

Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen

Lambert Wanninger

(Zeitschrift für Vermessungswesen, 124: 322-330, Oktober 1999)

Zusammenfassung

Für die cm-genaue Positionierung innerhalb regionaler GPS-Netze aktiver Referenzstationen werden Beobachtungen virtueller Referenzstationen verwendet. Deren Qualität hängt insbesondere von den Modellen für die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse ab. Beim Auftreten ionosphärischer Störungen mittlerer Größe kann die ionosphärische Refraktion in Referenzstationsnetzen mit Stationsabständen in der Größenordnung von 50 km zwar noch zum größten Teil, aber nicht mehr vollständig erfaßt werden. Die verbleibenden ionosphärischen Restfehler haben Auswirkungen auf die Berechnung der Basislinie virtuelle Station - Mobilstation.

Summary

Positioning in regional networks of active GPS reference stations is performed by means of virtual reference stations. Their performance mainly depends on the quality of the models correcting for distance and direction dependent errors. In the presence of medium-scale ionospheric disturbances, most but not all ionospheric refraction errors are removed in regional networks with station distances in the order of 50 km. The remaining ionospheric errors adversely affect ambiguity resolution and coordinate estimation in the baseline from the virtual station to the rover station.

Key words

GPS, regionale Referenzstationsnetze, Flächenkorrekturparameter, virtuelle Referenzstationen, ionosphärische Störungen, ionosphärische Refraktion

1 Einleitung

Durch den Aufbau regionaler aktiver Referenzstationsnetze wird sich die Zentimeter-genaue Positionierung mit GPS zum Teil stark wandeln. Während augenblicklich immer noch temporäre lokale Referenzstationen für die präzise relative Positionierung notwendig sind, werden bald flächendeckende Netze von Referenzstationen mit Stationsabständen von 30, 100 oder mehr Kilometern Beobachtungen bzw. Beobachtungskorrekturen zur Verfügung stellen. Entsprechende Netze sind z.B. in Deutschland (HANKEMEIER u.a. 1998), den Niederlanden (VAN DER MAREL 1998), Österreich (DÖLLER

UND PESEC 1998) und Schweden (HEDLING UND JONSSON 1996) schon realisiert oder sie befinden sich im Aufbau. In Deutschland wurden die Ansprüche an einen solchen Positionierungsservice besonders hoch angesetzt: man möchte Genauigkeiten von einem bis wenige Zentimeter für Echtzeitanwendungen und von einem Zentimeter für schnelle statische Positionierung bei nachträglicher Datenauswertung erreichen (HANKEMEIER u.a. 1998). Dementsprechend sind die Referenzstationsabstände mit 30 bis 50 km besonders gering gewählt worden.

Solche Genauigkeiten sind nur zu erreichen, wenn alle Fehlereinflüsse gering gehalten oder durch Korrekturen vermindert werden. So müssen die Referenzstationsdaten möglichst wenig durch Mehrwegeeffekte betroffen sein. Korrekturwerte der Antennenphasenzentren müssen sowohl auf Referenzstationsseite wie auf Mobilstationsseite berücksichtigt werden. Insbesondere müssen aber die entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse (ionosphärische und troposphärische Refraktion, Orbitfehler) durch Modellierung im Referenzstationsnetz erfaßt und auf geeignete Weise korrigiert werden.

Als Modellierungsansatz der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse wird im allgemeinen eine zweidimensionale lineare Interpolation verwendet (WEBSTER UND KLEUS-BERG 1992, WANNINGER 1995, WÜBBENA u.a. 1996). Die Erfassung der Fehlereinflüsse mit hoher Genauigkeit gelingt dabei nur, wenn diese großräumiger sind als der Abstand der Referenzstationen. Für die oben genannten Referenzstationsabstände ist dies zweifellos bei Orbitfehlern der Fall. Auch großräumige troposphärische Einflüsse durch Wetterfronten können so im allgemeinen gut korrigiert werden. Dagegen sind Probleme bei lokalen oder höhenabhängigen troposphärischen Effekten zu erwarten.

Ähnliches gilt für die ionosphärischen Effekte: der Einfluß des absoluten Elektronengehalts und

der von großräumigen Gradienten kann mit hoher Genauigkeit erfaßt werden. Kleinräumige oder mittelgroße Störungen werden aber nur zum Teil korrigiert. Mit Annäherung an ein neues Sonnenaktivitätsmaximum nimmt die Häufigkeit und Stärke solcher Störungen zu. So wurden seit November 1998 in Mitteleuropa vermehrt Probleme der schnellen präzisen GPS-Positionierung aufgrund ionosphärischer Störungen beobachtet. Insbesondere war auch die Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen davon betroffen.

Nach einer kurzen Einführung in das Konzept der virtuellen Referenzstationen werden in diesem Beitrag die ionosphärischen Einflüsse aus dem Blickwinkel regionaler Referenzstationsnetze analysiert und es wird anhand von Beispieldaten aufgezeigt, welche Auswirkungen ionosphärische Störungen auf die Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen haben.

2 Virtuelle Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen

Die Verwendung virtueller Referenzstationen stellt einen Weg dar, alle Beobachtungsinformationen eines Referenzstationsnetzes zu nutzen. Die Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation werden aus den Daten der real existierenden Referenzstationen berechnet. Sie sollen ähnliche oder bessere Fehlereigenschaften aufweisen als Beobachtungen, die mit einer realen

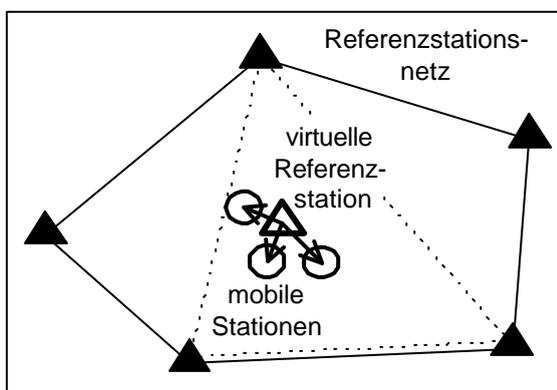


Abb. 1: Das Konzept der Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen mit Hilfe virtueller Referenzstationen. Hier: Berechnung der Beobachtungen der virtuellen Station aus den Beobachtungen von fünf (oder drei) realen Referenzstationen, Verwendung einer virtuellen Station für die Positionierung mehrerer Mobilstationen in einem kleinräumigen Meßgebiet.

Referenzstation auf derselben Position erzielt werden könnten (WANNINGER UND BÖHME 1998).

Um die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse in der Basislinie zur Mobilstation möglichst gering zu halten, werden zur räumlichen Festlegung der virtuellen Referenzstation die Näherungskordinaten der Mobilstation genutzt. Eine Genauigkeit von 100 m ist dafür mehr als ausreichend und durch absolute GPS-Positionierung jederzeit erzielbar. Es ist auch denkbar, für ein begrenztes Gebiet (z.B. das Arbeitsgebiet eines Meßtrupps an einem Tag) eine einzelne virtuelle Referenzstation zu berechnen, die dann für die Auswertung aller Beobachtungen dient (Abb. 1).

Voraussetzung für die Berechnung einer virtuellen Referenzstation ist die Zusammenführung der Beobachtungsdaten der realen Referenzstationen in einem Rechner (kommunikationsgemäße Vernetzung). Die Datenverarbeitung erfolgt dann in zwei Stufen (WANNINGER 1997, Abb. 2). In der ersten Stufe werden im Referenzstationsnetz die Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten vollständig gelöst und beseitigt, es werden flächenhafte Korrekturmodelle für die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler berechnet und es werden die Beobachtungen aller Stationen auf eine Position bezogen und zu einem Datensatz zusammengefaßt, wodurch Mehrwegefehler verringert werden (GPS-Vernetzung).

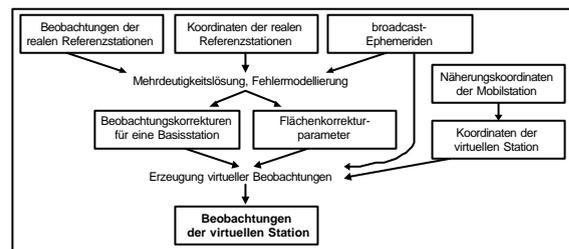


Abb. 2: Skizzierung des Datenflusses und der Berechnungsschritte zur Erzeugung von Beobachtungen virtueller Referenzstationen.

Es ergeben sich somit Beobachtungskorrekturen (d.h. um die Entfernung Satellit-Empfangsantenne gekürzte Beobachtungen) für Code- und Trägerphasenmessungen in Bezug auf die gewählte Position einer Basisstation und Korrekturmodelle der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler (Flächenkorrekturparameter), die die Umrechnung dieser Beobachtungs-

korrekturen auf beliebige andere Positionen im Netzgebiet ermöglichen. In der zweiten Stufe können die so gewonnenen Informationen genutzt werden, um die Beobachtungen der virtuellen Station zu erzeugen. Durch die Verwendung von Korrekturen für die Antennenphasen-zentren kann die virtuelle Station genau den Antennentyp erhalten, der auf den Mobilstationen verwendet wird.

Die Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstations-netz ist sehr viel einfacher durchzuführen als eine Mehrdeutigkeitslösung in unbekanntem Basislinien. Aufgrund der hochgenau bekannten Koordinaten ist die Mehrdeutigkeitsbestimmung bei Punktabständen bis 60 km im allgemeinen trivial. Andererseits müssen hier **alle** Mehrdeu-tigkeiten bestimmt werden, um für alle Beobachtungen Korrekturmodelle erstellen zu können. Probleme können insbesondere dann auf-treten, wenn die entfernungsabhängig wirken-den Fehlereinflüsse zu groß werden. Es ist deswegen sinnvoll, die ionosphärischen und troposphärischen Einflüsse soweit möglich schon bei der Mehrdeutigkeits-schätzung mit groben, nicht satelliten-individuellen Modellen zu erfassen.

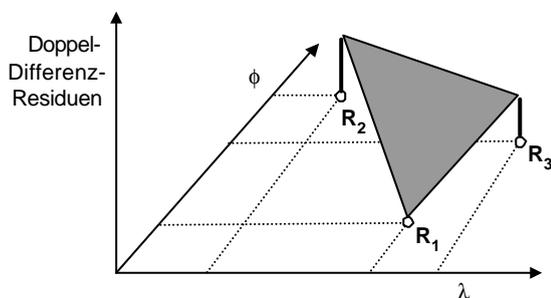


Abb. 3: Fehlermodellierung durch zweidimensionale lineare Interpolation

Von entscheidender Bedeutung für der Berechnung virtueller Beobachtungen ist der Modellierungsansatz für die entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse. Die Modellierung erfolgt satellitenindividuell und mit großer zeitlicher Auflösung (maximal epochenweise) mit Hilfe von Korrekturbenen, welches einer zweidimensionalen linearen Interpolation entspricht (Abb. 3). Bei Verwendung von drei Referenzstationen sind die Korrekturbenen eindeutig bestimmt, bei mehr Referenzstationen werden die Ebenenparameter durch Ausgleichung berechnet. Jede Korrektur Ebene wird

durch zwei Parameter beschrieben, die die Neigungen der Ebene in zwei Richtungen (Nord und Ost) festlegen. Die Modellierung der ionosphärischen Einflüsse erfolgt getrennt von den geometrischen Einflüssen (Troposphäre und Orbit), so daß pro Satellit und Epoche je vier Flächenkorrekturparameter (FKP) vorliegen. Sie werden in Einheiten von ppm angegeben, wobei die ionosphärischen Parameter den Einfluß auf das L_1 -Signal wiedergeben.

Die Berechnung der Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation kann überall dort durchgeführt werden, wo die Informationen über die gewünschte Position der Station, Beobachtungskorrekturen einer Basisstation und Korrekturmodelle zusammenkommen. Soll sie in der Rechenzentrale eines regionalen GPS-Netzes, also dort, wo die Beobachtungskorrekturen und Korrekturmodelle erzeugt werden, erfolgen, so muß der Nutzer seine Näherungsposition dorthin übermitteln und erhält von dort die Beobachtungen seiner virtuellen Referenzstation.. Andererseits kann der Nutzer die Berechnung einer virtuellen Station auch selber vornehmen, wenn er Beobachtungskorrekturen und Korrekturmodelle übermittelt bekommt. Es ist auch denkbar, daß der Nutzer die Beobachtungsdaten aller umliegenden realen Referenzstationen erhält und er beide Stufen der Berechnung der virtuellen Beobachtungen selber vornimmt.

Die Positionierung der Mobilstation erfolgt über die **eine** kurze Basislinie zur virtuellen Referenzstation (Abb. 1), die weitgehend frei von entfernungsabhängigen Fehlereinflüssen ist. Das Koordinatenergebnis einer Positionierung mit einer virtuellen Station unterscheidet sich nicht von dem Ergebnis, welches mit einer Netzausgleichung erzielt werden könnte, die identische Fehlermodellierungsansätze verwendet. Der Ansatz über eine virtuelle Station hat aber folgende Vorteile:

- *Geringerer Auswerteaufwand:* Die Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstationsnetz und die Berechnung der Fehlermodelle und Beobachtungskorrekturen muß nur einmal erfolgen, unabhängig von der Anzahl der Nutzer.
- *Qualitätskontrolle:* Gleichzeitig mit der Auswertung des Netzes der realen Referenzstationen kann eine durchgreifende Qualitätskontrolle der Beobachtungsdaten vorge-

nommen werden, so daß der Nutzer nur kontrollierte Beobachtungen zur Verfügung gestellt bekommt.

- *Geringerer Kommunikationsaufwand*: Die Datenübertragung zum Nutzer beschränkt sich entweder auf einen Satz von Beobachtungskorrekturen und die Flächenkorrekturparameter oder auf den Beobachtungsdatensatz einer virtuellen Station. Sie ist damit wesentlich geringer als bei einer Netzlösung, bei der die Daten aller Referenzstationen dem Nutzer übermittelt werden müßten.
- *Nutzung vorhandener Software*: Die Positionierung erfolgt über eine einzelne Basislinie, so daß sowohl im Post-Processing wie auch bei Echtzeit-Anwendungen (RTK - Real Time Kinematic) existierende und weit verbreitete Softwarepakete dafür eingesetzt werden können.

Alle hier vorgestellten Untersuchungen beruhen auf der Erzeugung virtueller Beobachtungen im Post-Processing. Dafür wurde das vom Autor entwickelte Auswerteprogramm Wa-Soft/Virtuell verwendet. Die virtuellen Beobachtungen werden im RINEX-Format abgespeichert, so daß die Datenauswertung der Basislinie virtuelle Referenzstation - Mobilstation mit vorhandenen Post-Processing-Softwarepaketen durchgeführt werden kann. Die erzielten Ergebnisse gelten auch für alle Echtzeit-Realisierungen.

3 Ionosphärische Einflüsse in Mitteleuropa

Aus der Sicht der relativen GPS-Positionierung kann man im wesentlichen vier Eigenschaften der Ionosphäre unterscheiden, die zu Meßfehlern in den einfachen Differenzen zwischen Stationen und damit in der relativen Positionierung führen:

- Der *absolute, vertikale Elektronengehalt* führt zu unterschiedlicher Beeinflußung der empfangenen Signale auf zwei Stationen, da die Signale eines Satelliten unter verschiedenen Elevationswinkeln auf voneinander entfernten Stationen eintreffen.
- *Großräumige horizontale Gradienten* des Elektronengehalts entstehen zum einen aufgrund seiner Breitenabhängigkeit (Gefälle

von der Äquator- zu den Polarregionen hin) und aufgrund seines Tagesganges in der Form von Ost-West-Gradienten.

Diese beiden großräumig wirkenden Einflüsse lassen sich schon mit Zweifrequenz-Beobachtungen einer einzelnen Station gut erfassen. Dafür werden sogenannte Ein-Schicht-Ionosphärenmodelle angesetzt, die in einem Koordinatensystem von Breite und Ortszeit mit mindestens drei Parametern (vertikaler Elektronengehalt VEC und ein Gradient je Koordinatenrichtung) den ionosphärischen Elektronengehalt großräumig und für Zeitspannen von einer bis mehrere Stunden modellieren (GEORGIADOU UND KLEUSBERG 1988, WILD u.a. 1989). Aufgrund der größeren zeitlichen und räumlichen Auflösung gelingt diese Modellierung aber besser in Referenzstationsnetzen auf der Ebene von Korrekturen für die relativen ionosphärischen Einflüsse mit dem oben beschriebenen Verfahren.

Die weiteren beiden Eigenschaften können als ionosphärische Störungen bezeichnet werden:

- *Wandernde ionosphärische Störungen mittlerer Größe* (Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances, MSTIDs) haben horizontale Ausdehnungen in der Größenordnung von einigen 100 km und scheinbare Perioden von 10 Minuten bis eine Stunde. Sie können auch schon bei kurzen Basislinien (kleiner 10 km) zu Fehlern auf L_1 in dm-Größenordnung führen. Sie stellen das Hauptproblem bei schnellen statischen und kinematischen Positionierungen dar. Bei statischen Beobachtungen von über 30 Minuten Dauer mitteln sie sich aufgrund ihres periodischen Charakters weitgehend heraus. Ihr Auftreten in Mitteleuropa ist im wesentlichen auf die Tagesstunden der Wintermonate in den Jahren starker Sonnenaktivität und in den darauffolgenden Jahren beschränkt (VAN VELTHOVEN 1992, WANNINGER 1993). Durch die Fehlermodellierung in Referenzstationsnetzen mit großer räumlicher (satelliten-individueller) und zeitlicher (epochenweisen) Auflösung können diese Störungen am besten erfaßt werden. Ein-Schicht-Modelle der Ionosphäre erfassen diese Störungen nicht (WANNINGER 1995).
- *Kleinräumige Störungen*, die zu Amplituden- und Phasenzintillationen führen, sind in

mittleren Breiten recht selten. Nur bei magnetischen Stürmen muß mit ihrem Vordringen aus der Nordpolarregion und dann insbesondere bei Nacht gerechnet werden. Eine deterministische Modellierung dieser Störungen ist in regionalen Referenzstationsnetzen nicht möglich.

Die ionosphärischen Flächenkorrekturparameter (FKP^l), die bei der Berechnung virtueller Beobachtungsdaten als Zwischenprodukt entstehen, geben in hoher zeitlicher Auflösung und satellitenindividuell die relativen ionosphärischen Fehler wieder. Das Beispiel der Abbildung 4 zeigt epochenweise ungefilterte Parameter für einem Zeitraum von zwei Stunden, in dem starke ionosphärische Störungen auftraten. Jede Linie verbindet die Parameter eines einzelnen Satelliten. Deutlich sind Störungen mit Perioden von 10 Minuten bis zu einer Stunde und mit Amplituden von 4 bis 10 und mehr ppm (L_1) zu erkennen, die durch MSTIDs verursacht werden.

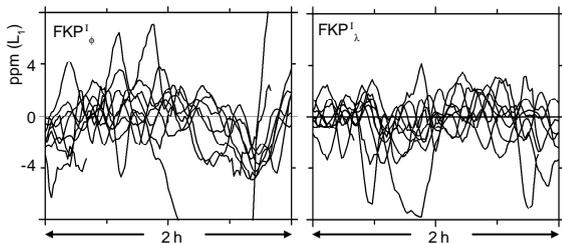


Abb. 4: Ionosphärische Flächenkorrekturparameter in einem Zeitraum starker ionosphärischer Störungen.

Um eine vereinfachte Darstellung zu ermöglichen, sollen hier die Parameter in Nord-Süd- (FKP_j^l) und Ost-West-Richtung (FKP_i^l) zu einem Neigungsparameter unter Elimination der Richtungsinformation zusammengefaßt werden:

$$FKP_G^l = \sqrt{(FKP_j^l)^2 + (FKP_i^l)^2}.$$

Ein Index I_{95} der ionosphärischen Relativfehler kann dann aus den epochenweisen FKP_G^l -Werten für Stundenblöcke von Beobachtungsdaten (Elevationsmaske 15 Grad) gerechnet werden. Dieser Index ist folgendermaßen definiert:

$$I_{95} \text{ mit } 95\% \text{ der } FKP_G^l < I_{95} \\ \text{und } 5\% \text{ der } FKP_G^l > I_{95}.$$

Die 95%-Grenze wurde gewählt, da davon ausgegangen werden kann, daß die jeweils am stärksten beeinflussten Beobachtungen von ei-

nem Auswerteprogramm identifiziert und ignoriert werden können.

Für eine Netzschleife in Sachsen-Anhalt wurden die Flächenkorrekturparameter für den Zeitraum September 1997 bis Mai 1999 berechnet und I_{95} -Indexwerte stundenweise bestimmt. Wochenmittel der Indexwerte sind in Abbildung 5 in einem Koordinatensystem von Datum und Tageszeit dargestellt. Während nachts die ionosphärischen Relativfehler gering bleiben, weisen sie ein tägliches Maximum zur Mittagszeit auf. Im Zeitraum November 1998 bis Februar 1999 wurden zwischen 9 und 15 Uhr Ortszeit die stärksten Einflüsse registriert. Dies bestätigt, daß die vermehrten Probleme von RTK- und statischer GPS-Positionierung in diesem Zeitraum auf die Ionosphäre zurückzuführen waren.

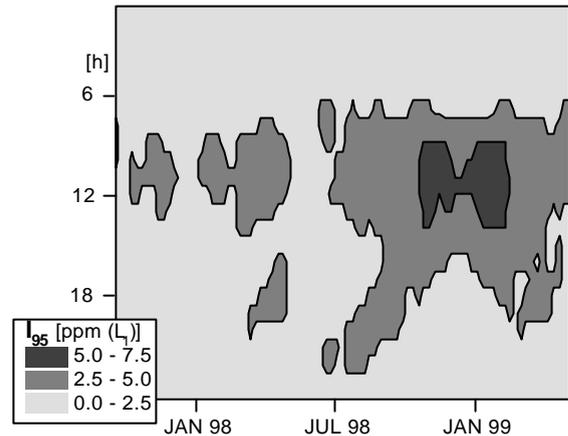


Abb. 5: I_{95} -Indexwerte für eine Netzschleife in Sachsen-Anhalt geben die Stärke ionosphärischer Beeinflussung relativer GPS-Positionierung wieder. Es sind Wochenmittel für die einzelnen Tagesstunden dargestellt.

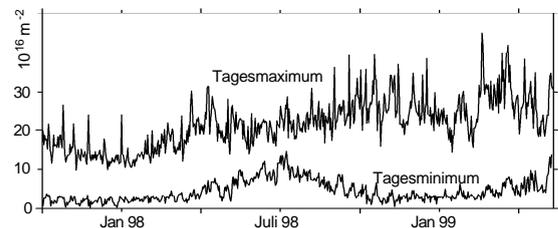


Abb. 6: Tagesmaxima und -minima des vertikalen ionosphärischen Elektronengehalts über Sachsen-Anhalt von September 1997 bis Mai 1999.

Zur besseren Interpretation der ionosphärischen Verhältnisse wurden für den gleichen Zeitraum aus den Daten einer GPS-Referenzstation Einschicht-Ionosphärenmodelle für jede Tagesstunde abgeleitet. Die Tagesmaxima und -

minima des vertikalen Elektronengehalts (VEC) weisen einen langfristigen Anstieg aufgrund des elfjährigen Sonnenaktivitätszyklusses auf (Abb. 6). Dem langfristigen Trend ist im Falle der VEC-Tagesmaxima eine halbjährliche Periode mit lokalen Maxima in den Monaten der Äquinoktien und Minima in den Monaten der Sonnenwenden überlagert. Die VEC-Tagesminima weisen eine jährliche Periode mit lokalem Maximum zur Zeit der längsten Tageslichtdauer im Juni/Juli auf. Im Zeitraum der stärksten relativen ionosphärischen Fehler beträgt der vertikale Elektronengehalt weniger als $30 \cdot 10^{16}$ Elektronen/m². Simulationsrechnungen unter Einbeziehung der Satellitenorbits zeigen, daß dieser VEC-Wert I_{95} -Indexwerte von 1,7 ppm (L_1) erzeugt und damit nur einen geringen Anteil an den Gesamtfehlern hat.

Die aus dem Ein-Schicht-Ionosphärenmodell abgeleiteten Gradienten in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung sind für alle Tage des Dezembers 1998 und Januars 1999 in Abbildung 7 dargestellt. Die Nord-Süd-Gradienten lassen das Gefälle zwischen hohem Elektronengehalt in der Äquatorregion und geringem Elektronengehalt in der Nordpolarregion erkennen. Die Ost-West-Gradienten geben die Tageszeit-Abhängigkeit wieder: Zunahme des Elektronengehalts in den Vormittagsstunden, Abnahme am Nachmittag. Maximale Gradienten liegen bei ungefähr $1 \cdot 10^{16}$ Elektronen/m² pro 100 km in Nord-Süd und $0,5 \cdot 10^{16}$ Elektronen/m² pro 100 km in Ost-West. Simulationsrechnungen zeigen, daß dies I_{95} -Indexwerten von 1,3 ppm (L_1) entspricht.

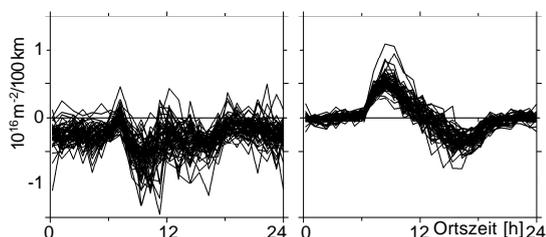


Abb. 7: Großräumige horizontale Gradienten des vertikalen ionosphärischen Elektronengehalts in Nord-Süd- (links) und Ost-West-Richtung (rechts) über Sachsen-Anhalt für alle Tage der Monate Dezember 1998 und Januar 1999.

Vertikaler Elektronengehalt und großräumige horizontale Gradienten verursachten somit ungefähr die Hälfte der relativen ionosphärischen

Laufzeitfehler in den Tagesstunden des Winters 1998/99. Der restliche Anteil ist auf Störungen mittlerer Größe (MSTIDs) zurückzuführen, die in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt wurden. Diese traten nur während der Wintermonate auf (in starker Ausprägung an ungefähr einem Drittel aller Tage), so daß ab März 1999 die ionosphärischen FPKs wieder deutlich geringere Werte annehmen. Im Winter 1997/98 wurden zwar auch MSTIDs detektiert, doch Anzahl und Amplituden waren so gering, daß sie in der stark generalisierten Darstellung der Abbildung 5 nicht zu erkennen sind. Mit neuen Störungen dieser Art ist im Winter 1999/2000 zu rechnen. Ob diese dann aufgrund der weiter zunehmenden Sonnenaktivität noch stärker ausfallen, ist augenblicklich nicht abschätzbar.

Die Modellierung dieser Störungen gelingt am besten in regionalen Referenzstationsnetzen mit dem oben beschriebenen Modellierungsansatz. Verbleibende Restfehler hängen von der Größe der Störungen einerseits und dem Referenzstationsabstand andererseits ab.

4 Virtuelle Referenzstationen unter extremen ionosphärischen Bedingungen

Zur Überprüfung der Qualität einer virtuellen Referenzstation ist am besten die Basislinie zur zugehörigen Mobilstation geeignet. Je geringer die Doppel-Differenz-Phasenresiduen ausfallen, um so besser sind die Modellierungen der entfernungsabhängig wirkenden Fehler gelungen bzw. Mehrwegeeffekte verringert worden. Durch den Vergleich der L_1 -Residuen mit den Residuen der ionosphären-freien Linearkombination kann zusätzlich noch die Stärke der verbliebenen ionosphärischen Fehler abgeschätzt werden.

Alle hier verwendeten Testdaten stammen vom Tag 313/1998. An diesem Tag traten starke Störungen durch MSTIDs zwischen 8 und 18 Uhr Ortszeit auf. Die Nachtstunden davor waren vollkommen störungsfrei. So konnten fünf-stündige Datensätze der ungestörten (0 bis 5 Uhr Ortszeit, I_{95} -Indexwerte um 1) und der gestörten Ionosphäre (9²⁰ bis 14²⁰ Ortszeit, I_{95} -

Indexwerte um 10) ausgewählt werden (Abb. 8).

Die ersten beiden Testnetze weisen Punktabstände der realen Referenzstationen von etwa 60 km auf (Abb. 9). Eine Station wurde jeweils als Mobilstation aufgefaßt und zugehörige virtuelle Beobachtungen aus den Beobachtungen von drei bzw. vier umliegenden Referenzstationen berechnet. Die Ergebnisse der Basislinienberechnungen virtuelle Station - Mobilstation werden in der Form von Standardabweichungen der Doppel-Differenz-Beobachtungsresiduen dargestellt. Zum Vergleich wurden auch die Basislinien von der Mobilstation zur jeweilig nächsten realen Referenzstation berechnet (Tab. 1). Die beiden Einzelnetze unterscheiden sich in der Lage der Mobilstation: im ersten Netz liegt sie in der Nähe des Netzzentrums, im zweiten Netz dagegen nahe bei einer realen Referenzstation.

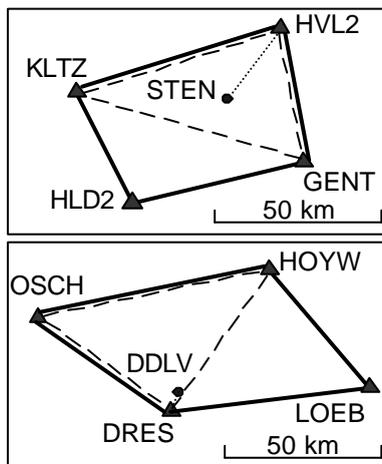


Abb. 9: Testnetze für virtuelle Referenzstationen in Sachsen-Anhalt und Sachsen.

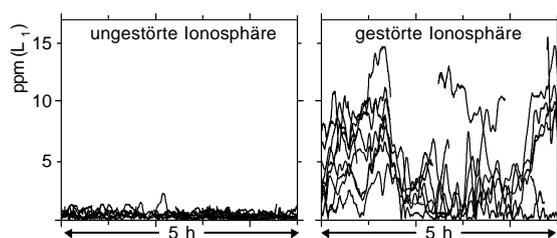


Abb. 8: FKP_G^I -Werte für zwei Zeiträume des Tages 313/1998.

Tab. 1: Standardabweichungen [cm] der Doppel-Differenz-Beobachtungsresiduen in Basislinien zur Mobilstation bei Abständen zwischen den Referenzstationen von etwa 60 km.

Basislinie	ungestörte Ionosphäre		gestörte Ionosphäre	
	iono.-frei	L ₁	iono.-frei	L ₁
Mobilstation nahe des Netzzentrums:				
nächste Ref.sta. (29 km)	2,0	2,2	2,1	12,0
virt. Station (3 Ref.sta.)	1,5	0,9	1,6	2,3
virt. Station (4 Ref.sta.)	1,4	0,8	1,6	2,2
Mobilstation in der Nähe einer realen Referenzstation:				
nächste Ref.sta. (6 km)	1,3	0,9	1,4	2,7
virt. Station (3 Ref.sta.)	1,1	0,6	1,2	0,8
virt. Station (4 Ref.sta.)	1,0	0,7	1,0	3,4

Aus den Werten der Tabelle 1 lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Bei kurzen Basislinien zur nächsten Referenzstation (6 km) sind die L₁-Beobachtungen von höherer Genauigkeit (0,9 cm) als die der ionosphären-freien Linearkombination (1,3 cm). Dies ist einerseits auf die deutlich geringere Mehrwegebeeinflussung der L₁-Beobachtungen zurückzuführen und andererseits auf die bei kurzen Basislinien und ungestörter Ionosphäre hohe Korrelation der ionosphärischen Fehler auf beiden Stationen, die eine weitestgehende Elimination ionosphärischer Einflüsse in der relativen Positionierung ermöglicht.
- Bei längeren Basislinien (29 km) oder bei starken ionosphärischen Störungen liefert die ionosphären-freie Linearkombination die besseren Ergebnisse.
- Beim Übergang auf virtuelle Referenzstationen fallen bei ungestörter Ionosphäre die L₁-Beobachtungen genauer aus als die ionosphären-freien. Ionosphärische Einflüsse konnten also weitestgehend beseitigt werden. Die Genauigkeitssteigerung bei der Koordinatenschätzung sind insbesondere darauf zurückzuführen, daß man nun nicht mehr auf die ionosphären-freie Linearkombination angewiesen ist, sondern auf L₁-Lösungen übergehen kann. Die Unterschiede, ob man virtuelle Referenzstationen auf der Grundlage von drei oder vier realen Referenzstationen berechnet hat, sind gering. Die ionosphären-freien Beobachtungen erfahren aber eine leichte Genauigkeitssteigerung beim

Übergang auf vier Stationen, da nun Mehrwegeeffekte sich zum Teil herausmitteln.

- Bei gestörter Ionosphäre gelingt die Modellierung nicht mehr so gut. Die ionosphärenfreien Beobachtungen sind nun genauer als die von L_1 . Bei der Mehrdeutigkeitslösung in der Basislinie virtuelle Station - Mobilstation muß nun mit ionosphärischen Resteffekten gerechnet werden. Die Koordinatenlösung sollte mit der ionosphären-freien Linearkombination erfolgen.
- Liegt die Mobilstation in der Nähe einer realen Referenzstation, scheitert die Ionosphärenmodellierung beim Vorhandensein von MSTIDs vollständig, wenn sie auf der Grundlage von vier Stationen erfolgt, weil die Störungen kleinräumiger sind als die Netzausdehnung. Bei einer virtuellen Station auf der Basis von drei Stationen erhält die nächstgelegene reale Referenzstation ein sehr hohes Gewicht, so daß hier trotz Störungen sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

Weitere Testrechnungen wurden auf die gleiche Art und Weise in Netzen mit unterschiedlichen Abständen der realen Referenzstation vorgenommen (Abb. 10). Die virtuellen Stationen basieren hier immer auf den Beobachtungen

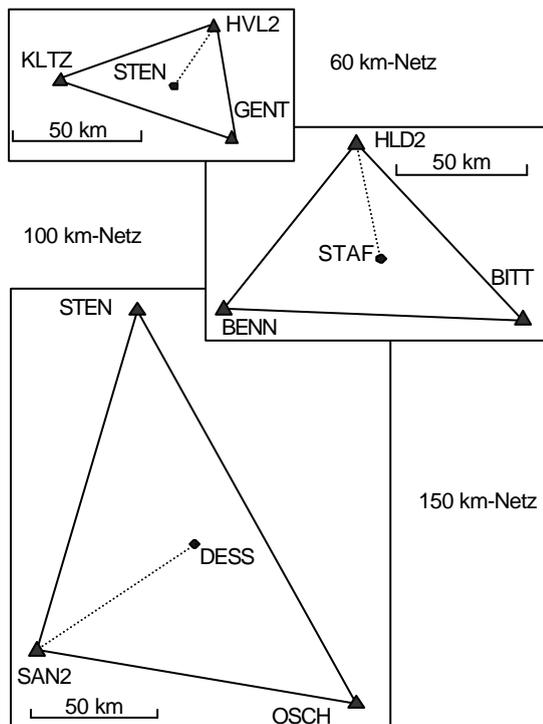


Abb. 10: Testnetze unterschiedlicher räumlicher Ausdehnung in Sachsen-Anhalt und Sachsen.

von drei realen Stationen. Die Mobilstationen liegen immer in der Nähe des Netzzentrums.

Tab. 2: Standardabweichungen [cm] der Doppel-Differenz-Beobachtungsresiduen in Basislinien zur Mobilstation bei unterschiedlichen Abständen der Referenzstationen.

Basislinie	ungestörte Ionosphäre		gestörte Ionosphäre	
	iono.-frei	L_1	iono.-frei	L_1
60 km - Netz:				
nächste Ref.sta.(29 km)	2,0	2,2	2,1	12,0
virtuelle Station	1,5	0,9	1,6	2,3
100 km - Netz:				
nächste Ref.sta.(50 km)	2,2	3,2	1,7	23,8
virtuelle Station	1,0	0,8	0,9	3,5
150 km - Netz:				
nächste Ref.sta.(75 km)	1,7	3,8	2,1	21,4
virtuelle Station	1,4	1,8	1,4	8,5

In allen Fällen kann ein großer Anteil der ionosphärischen Relativfehler modelliert und beseitigt werden (Tab. 2). Diese Modellierung gelingt aber um so schlechter, je größer der Abstand der realen Referenzstationen ist. Insbesondere bei gestörter Ionosphäre verbleiben in den 100 km- und 150 km-Netzen sehr große Restfehler. Diese werden die Mehrdeutigkeitslösung in den Basislinien virtuelle Station - Mobilstation deutlich beeinträchtigen und machen eine ionosphären-freie Koordinatenlösung notwendig.

5 Verwendung virtueller Referenzstationsdaten im Post-Processing

Wie im letzten Abschnitt gezeigt, gelingt die ionosphärische Modellierung im Referenzstationsnetz mit Stationsabständen von 60 km beim Auftreten von MSTIDs gut, aber nicht perfekt. Es verbleiben Restfehler, die bei der Basislinienberechnung virtuelle Referenzstation - Mobilstation eine Rolle spielen werden. Diese sind von um so größerer Bedeutung, da das Auswerteprogramm davon ausgeht, eine sehr kurze Basislinie (maximal mehrere 100 m) zu berechnen, die keine ionosphärischen Relativfehler aufweisen dürfte. Die Auswerteprogramme werden damit vor eine Aufgabe gestellt, auf die sie nicht unbedingt vorbereitet sind. Dies gilt sowohl für RTK-Auswertungen wie auch für nachträgliche Basislinienberechnung. In diesem Abschnitt sollen die aktuellen (April 1999) Ver-

sionen der drei wohl am weitesten verbreiteten Post-Processing-Software-Pakete auf ihre Fähigkeit hin untersucht werden, mit virtuellen Daten umzugehen.

Dafür wurden für die Netzschleife KLTZ-HVL2-GENT mit der Mobilstation STEN (Abb. 10) die beiden 5-Stunden-Beobachtungsblöcke des Tages 313/1998 in jeweils 60 5-Minuten-Stücke zerlegt und somit 120 unabhängige Basislinienberechnungen durchgeführt.

Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse wird zum einen betrachtet, ob die Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten von der Software festgesetzt werden konnten und zum anderen, ob diese Festsetzungen korrekt erfolgten. Als korrekte Lösungen werden diejenigen angesehen, bei denen die Länge des dreidimensionalen Differenzvektors zu einer Sollösung 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.

Tab. 3: Qualität der Basislinienauswertung virtuelle Referenzstation - Mobilstation bei Beobachtungsdauern von 5 Minuten.

Software-Paket	Korrektheit [%]	Zuverlässigkeit [%]	Genauigkeit: Standardabw. in Lage/Höhe [cm]
ungestörte Ionosphäre, Standardauswertalgorithmen:			
A	97	97	1,0 / 1,6
B	95	95	1,1 / 1,8
C	87	98	0,9 / 2,0
gestörte Ionosphäre, Standardauswertalgorithmen:			
A	87	87	2,2/2,9
B	80	81	2,1/3,3
C	37	96	2,0/2,7
gestörte Ionosphäre, Algorithmen für lange Basislinien (iono.-frei):			
A	97	97	1,5 / 2,8
B	83	86	2,2 / 3,5
C	37	96	1,4 / 1,8

- *Genauigkeit der Koordinatenergebnisse*: Standardabweichung der korrekten Lösungen in Lage und Höhe.

Bei ungestörter Ionosphäre und mit je 5 Minuten Beobachtungsdaten erzielen alle Softwarepakete gute Ergebnisse für die Basislinie virtuelle Station - Mobilstation (Tab. 3). Die Korrektheitsquote beträgt bei Software A und B 95% und mehr. Bei Software C liegt sie unter 90 %, wobei die Lösungen ein wenig zuverlässiger sind als die der anderen Programme. Die Standardabweichungen der Koordinatenfehler liegen in der Lage bei ungefähr 1 cm und in der Höhe bei maximal 2 cm.

Treten nun ionosphärische Störungen auf, wodurch ionosphärische Restfehler in der kurzen Basislinie verbleiben, so zeigt sich eine Verschlechterung der Auswertergebnisse bei Verwendung der Standardoptionen. Die Korrektheitsquote sinkt um 10, 15 und sogar 50 Prozentpunkte, die Koordinatenfehler steigen auf 2 cm in der Lage und ungefähr 3 cm in der Höhe an.

Alle Softwarepakete bieten nun aber auch Auswertalgorithmen für lange Basislinien, also mit Berücksichtigung von ionosphärischen Relativfehlern, an. Bei Software-Paketen A und B beziehen diese sich sowohl auf die Mehrdeutigkeitslösung wie auch auf die (dann ionosphärenfreie) Koordiantenschätzung. Normalerweise werden diese Algorithmen ab einer Basislinienlänge von 10 oder 30 km aktiviert. Diese Entscheidungsgrenze kann aber auch auf 0 km gesenkt werden, was in diesem Falle getan wurde. Software C besitzt keinen speziellen Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus für lange Basislinien, bietet aber ionosphären-freie Koordinatenlösungen an.

Bei der Mehrdeutigkeitslösung liefert Software-Paket A mit dem Algorithmus für lange Basislinien nun deutlich bessere Ergebnisse. Sie sind von denen ohne ionosphärische Störungen und mit Verwendung der Standardalgorithmen nicht zu unterscheiden. Eine leichte Verbesserung ist auch bei Programm B zu erkennen. Der Übergang von der ionosphärisch beeinflussten zur ionosphären-freien Koordinatenlösung verbessert die Genauigkeiten bei A und C deutlich. Bei B werden viele Lösungen der Widelane-

Linearkombination als endgültige Lösungen ausgegeben, so daß hier keine Verbesserungen auftreten

Die getesteten Software-Pakete kommen alle mit virtuellen Referenzstationsdaten gut zurecht. Bei ionosphärischen Restfehlern in der Basislinie virtuelle Station - Mobilstation haben sie zum Teil Probleme, die verringert werden können, wenn vom Auswerter auf einen Algorithmus für lange Basislinien umgeschaltet wird. Eine Entscheidung, welcher Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmus und welche Koordinatenlösung verwendet werden sollen, kann anhand der FKP^I -Werte (z.B. in der Form der I_{95} -Indizes) getroffen werden. Grundsätzlich gilt, daß das Auftreten ionosphärischer Störungen die erzielbaren Koordinatengenauigkeiten verschlechtert, da auf die ionosphären-freie Linearkombination zurückgegriffen werden muß.

Bei RTK-Anwendungen bereiten verbleibende ionosphärischen Restfehler in der Basislinie virtuelle Referenzstation - Mobilstation vielfach größere Probleme, da die Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen nur auf verschwindend geringe ionosphärische Einflüsse ausgelegt sind und die Koordinatenlösungen grundsätzlich auf L_1 basieren.

Die hier beschriebenen Probleme aufgrund einer gestörten Ionosphäre treten auch auf, wenn lokale temporäre Referenzstationen im Abstand von einigen Kilometern verwendet werden. Nur bei Basislinienlängen von weniger als 2 bis 4 km sind keine erkennbaren Einflüsse von MSTIDs zu erwarten.

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 Sonnenaktivitätszyklusses waren sie im Winter 1998/99 besonders häufig und stark ausgeprägt. Für die nächsten drei oder vier Winter muß mit ähnli-

chen (häufigeren ?, stärkeren ?) 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, wenn die Modelle für Subnetze von jeweils **drei** Referenzstationen berechnet werden. 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.

Der Einsatz virtueller Referenzstationen wurde für schnelle statische Positionierung im Post-Processing mit drei Software-Paketen ausgetestet. Während bei ionosphärisch ungestörten Daten gute Ergebnisse erzielt werden konnten, bereiten ionosphärische Restfehler in der Basislinie virtuelle Station - Mobilstation zum Teil erhebliche Probleme. Diese konnten durch die Wahl von Auswertelgorithmen für lange Basislinien und eine ionosphären-freie Koordinatenlösung gemindert werden. Grundsätzlich gilt aber, daß das Auftreten ionosphärischer Störungen auch in regionalen Referenzstationsnetzen die erzielbaren Koordinatengenauigkeiten verschlechtert, da auf die ionosphären-freie Linearkombination zurückgegriffen werden muß.

Dank

Die GPS-Beobachtungen wurden von den Landesvermessungsämtern in Sachsen-Anhalt und Sachsen zur Verfügung gestellt. Ein besonderer Dank gilt Thomas Leipholz vom Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung, Halle, der den größten Teil der I_{95} -Indexwerte, die der Abbildung 5 zugrunde liegen, unter Verwendung von Wa-Soft/Virtuell berechnet hat. Die Software-Hersteller, deren Produkte in Abschnitt 5 verglichen wurden, stellten ihre Programme für Testzwecke zur Verfügung. Auf ihren Wunsch hin werden die Ergebnisse anonymisiert veröffentlicht.

Literatur

- Döllner, H., Pesec, P. (1998): DGPS und DARC - Ein universeller Dienst für die präzise Navigation in Österreich. Proceed. SATNAV 98, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, 45-51.
- Georgiadou, Y., Kleusberg, A. (1988): On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning. Manuscripta Geodaetica, 13: 1-8.
- Hankemeier, P., Engel, I., Koch, S. (1998): SAPOS- ein aktives Bezugssystem für multifunktionale Anwendungen. Z. f. Vermessungswesen, 123: 149-156.
- Hedling, G., Jonsson, B. (1996): New Developments in the SWEPOS Network. Proceed. of ION GPS '96, Kansas City, 1803-1808.
- Marel, H. van der (1998): Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. Proceed. of ION GPS '98, Nashville, 49-58.
- 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. (eds.): Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Nr. 36, 77-80.
- Wanninger, L. (1993): Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. Z. f. Vermessungswesen, 118:25-36.
- Wanninger, L. (1995): Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. Proceed. of ION GPS '95, Palm Springs, 55-62.
- Wanninger, L. (1997): Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. In: Brunner, F.K. (ed.): Advances in Positioning and Reference Frames, IAG Symp. Proceed. 118: 86-92.
- Wanninger, L., Böhme, J. (1998): Verwendung virtueller Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 105:113-118.
- Webster, I., Kleusberg, A. (1992): Regional Modelling of the Ionosphere for Single Frequency Users of the Global Positioning System. Proceed. 6th Int. Geodetic Symp. on Sat. Pos., Columbus, 220-239.
- Wild, U, Beutler, G., Gurtner, W., Rothacher, M. (1989): Estimating the ionosphere using one or more dual frequency GPS receivers. Proceed. 5th Int. Geodetic Symp. on Sat. Pos., Las Cruces, 724-736.
- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Böder, V., Hankemeier, P. (1996): Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceed. of ION GPS '96, Kansas City, 1845-1852.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Lambert Wanninger
Geodätisches Institut
TU Dresden
D-01062 Dresden