GPS-Messungen als Funktion von Tageszeit und Datum, bestimmt aus Zweifrequenz-GPS-Messungen des Referenzstationsnetzes von Sachsen-Anhalt.

Will man nun den Gesamteinfluß relativer ionosphärischer Laufzeitfehler auf die GPS-Positionierung betrachten, so bieten sich dafür die ionosphärischen Flächenkorrekturparameter (FKP^I) an, wie sie aus den Beobachtungen räumlich verteilter Referenzstationen abgeleitet werden können (siehe Abschnitte 4 und 5). Zur besseren Darstellung wurden sie stundenweise zu Index-Werten zusammengefaßt [Wanninger 1999], dessen Wochenmittel in Abbildung 6 dargestellt sind. Sie zeigen die ionosphärische Beeinflussung der relativen GPS-Phasenmessungen und sind in dieser Form für kurzzeitig statischen bzw. kinematischen Meßmodus gültig. Auch hier ist die deutliche Zunahme des ionosphärischen Einflusses in den letzten Jahren zu erkennen. Maxima liegen zur Mittagszeit der Wintermonate. Sie korrespondieren somit nicht mit den Maxima der VEC-Werte und großräumiger Gradienten, sondern mit den maximalen Störungen durch MSTIDs. Die detaillierte Untersuchung der FKP^I -Werte bestätigt dies: die vorherrschenden Perioden in den FKP^I -Zeitreihen liegen zwischen 10 Minuten und einer Stunde, wie es für MSTIDs zu erwarten ist.

3. Verringerung bzw. Korrektur der ionosphärischen Laufzeitfehler

Die effektivste Methode zur Verringerung des Einflusses der ionosphärischen Refraktion auf die Positionierung ist der Einsatz der relativen Positionierung über kurze Basislinien. Je näher die Meßstationen zusammenliegen, um so ähnlicher sind die ionosphärischen Laufzeitfehler und um so geringer fällt der Relativfehler aus (Abb. 7). Dementsprechend wird die Koordinatenlösung bei kurzen Basislinien (z.B. < 5km) vielfach auf der Basis von Einfrequenz-Beobachtungen berechnet. Trotzdem müssen auch bei kurzen Basislinien Zweifrequenz-Empfänger eingesetzt werden, um eine schnelle

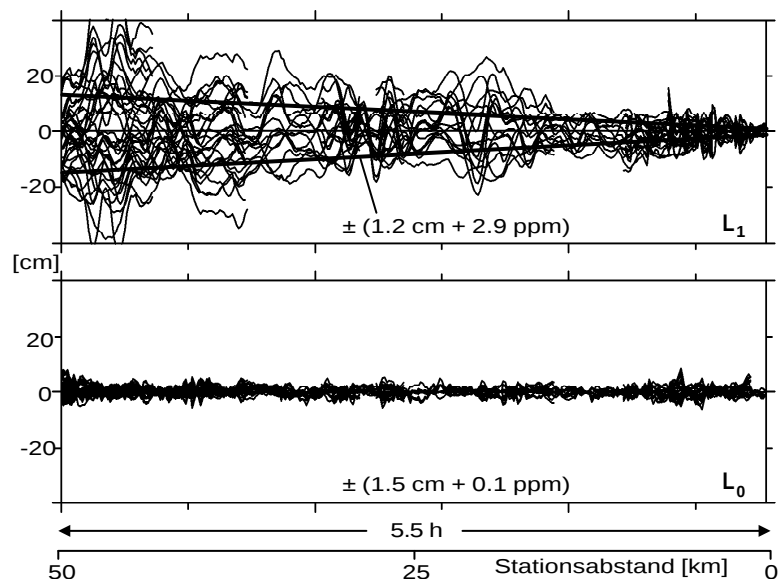


Abb. 7: Doppeldifferenz-Phasenresiduen des ionosphärisch beeinflussten L_1 -Signals und der ionosphären-freien L_0 -Linearkombination bei sich veränderndem Stationsabstand (50 km bis 0 km) in einem Zeitraum großer relativer ionosphärischer Laufzeitfehler, aus statischen Messungsdaten simuliert.

und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung zu erzielen. Die dabei verwendeten Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen setzen voraus, daß der relative ionosphärische Laufzeitfehler gering ist (kurze Basislinie) **und** daß Zweifrequenz-Messungen vorliegen.

Bei der Bildung der ionosphären-freien Linearkombination aus Zweifrequenz-Phasendaten wird der Einfluß der ionosphärischen Refraktion praktisch vollständig eliminiert. Diese Fehlerverminderung geht aber einher mit einer Verstärkung der Mehrwegeeffekte und des Meßrauschens um einen Faktor von ungefähr 3. Von daher macht es nur Sinn, die ionosphären-freie Linearkombination für solche Basislinien einzusetzen, bei denen aufgrund ihrer Länge der ionosphärische Einfluß durch Relativmessungen nicht weitgehend beseitigt werden konnte (z.B. > 5 km Länge).

Gäbe es präzise Korrekturmodelle für ionosphärische Laufzeitfehler, so wäre man auf die Zweifrequenz-Korrekturen nicht angewiesen und könnte auch über größere Entfernungen mit schneller Statik oder kinematisch arbeiten. Weil etliche großräumige Modelle angeboten werden und immer wieder die Frage auftaucht, ob deren Einsatz auch für cm-genaue schnelle Positionierung sinnvoll ist, sollen die Eigenschaften dieser Modelle hier kurz beschrieben werden:

- die Parameter des *Ionospheric Correction Algorithm (ICA)*, meist nach seinem Entwickler Klobuchar-Modell genannt, werden jedem GPS-Nutzer mit dem von den Satelliten empfangenen Datenstrom zur Verfügung gestellt [ICD 1999]. Es ist ein stark vereinfachtes Prädiktionsmodell, welches die Ionosphäre nur sehr grob erfaßt. Es wurde für Einfrequenz-Navigationsnutzer (absolute Positionierung) entwickelt. Seit der Einführung der künstlichen Genauigkeitsverschlechterung durch *Selective Availability (SA)*, hat dieses Modell kaum noch eine praktische Bedeutung. Für die Korrektur von Relativmessungen war es nie geeignet.

Eine höhere Qualität ist erreichbar, wenn die Korrekturwerte nicht in die Zukunft prädictiert, sondern erst mit leichter zeitlicher Verzögerung für Zeitpunkte in der Vergangenheit zur Verfügung gestellt werden oder in Echtzeit-Auswertung erstellt werden. Entsprechende Modelle beruhen dann ausschließlich oder zum größten Teil auf der Auswertung von Zweifrequenz-GPS-Beobachtungen.

- Innerhalb des *International GPS Service (IGS)* werden am Astronomischen Institut der Universität Bern globale Ionosphärenmodelle berechnet [Schaer u.a. 1998]. Sie beruhen auf den GPS-Meßwerten von global verteilten Stationen und werden insbesondere zur Auswertung permanenter großräumiger (globaler) GPS-Netze herangezogen. Sie erfassen den VEC und zum Teil auch die großräumigen horizontalen Gradienten, aber keinerlei ionosphärische Störungen. Aufgrund ihrer sehr begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösung haben sie keine Bedeutung für Basislinien kürzer 50 km bzw. kurzzeitige Messungen.
- Die DLR Neustrelitz produziert stündliche VEC-Modelle für Europa, welche auf der Kombination der GPS-Meßdaten von über 20 Stationen und einem Ionosphärenmodell beruhen [Jakowski u.a. 1998]. Auch hier ist die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells zu gering, um für präzise lokale oder regionale Anwendungen eine Rolle zu spielen.
- ähnliche Qualitäten weisen ionosphärische Modelle auf, die im Rahmen von Wide-Area DGPS-Systemen Verwendung finden, wie z.B. innerhalb des sich im Aufbau befindlichen europäischen EGNOS-Systems.

Alle großräumigen Modelle des VEC sind für Anwendungen der schnellen cm-genauen Positionierung und damit für Basislinienlängen kürzer 50 km nicht geeignet. Sie geben zwar den regulären Teil des ionosphärischen Elektronengehalts wieder, haben aber weder die räumliche noch zeitliche Auflösung, um ionosphärische Störungen zu erfassen. Da letztere aber für die hier behandelten Anwendungen die Haupteinflussfaktoren darstellen, macht es kaum Sinn, VEC-Modelle zu verwenden.

4. Ionosphärische Korrekturen aus Referenzstationsnetzen

Ein flächendeckender Service für schnelle, cm-genaue Positionierung (also GPPS und HEPS innerhalb von SAPOS) kann nur durch Referenzstations**netze** gelingen. Der dabei aus wirtschaftlichen Gründen gewählte Punktabstand beträgt 30 bis 60 km. Der Abstand zu Neupunkten im Netz kann also bis zu 40 km betragen. Bei den augenblicklich herrschenden ionosphärischen Verhältnissen (vergleiche Abb. 6) ist eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung über eine solche großen Distanz vielfach unmöglich. Da größtenteils ionosphärische Störungen mittlerer Größe die Verursacher sind, können auch die oben beschriebenen Korrekturmodelle die relativen ionosphärischen Laufzeitfehler kaum verringern.

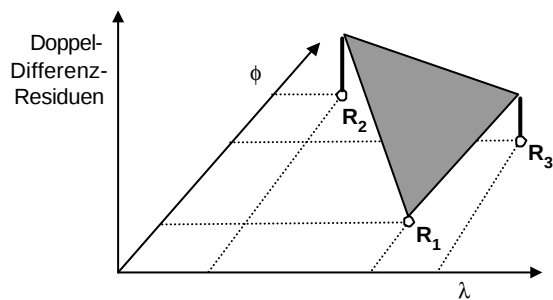


Abb. 8: Fehlermodellierung in einem Referenzstationsnetz durch zweidimensionale lineare Interpolation

werden satelliten-individuell und maximal epochenweise erfaßt. Die Modellierung erfolgt über Interpolationsflächen. Für die Erfassung der ionosphärischen Laufzeitdifferenzen hat sich als günstig erwiesen, Interpolationsebenen zu verwenden, die möglichst kleinräumig (d.h. unter Verwendung von drei benachbarten Referenzstationen) gebildet werden [Wanninger 1999].

Jede solche Ebene wird durch zwei Parameter beschrieben: ihre Neigungen in zwei ausgewählten Richtungen, z.B. Nord-Süd (ϕ) und Ost-West (λ). Sie werden als Flächenkorrekturparameter FKP^I_ϕ und FKP^I_λ bezeichnet, wobei I für ionosphärische Korrekturen steht. Eine ähnliche Modellierung erfolgt auch für Einflüsse der troposphärischen Refraktion und der Orbitfehler. Es ergeben sich dabei Flächenkorrekturparameter FKP^G_ϕ und FKP^G_λ , wobei G für geometrische Korrekturen steht.

Verwendet man diese hochgenauen auf GPS-Phasendaten basierenden Korrekturmodelle, so kann man im Ausdehnungsgebiet des Referenzstationsnetzes die entfernungsabhängig wirkenden Fehler fast vollständig korrigieren. Die Positionierung eines Neupunktes erfolgt dann zweckmäßigerweise relativ zu einer sogenannten **virtuellen** Referenzstation. Deren Beobachtungsdaten werden aus den Beobachtungen der realen Referenzstationen unter Verwendung der beschriebenen Korrekturmodelle erzeugt. Ihre Position wird so gewählt, daß der Abstand zum Neupunkt möglichst gering ist und somit die Standardauswertealgorithmen für kurze Basislinien Verwendung finden können. Das Konzept der virtuellen Referenzstationen kann sowohl für *Post-Processing* wie auch für Echtzeitanwendungen realisiert werden.

Die ionosphärischen Korrekturmodelle innerhalb eines Referenzstationsnetzes sind für die schnelle Mehrdeutigkeitslösung von entscheidender Bedeutung. Die geometrischen Modelle haben eine geringere Bedeutung. Beide Modellarten tragen zur Steigerung der Koordinatengenauigkeit bei.

5. Positionierungsergebnisse aus Referenzstationsnetzen

Um den Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen zu demonstrieren, wurden Testdaten aus dem Referenzstationsnetz von Sachsen-Anhalt ausgewählt und auf verschiedene Arten im *Post-Processing* bearbeitet [Wanninger 1999]. Drei Stationen (KLTZ-HVL2-GENT) werden als Referenzstationsnetz und eine vierte Station (STEN) als Neupunkt betrachtet (Abb. 9). Die Testdaten bestehen aus zwei 5-Stunden Beobachtungsblöcken des Tages 313/1998, von denen einer ungestörte und der andere gestörte ionosphärische Verhältnisse aufweist. Die zugehörigen ionosphärischen FKPs lassen die unterschiedlichen Bedingungen gut erkennen (Abb. 10).

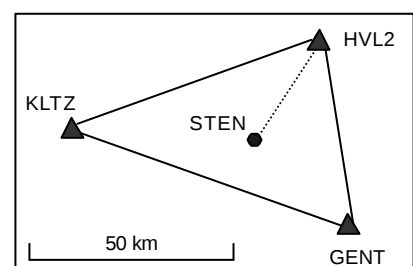


Abb. 9: Referenzstationstestnetz

Die Positionierung des Neupunktes erfolgte zum einen über die kürzeste Basislinie zu einer realen Referenzstation (HVL2-STEN: 29 km) und zum anderen mit Hilfe der zugehörigen virtuellen Referenzstation, die aus den Beobachtungen der drei umliegenden Referenzstationen berechnet wurde. Die Bestimmung der FKP-Werte und die Erzeugung von Beobachtungsdaten virtueller Stationen im *Post-Processing* erfolgt mit Wa-Soft/Virtuell. Bei der Berechnung der virtuellen Beobachtungen wurden sowohl ionosphärische wie auch geometrische Korrekturen berücksichtigt.

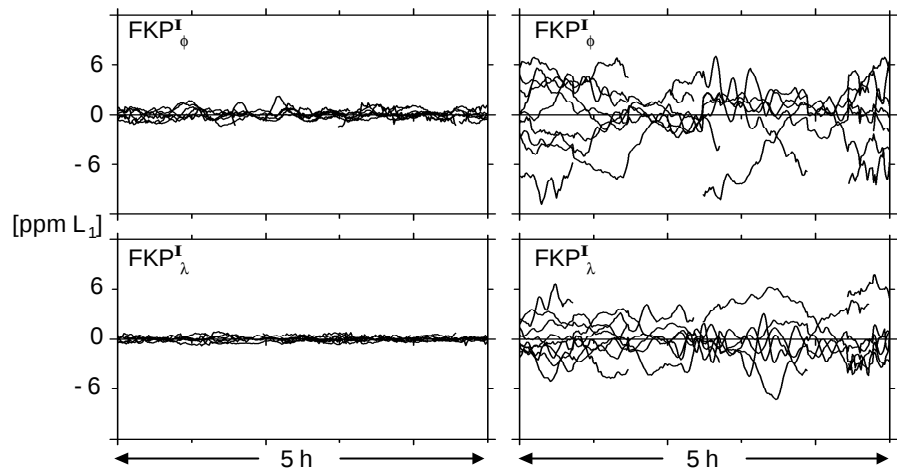


Abb.10: Ionosphärische Flächenkorrekturparameter (FKP^I) der beiden Testdatensätze: schwach und ungestörter (links) bzw. stark und gestörter (rechts) ionosphärischer Elektronengehalt.

Um kurzzeitige statische Messungen zu simulieren, wurden die Beobachtungsdaten von STEN in 5-Minuten-Stücke zerlegt und in jedem Auswerteverfahren 60 unabhängige Basislinienberechnungen durchgeführt. Jede Auswertung erfolgte mit den aktuellen (April 1999) Versionen von vier *Post-Processing*-Paketen, um einen Vergleich zwischen verschiedenen Produkten zu ermöglichen. Auf Wunsch eines Teils der Softwarehersteller werden die Ergebnisse anonymisiert veröffentlicht.

Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse werden zum einen betrachtet, ob die Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden konnten und zum anderen, ob diese Festsetzungen korrekt erfolgten. Als korrekte Lösungen werden diejenigen angesehen, bei denen die Länge des dreidimensionalen Differenzvektors zur Solllösung 8 cm nicht übersteigt. Dementsprechend werden folgende drei Qualitätskriterien verwendet:

- **Korrektheit der Basislinienlösung:** Verhältnis von Anzahl der korrekten Lösungen zur Anzahl aller möglichen Lösungen.
- **Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösungen:** Verhältnis von Anzahl der korrekten Lösungen zur Anzahl der Lösungen, bei denen die Mehrdeutigkeiten festgesetzt worden sind.
- **Genauigkeit der Koordinatenergebnisse:** Standardabweichung der korrekten Lösungen in Lage und Höhe.

Die getesteten Softwarepakete haben fast alle mehrere Mehrdeutigkeitslösungs- und Koordinatenberechnungsalgorithmen implementiert, die je nach Basislinienlänge zum Einsatz kommen. Für kurze Basislinien kann von geringem ionosphärischem Einfluß ausgegangen werden, während bei längeren die Ionosphäre berücksichtigt werden muß. Die Koordinatenberechnung erfolgt bei kurzen Basislinien vielfach mit L_1 , während bei langen auf die ionosphären-freie Linearkombination L_0 zurückgegriffen werden muß und somit ein größerer Einfluß von Mehrwegeeffekten und Meßrauschen in Kauf genommen wird.

Für die 29 km lange Basislinie zwischen der realen Referenzstation HVL2 und dem „Neupunkt“ STEN kamen bei allen Softwarepaketen die Algorithmen für lange Basislinien zum Einsatz (Tab. 1). Solange der ionosphärische Elektronengehalt schwach und ungestört ist, liefern die meisten auch mit nur 5 Minuten Beobachtungsdaten akzeptable Ergebnisse: Korrektheitsquote um 90 %, Zuverlässigkeit der Ergebnisse über 90 %, Koordinatengenauigkeit bei knapp 1 cm in der Lage und 2 cm in der Höhe. Man beachte aber auch die Ausreißer bei der Korrektheit der Mehrdeutigkeitslösung (Softwarepaket C, keinen speziellen Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus für lange Basislinien) und bei der Koordinatengenauigkeit (Softwarepaket B, hier werden zum Teil die ungenaueren Widelane-Lösungen als endgültige Lösungen ausgegeben). Sobald nun aber ionosphärische Störungen auftreten, liefert keine Software mehr verwendbare Ergebnisse. Korrektheitsquoten von unter 10 % können als Zufallstreffer betrachtet werden. Hier hilft nur noch die Modellierung der Ionosphäre im Netz und somit der Einsatz einer virtuellen Referenzstation.

Ionosphärische Verhältnisse, Algorithmus	Software - paket	Korrekt- heit %	Zuverläss- sigkeit %	Genauigkeit: Stdabw. Lage/Höhe [cm]
Iono. ungestört, Algorith. für lange Basislinien	A	92	92	1.2 / 1.9
	B	95	95	2.0 / 2.5
	C	43	90	1.1 / 2.3
	D	85	93	1.1 / 2.2
Iono. stark gestört, Algorith. für lange Basislinien	A	8	8	- / -
	B	2	2	- / -
	C	0	-	- / -
	D	7	10	- / -

Tab.1: Ergebnisse der Berechnungen der 29 km langen Basislinie HVL2-STEN auf der Basis von jeweils 60 5-Minuten-Stücken.

Die Ergebnisse, die bei Verwendung einer virtuellen Referenzstation erzielt werden können, sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Alle Softwarepakete setzen nun die Algorithmen für kurze Basislinien ein, da die Koordinate der virtuellen Referenzstation so gewählt wurde, daß die Basislinienlänge zum Neupunkt maximal einige hundert Meter beträgt. Bei ungestörter Ionosphäre erzielen alle Softwarepakete bessere Ergebnisse als bei der 29 km langen Basislinie. Dies resultiert nicht nur daraus, daß ionosphärische und geometrische Fehler durch Korrektur im Netz deutlich verringert werden konnten, sondern kommt auch daher, daß die Koordinatenlösungen nun nicht mehr auf der ionosphären-freien Linearkombination beruhen. Somit wirken sich Mehrwegeeffekte und Meßrauschen deutlich geringer aus.

Auch wenn die Ionosphäre stark gestört ist, fallen die Ergebnisse mit virtueller Referenzstation sehr viel besser aus als bei der 29 km langen realen Basislinie. Aber sie sind nicht so gut, wie bei ionosphärisch ungestörten Verhältnissen: Korrektheit und Zuverlässigkeit der Lösungen verringern sich zum Teil erheblich. Die Standardabweichungen verdoppeln sich. Aufgrund der Kleinräumigkeit der ionosphärischen Störungen gelingt hier bei einem Referenzstationsabstand von 50 bis 60 km zwar eine deutliche aber bei weitem keine vollständige Korrektur der relativen ionosphärischen Laufzeitfehler. Die verbleibenden Restfehler verschlechtern die Lösungsqualität. Trotzdem zeigt dies, daß bei solchen ionosphärischen Verhältnissen nur durch ionosphärische Modellierung im Netz Lösungen überhaupt möglich sind.

Diese können noch verbessert werden, wenn die Datenauswertung mit den Algorithmen für lange Basislinien durchgeführt werden (Tab. 2). Die meisten Softwarepakete lassen sich so einstellen, daß auch sehr kurze Basislinien (virtuelle Station - Neupunkt) entsprechend bearbeitet werden können. Korrektheit und Zuverlässigkeit steigen dann wieder an und erreichen z.T. den Stand, den sie bei ungestörten ionosphärischen Verhältnissen und Algorithmen für kurze Basislinien hatten. Die Koordinatenlösungen (ionosphären-frei) verbessern sich im allgemeinen auch, bleiben aber ungefähr 50 % schlechter als die Lösungen der ionosphärisch

Ionosphärische Verhältnisse, Algorithmus	Software - paket	Korrekt- heit %	Zuverläss- sigkeit %	Genauigkeit: Stdabw. Lage/Höhe [cm]
Iono. ungestört, Algorith. für kurze Basislinien	A	97	97	1.0 / 1.6
	B	95	95	1.1 / 1.8
	C	87	98	0.9 / 2.0
	D	92	95	1.1 / 1.6
Iono. stark gestört, Algorith. für kurze Basislinien	A	87	87	2.2 / 2.9
	B	80	81	2.1 / 3.3
	C	37	96	2.0 / 2.7
	D	50	77	1.9 / 2.4
Iono. stark gestört, Algorith. für lange Basislinien	A	97	97	1.5 / 2.8
	B	83	86	2.2 / 3.5
	C	37	96	1.4 / 1.8
	D	83	91	1.4 / 2.5

Tab. 2: Ergebnisse der Positionierungen der Station STEN in der Netzschleife KLTZ-HVL2-GENT unter Verwendung einer virtuellen Referenzstation und auf der Basis von jeweils 60 5-Minuten-Stücken.

gering beeinflussten Beobachtungen. Hier wirken sich die verstärkten Einflüsse von Mehrwegeeffekten und Meßrauschen auf die ionosphären-freie Linearkombination negativ aus.

Die Wahl des günstigsten Auswertalgorithmus setzt voraus, daß Informationen über die ionosphärischen Verhältnisse vorliegen. Sie sind leicht durch Interpretation der FKP¹-Zeitreihen zu erhalten. Dem Nutzer (bzw. seiner Software) müssen also nicht nur virtuelle Beobachtungen, sondern auch FKP¹-Zeitreihen oder besser noch deren Interpretation zur Verfügung gestellt werden. Bei Wa-Soft/Virtuell wurde dies so gelöst, daß der Nutzer einen entsprechenden Hinweis bekommt, wenn eine ionosphären-freie Koordinatenlösung in der Basislinie virtuelle Referenzstation - Neupunkt von Vorteil ist. Bei Echtzeit-Anwendungen (RTK) gibt es im allgemeinen keine Möglichkeit, zwischen verschiedenen Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen auszuwählen, da nur von Anwendungen mit kurzen Basislinien ausgegangen wird. Bei ionosphärischen Störungen muß sich der Nutzer hier mit der schlechteren Lösung begnügen.

Zusammenfassend bedeutet dies: liegen starke ionosphärische Störungen vor, ist bei längeren Basislinien (um 30 km Länge) keine schnelle Mehrdeutigkeitslösung möglich. Sie gelingt aber mit vielen Softwarepaketen noch akzeptabel im Referenzstationsnetz mit Hilfe präziser Modellierung der relativen ionosphärischen Laufzeitfehler und unter Verwendung einer virtuellen Referenzstation. Abschläge in der Koordinatengenauigkeit von etwa 50 % im Vergleich zu ionosphärisch ungestörten Bedingungen sind dabei aber nicht zu verhindern.

6. Schlußfolgerungen

Wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe (MSTIDs) sind in Mitteleuropa die Hauptursache für ionosphärische Probleme bei der cm-genauen schnellen statischen oder kinematischen Positionierung mit GPS. Sie treten insbesondere in den Tagesstunden der Wintermonate auf. Aufgrund des elfjährigen Sonnenaktivitätszyklus waren sie in den letzten beiden Wintern (1998/99 und 1999/2000) besonders häufig und stark ausgeprägt. Für die nächsten drei Winter muß mit ähnlichen Störungen gerechnet werden.

Durch Ionosphärenmodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen mit großer räumlicher (satelliten-individuell) und zeitlicher (maximal epochenweisen) Auflösung lassen sich diese ionosphärischen Störungen gut erfassen. Je größer die Abstände zwischen den Referenzstationen, um so größer werden aber die verbleibenden ionosphärischen Restfehler. Ein Stationsabstand von maximal 50 km ist für eine cm-genaue schnelle statische oder kinematische Positionierung zu empfehlen.

Die schnelle statische Positionierung im *Post-Processing* über eine für Referenzstationsnetze übliche Entfernung von fast 30 km wurde mit vier Software-Paketen ausgetestet. Während bei ionosphärisch ungestörten Daten in der Basislinie zur nächstgelegenen realen Referenzstation gute Ergebnisse erzielt werden konnten, gelang die Positionierung bei gestörter Ionosphäre nur mit Hilfe der Ionosphärenmodellierung im Netz und unter Verwendung einer virtuellen Referenzstation. Es zeigte sich aber, daß bei gestörter Ionosphäre Restfehler verbleiben, die auch diesen Auswerteansatz negativ beeinflussen können. Diese führt dazu, daß die Mehrdeutigkeitslösung erschwert ist und daß die Koordinatengenauigkeiten um mindestens 50 % schlechter ausfallen als bei ungestörten ionosphärischen Verhältnissen.

Dank Die verwendeten Daten wurden vom Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung des Landes Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt.

7. Literatur

Jacobsen, A.R., Carlos, R.C., Massey, R.S., Wu, G. (1995): Observations of Traveling Ionospheric Disturbances with a Satellite-Beacon Radio Interferometer: Seasonal and Local Time Behavior. *Journal of Geophysical Research*, 100(A2):1653-1665.

Jakowski, N., Schlüter, S., Jungstand, A. (1998): Monitoring the Ionosphere over Europe and Related Ionospheric Studies. IGS 1998 Analysis Center Workshop, 9.-11. Feb. 1998, Darmstadt, 265-271

(erhältlich über <http://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs.html>, siehe auch: <http://www.nz.dlr.de/gps/gps-ion.html>).

ICD (1999): Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces: ICD-GPS-200. ARINC Research Corporation, El Segundo, CA. (erhältlich über: <http://www.navcen.uscg.mil/gps/geninfo/gpsdocuments/default.htm>)

Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M. (1998): Mapping and Predicting the Ionosphere. IGS 1998 Analysis Center Workshop, 9.-11. Feb. 1998, Darmstadt, S. 307-318 (erhältlich über <http://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs.html>, siehe auch: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>).

SIDC (2000): Monthly Sunspot Numbers. Solar Influence Data Center, Royal Observatory of Belgium, http://sidc.oma.be/sidc_graphics.html.

Velthoven, P.F.J. van (1992): Climatology of Phase Errors due to Ionospheric Acoustic-Gravity Waves Observed by the Westerbork Radio Synthesis Telescope. In: Munck, J.C. de, Spoelstra T.A. Th. (Hg.): Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Nr. 36, 77-80.

Wanninger, L. (1995a): Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. DVW-Seminar: GPS-Leistungsbilanz '94, DVW-Schriftenreihe 18/1995, 218-232.

Wanninger, L. (1995b): Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. Proceed. of ION GPS '95, Palm Springs, 55-62.

Wanninger, L. (1999): Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen. Zeitschrift für Vermessungswesen **124** :322-330.