

TOMOGRAPHIE IN DER IONOSPHERE UNTER EINBINDUNG VON GPS-OKKULTATIONEN

C. Stolle*, S. Schlüter°, N. Jakowski°, Ch. Jacobi*, S. Heise°, A. Raabe*

* *Institut für Meteorologie, Universität Leipzig*

° *DLR, Institut für Kommunikation und Navigation, Neustrelitz*

Email: stolle@rz.uni-leipzig.de

ZUSAMMENFASSUNG :

Wenn sich die von GPS-Satelliten gesendete Radiowellen in der Atmosphäre ausbreiten, unterliegen sie Störungen, die auf die atmosphärische Zusammensetzung zurückzuführen sind. Beim Durchqueren der Ionosphäre erfahren sie Veränderungen in Amplitude, Polarisation sowie Phasen- und Gruppenlaufzeit. Da die Ionosphäre ein dispersives Medium ist, können GPS (Global Positioning System) Zweifrequenzmessungen genutzt werden, um den entlang des Signalweges integrierte Elektronengehalt, TEC (Total Electron Content), zu bestimmen und die Messungen zur tomographischen Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung zu verwenden.

Radiookkultationsdaten, wie sie durch LEO-Satelliten (Low Earth Orbiting satellites) wie GPS-MET und CHAMP bereitstehen, sollen genutzt werden, um bestehende tomographische Arbeiten weiter zu entwickeln. Durch diesen Schritt erhoffen wir uns vor allem eine Verbesserung der vertikalen Auflösung in den Elektronendichten.

Es ist notwendig, sich mit der Ionosphäre als eine wichtige Schicht zwischen der Atmosphäre und dem Weltraum zu beschäftigen. In

diesen Höhen zwischen circa 80 und 1000 km, also den Regionen der Mesosphäre und Thermosphäre, treten dynamische Prozesse des Neutralgases in Verbindung mit elektrischen und magnetischen Effekten des Plasma auf.

Langfristige Zielsetzung der Arbeiten ist es, Beiträge für die Untersuchung ionosphärischer Störungen und Signale atmosphärischer Wellen zu leisten.

Da GPS eine kontinuierliche und preiswerte Datenquelle darstellt, sind Untersuchungen in klimatologischer Hinsicht denkbar.

EINLEITUNG

Elektromagnetische Wellen, die die Atmosphäre durchlaufen, unterliegen Veränderungen auf ihrem Strahlweg. Der Strahl wird aufgrund von vertikalen Gradienten in der Atmosphäre gebeugt, die auf die Zusammensetzung zurückzuführen sind.

Radiookkultationen bieten die Möglichkeit in der Neutralgasatmosphäre Druck- und Temperaturprofile zu bestimmen. In der Troposphäre ist der Einfluss des Wasserdampfes auf den Brechungsindex beachtlich und somit können hier Temperatur und

Luftfeuchte nicht unabhängig voneinander berechnet werden (*Kursinski et al., 1997*). Das Brechungsindexprofil wird aus der Bestimmung des Beugewinkels des Strahles meist durch die Abelinversion bestimmt. Neben Messungen der aus der Refraktion hervorgerufenen Laufzeitverlängerung sind hier auch genaue Angaben der Satellitenposition notwendig. Diese Informationsübertragung durch elektromagnetische Wellen wird aber auch durch die freien Elektronen in der Ionosphäre beeinflusst. Es liegt also eine Notwendigkeit vor, ionosphärische Störungen genauer zu untersuchen. Ein Ziel wäre kontinuierlich dreidimensionale Karten der Elektronendichteverteilung bereitstellen zu können.

In der Ionosphäre (100 -1000 km, Bereich der unteren Thermosphäre) spielt die dispersiven Ablenkung der Radiowellen durch die freien Elektronen eine entscheidende Rolle. Hierbei ist es wichtig, das GPS als bifrequentes Signal ($f_1=1575,45$ MHz, $f_2=1227,6$ MHz) zu betrachten. Die zwei Frequenzen unterliegen verschiedenen Zeitverschiebungen, Veränderungen in der Amplitude, Phase und Polarisation. Dies wird ausgenutzt, um den über den Strahlweg integrierten Elektronengehalt (TEC) aus den Messungen zu berechnen.

Auf die Trägerfrequenzen, die als Relativmessungen gelten, werden Navigationssignale (codes) aufmodelliert. Da eine genaue Bestimmung des absoluten TEC nur durch eine Kombination von Navigationssignal und Trägerphase erhalten werden kann, müssen die Rohdaten prozessiert und kalibriert werden.

Diese integrierte Größe des kalibrierten TEC kann für tomographische Untersuchungen verwendet werden, um dreidimensionale Rekonstruktionen der Elektronendichteverteilungen zu erstellen. Eine Tomographie, die mit Bodenstationsdaten des IGS (International GPS Service) arbeitet, ist bereits entwickelt. Durch Integration von LEO-Satelliten, wie CHAMP und GPS-MET, empfangenen GPS-Signalen erwarten wir eine Verbesserung der vertikalen Auflösung der Ergebnisse.

In der unteren Thermosphäre ist das Verhältnis zwischen Neutralgas- und geladenen Teilchen sehr groß. Somit hat neben elektrischen und magnetischen Feldbedingungen auch die Dynamik der neutralen Atmosphäre Auswirkungen auf das Verhalten der Elektronen. Die Resultate der tomographischen Rekonstruktionen sollen uns zu einem besseren Verständnis der Kopplung zwischen unterer und oberer Atmosphäre dienen. Im Besonderen erwarten wir Fortschritte in den Untersuchungen der vertikalen Ausbreitung von in der Troposphäre angeregten Wellen.

Das Verfahren der GPS-gestützten Ionosphärentomographie dient weiterhin zur Erschließung von neuen Datenquellen. Dadurch, dass das GPS eine kontinuierliche und kostengünstige Messmethode darstellt, sind Langzeitmessungen zur Klimatologie im Höhenbereich der Thermosphäre zu erwarten.

AUSBREITUNG DES GPS-SIGNALS IN DER IONOSPHERE

Die in den Signalen des GPS erhaltenen Komponenten lassen sich durch die Beobachtungsgleichung beschreiben. Dabei werden

jeweils die Phasenmessungen $L1$ und $L2$ und die aufmodellierten Codemessungen $P1$ und $P2$ betrachtet (RAKO, 1996):

$$P_i = R_{geo} + c * [dt - dT] + dtrop + dion(f_i) + E_Pi ,$$

$$L_i = R_{geo} + c * [dt - dT] + dtrop - dion(f_i) - \lambda_i * N_i - E_Li ,$$

mit $i = 1, 2$: GPS Frequenzen

Die freien Elektronen der Ionosphäre üben einen dispersiven Einfluss auf das Signal aus.

Dabei sind die nichtdispersiven Terme durch

R_{geo} : wahre Entfernung zwischen Sender und Empfänger
 $c*[dt - dT]$: Uhrenfehler der Satelliten und Empfänger
 $dtrop$: Troposphärischer Ausbreitungsfehler

und die dispersiven Terme durch

$dion$: Ionosphärischer Ausbreitungsfehler

E_Li / Pi : Multipath (durch Reflexion der Welle verursachter Fehler), Rauschen und instrumentelle Laufzeiteffekte

λ_i : Wellenlänge der Trägerphasen ($\lambda_1 = 0,1903$ cm, $\lambda_2 = 0,2442$ cm)

N_i : Mehrdeutigkeit der Phasenmessungen

beschrieben.

Die Beobachtungsgleichungen enthalten frequenzabhängige und – unabhängige Terme. Durch Differenzenbildung der jeweils beiden Code- und Trägerphasen werden die nichtfrequenzabhängigen Terme eliminiert:

Wir erhalten:

$$\frac{P2 - P1}{cst} = TEC + \frac{(instrumentelleLaufzeitfehler + Multipath + Rauschen)}{cst}$$

$$\text{und} \quad \frac{L1 - L2}{cst} = TEC + \frac{(Mehrdeutigkeit + Rauschen)}{cst} .$$

mit

$$dion = 40.3 * \frac{TEC}{f^2}$$

und einer empirischen Konstante

$$cst = 40.3 * \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 * f_2^2} .$$

In Abb. 1 ist die Okkultation des LEO-Satelliten GPS-MET vom 17. Juni 1995 zu sehen. Man kann erkennen, dass die P-Code-Messung sehr verrauscht ist und der Multipath einen großen Einfluss auf die Zeitreihe ausübt. Die Phasenmessung hingegen ist wenig verrauscht, unterliegt jedoch Mehrdeutigkeiten (Phasensprüngen), die nach Empfangsausfällen auftreten können. Es gilt nun, die Rohdaten auf einen absoluten TEC-Wert zu kalibrieren.

KALIBRIERUNG DER MESSDATEN

Um die Messdaten in plausibler Form weiter zu benutzen, ist es von Interesse, die wenig verrauschten Trägerphasen zu verwenden. Diese Zeitreihe jedoch unterliegt Mehrdeutigkeiten. Die Codesphasenmessung besitzt einen absoluten TEC-Wert, aber sie ist zu stark verrauscht, um genaue Aussagen zu erhalten.

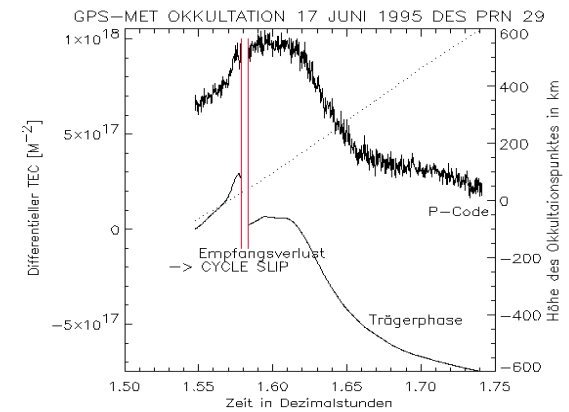
Die Kalibrierung der Okkultationsdaten erfolgte im Allgemeinen nach *Blewitt, (1990)*. Das Verfahren ist für Bodenstationsdaten

entwickelt worden und musste hier an Okkultationsbedingungen angepasst werden.

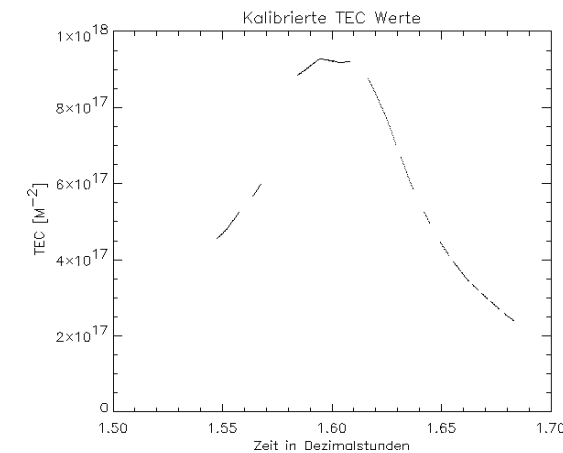
Man kann die Kalibrierungsschritte wie folgt darstellen:

- Ein Algorithmus durchsucht die Trägerphasenmessreihe nach Phasensprüngen. Es werden sogenannte zusammenhängende Bögen gebildet. Dabei werden Bögen unter 8 Messdaten für die Folge nicht weiter berücksichtigt, da Trendprognosen nur mit längeren Bögen erstellt werden können.
- Erfüllt der Phasensprung definierte Bedingungen und gilt somit als korrigierbar, werden die Messdaten nach dem Sprung auf das Niveau des bisherigen Trends angepasst.
- Im Rahmen der letztlich erhaltenen Bögen werden jeweils die Medienwerte der Träger- und der Codephase errechnet und die Trägerphasenmessreihe wird in die Codemessung gehoben. Nun wird mit der eindeutigen, wenig verrauschten Trägerphasereihe weitergearbeitet.
- Zum Abschluss erfolgt die Korrektur der instrumentellen Laufzeitfehler. Der gesamte instrumentelle Laufzeitfehler wird mittels Modellläufen zu der Differenz der Trägerphasen addiert.

In Abb. 1 a) u. b) wird die Okkultation des GPS-MET vom 17. Juni 1995 vor und nach der Kalibrierung dargestellt.



a



b

Abb. 1: P-Code- und Trägerphasenmessreihe der GPS-MET-Okkultation am 17. Juni 1995, in TEC aufgetragen über der Zeit in Dezimalangabe. a) vor der Kalibrierung: Die Codemessung ist sehr verrauscht und die Phasemessung unterliegt Empfangsausfällen und Phasensprüngen (Cycle slips). Die gestrichelte Linie zeigt die Höhe des Okkultationspunktes, der Ort an dem der Okkultationsstrahl der Erde am nächsten ist. b) bildet die selbe Okkultation nach der Kalibrierung ab: Die Trägerphase ist Cycle slip frei und eindeutig im TEC-Wert. Lücken kommen zustande, da nichtkorrigierbare Phasensprünge detektiert worden sind und zusammenhängende Bögen unter 8 Werten nicht berücksichtigt werden können.

TOMOGRAPHIE IN DER IONOSPHERE

Die über den Strahlweg integrierten TEC Messungen können durch das Verfahren der Tomographie zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Elektronendichteprofilen verwendet werden. Das Prinzip baut auf Schnittpunkte von Linienintegralen auf, die das zu untersuchende Medium durchstrahlen. Es wird eine Optimierung der zu bestimmenden physikalischen Parameter des durchleuchteten Mediums im Vergleich mit den invertierten Messwerten an den Schnittstelle unternommen.

Radiotomographie der Ionosphäre und ihre Anwendungen wurden untersucht, wie (z.B. *Pryse & Kersley, 1992; Walker et al., 1996; und Pakula et al., 1995*). Verschiedene Methoden der Ionosphärentomographie und ihre Vor- und Nachteile können in *Raymund et al. (1994, 1995)* dargestellt.

Der Ausgangspunkt der Rekonstruktion ist die Inversion der tomographische Gleichung :

$$TEC = \int_{ray} \rho \, dl ,$$

mit ρ als der Elektronendichte, und dl als der Einheit des Strahlstückes.

Es liegen mehrere Gründe vor, das hier die Iterative Algebraische Methode der Tomographie verwendet wurde. Da eine rare Verteilung der Messdaten vorliegt, ist das Inversionsproblem unterbestimmt. Weiter wäre die Invertierung von großen Matrizen notwendig. Um zeitsparender und weniger speicherintensiv zu arbeiten, werden im ART-Algorithmus die Zeilen der Matrizen nacheinander behandelt.

Dieses Verfahren lässt sich folgendermaßen beschreiben (nach *Ziemann, 2000*):

Um die tomographische Gleichung den Gitterpunkten des Programmes anzupassen, schreibt man sie in diskreter Form:

$$TEC_i = \sum_j \rho_j^* l_{ij} ,$$

mit dem i -tem Strahl und der j -ter Gitterzelle.

Zu Beginn der Berechnungen wird eine Anfangsverteilung der Elektronendichte bereitgestellt. In unserer Arbeit werden sie aus den Modellläufen des Modells IRI (International Reference Ionosphere) entnommen:

$$\rho_j^0 = \rho^{model} .$$

Ausgehend von diesem Startwert werden n Iterationsschritte durchgeführt:

$$TEC_i^n = \sum_j \rho_j^n * l_{ij} .$$

Residuenbildung des errechneten und des gemessenen TEC:

$$\Delta TEC_i^n = TEC_i^{mess} - TEC_i^n$$

Diese Differenz wird nun ausgenutzt, um eine Korrektur für die bisher errechnete Elektronendichte in der vom Strahl durchlaufenen Gitterzellen neu zu berechnen. Diese Korrektur wird aufaddiert:

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^n + \Delta \rho_j^n$$

Die Iteration wird abgebrochen, wenn eine bestimmte Anzahl von Schritten erreicht oder wenn ein nutzerdefinierter Wert von ΔTEC_i^n unterschritten worden ist.

Das Programm wird während seines Durchlaufes segmentuell geglättet und gewichtet. Auch erlaubt der Algorithmus, Vorkenntnisse über den Aufbau der Ionosphäre einzubeziehen.

DIE GEOMETRISCHE SITUATION

Für die Tomographie spielt die Verteilung der Messdaten innerhalb des Berechnungsbereiches eine entscheidende Rolle. Die besten Resultate können erreicht werden, wenn in jeder Gitterzelle ein Schnittpunkt von mindestens zwei Integrallinien liegt. Im Fall der GPS-gestützten dreidimensionalen ionosphärischen Tomographie, ist die Datensituation von der Anzahl der IGS-Empfängerstationen und den Satelliten bestimmt. Hier können nicht alle Gitterzellen abgedeckt werden. Zudem sind Informationen über die vertikale Verteilung schwierig zu erhalten, da GPS-Signale nur über einen Winkel von ca. 20° am Boden empfangen werden und somit eine Durchleuchtung der Ionosphäre in verschiedenen quasihorizontalen Höhen nicht möglich ist.

Durch das Einfügen von satellitenempfangenen GPS-Signalen kann die Datendichte erhöht und vor allem Informationen über die vertikale Struktur der Ionosphäre bereitgestellt werden (siehe Abb. 2). Besonders im letzteren Punkt erwarten wir große Verbesserungen. Es ist zu erkennen, dass fehlende vertikale Informationen, durch das

horizontale Durchstrahlen in verschiedenen Höhen von dem LEO-Satelliten ergänzt werden können. Für die horizontale Auflösung wiederum sind Bodenstationsdaten unablässig. Ausserdem wird die Anzahl der Schnittstellen zwischen Integrallinien erhöht.

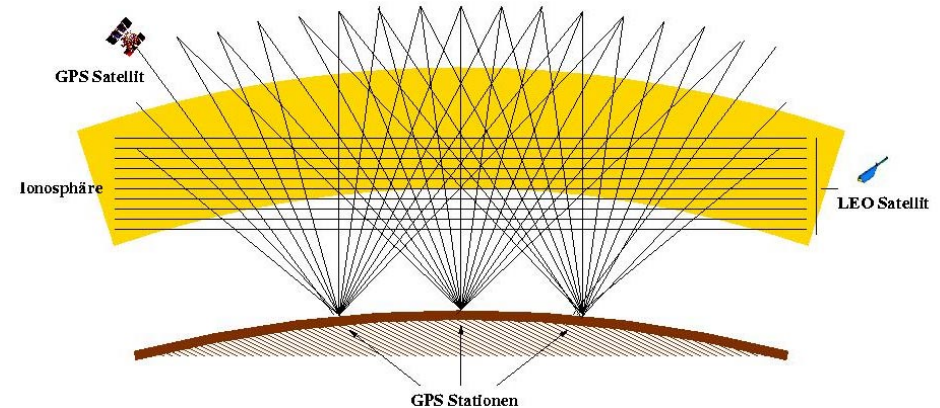


Abb. 2 : Idealisierte Strahlensituation für eine Ionosphärentomographie mit Bodenstations- und LEO-Daten. Man kann erkennen, dass die für die Tomographie notwendigen Schnittpunkte der Strahlen durch Einbindung von satellitengestützten Messungen drastisch ansteigen, sowohl auch Informationen über die vertikale Struktur gewährleistet werden.

Um einen Eindruck einer realen Strahlenverteilung zu bekommen, sind in Abb. 3 die Messungen der IGS-Stationen und die simulierten CHAMP-Daten für eine bestimmte Zeit dargestellt.

Bei der Integration von LEO-Okkultationsdaten stellen sich einige geometrische Probleme. Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, gibt es einige Okkultationen die über den Berechnungsgebietsrand hinausragen. Der Wert des herausragenden Teilstückes muss von dem gemessenen TEC-Wert abgezogen werden. Man kann diesen Teilwert aus Modellen

errechnen, bekommt aber somit eine zusätzliche Fehlerquelle hinzu. Da man anstrebt, eine möglichst große Zahl von Okkultationen mit unbehandelten Messungen einzubinden, wird es nötig sein, die geographischen Grenzen des Messgebietes zu erweitern. Der jetzige Messraum erstreckt sich über das Gebiet Europa, in dem gute Unterstützung an Empfangsstationen gegeben ist, die in Abb. 5 abgebildet sind. Bei Erweiterung des Gebietes muss man damit rechnen, dass an den Ränder Datenlücken entstehen.

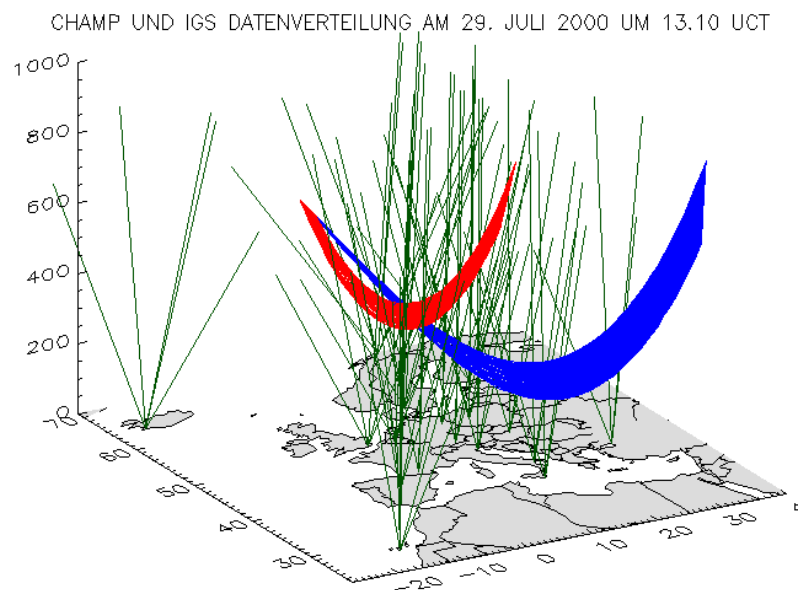


Abb 3 : Die Abbildung zeigt IGS-Stationsdaten die am 29. Juli 2000 um 13.10 UTC bereitgestellt worden sind. Die simulierten Daten von CHAMP innerhalb einer Minute sind auch abgebildet. CHAMP hat zu diesem Zeitpunkt Signale von zwei Satelliten empfangen.

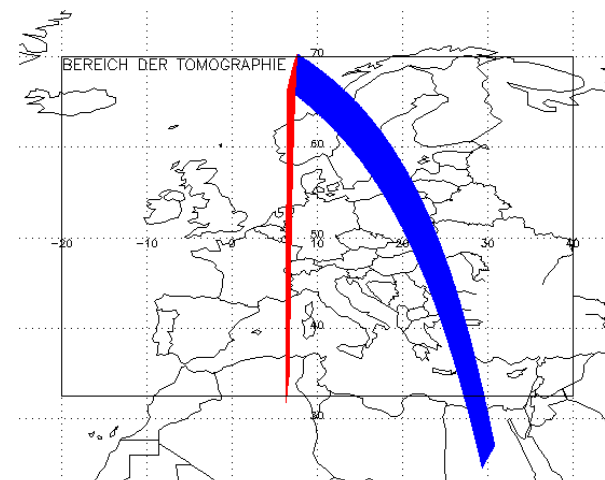


Abb. 4: Blick von oben auf die selben Okkultationen wie in Bild 5. Beide Okkultationen rgaen am südlichen Rand aus dem Berechnungsgebiet heraus.

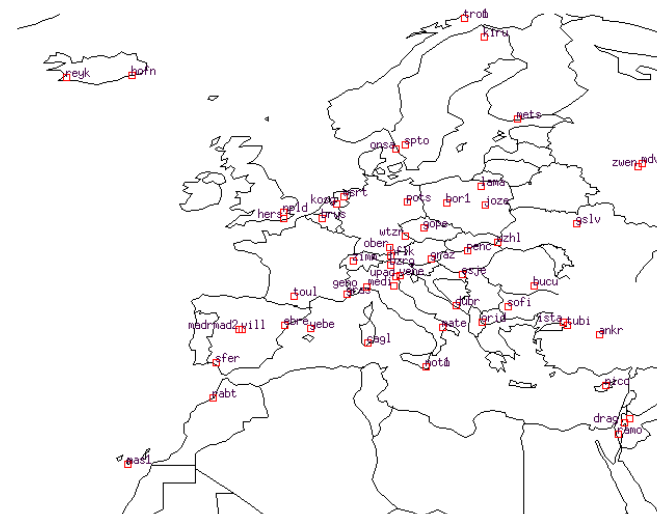


Abb. 5 : IGS-GPS-Empfängerstationen in Europa und Nordafrika. Das Gebiet der Tomographie ist mit Bodenempfangstationen unterstützt. Ausserhalb Mitteleuropas gibt es nur wenige Empfänger.

ERGEBNISSE AUS DER BODENGESTÜTZTEN GPS-TOMOGRAPHIE

Für das Ereignisses eines magnetischen Sturmes am 6. April 2000 sind erfolgreiche Läufe mit bodengestützter GPS-Tomographie unternommen worden. Als Sturm wird hier das Eindringen des geladener Partikel (Sonnenwind) in die Erdatmosphäre bezeichnet. In Abb. 6 ist der DST-Index über eine Stunde gemittelt dargestellt. Der Index ist ein Maß der Störung des Erdmagnetfeldes.

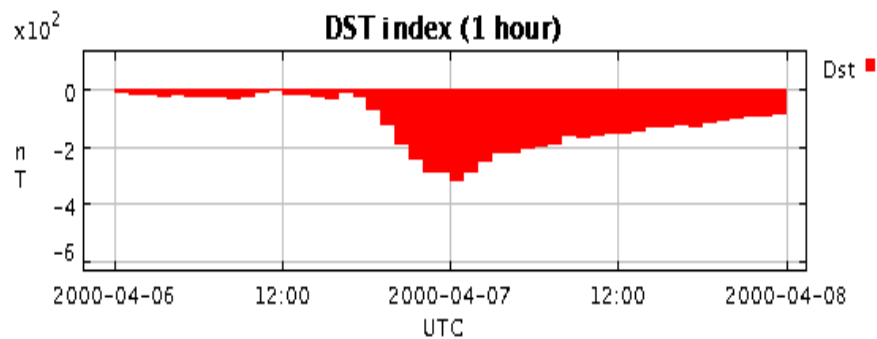


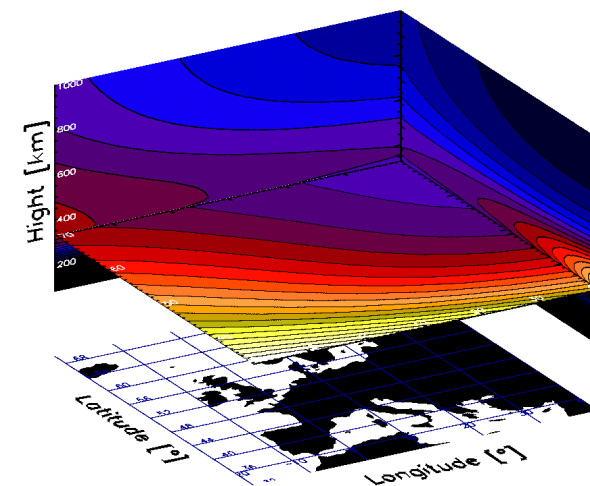
Abb. 6 : DST-Index über eine Stunde gemittelt dargestellt für den Zeitraum vom 6.4. – 8.4. 2000. Der magnetische Sturm fand in der Nacht vom 6.4 – 7.4. 2000 statt. Zu dieser Zeit ist eine starke Störung des Erdmagnetfeldes detektiert worden.

Für 21.00 Uhr am 6.4.2000 wird das Ergebnis der Tomographie in Abb. 7 dargestellt.

Wir sehen links die Darstellung des Modells, das als Eingangsmodell für die Tomographie fungiert. Dieses Modell repräsentiert die ungestörte Standardatmosphäre. Man kann erkennen, dass in den nördlichen Regionen die Ionisierung geringer ist

als in den tropischen Gebieten, was auf die geringere solare Einstrahlung in hohen Breiten zurückzuführen ist. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis der Tomographie mit den zu dieser Zeit zur Verfügung stehenden GPS-Daten dargestellt. Für diesen Lauf sind zur weiteren Unterstützung TEC-Werte aus imaginären vertikalen Integrallinien eingebunden. Informationen über die Werte wurden aus den TEC-Analysen für die selben Zeit entnommen (Jakowski, 1996).

Die solaren geladenen Partikel koppeln aufgrund des Aufbaues der Erdmagnetfeldes in den Polarregionen ein. Man kann gut erkennen, dass die Elektronendichte in hohen Breiten sehr hohe Werte aufweist. Die einfallenden geladenen Partikel stören die Ionosphäre und rufen verstärkt Ionisierung hervor. Der magnetische Sturm konnte also gut durch die Tomographie dargestellt werden.



a

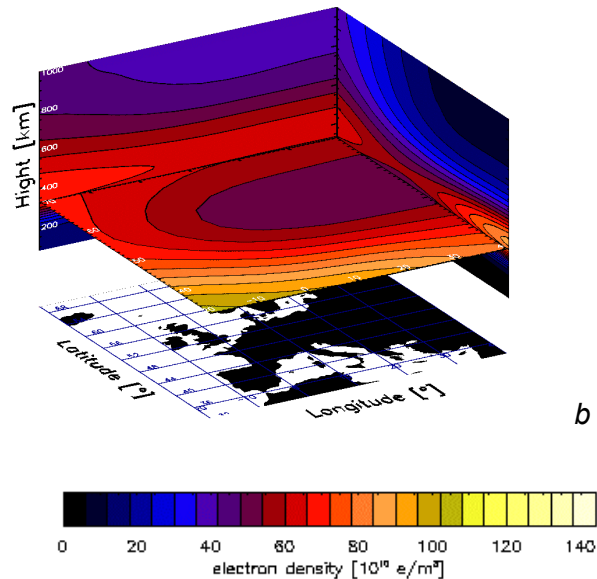


Abb. 7 : Modellionosphäre und tomographische Rechnung am 6. August um 21.00 Uhr über Europa. Es sind die Nord- und die Ost-Seite des Berechnungsgebietes und ein Horizontalschnitt in 325 km abgebildet a) Modellionosphäre: aufgrund der schwächeren Sonnenstrahlung ist die Elektronendichte in den Polarregionen geringer b) Tomographie des magnetischen Sturmes: durch die Einkopplung der geladenen Teilchen in den hohen Breiten sind die Elektronendichte in den Polarregionen verstärkt.

AUSBLICKE

Es wurde eine dreidimensionale Tomographie der Ionosphäre entwickelt, die mit Unterstützung von bodenempfangenen GPS-Daten arbeitet. Erste Läufe haben gezeigt, dass die Ergebnisse plausibel sind und die Realität gut nachbilden. Es wurden jedoch Mängel in der vertikalen Auflösung erkannt.

Infolge dessen werden satellitengestützte GPS-Daten des LEO-Satelliten CHAMP eingebunden, um die höhenabhängige Struktur der Ionosphäre besser nachbilden zu können. Hierfür wurden bereits GPS-MET- und CHAMP-Okkultationsdaten erfolgreich kalibriert.

Nach Integration dieser zusätzlichen Datenquelle sollen zum Einen Untersuchungen von troposphärisch angeregten Wellen in Verbindung mit TID's (Traveling Ionospheric Disturbances) durchgeführt werden. Erste Berechnungen dieser Art wurden bereits von Pryse et al.(1995) und Nygrøn et al.(1996) unternommen.

Zum Anderen wird eine kontinuierliche Berechnung von Elektronendichtefeldern angestrebt. Dies kann einen Beitrag zur Erstellung einer Klimatologie im Bereich der Thermosphäre leisten und zu fortlaufenden Ionosphärenkorrekturen des Radiowellensignals für die Erforschung der Neutralgasatmosphäre mittels GPS dienen.

DANKSAGUNG

Das CHAMP-Projekt wird vom GeoForschungsZentrum Potsdam geleitet. Die Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Kz: RA 569/5-1) und durch das INTA-Projekt (Kz: 991-1186) unterstützt.

LITERATURVERZEICHNIS

- Blewitt, G., An automatic editing algorithm for GPS Data, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 3, 199-202, 1990
- Jakowski, N., TEC Monitoring by Using Satellite Positioning Systems, *Modern Ionospheric Science*, (Eds. H.Kohl, R. Rüster, K.

- Schlegel), EGS, Katlenburg-Lindau, ProduServ GmbH Verlagsservice, Berlin, pp 371-390, 1996
- Kursinski, E.R., Hajj, G.A., Schofield, J.T., Linfield, R.P., Hardy, K.R., Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 102, D19, 23,429-23,465, 1997
- Nygrøn, T., Markkanen, M., Lehtinen, M., Tereshchenko, E.D., Khudukon, B.Z., Evstafiev, O.V., Pollari, P., Comparison of F-region electron density observations by satellite radio tomography and incoherent scatter methods, *Ann. Geophysicae*, 14, 1422-1428, 1996
- Pakula, W.A., Fourgere, P.F., Klobuchar, J.A., Kuenzler, H.J., Tomographic reconstruction of the ionosphere over North America with comparisons to ground-based radar, *Radio Sci.*, 30, 1, 89-103, 1995
- Pryse, S.E., Kersley, L., A, A preliminary test of ionospheric tomography, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 54, 7/8, 1007-1012, 1992
- Pryse, S.E., Mitchell, C.N., Heaton, J.A.T., Kersley, L., A, Travelling Ionospheric disturbances imaged by tomographic techniques, *Ann. Geophysicae*, 13, 1325-1330, 1995
- RAKO, Projektabschlussbericht, Projektleiter: Engler, E., DLR Neustrelitz, 1996
- Raymund, T.D., Pryse, S.E., Kersley, L., Heaton, J.A.T., Tomographic reconstruction of ionospheric electron density with European incoherent scatter radar verification, *Radio Sci.*, 28, 5, 811-817, 1993
- Raymund, T.D., Franke, S.J., Yeh, K.C., Ionospheric tomography: its limitations and reconstruction methods, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 5, 637-357, 1994
- Raymund, T.D., Comparison of several ionospheric tomography algorithms, *Ann. Geophysicae*, 13, 1254-1262, 1995
- Walker, I.K., Heaton, J.A.T., Kersley, L., Mitchell, C.N., Pryse, S.E., Williams, M.J., EISCAT verification in the development of ionospheric tomography *Ann. Geophysicae*, 14, 1413-1421, 1996
- Ziemann, A., Eine theoretische Studie zur akustischen Tomographie in der atmosphärischen Grenzschicht, *Wissenschaft. Mitteilungen aus dem Inst. f. Meteorologie und dem Inst. f. Troposphärenforschung*, 19, 2000