

Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenzstationsnetze¹

Lambert Wanninger, Dresden

Einleitung

Bei der präzisen (cm-genauen) satellitengestützten relativen Positionierung spielen die ionosphärisch bedingten Signallaufzeitfehler eine entscheidende Rolle. Mehr noch als die anderen entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse (Orbitfehler, troposphärisch bedingte Laufzeitverzögerungen) können die relativen ionosphärischen Einflüsse die notwendige Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten bei kinematischen oder kurzzeitig statischen Beobachtungen behindern. Dies gilt auch für Zweifrequenz-Anwendungen, denn die effektivsten Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen setzen sowohl Zweifrequenz-Beobachtungen voraus, wie auch minimale relative ionosphärische Einflüsse. Liegen ionosphärische Restfehler in einer Basislinie vor, kann sich die notwendige Beobachtungszeit bis zu einer zuverlässigen Mehrdeutigkeitslösung deutlich verlängern oder eine cm-genaue Positionierung zeitweilig auch gar nicht möglich sein.

Die Größe der relativen ionosphärischen Fehler ist stark vom etwa 11-jährigen Sonnenaktivitätszyklus abhängig (Abb.1). Seit 1999 befinden wir uns in einem Aktivitätsmaximum, welches entscheidenden Einfluß auf den praktischen Einsatz satellitengestützter Positionierung hat. In den Jahren eines Maximums erreicht der Elektronengehalt der Ionosphäre und somit auch die absoluten Signallaufzeitfehler seine höchsten Werte. Dies ist aber für die relative Positionierung von nicht so starker Bedeutung wie die gleichzeitige Zunahme von Inhomogenitäten in der Elektronenverteilung, die zu mittelgroßen und kleinräumigen ionosphärischen Störungen führen. Diese bereiten bei kinematischer und kurzzeitig statischer Positionierung die Hauptprobleme.

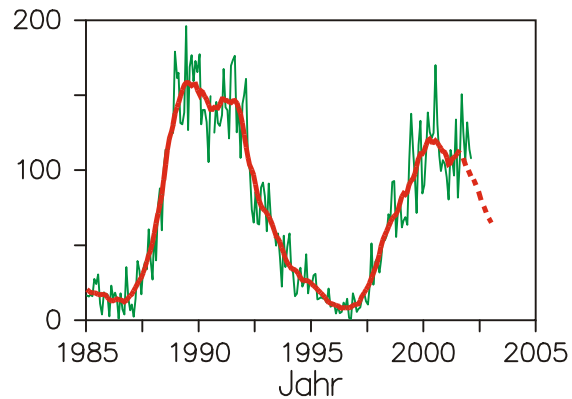


Abb. 1: Monatliche Sonnenfleckenrelativzahlen, geglättete Werte und Prädiktion über Februar 2002 hinaus (SIDC 2002).

Sie führen dazu, daß bei der relativen Positionierung die maximalen Basislinienlängen zwischen den beiden Stationen beschränkt ist. Während in Zeiten geringer ionosphärischer Störungen kinematische oder schnelle statische Mehrdeutigkeitslösungen auch über mehrere 10er Kilometer möglich sind, können sie in Zeiten starker Störungen auf wenige Kilometer begrenzt sein. Bessere Ergebnisse erzielt man, wenn die relativen ionosphärischen Einflüsse in regionalen Referenzstationsnetzen erfaßt werden.

Korrektur relativer ionosphärischer Fehler in Referenzstationsnetzen

Die effektivste Methode zur Verringerung ionosphärischer Einflüsse ist die relative Positionierung über geringe Entfernungen. Übersteigen diese Entfernungen aber einige Kilometer und weist die Ionosphäre Inhomogenitäten in der Elektronenverteilung auf, so gelingt eine kinematische oder schnelle statische Positionierung vielfach nicht mehr oder zumindest nicht mehr mit Zentimeter-Genauigkeit. Deswegen nutzt man bei größerem Referenzstationsabstand die Beobachtungen eines Netzes von Referenzstationen, um diese relativen ionosphärischen Einflüsse in Modellen zu erfassen und korrigieren zu können. Ebenso geht man auch mit den Einflüssen der Orbitfehler und der troposphärischen Lauf-

¹ 4. SAPOS-Symposium, 21.-23. Mai 2002 in Hannover, S. 132-138.

zeitfehler um. Jene haben aber im allgemeinen einen geringeren Einfluß auf die schnelle Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten als die relativen ionosphärischen Fehler.

Die Korrekturmodelle zur Erfassung der relativen ionosphärischen Einflüsse in Referenzstationsnetzen müssen die besonderen Eigenschaften der Ionosphäre berücksichtigen, d.h. insbesondere die hohe räumliche und zeitliche Variabilität des wirksam werdenden Elektronengehalts. Um höchste Genauigkeiten erreichen zu können, müssen die Korrekturmodelle satellitenindividuell, möglichst kleinräumig (zwischen jeweils drei nicht zu weit voneinander entfernten Referenzstationen) und mit hoher zeitlicher Auflösung erzeugt werden. Im allgemeinen verwendet man Korrekturebenen zur zweidimensionalen Interpolation. Jede dieser Korrekturebenen wird durch jeweils zwei Parameter beschrieben: die Ebenenneigungen in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung. Diese werden als ionosphärische Flächenkorrekturparameter (FKP_{ϕ}^{iono} und FKP_{λ}^{iono}) bezeichnet und erfassen die relativen, entfernungsabhängig wirkenden ionosphärischen Einflüsse. Sie werden vielfach in Einheiten von ppm bezogen auf die L_1 -GPS-Frequenz angegeben.

Zeitreihen ionosphärischer FKP zeigen Bilder der Ionosphäre aus dem Blickwinkel präziser relativer Positionierung (Abb. 2). Sie dienen nicht nur der Fehlerkorrektur, sondern ermöglichen auch ein besseres Verständnis für die durch die Ionosphäre verursachten praktischen Probleme beim Einsatz satellitengestützter Techniken.

Ist der Elektronengehalt der Ionosphäre gering und liegen keine Störungen vor, so übersteigen die FKP-Werte 1 ppm (L_1) nur selten (vgl. Abb. 2). Von Seiten des ionosphärischen Einflusses her steht hier einer basislinienbezogenen relativen Positionierung auch über Entfernungen von 10 oder 20 km nichts im Wege. Die Korrekturmodelle aus den Referenzstationsnetzen haben nur eine geringe Wirkung.

Liegt ein hoher Elektronengehalt vor (im Beispiel der Abb. 2 ein für mittlere Breiten hoher vertikaler Elektronengehalt VEC von $51 \cdot 10^{16} \text{ el/m}^2$), so erreichen die FKP-Werte 5 ppm (L_1) und mehr. Die Korrektur dieser Fehler im Referenzstationsnetz wird mit großer Genauigkeit gelingen, da hier nur großräumige Strukturen erfaßt werden müssen.

Die Korrekturparameter nehmen noch größere Werte an, wenn ionosphärische Störungen vorliegen.

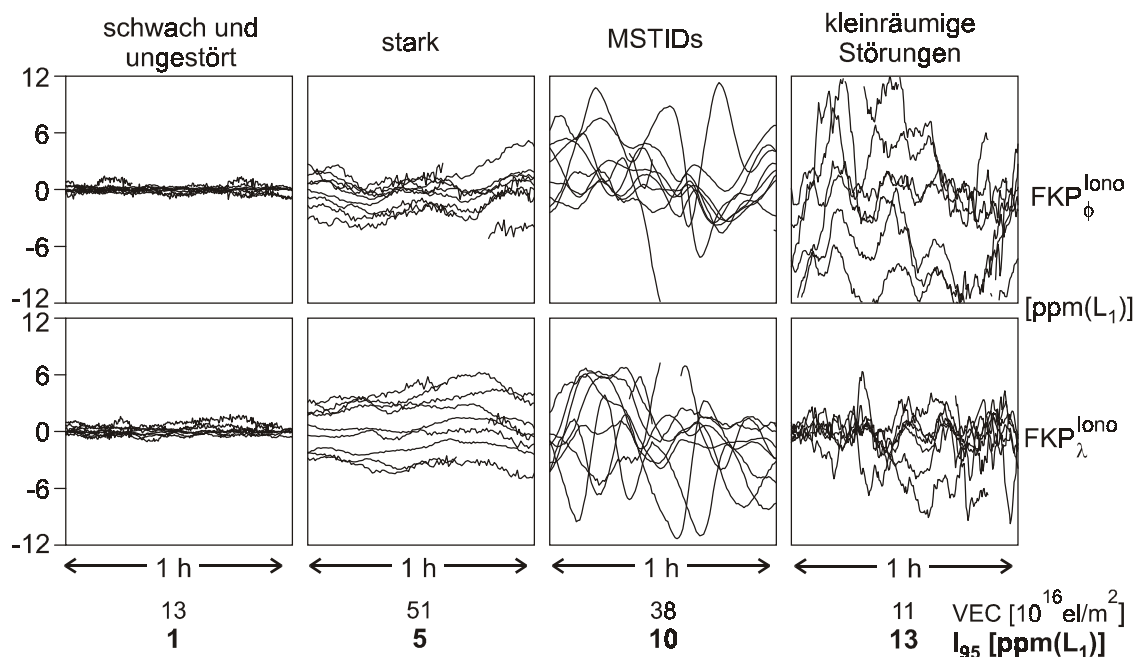


Abb. 2.: Eigenschaften der Ionosphäre und ihre Erkennung in Zeitreihen der ionosphärischen Flächenkorrekturparameter (FKP^{iono}), zugehörige I_{95} -Indexwerte.

Bei wandernden ionosphärischen Störungen mittlerer Größe (Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances, MSTIDs), die typischerweise Fehler mit Perioden von 10 Minuten bis zu einer Stunde verursachen, werden FKP-Werte von 10 und mehr ppm(L_1) beobachtet. Zwar werden diese Störungen bei einem Referenzstationsabstand von etwa 50 km zum größten Teil erfaßt, aber aufgrund ihrer geringeren räumlichen Ausdehnung verbleiben auch Restfehler, die sich negativ auf die Positionierung auswirken. Je weiter die Referenzstationen auseinander liegen, um so größer werden die vom Korrekturmodell nicht erfaßbaren Anteile sein. Andererseits sind bei ihrem Auftreten Korrekturmodelle aus Referenzstationsnetzen unverzichtbar, da die klassische Basislinienlösung mit kinematischer oder schneller statischer Mehrdeutigkeitslösung hier selbst bei geringer Basislinienlänge (wenige Kilometer) scheitern kann.

Die in mittleren Breiten seltener auftretenden kleinräumigen Störungen erzeugen ähnlich große FKP-Werte wie MSTIDs. Aufgrund ihrer noch geringeren räumlichen Ausdehnung fällt ihre Erfassung im Referenzstationsnetz aber noch schwerer.

Statistische Aufbereitung der FKP^{iono}

Für eine weitere statistische Bearbeitung der ionosphärischen Information aus Referenzstationsnetzen ist es sinnvoll, die FKP^{iono} -Werte zu Index-Werten zu kondensieren, die leicht erfaßbar die Stärke ionosphärischer Störungen und damit die zu erwartende Beeinflussung der relativen GPS-Positionierung wiedergeben. In einem ersten Schritt werden dazu die zusammengehörigen FKP-Werte für die Nord-Süd-Richtung (FKP_{ϕ}^{iono}) und die Ost-West-Richtung ($FKP_{\lambda}^{\text{iono}}$) zu einem Parameter unter Elimination der Richtungsinformation zusammengefaßt (Wanninger 1999):

$$FKP_G^{\text{iono}} = \sqrt{(FKP_{\phi}^{\text{iono}})^2 + (FKP_{\lambda}^{\text{iono}})^2}$$

Aus diesen satellitenindividuellen FKP_G^{iono} -Werten kann dann ein Index-Wert I_{95} für festgelegte Zeitabschnitte abgeleitet werden, wobei dieser folgendermaßen definiert wird: für I_{95} gilt, daß 95% der $FKP_G^{\text{iono}} \leq I_{95}$ und 5% der $FKP_G^{\text{iono}} > I_{95}$. Die 95%-Grenze wurde gewählt, da davon ausgegangen werden kann, daß die jeweils am stärksten beeinflussten Beobachtungen von einem Auswerteprogramm identifiziert und eliminiert werden können. I_{95} -Werte sind nicht nur von den ionosphärischen Verhältnissen abhängig, sondern auch vom Abstand der Referenzstationen und der verwendeten Elevationsmaske. Hier dargestellte Werte beziehen sich immer auf einen Referenzstationsabstand von ungefähr 50 km, auf eine Elevationsmaske von 14 Grad und Stundenblöcke von Daten.

Die Entwicklung der I_{95} -Werte über die letzten 4,5 Jahre (Abb. 3) läßt deutlich die Wirkung der verstärkten Sonnenaktivität erkennen. Während bis Mitte 1998 ein sehr geringer ionosphärischer Einfluß auf relative GPS-Positionierung festzustellen war, treten seitdem in den Tageslichtstunden der Wintermonate zum Teil sehr starke ionosphärische Störungen auf. Schon diese zeitliche Verteilung, aber auch die nähere Analyse der FKP-Werte läßt erkennen, daß die Hauptursache dafür im Auftreten von MSTIDs zu suchen ist. Ihre Intensität hat von Winter zu Winter zugenommen und wird wahrscheinlich im Winter 2001/2002 ihren Höhepunkt erreicht haben.

Weitere Details sind der I_{95} -Zeitreihe zu entnehmen, wenn die Tageskurven einzeln betrachtet werden (Abb. 4). Im Jahr 2001 traten neben den Mittagmaxima in den Wintermonaten (bis März und dann wieder ab Oktober), die auf MSTIDs zurückzuführen sind, weitere starke Störungen an einzelnen Tagen und zu ganz unterschiedlichen Tageszeiten auf. Diese werden durch kleinräumige Störungen in der Ionosphäre, die in direktem Zusammenhang zu solaren Eruptionen stehen, verursacht. Für ihr Auftreten ist keine jahreszeitliche oder tageszeitliche Abhängigkeit bekannt. In 2001 waren sie in den Monaten April/Mai und Oktober/November besonders häufig.

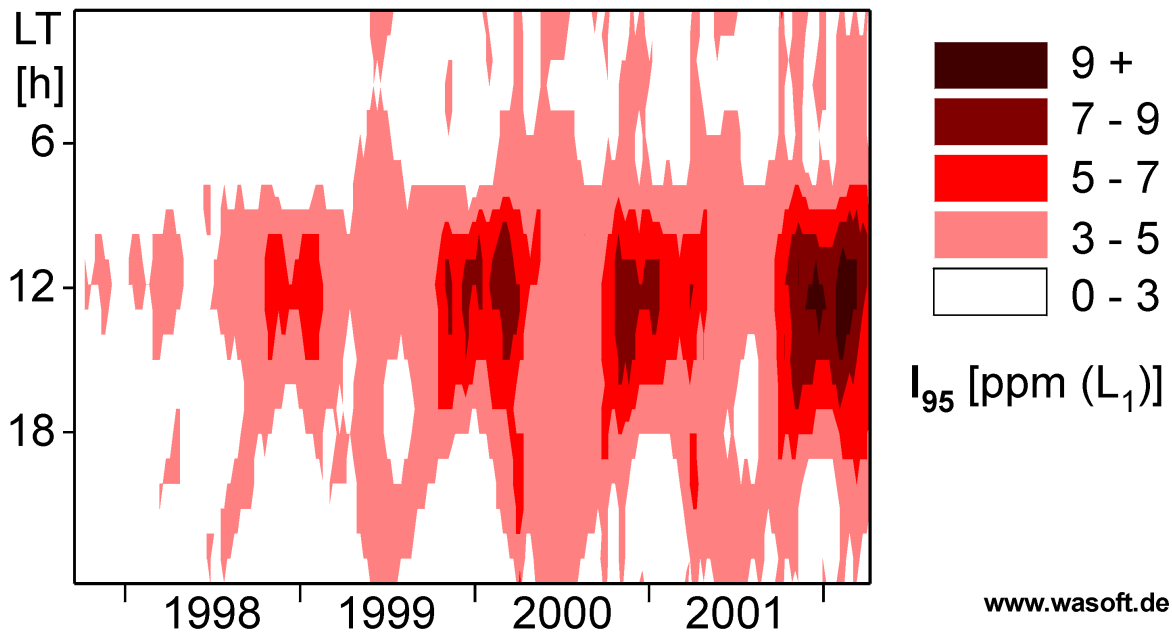


Abb. 3: Wochenmittel von I_{95} -Stundenwerten, die vom Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung, Halle aus den GPS-Beobachtungen von drei seiner Referenzstationen berechnet wurden, gültig für Mitteleuropa.

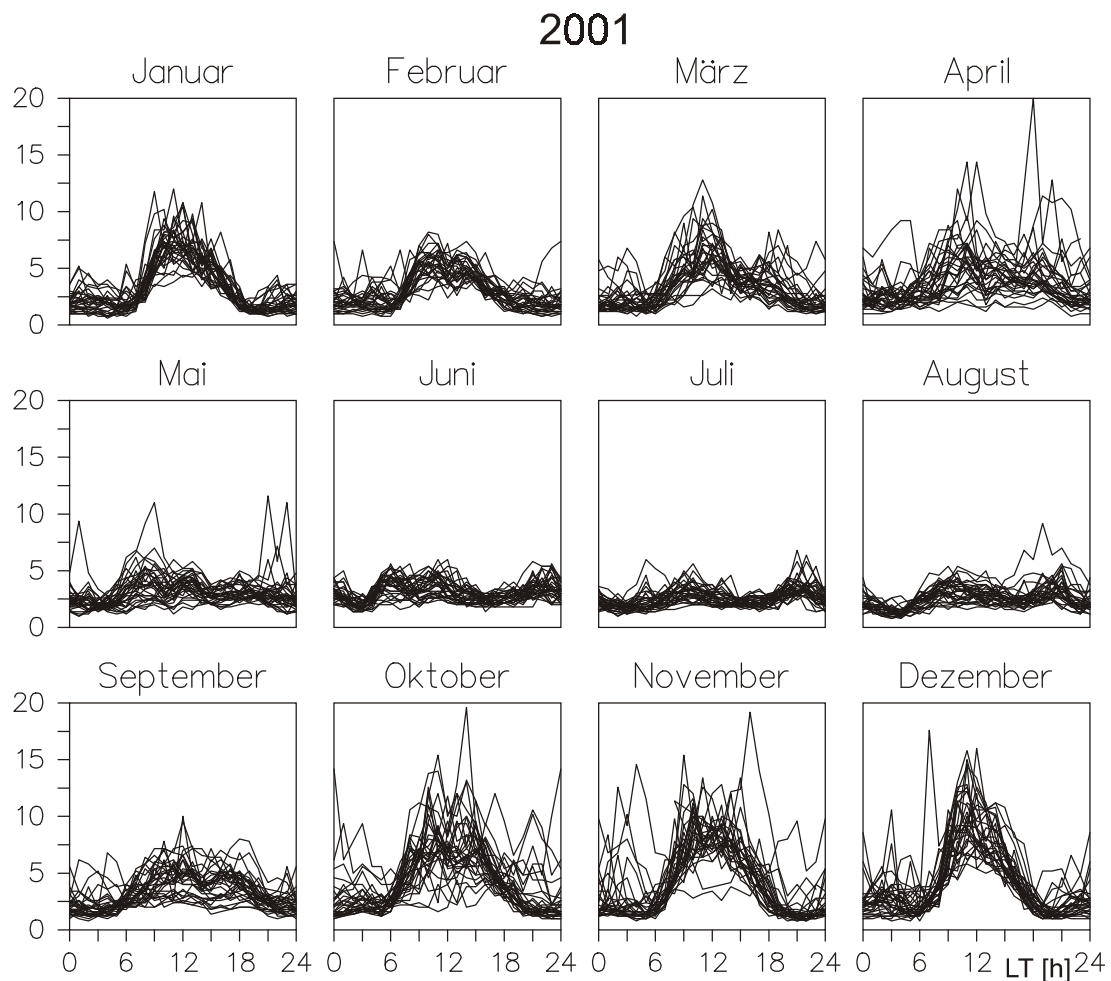


Abb. 4: Monatsweise Darstellung der Tagesverläufe von I_{95} -Stundenwerten für das Jahr 2001.

Sieht man alle Stunden mit I_{95} -Werten über 8 als besonders stark gestört an, so ergibt sich folgende Jahresstatistik für 2001 und Mitteleuropa:

- 4% aller Jahresstunden wiesen starke Störungen auf, verursacht zu etwa 85% durch MSTIDs und zu 15 % durch kleinräumigere ionosphärische Störungen,
- zwischen 9 und 15 Uhr Ortszeit in den Monaten Oktober bis Dezember 2001 waren 35% der Stunden von sehr starken Störungen betroffen,
- in den Monaten Mai bis September gab es so gut wie keine sehr starken Störungen (weniger als 0,3 %), ebensowenig zwischen frühen Abend- und frühen Morgenstunden (zwischen 17 und 7 Uhr Ortszeit weniger als 0,8 %).

Positionierung in Referenzstationsnetzen in Zeiten starker ionosphärischer Störungen

Liegen starke ionosphärische Störungen vor, ist eine klassische Basislinienlösung nur noch bis wenige Kilometer Stationsabstand durchführbar. Bei größeren Abständen zu einer Referenzstation ist man auf die Korrekturmodelle aus den Referenzstationsnetzen angewiesen. Aber auch die Positionierung in Referenzstationsnetzen wird durch starke ionosphärische Störungen beeinträchtigen. Probleme können auftreten:

- bei der Erzeugung der Korrekturmodelle, also der Berechnung der FKP-Werte und
- bei der basislinienbezogenen Positionierung.

Der wichtigste und kritischste Vorverarbeitungsschritt zur Erzeugung von Korrekturmodellen für relative Fehlereinflüsse ist die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz. Nur nach ihrer korrekten Bestimmung ist es möglich, präzise Flächenkorrekturparameter zu berechnen. Während dieser Vorverarbeitungsschritt bei Stationsabständen von 50 bis 100 km im allgemeinen leicht gelingt, erweist er sich beim Auftreten von ionosphärischen Störungen als problematisch. Dies gilt um so mehr, je weiter die Referenzstationen auseinander liegen und je größer weitere Fehlereinflüsse (insbesondere Mehrwegeeffekte, aber auch Orbitfehler und troposphärische Einflüsse) ausfallen. Als Konsequenz liegen nicht für alle sichtbaren Satelliten FKP-Werte vor, die Anzahl der verwendbaren Satelliten verringert sich und beeinträchtigt die Positionierung im Referenzstationsnetz.

Aber auch wenn die Berechnung der FKP-Werte gelingt, weisen diese aufgrund der ionosphärischen Störungen Restfehler auf, die sich dann in der Positionierung des Neupunktes negativ bemerkbar machen. Diese Auswirkungen sind anhand der Beobachtungsresiduen der Basislinie zwischen virtueller Referenzstation, die mit Hilfe der FKP aus den Beobachtungen der umliegenden realen Referenzstationen berechnet wurde, und der Nutzerstation gut erkennbar (Abb. 5). Normalerweise liegen in einer solchen Basislinie nur sehr geringe ionosphärische Restfehler vor. Die L_1 -Residuen fallen deswegen deutlich geringer aus als Residuen der ionosphären-freien Linearkombination L_0 , die weit stärker von Mehrwegeeffekten betroffen sind. Für die Mehrdeutigkeitslösung kann von geringen ionosphärischen Einflüssen ausgegangen werden. Nach der Zweifrequenz-Mehrdeutigkeitslösung erzeugt eine L_1 -Koordinatenlösung die besten Resultate.

Liegen nun aber ionosphärische Restfehler vor (in Abb. 5 aufgrund von MSTIDs), übertreffen die L_1 -Residuen die L_0 -Residuen bei weitem. Dies hat zur Folge, daß bei der Mehrdeutigkeitslösung die Existenz dieser ionosphärischen Restfehler berücksichtigt werden muß, und bei der Koordinatenlösung ist nun eine ionosphären-freie Lösung vorzuziehen.

Die Größe der ionosphärischen Restfehler ist aber bei der Basislinienauswertung aus den Beobachtungsdaten nicht direkt offensichtlich. Auswerteprogramme helfen sich deswegen damit, daß sie in Abhängigkeit von der Basislinienlänge unterschiedliche Auswertelgorithmen anwenden oder den ionosphärischen Einfluß stochastisch modellieren, wobei hierbei die Basislinienlänge in die Gewichtung mit einfließt.

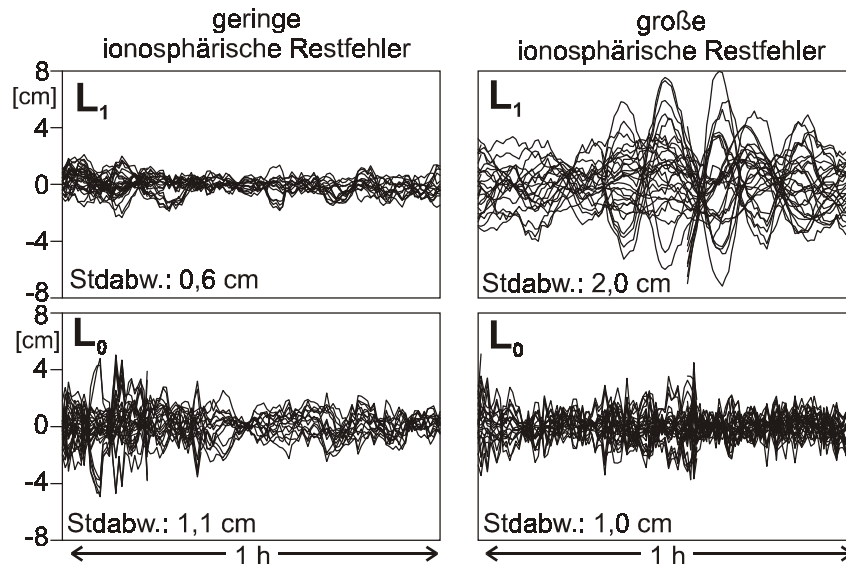


Abb. 5: Doppeldifferenz-Residuen einer Basislinie Virtuelle Referenzstation – Neupunkt für L_1 (oben) und für die ionosphären-freie Linearkombination L_0 (unten) bei ungestörten ionosphärischen Verhältnissen (links) und beim Auftreten von MSTIDs (rechts) in einem Referenzstationsnetz mit einer Ausdehnung von etwa 50 km.

Bei der Positionierung in Referenzstationsnetzen werden die Beobachtungsdaten der realen Referenzstationen zu einem für die Nutzerposition optimalen Datensatz zusammengefaßt und damit den Echtzeit- oder Postprocessing-Auswerteprogrammen suggeriert, daß die Referenzdaten von **einer** realen Station stammen. Der Nutzer positioniert sich dann relativ zu dieser einen Referenzstation. Verwendet man den Ansatz der virtuellen Referenzstation, so ist die scheinbare Basislinienlänge immer sehr kurz. Das Auswerteprogramm wird keine ionosphärischen Restfehler erwarten. Dies ist bei einem Referenzstationsabstand von etwa 50 km im allgemeinen korrekt, kann aber beim Auftreten ionosphärischer Störungen und dadurch verursachter Restfehler zu Problemen führen. Verwendet man dagegen den Ansatz „eine reale Referenzstation plus FKP“, so ist die scheinbare Basislinienlänge im allgemeinen recht groß (10 ... 20 ... 30 km). Das Auswerteprogramm wird große ionosphärische Restfehler erwarten, obwohl diese im allgemeinen durch die FKPs schon beseitigt werden konnten. Nur im Falle ionosphärischer Störungen und tatsächlicher Restfehler sind bei diesem Ansatz die Basislinienauswerteprogramme im Vorteil.

Es zeigt sich also, daß die Abschätzung der relativen ionosphärischen Fehler aus der (scheinbaren) Basislinienlänge bei der Positionierung im Referenzstationsnetz noch schwerer fällt als schon bei der klassischen Basislinienauswertung. Zusätzliche Informationen über die zu erwartende Größe ionosphärischer Restfehler müssen in die Auswertung mit einfließen. Zwei Lösungsansätze bieten sich an:

1. Die Größe der ionosphärischen Restfehler wird aus den ionosphärischen FKP-Werten abgeleitet. Diese enthalten zwar in erster Linie Informationen über relative ionosphärischen Fehler, wie sie bei einer klassischen Basislinienauswertung auftreten. Es zeigt sich aber, daß große FKP-Werte Indikatoren für ionosphärische Störungen sind (vgl. Abb. 2) und somit auf ionosphärische Restfehler bei der Auswertung im Referenzstationsnetz schließen lassen.
2. An einer Monitorstation im Netzgebiet wird die Größenordnung der ionosphärischen Restfehler bestimmt (entsprechend den L_1 -Residuen in Abb. 5) und den Nutzern in geeigneter Form mitgeteilt. Eine einzelne Monitorstation würde dabei für ein großes Netzgebiet (z.B. Deutschland) ausreichen.

Keine der beiden Lösungsansätze ist für Echtzeitanwendungen kurzfristig realisierbar, da beide eine internationale Standardisierung der FKP-Werte bzw. der Angabe über ionosphärische Restfehler voraussetzen und darüber hinaus Anpassungen bei Datenformaten und Auswertelgorithmen notwendig machen. Für Postprocessing-Anwendungen ist Lösungsansatz 1 leicht zu realisieren. Er wird im Pro-

grammpaket WaSoft/Virtuell genutzt, um den Anwender auf eventuelle ionosphärische Restfehler in der Basislinienbestimmung hinzuweisen.

Ausblick bis 2010

Die im letzten Winter über Mitteleuropa aufgetretenen ionosphärischen Störungen waren wahrscheinlich die stärksten dieses Sonnenaktivitätszyklus. Zwar ist auch noch in den Tagesstunden der kommenden Winter mit Problemen zu rechnen, aber von der Tendenz her werden in den nächsten Jahren die Störungen in Häufigkeit und Stärke deutlich abnehmen. In wenigen Jahren wird der ionosphärische Einfluß auf satellitengestützte Positionierung so gering sein, daß

- eine klassische Basislinienlösung auch über 15 km hinaus möglich sein wird, so daß man in recht dichten Referenzstationsnetzen nicht unbedingt auf Korrekturmodelle der relativen Fehlereinflüsse angewiesen ist,
- keinerlei ionosphärische Probleme bei Positionierung innerhalb der existierenden Referenzstationsnetzen auftreten werden, so daß auch in Referenzstationsnetzen mit größerem Stationsabstand (Größenordnung 100 km) bei kinematischer oder kurzzeitig statischer Positionierung cm-Genauigkeit in den Lagekomponenten erzielt werden kann,
- die Problematik der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen für Referenzstationsbetreiber und -nutzer in den Hintergrund treten und somit bei Beginn des nächsten Sonnenaktivitätsmaximums wieder für Überraschungen sorgen wird.

Dank

Das Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung (LVerMD), Halle berechnet kontinuierlich I_{95} -Index-Werte und stellte diese zur Verfügung.

Literatur

SIDC (2002): Monthly Sunspot Numbers. Solar Influence Data Center, Royal Observatory of Belgium, <http://sidc.oma.be>.

Wanninger, L. (1999): Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen. Zeitschrift für Vermessungswesen **124**:332-330.

Dr.-Ing. Lambert Wanninger
Ingenieurbüro Wanninger
Rückertstr. 16
01129 Dresden

www.wasoft.de
wanninger@wasoft.de