

KLIMAWANDEL-MONITORING MIT SATELLITENGETRAGENEN GNSS OKKULTATIONSENSOREN

Ulrich Foelsche, Gottfried Kirchengast und Andrea K. Steiner

Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie (IGAM), Universität Graz, Graz, Österreich.

Luis Kornblueh, Elisa Manzini und Lennart Bengtsson

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Deutschland.

Paper, Proc. CD-Rom
der DACH (deutsch-
österreich.-schweiz.) Mete-
orologientagung 2001,
Sept. 2001, Wien, A.

KURZFASSUNG.

Die satellitengestützte Radio-Okkultationsmethode stellt ein neues vielversprechendes Werkzeug für Klima- und Klimawandel-Monitoring dar. Die Grundlage der Radio-Okkultationsmethode sind Signale von GNSS (Global Navigation Satellite System) Satelliten, die von LEO (Low Earth Orbit) Satelliten empfangen werden, nachdem sie die Ionosphäre und Atmosphäre der Erde durchquert haben und dabei verdunkelt („okkultiert“) wurden. Das GNSS umfaßt derzeit nominell 4 Dutzend Satelliten: es besteht aus dem U.S.-amerikanischen GPS (Global Positioning System) und dem russischen GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System); ein europäisches System (GALILEO) aus 30 weiteren Satelliten ist in Vorbereitung. In Okkultationsgeometrie durchqueren die Radiosignale kurz vor dem Untergang eines GNSS Satelliten aus Sicht des Empfängers immer dichtere Atmosphärenschichten und werden dabei entsprechend den Brechungseigenschaften des Mediums gebrochen und verlangsamt. Eine analoge Situation tritt ein, kurz nachdem ein GNSS Satellit aufgeht. Die Hauptobservable, die mit Millimetergenauigkeit gemessen werden kann, ist die atmosphärische Phasenweg-verlängerung (relativ

zum Vakuum-Phasenweg). Aus derartigen Phasenwegprofilen werden Brechungsindexprofile und daraus Profile fundamentaler atmosphärischer Parameter wie Dichte, Druck, Temperatur und Wasserdampf berechnet. Bereits mit einem einzigen GNSS Empfänger können pro Tag etwa tausend solcher über den ganzen Globus verteilter Profile gemessen werden. Für Klima-Monitoring eignet sich die Methode besonders durch die Kombination aus globaler Bedeckung, Langzeit-Stabilität und hoher Genauigkeit und vertikaler Auflösung. Wir führen derzeit eine ambitionierte Studie durch, die das Potential der Methode zur Ermittlung von Temperaturtrends innerhalb der kommenden 25 Jahre untersucht und die folgende Schritte beinhaltet:

(1) Realistische Modellierung der neutralen Atmosphäre (ECHAM5/T42L39 GCM bis zur Mesopause; Treibhausgase, Aerosole und Ozon) und der Ionosphäre (empirisches zeit- und sonnenaktivitätsabhängiges 3D-Modell) für die Periode 2001 bis 2025.

(2) Realistische Modellierung der fehlerbehafteten Phasenwegmessungen für eine kleine Konstellation von GNSS-Empfängern (6 LEO Satelliten) innerhalb dieser Periode.

(3) State-of-the-art Datenverarbeitung für die Gewinnung von Temperaturprofilen in der Troposphäre und in der Stratosphäre (Kernregion 8 bis 40 km) zur Gewinnung eines signifikanten Satzes von realistisch simulierten Messungen.

(4) Multivariate statistische Analyse zeitlicher Trends innerhalb der 25 Jahr-Periode in Breite–Höhe Schnitten, einerseits für das modellierte „wahre“ Temperaturfeld (Ideal-Analyse), andererseits für das „gemessene“ fehlerbehaftete Temperaturfeld (Real-Analyse), das aus dem Satz der realistisch simulierten Messungen gewonnen wurde.

(5) Beurteilung, ob und bis zu welchem Grad das GNSS Okkultations-Beobachtungssystem in der Lage war, die Temperaturänderungen zweifelsfrei zu detektieren.

Es wird über den Aufbau und den aktuellen Stand der Studie sowie bereits vorliegende Ergebnisse aus „testbed“-Simulationen berichtet.

EINLEITUNG

Das Klimasystem der Erde wird in zunehmendem Maße vom Menschen beeinflusst (siehe z.B. *IPCC*, 1995; *IPCC*, 2001). In den kommenden Jahrzehnten wird daher der Beobachtung des Klimawandels immer größere Bedeutung zukommen. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, daß die Radio-Okkultationsmethode einen wertvollen Beitrag zu dieser Aufgabe leisten kann (z.B. *Ware et al.*, 1996; *Kursinski et al.*, 1996; *Rocken et al.*, 1997; *Steiner et al.*, 1999).

Im Abschnitt 1 wird die Radio-Okkultationsmethode kurz beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird die GNSS Klimawandel-Monitoring Studie vorgestellt. Für die Testphase („testbed“ Sommer 1997) wurden die verschiedenen Fehlerquellen eingehend untersucht, die Ergebnisse werden im Abschnitt 3 dargestellt. Abschnitt 4 bietet schließlich eine Zusammenfassung und einen kurzen Ausblick.

DIE RADIO-OKKULTATIONSMETHODE

Hier kann die Methode nur im Überblick dargestellt werden, eine genaue Ausführung findet man z.B. in *Kursinski et al.* (1997) und *Steiner et al.* (2001).

DAS MEßPRINZIP

Die Grundlage der Radio-Okkultationsmethode sind Signale von GNSS Satelliten, die von LEO Satelliten empfangen werden, nachdem sie die Ionosphäre und Atmosphäre der Erde durchquert haben und dabei verdunkelt („okkultiert“) wurden. Das GNSS umfaßt derzeit nominell 4 Dutzend Satelliten: es besteht aus dem U.S.-amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS; ein europäisches System (GALILEO) aus 30 weiteren Satelliten ist in Vorbereitung. In Okkultationsgeometrie durchqueren die Radiosignale kurz vor dem Untergang eines GNSS Satelliten aus Sicht des Empfängers immer dichtere Atmosphärenschichten und werden dabei entsprechend den Brechungseigenschaften des Mediums gebrochen und verlangsamt. Eine analoge Situation tritt ein, kurz nachdem ein

GNSS Satellit aus dem Erdschatten tritt. Abbildung 1 veranschaulicht die geometrische Situation während solcher Okkultationsereignisse.

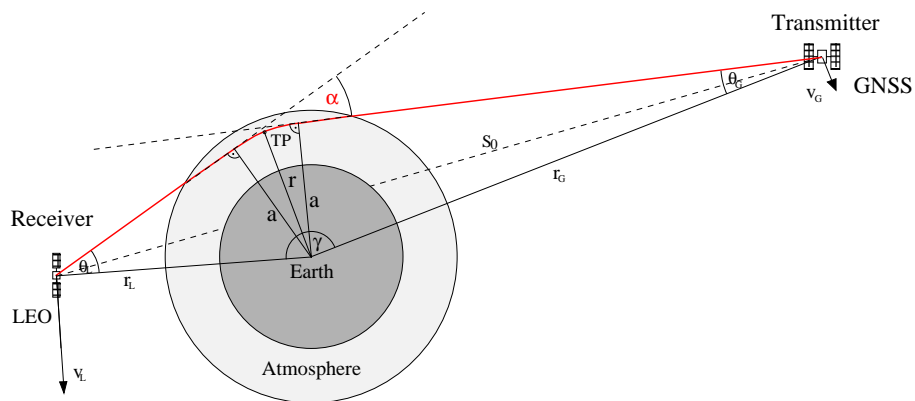


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Okkultationsgeometrie, TP bezeichnet den Tangentialpunkt, a den Impaktparameter (oder Strahlparameter), α ist der totale Brechungswinkel, der den Gesamteinfluß der Atmosphäre charakterisiert (weitere Symbole - siehe Text).

Die Basismeßgrößen während eines etwa 1 min dauernden Okkultationsereignisses sind Phasenwegverlängerung (relativ zum geometrischen Weg zwischen Sender und Empfänger) und Amplitudendämpfung (hauptsächlich durch Defokussierung der Radiostrahlen), wobei letztere nur in der Troposphäre von Bedeutung ist (z.B. Gorbunov and Gurvich, 1998).

Genaugenommen sind diese Basismeßgrößen nicht wirklich die Rohdaten des LEO Empfängers; sie werden mit satellitengeodätischen Methoden aus den Navigationsdaten des Empfängers unter Einbeziehung von hochpräzisen Satellitenorbits und einer

Uhrenkorrektur abgeleitet (siehe z.B. Kursinski et al., 1997; Hajj et al., 2001).

Aus den Phasenwegprofilen werden zunächst Brechungswinkelprofile berechnet, die dann in Refraktivitätsprofile und in weitere Folge in Profile fundamentaler atmosphärischer Parameter wie Temperatur und Wasserdampf übergeführt werden können.

VON DER PHASENMESSUNG ZUM BRECHUNGSINDEX

Die Hauptobservable, die mit Millimetergenauigkeit gemessen werden kann, ist die atmosphärische Phasenwegverlängerung (relativ zum Vakuum-Phasenweg, S_0), für zwei GNSS Trägerfrequenzen im L-Band (im Falle von GPS: $f_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 1227.60$ MHz):

$$\Delta L_1 = \int_{GNSS}^{LEO} n(s_1) ds_1 - S_0 = \Delta\phi_1 \lambda_1 \quad (1)$$

$$\Delta L_2 = \int_{GNSS}^{LEO} n(s_2) ds_2 - S_0 = \Delta\phi_2 \lambda_2 .$$

ΔL_1 ist die Phasenwegverlängerung bei der Frequenz f_1 (Wellenlänge λ_1) längs des gekrümmten Strahlweges s_1 in Abhängigkeit vom Brechungsindex n , $\Delta\phi_1$ ist die entsprechende Phasenverschiebung (analog für L_2).

Da der ionosphärische Einfluß frequenzabhängig ist (deshalb auch unterschiedliche Strahlwege s_1 und s_2), kann er mittels Messung bei zwei Frequenzen und Bildung einer Linearkombination, ΔL_c , zum größten Teil eliminiert werden:

$$\Delta L_c = \frac{f_1^2 \Delta L_1 - f_2^2 \Delta L_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (2)$$

Der Restfehler hängt vom Zustand der Ionosphäre und damit von der Sonnenaktivität ab. Die ionosphärische Elektronendichte muß daher für eine realistische Simulation von Okkultationsereignissen mit modelliert werden.

Die atmosphärische Dopplerverschiebung Δf kann nun durch Zeitableitung von ΔL_c ermittelt werden:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c} \frac{d(\Delta L_c)}{dt}. \quad (3)$$

Daten von anderen GNSS Satelliten können verwendet werden, um die genauen Positionen und Geschwindigkeiten des GPS und des LEO Satelliten und den daraus resultierenden kinematischen Dopplereffekt zu bestimmen. Gleichung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** kann nun mit kinematischen Größen in Verbindung gesetzt werden

$$\frac{\Delta f}{f} c = v_G^r \cos \theta_G + v_G^\phi \sin \theta_G + v_L^r \cos \theta_L - v_L^\phi \sin \theta_L, \quad (4)$$

wobei r und ϕ die Radial- bzw. Tangentialkomponenten der Geschwindigkeiten von LEO und GNSS bezeichnen (vgl. Abb. 1).

Aus dem Brechungsgesetz

$$n(r) r \sin \beta = \text{constant} = a, \quad (5)$$

folgt nun mit $n(r_L) = n(r_G) = 1$:

$$r_G \sin \theta_G = r_L \sin \theta_L = a. \quad (6)$$

Aus der Geometrie folgt außerdem (siehe Abb. 1):

$$\alpha(a) = \theta_G + \theta_L + \gamma - \pi. \quad (7)$$

Kennt man nun den Brechungswinkel als Funktion des Impaktparameters, so kann mittels Abel-Inversion (unter Annahme sphärischer Symmetrie) der Brechungsindex als Funktion der Tangentenpunktshöhe r berechnet werden (siehe z.B. *Fjeldbo and Eshleman, 1965; Phinney and Anderson, 1968; Fjeldbo et al., 1971*):

$$n(r_1) = \exp \left[-\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha(a) da}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} \right]. \quad (8)$$

a_1 ist dabei der Parameter eines bestimmten Strahles, r_1 die entsprechende Tangentenpunkts-höhe.

Anstelle der hier beschriebenen „Standard-Ionosphärenkorrektur“ (Gleichung 2) kann eine lineare Korrektur auch direkt auf die Brechungswinkeldaten angewandt werden (z.B. *Vorob'ev and Krasil'nikova, 1994; Rocken et al., 1997*). Weiters kann die Qualität von Brechungswinkeldaten in der oberen Stratosphäre durch Hinzufügen von Modellinformation (von der Stratopausenregion aufwärts) mittels statistischer Optimierung verbessert werden (z.B. *Hocke, 1997; Rieder and Kirchengast, 2001*).

VOM BRECHUNGSINDEX ZUR TEMPERATUR

Aus dem Brechungsindexprofil können nun Profile fundamentaler atmosphärischer Parameter wie Dichte, Druck, Temperatur und Wasserdampf berechnet werden.

Da der Brechungsindex in der Atmosphäre nur geringfügig von 1 abweicht, verwendet man üblicherweise die Refraktivität N , definiert als

$$N \equiv (n - 1) \cdot 10^6. \quad (9)$$

In Regionen mit vernachlässigbarem Wasserdampfgehalt (typisch von der oberen Troposphäre aufwärts im Kontext dieser Methode) ist die Refraktivität eine Funktion von Gesamtdruck, p [hPa], und Temperatur, T [K]:

$$N = k_1 \frac{p}{T}, \quad \text{mit } k_1 = 77.60 \text{ K/hPa}. \quad (10)$$

Unter Verwendung der idealen Gasgleichung erhält man die Dichte der trockenen Luft, ρ_d [kg/m³], als Funktion der Refraktivität (siehe z.B. *Kursinski et al.*, 1996):

$$\rho_d(z) = \frac{m_d}{R^* k_1} N(z) = b_1 N(z). \quad (11)$$

R^* ist die universelle Gaskonstante (8314.5 Jkmol⁻¹K⁻¹), m_d die molare Masse der trockenen Luft (28.964 kg/kmol). Die neue Konstante b_1 hat damit den Wert:

$$b_1 \equiv \frac{m_d}{R^* k_1} = 4.489 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3. \quad (12)$$

Da m_d im interessierenden Höhenbereich konstant ist, kann der Gesamtdruck p ($= p_d$) durch Integration der hydrostatischen Gleichung gewonnen werden:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_d(z)g(z). \quad (13)$$

g ist dabei die Schwerebeschleunigung, sie kann mit Hilfe von Standard-Schwereformeln genau berechnet werden. Die Integration beginnt in einer Höhe, in der man näherungsweise $p \cong 0$ setzen kann (in der Praxis bei ~120 km, mit einem klimatologischen Startwert für p). Der Druck p [hPa] als Funktion der Höhe ist nun gegeben durch:

$$p(z) = \int_z^\infty g(z') \rho_d(z') dz' = b_2 \int_z^\infty g(z') N(z') dz', \quad (14)$$

mit

$$b_2 = 4.489 \cdot 10^{-5} \text{ hPa s}^2/\text{m}^2. \quad (15)$$

Unter nochmaliger Verwendung der idealen Gasgleichung erhält man schließlich die Temperatur als Funktion der Höhe

$$T(z) = \frac{m_d p(z)}{R^* \rho_d(z)} = \frac{m_d b_2}{R^* b_1 N(z)} \int_z^\infty g(z') N(z') dz' = \frac{b_3}{N(z)} \int_z^\infty g(z') N(z') dz'. \quad (16)$$

b_3 ist dabei definiert als:

$$b_3 \equiv \frac{m_d}{R^*} \frac{b_2}{b_1} = 3.484 \cdot 10^{-3} \text{ K s}^2/\text{m}^2. \quad (17)$$

In der mittleren und unteren Troposphäre, wo die variable Verteilung des Wasserdampfes bedeutend wird, kommt eine Vorbearbeitung der Phasendaten zur Anwendung (z.B. mit radiographischen Methoden: *Gorbunov et al.*, 2000). In feuchter Luft können Temperatur- oder Wasserdampfprofile mittels iterativer Verfahren gewonnen werden (z.B. *Gorbunov and Sokolovskiy*, 1993). Zur gleichzeitigen konsistenten Berechnung von Temperatur- und Wasserdampfprofilen können Optimale Schätzverfahren herangezogen werden (z.B. *Healy and Eyre*, 2000).

EIGNUNG FÜR KLIMAWANDEL-MONITORING

Für Klimawandel-Monitoring eignet sich die Methode besonders durch die Kombination aus gleichmäßiger globaler Bedeckung, hoher Genauigkeit, hoher vertikaler Auflösung und Langzeit-Stabilität.

- Bereits mit einem einzigen GNSS Empfänger können pro Tag bis zu tausend gleichmäßig über den ganzen Globus verteilte Profile gemessen werden. Die Beobachtungsdichte ist über den Ozeanen gleich groß wie über Land.
- In der oberen Troposphäre und in der unteren Stratosphäre kann die Temperatur mit einer Genauigkeit von < 1 K bestimmt werden (*Kursinski et al.*, 1997), also gerade in dem Bereich, in dem anthropogene Temperaturänderungen voraussichtlich besonders deutlich ausgeprägt sein werden.
- Die vertikale Auflösung beträgt in der Nähe der Erdoberfläche etwa 0.5 km und nimmt in der Stratosphäre auf ~1.5 km ab (siehe z.B. *Melbourne et al.*, 1994).
- Durch die direkte Ableitung von Phasenwegmessungen aus einem äußerst präzisen Zeitnormal (Atomuhren bzw. Wasserstoff-Maser bei GPS Satelliten der neuesten Generation, ultrastabile Quarz-Oszillatoren auf LEO Satelliten) liefert die Radio-Okkultationstechnik selbstkalibrierte langzeit-stabile Meßwerte. Die erwartete Drift-Rate ist kleiner als 0.1 K pro Dekade.

DIE GNSS KLIMAWANDEL-MONITORING STUDIE

Wir führen derzeit eine Studie durch, die das Potential der Methode zur Ermittlung von Temperaturtrends innerhalb der kommenden 25 Jahre untersucht, und die folgende Schritte beinhaltet:

(1) Realistische Modellierung der neutralen Atmosphäre und der Ionosphäre für die Periode 2001 bis 2025.

(2) Realistische Modellierung der fehlerbehafteten Phasenwegmessungen für eine kleine Konstellation von GNSS-Empfängern (6 LEO Satelliten) innerhalb dieser Periode.

(3) State-of-the-art Datenverarbeitung für die Gewinnung von Temperaturprofilen in der Troposphäre und in der Stratosphäre (Kernregion 8 bis 40 km) zur Gewinnung eines signifikanten Satzes von realistisch simulierten Messungen.

(4) Multivariate statistische Analyse zeitlicher Trends innerhalb der 25 Jahr-Periode in Breite-Höhe Schnitten, einerseits für das modellierte „wahre“ Temperaturfeld, andererseits für das „gemessene“ fehlerbehaftete Temperaturfeld, das aus dem Satz der realistisch simulierten Messungen gewonnen wurde.

(5) Beurteilung, ob und bis zu welchem Grad das GNSS Okkultations-Beobachtungssystem in der Lage war, die Temperaturänderungen zweifelsfrei zu detektieren.

In der Durchführung der Schritte (1) bis (3), die aufwendige Simulationen beinhalten, wird neben einem Klimamodell für die Modellierung der neutralen Atmosphäre insbesondere der „End-to-End GNSS Occultation Performance Simulator“ (EGOPS) eingesetzt, ein

umfangreiches Softwarepaket zur Simulation von GNSS-Okkultationen (Kirchengast, 1998; Ramsauer and Kirchengast, 2000).

MODELLIERUNG DER NEUTRALEN ATMOSPHÄRE UND DER IONOSPHERE

Eine genaue Modellierung der neutralen Atmosphäre und der Ionosphäre ist unerlässlich, um realistische atmosphärische Profile simulieren zu können. Für die neutrale Atmosphäre verwenden wir das Hamburger ECHAM5/MA Modell. Dieses ist eine Weiterentwicklung des ECHAM4 Modells (Roeckner et al., 1999) mit nunmehr u.a. T42L39 Auflösung (Manzini and McFarlane, 1998) und einer Reihe weiterer Verbesserungen. Die Zahl der vertikalen Schichten wurde für unsere Simulationen von 19 auf 39 erhöht, die höchste Schicht liegt nun bei $\sim 0.01\text{hPa}$ ($\sim 80\text{ km}$). Durch diese Erweiterung wird auch die Variabilität der Mesosphäre erfaßt und damit die Simulation von Okkultationsereignissen mit realistischer Fehler-charakteristik ermöglicht. Abbildung 2 zeigt als Beispiel einen Schnitt durch ein T42L39 Temperaturfeld. Erst oberhalb von 70 km Höhe wird die MSISE-90 Klimatologie verwendet (Hedin, 1991).

Derzeit werden zwei ECHAM5/MA Modell-Läufe für den Zeitraum von 2000 bis 2025 durchgeführt. Der erste berücksichtigt anthropogene Treibhausgase, Sulfat-Aerosole und Ozon, der zweite ist ein Kontroll-Lauf. Rand- und Anfangsbedingungen stammen aus Langzeit-Integrationen des ECHAM4 Modells mit T42L19 Auflösung (Roeckner et al., 1999; Bengtsson et al., 1999). Die atmosphärischen

Felder werden alle 6 Stunden gespeichert, um auch tägliche Variationen zu erfassen.

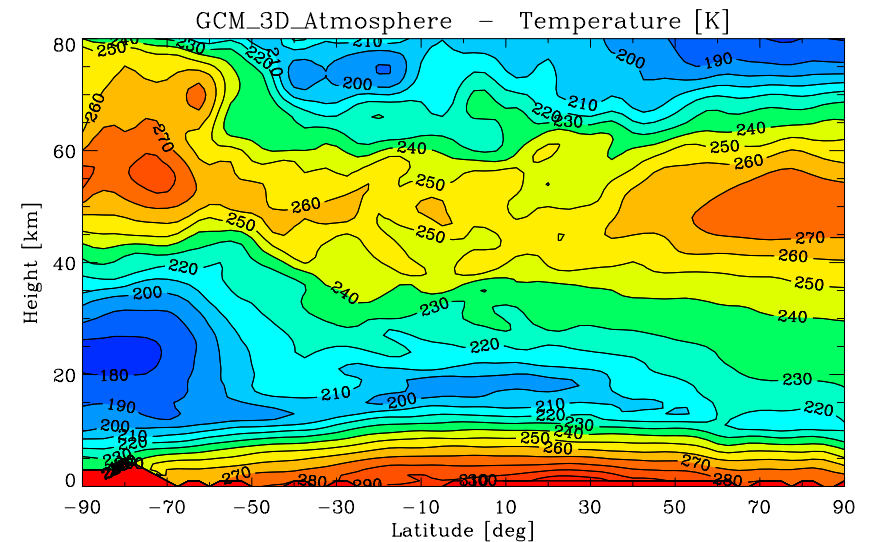


Abbildung 2: Beispiel eines ECHAM/MA T42L39 Temperaturfeldes, Meridionalchnitt bei 0°E für den 15. Juli 1997, 12 UT.

Um ionosphärische Restfehler realistisch zu simulieren, ist es nötig, auch Änderungen der ionosphärischen Elektronendichte realitätsnah zu modellieren (Steiner et al., 1999). Für die Ionosphäre verwenden wir das Grazer NeUoG Modell (Leitinger et al., 1996), ein globales empirisches 3D Modell für die ionosphärische Elektronendichte, das tägliche und saisonale Variationen, sowie die Abhängigkeit von der Sonnenaktivität erfaßt. Ein Beispiel eines Querschnittes durch die Ionosphäre ist in Abbildung 3 zu sehen.

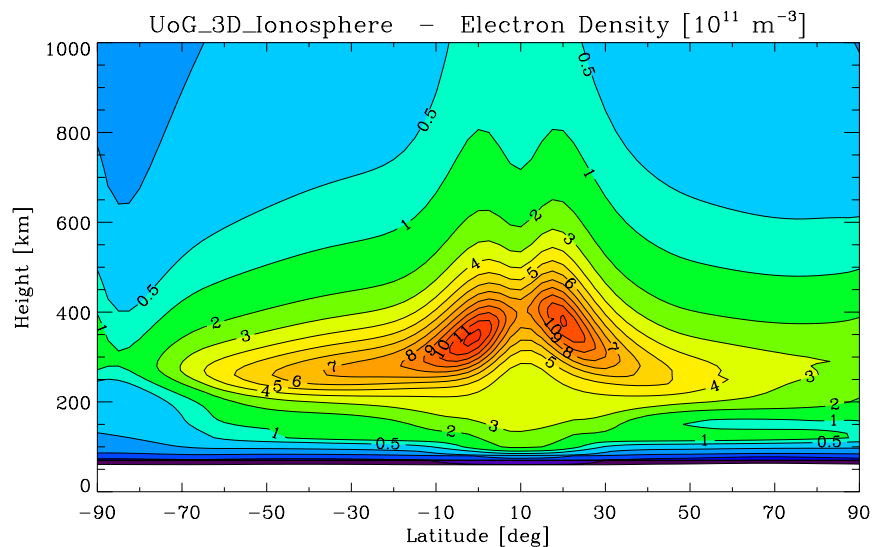


Abbildung 3: Beispiel eines NeUoG Elektronendichte-Feldes, Meridionalschnitt bei 0°E für Juli 1997, 12 UT.

Das Modell wird durch Variationen des solaren F10.7 Flusses (Flußdichte bei 10.7 cm Wellenlänge) angetrieben. „Historische“ 7-Tagesmittel, die den jeweiligen Tag (als letzten) einschließen, haben sich dabei als Indikator für von der Sonne verursachte Variationen der Ionosphäre bewährt (Leitinger and Kirchengast, 1997). F10.7 Daten der Sonnenaktivitätszyklen 21, 22 und 23 (1979 bis 1999) wurden verwendet um zukünftige Sonnenaktivitätszyklen bis 2025 zu simulieren. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der verwendeten F10.7 Variationen über den gesamten interessierenden Zeitraum.

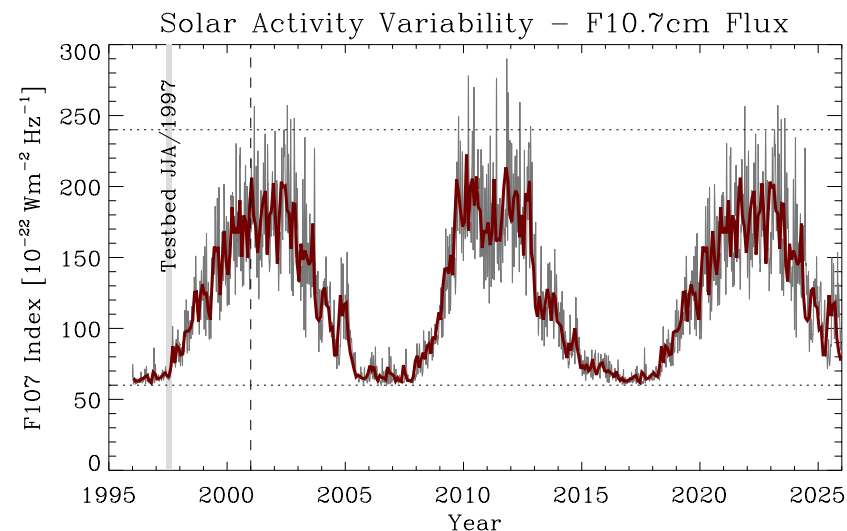


Abbildung 4: Variation des solaren F10.7 Flusses: „Historische Wochenmittel“ (grau) und Monatsmittel (rot).

MODELLIERUNG DER OKKULTATIONEN

Entsprechend dem typischen Design geplanter zukünftiger Missionen wie ACE (vgl. Kirchengast et al., 1998) und COSMIC (Kuo et al., 2000; UCAR, 2000) gingen wir von einer Konstellation aus 6 LEO Satelliten mit GNSS Empfängern aus. Zwei der Satelliten befinden sich in einem Orbit mit 30° Inklination, die anderen vier in einem Orbit mit 80° Inklination. Bei einer typischen „Lebenserwartung“ von 5 Jahren wären 5 solche Missionen nötig, um die Periode von 2001 bis 2025 abzudecken. Bei der Auswahl der Okkultationsereignisse beschränkten wir uns auf solche, die weniger als $\pm 15^\circ$ von der LEO Umlaufebene entfernt sind und damit nahezu vertikale Tangentenpunkts-Trajektorien haben. Mit dieser Einschränkung ergeben sich pro Tag etwa 2000 GNSS-Okkultationen

(oder mehr als 18 Millionen innerhalb von 25 Jahren). Um die Rechenzeit in einem erträglichen Ausmaß zu halten, mußten wir daher die Zahl der verwendeten Okkultationen weiter reduzieren. Wir beschränken uns auf die Sommersaison (Juni, Juli, August) sowie auf einen Streifen zwischen 85°S und 85°N, der symmetrisch zum Greenwich Meridian liegt. Dieser Streifen wurde in 17 „Bins“ mit jeweils gleicher Fläche unterteilt ($\pm 7.5^\circ$ Längenerstreckung am Äquator). Abbildung 5 illustriert den ausgewählten Streifen.

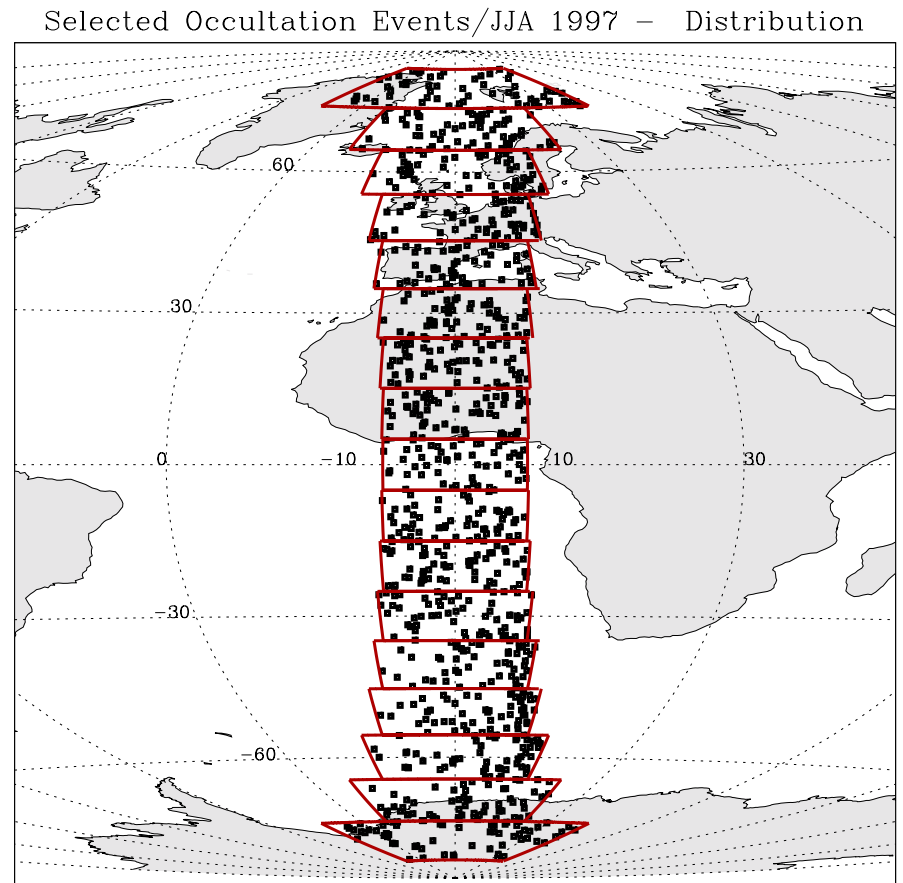


Abbildung 5: Lage der ~1000 ausgewählten Okkultationsereignisse innerhalb der Sommersaison 1997 in den 17 Breiten-„Bins“ (mit jeweils gleicher Fläche).

Die Zahl der Okkultationen reduziert sich somit auf etwa 13 000 pro Sommersaison. In der realen Welt dauert ein Okkultationsereignis etwa 2 Minuten, die Simulation mit präziser 3D Strahlverfolgung nimmt allerdings auf einer typischen Workstation mehrere Stunden in Anspruch. Aus der Gesamtzahl der Okkultationen werden daher in

einem weiteren Schritt etwa 1000 pro Saison ausgewählt (50 bis 60 pro „Bin“), die möglichst gleichmäßig in Raum und Zeit verteilt sind (siehe Abbildung 5 für die Test-Saison 1997). Bei realer Datenauswertung würde man natürlich jedes Okkultationsereignis verwenden.

Für jedes Ereignis wird nun die Geometrie mittels Kepler-Bahnelementen berechnet, die Signalausbreitung durch die Ionosphäre und Atmosphäre wird mit präziser 3D Strahlverfolgung (Genauigkeit < 1 mm) bei 10 Hz Abtastung simuliert. Die so gewonnen Phasenwegmessungen werden schließlich mit realistischen Meßfehlern überlagert. Die resultierenden Fehler (~ 2 mm Standardabweichung für Phasenmessungen bei 10 Hz Abtastung) entsprechen der Charakteristik moderner GNSS Empfänger (siehe z.B. GRAS-SAG, 1998).

GEWINNUNG VON TEMPERATURPROFILIEN

Aus den Phasenprofilen werden, basierend auf einer Erweiterung eines Algorithmus von Syndergaard (1999), Temperaturprofile errechnet. Für die Entfernung von Ausreißern werden die Brechungswinkeldaten zwischen 70 und 80 km Höhe herangezogen. Okkultationsereignisse, die im jeweiligen „Bin“ die „ 3σ Grenze“ überschreiten werden ausgeschieden; siehe Abbildung 6. Im Mittel sind davon etwa 1–3% der Ereignisse betroffen.

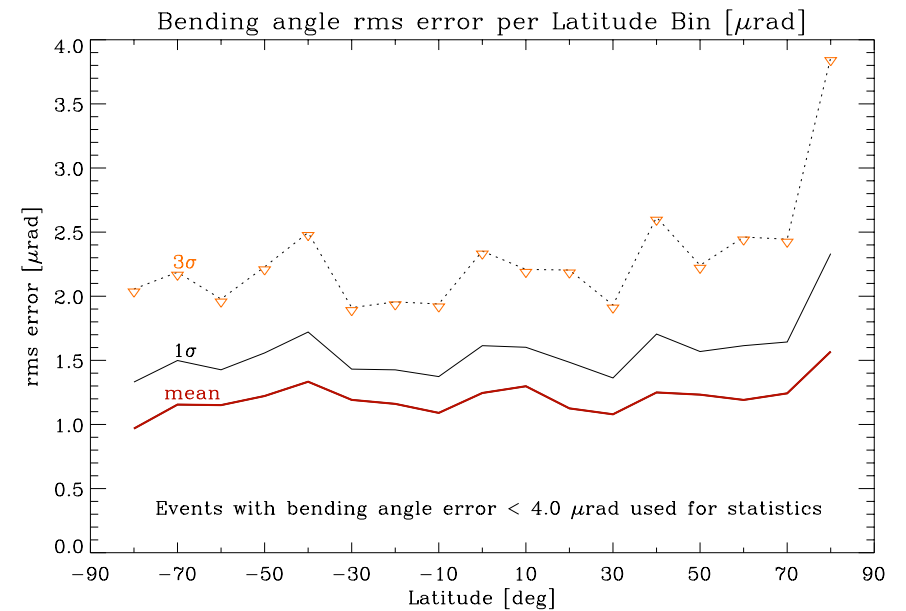


Abbildung 6: Fehler des Brechungswinkels (Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) im Höhenintervall 70 – 80km pro Breiten-„Bin“ für die Sommersaison 1997 (rote Linie), „ 1σ -Grenze“ (schwarz) sowie „ 3σ -Grenze“ (strichliert mit orangen Symbolen).

Eine detailliertere Beschreibung der Gewinnung von Temperaturprofilen findet sich in Steiner et al. (2001).

TRENDANALYSE

Die ausgewählten Temperaturprofile während einer Sommersaison werden innerhalb jedes „Bins“ (in 34 Höhen zwischen 2 km und 50 km) gemittelt. Die gemessene Klimatologie liegt damit in Form einer 17×34 Matrix vor. Zum Vergleich wird die „wahre“ Klimatologie auf dem selben Gitter direkt aus den ECHAM5/MA

Feldern ermittelt. Abbildung 7 zeigt so eine Juni-Juli-August Klimatologie für die 1997-Testdaten.

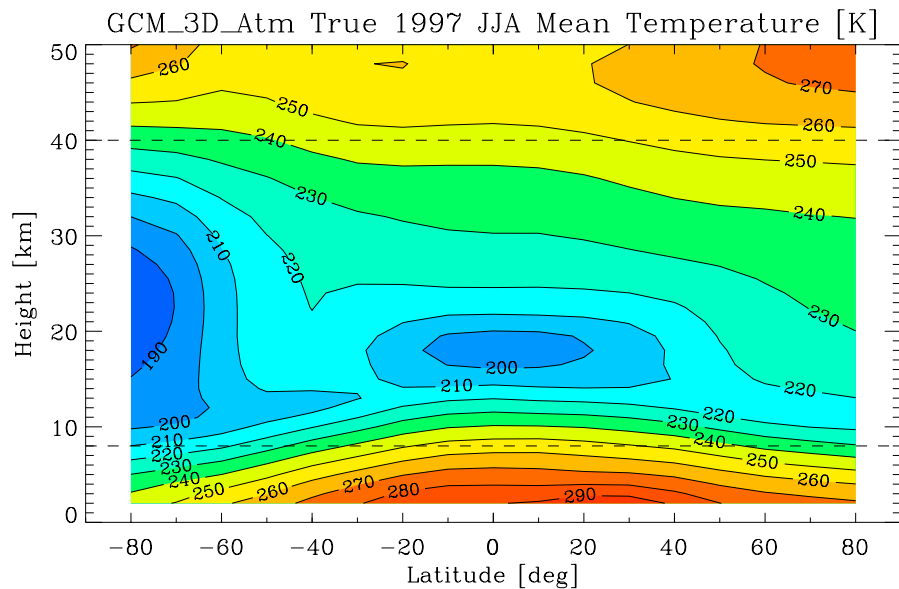


Abbildung 7: Beispiel für ein „wahres“ mittleres ECHAM/MA T42L39 Temperaturfeld für die Sommersaison 1997 im ausgewählten Höhen- und Breitenbereich (17 × 34 Punkte).

Sobald die entsprechenden Felder für alle 25 Jahr vorliegen, kann man für jedes einzelne Element der 17 × 34 Matrix die Temperaturtrends errechnen. Eine genaue Darstellung der formalen Aspekte (multivariate Analyse mittels gewichteter kleinster Quadrate) findet man in Kirchengast et al. (2000). Als Resultat der Analyse erhält man für jedes Element, jeweils für die „gemessene“ und für die „wahre“ Klimatologie, die Steigung der angepaßten Gerade und deren Unsicherheit.

Als Hinweis auf die zu erwartende Temperaturänderung kann Abbildung 8 dienen; sie zeigt Temperaturtrends für die Sommersaisonen der Jahre 2001 bis 2025, basierend auf dem T42L19 GSDIO Modell-Lauf (Roeckner et al., 1999). Dafür wurden, so wie in Abbildung 7, für jedes einzelne Jahr Breite-Höhe Matrizen mit gleicher Auflösung errechnet (wegen L19 allerdings nur 24 Punkte bis 30 km Höhe) und für jedes Matrixelement lineare Trends angepaßt.

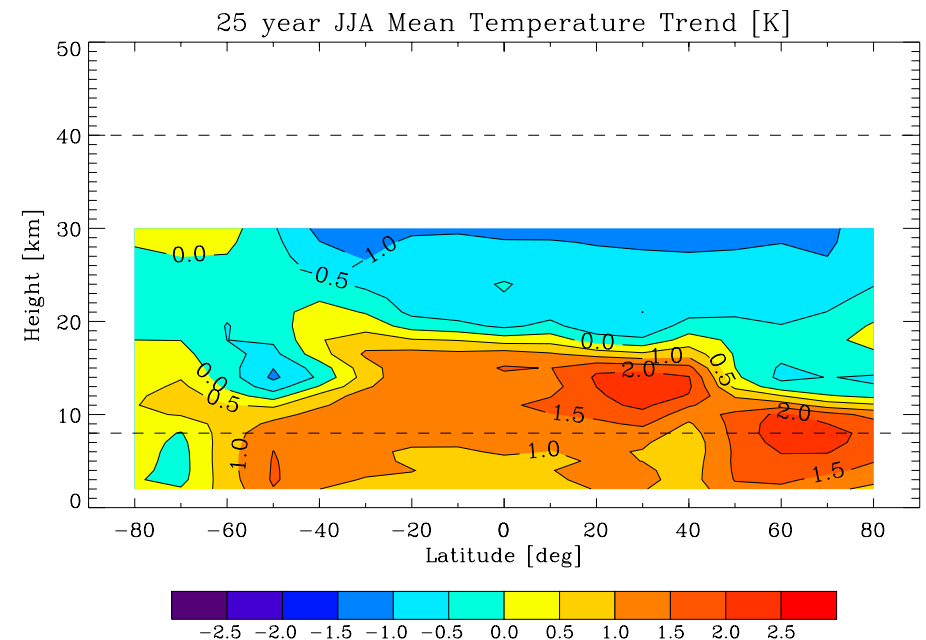


Abbildung 8: Trends in der Periode 2001 bis 2025 (17 × 24 Punkte) für die Sommer-Mitteltemperatur, basierend auf dem T42L19 GSDIO Modell-Lauf (Roeckner et al., 1999).

“TESTBED” ERGEBNISSE

Für die Testsaion (Sommer 1997) wurden die verschiedenen Fehlerquellen eingehend untersucht, die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Die bisherigen Analysen haben gezeigt, daß die besten Meßwerte in Höhen zwischen 8 km und 40 km erwartet werden können. Dies „Kernregion“ ist in allen folgenden Abbildungen, wie auch schon in den Abb. 7 und 8, durch strichlierte horizontale Linien hervorgehoben.

BEOBACHTUNGSFEHLER

Der Beobachtungsfehler wird ermittelt indem man die gewonnenen Okkultationsprofile mit den „wahren“ Temperaturprofilen am Ort der Okkultation vergleicht. Die Ergebnisse für zwei „Bins“ sind in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt; Abbildung 9 zeigt einen typischen Fall mit geringem systematischen Fehler (Äquator), Abbildung 10 zeigt den „worst case“ (80°S).

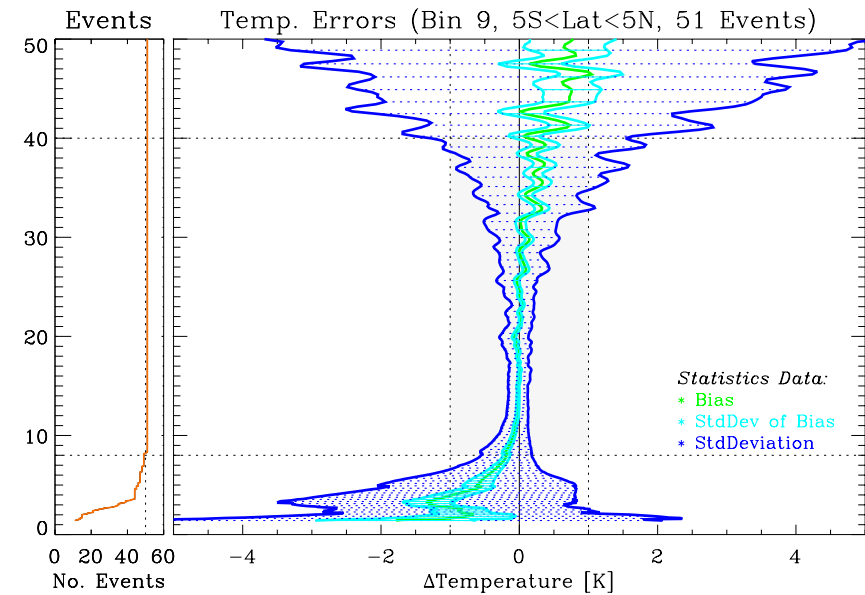


Abbildung 9: Fehlerstatistik für den Äquator-„Bin“ (5°S bis 5°N). Anzahl der Ensemblemitglieder (links, orange), sowie Systematischer Fehler des Mittelwertes (grün), Standardabweichung des Mittelwertes (türkis), und Standardabweichung (blau) in Abhängigkeit von der Höhe, letztere um den Mittelwert herum aufgetragen.

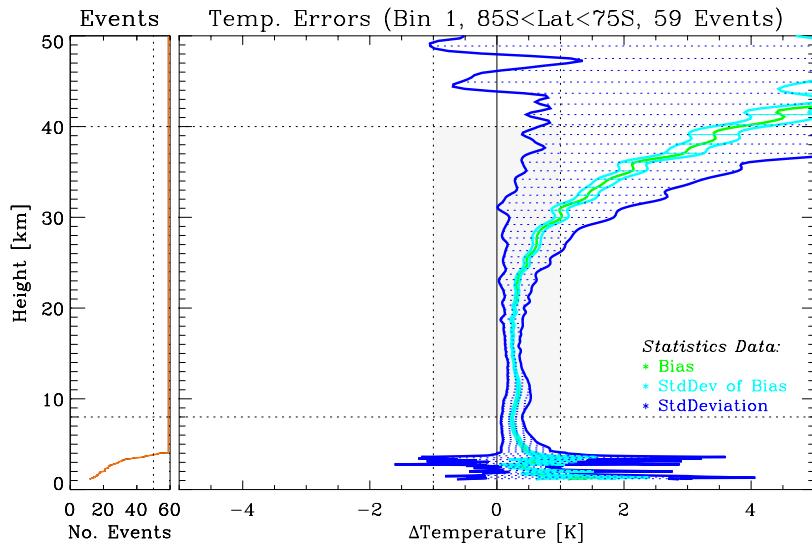


Abbildung 10: Fehlerstatistik für den südlichsten „Bin“ (85°S bis 75°S). Anzahl der Ensemblemitglieder (links, orange), sowie Systematischer Fehler des Mittelwertes (grün), Standardabweichung des Mittelwertes (türkis), und Standardabweichung (blau) in Abhängigkeit von der Höhe, letztere um den Mittelwert herum aufgetragen.

Diese Analyse wurde für alle 17 Breiten-„Bins“ durchgeführt, die Ergebnisse sind in den beiden folgenden Abbildungen auf dem 17×34 Gitter zusammengefasst. Abbildung 11 zeigt den systematischen Temperaturfehler (vgl. grüne Linie in den beiden vorigen Abbildungen) für die Sommersaison 1997.

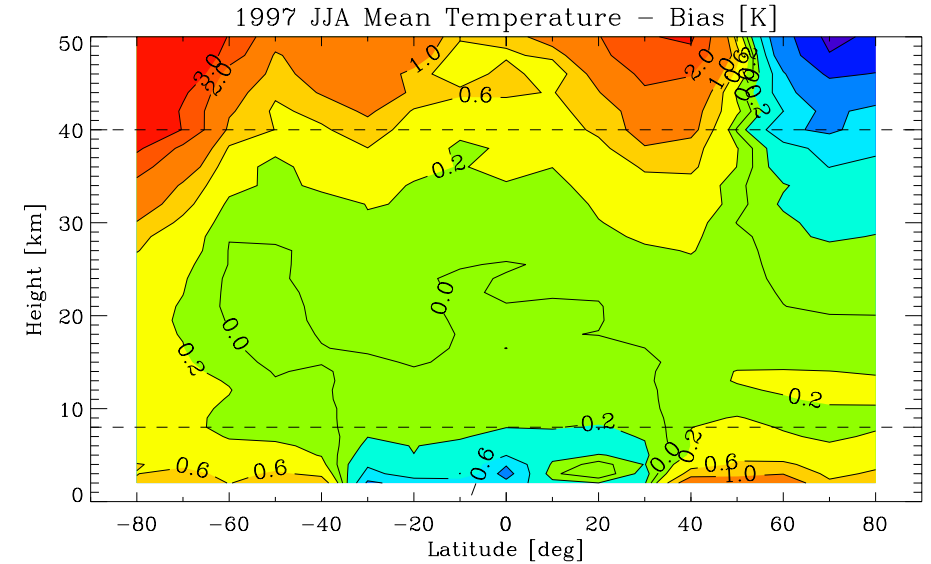


Abbildung 11: Systematischer Fehler des Mittelwertes für die mittlere Sommertemperatur 1997.

Der gesamte Beobachtungsfehler für die einzelnen Matrix-Elemente (ΔT^{obs}) setzt sich nun aus dem systematischen Fehler des Mittelwertes (ΔT^{bias}) und aus dessen Standardabweichung zusammen,

$$\Delta T_{ij}^{obs} = \left[\left(\Delta T_{ij}^{bias} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{ij}^{stddev}}{\sqrt{N}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (18)$$

wobei N die Zahl der Ensemblemitglieder ist, ΔT^{stddev} ist die Standardabweichung (vgl. blaue Linie in Abb. 9 und Abb. 10). Abbildung 12 zeigt den gesamten Beobachtungsfehler.

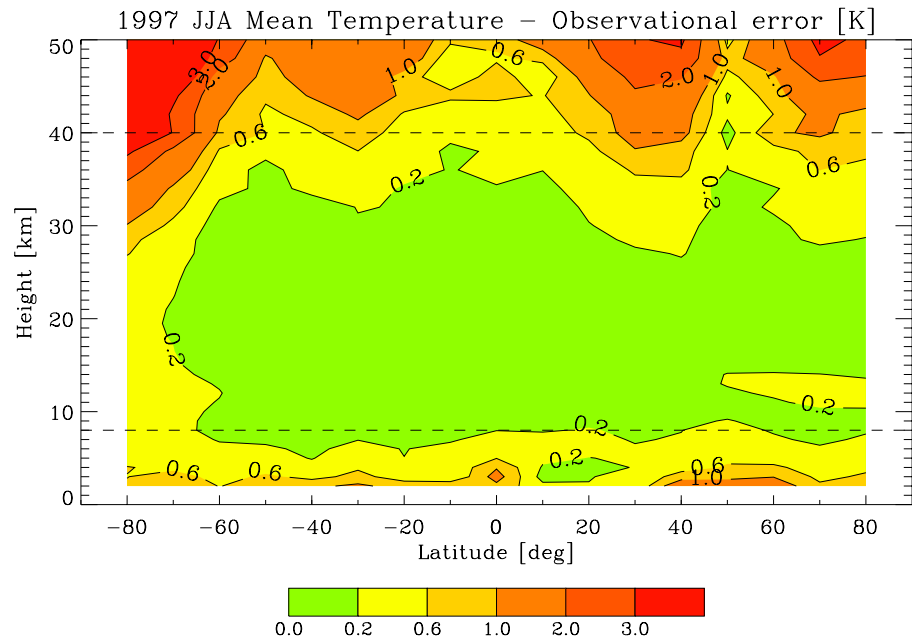


Abbildung 12: Beobachtungsfehler des Mittelwertes für die mittlere Sommertemperatur 1997.

Im überwiegenden Teil der „Kernregion“ zwischen 8 und 40 km Höhe ist der erwartete Beobachtungsfehler somit kleiner als 0.2 K.

REPRÄSENTATIVITÄTSFEHLER

Bei der Bildung der Saisonmittel gibt es eine weitere Fehlerquelle bedingt durch die diskrete und zwangsläufig ungleichmäßige Abtastung in einem vergleichsweise kleinen geographischen Bereich. Diesen Fehler kann man bestimmen, indem man das „wahre“ zeitlich und räumlich gemittelte Temperaturfeld mit dem Feld vergleicht, das man durch Mittelung der „wahren“ Temperaturprofile an den Orten (und zu den Zeiten) der Okkultationsereignisse erhält.

Das Ergebnis für die Testphase ist in Abbildung 13 zu sehen. Am größten ist der Repräsentativitätsfehler um 60°S, wo sich die Temperatur mit der geographischen Breite besonders stark ändert (vgl. Abb. 7).

Bei Verwendung aller Temperaturprofile, in Abbildung 14 illustriert, wird der Repräsentativitätsfehler zwar geringer, die Verbesserung ist aber deutlich kleiner, als man aufgrund der Zunahme der Ensemblemitglieder vermuten würde. Häufig beobachtet man nämlich eng benachbarte Okkultationsereignisse in kurzem zeitlichen Abstand, die zu keiner merklich besseren Abtastung der räumlichen und zeitlichen Variabilität führen. Durch diese Ergebnisse wird andererseits bestätigt, daß die Auswahl der ~1000 Okkultationsereignisse vernünftig war.

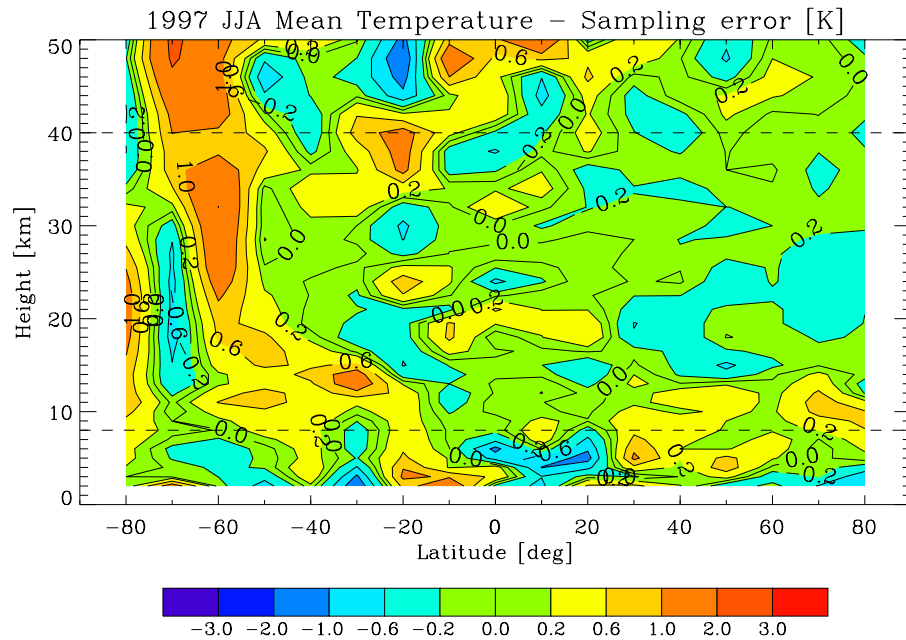


Abbildung 13: Repräsentativitätsfehler der Mitteltemperatur für die Sommersaison 1997 bei der Verwendung von etwa 1000 Temperaturprofilen (~55 pro Bin).

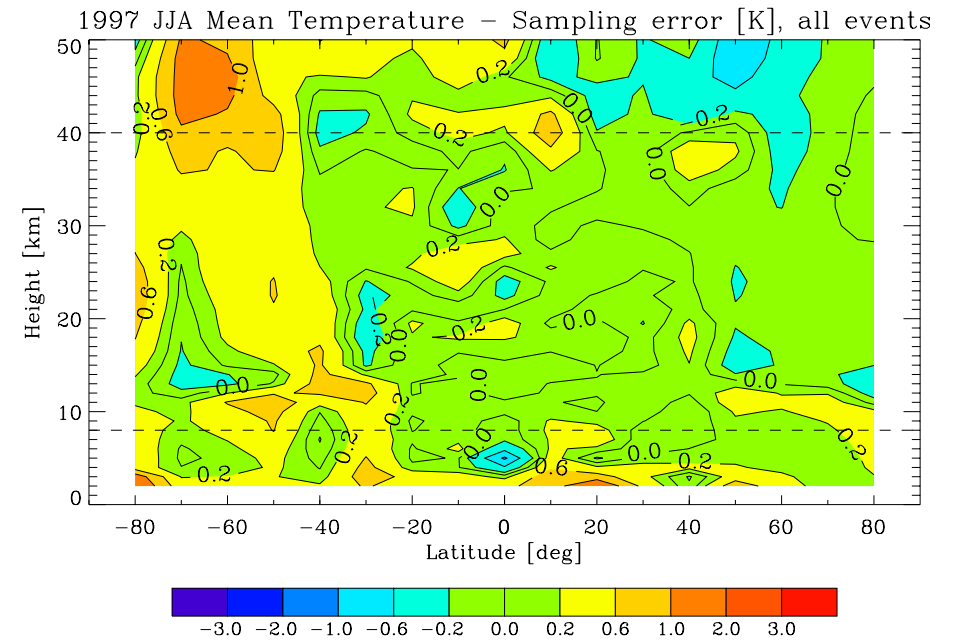


Abbildung 14: Repräsentativitätsfehler der Mitteltemperatur für die Sommersaison 1997 bei der Verwendung aller ~13000 Temperaturprofile (~750 pro Bin).

GESAMTFEHLER

Der gesamte klimatologische Fehler (ΔT^{total}) setzt sich nun aus Beobachtungsfehler (ΔT^{obs}) und Repräsentativitätsfehler (ΔT^{rep}) zusammen

$$\Delta T_{ij}^{total} = \left[(\Delta T_{ij}^{obs})^2 + (\Delta T_{ij}^{rep})^2 \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Das Ergebnis für die Sommersaison 1997 ist in Abbildung 15 dargestellt.

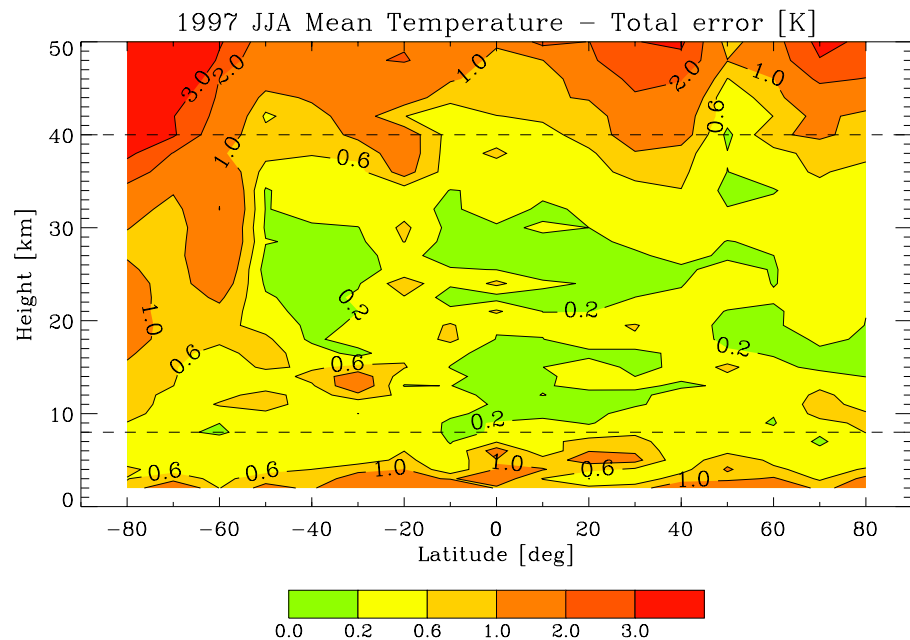


Abbildung 15: Gesamter klimatologischer Fehler der Mitteltemperatur für die Sommer-saison 1997.

Innerhalb der „Kernregion“ zwischen 8 und 40 km Höhe ist der Gesamtfehler nördlich von 50°S fast überall kleiner als 0.6 K. Südlich davon sorgt die Kombination aus vergleichsweise großem Beobachtungs- und Repräsentativitätsfehler für einen Gesamtfehler von 1 bis 2 K. Oberhalb von 40 km Höhe nimmt der Gesamtfehler überall deutlich zu und erreicht Werte von 2 bis 4 K. Die erwarteten Temperaturtrends für die 25-Jahr Periode werden aber andererseits, wie Abbildung 8 andeutet, im überwiegenden Teil der Kernregion nördlich von 50°S größer als ~ 0.5 K sein. Insgesamt ist die Chance daher gut, daß sie in diesen Regionen innerhalb von zwei Jahrzehnten statistisch signifikant (95 % Niveau) nachweisbar sind.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Nach einer kurzen Beschreibung der Radio-Okkultationsmethode und ihrer Vorteile für das Klima-Monitoring, haben wir eine GNSS Klimawandel-Monitoring Studie vorgestellt und Ergebnisse für eine Testphase (Sommer 1997) gezeigt. Diese Ergebnisse deuten an, daß es möglich sein sollte, mit einer Konstellation von 6 LEO Satelliten die erwarteten Temperaturänderungen während der nächsten zwei Jahrzehnte in weiten Teilen des Höhen-bereiches zwischen 8 km und 40 km statistisch signifikant nachzuweisen.

In den kommenden Monaten (zweite Jahreshälfte 2001) werden die Simulationen für die gesamte 25-Jahr Periode durchgeführt. Die Auswertung dieser Daten wird zunächst zeigen, wie sich ionosphärische Restfehler während hoher Sonnenaktivität auswirken und wie sich Repräsentativitäts- sowie Beobachtungsfehler (insbesondere in hohen Breiten der Südhalbkugel) im Laufe der Jahre entwickeln. Insgesamt liegt dann die gesamte Datengrundlage für die Trendanalyse vor. Diese erlaubt dann erstmals eine genaue Gesamtbewertung der besonderen Eignung von GNSS-Okkultationen zur Studie des Klimawandels.

LITERATUR

- Bengtsson, L., Roeckner, E., and Stendel, M., Why is the global warming proceeding much slower than expected?, *J. Geophys. Res.*, 104, 3865-3876, 1999.
- Fjeldbo, G., and Eshleman, V.R., The bistatic radar-occultation method for the study of planetary atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 70, 3217-3225, 1965.
- Fjeldbo, G., Kliore, A.J., and Eshleman, V.R., The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiment, *Astron. J.*, 76, 123-140, 1971.
- Gorbunov, M.E., and Gurvich, A.S., Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 13819-13826, 1998.
- Gorbunov, M.E., Gurvich, A.S., and Kornblueh, L., Comparative analysis of radioholographic methods of processing of radio occultation data, *Radio Sci.*, 35, 1025-1034, 2000.
- GRAS-SAG, The GRAS instrument on Metop, *ESA/EUMETSAT Report No. VR/3021/PI (EUM No. EPS/MIS/IN/9)*, 38p., ESA/ESTEC, Noord-wijk, Netherlands, 1998.
- Gurvich, A.S., and Krasil'nikova, T.G., Navigation satellites for radio sensing of the Earth's atmosphere, *Sov. J. Remote Sensing*, 7, 1124-1131, 1990.
- Hajj, G.A., Kursinski, E.R., Romans, L.J., Bertiger, W.I., and Leroy, S.S., A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation, *J. Atmos. Ocean. Technology*, in press, 2001.
- Hedin, A.E., Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 96, 1159-1172, 1991.
- Hocke, K., Inversion of GPS meteorology data, *Ann. Geophysicae*, 15, 443-450, 1997.
- Healy, S.B., and Eyre, J.R., Retrieving temperature, water vapour and surface pressure information from refractive-index profiles derived by radio occultation: A simulation study, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 126, 1661-1683, 2000.
- IPCC, *The Science of Climate Change – Contribution of WG I to the 2nd assessment of the IPCC*. Cambridge Univ. Press, 572 pp, 1995.
- IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds. Albritton, D.L. et al.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, in press, 2001.
- Kirchengast, G., End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator (EGOPS) – Overview and exemplary applications, *Wissenschaftl. Ber. No. 2/1998*, 138 pp., Inst. for Geophys., Astrophys., and Meteorol., Univ. of Graz, Austria, 1998.
- Kirchengast, G., Gorbunov, M., Jakowski, N., Kornblueh, L., Mallow, U., Rius, A., Rocken, C., Rothacher, M., Schmidtke, G., Sust, M., Ward, J., and Wernik, A., ACLISCOPE — Atmosphere and Climate Sensors Constellation Performance Explorer (ESA Earth Explorer Opportunity Mission proposal), *Wissenschaftl. Ber. No. 4/1998*, 60 pp.,

- Inst. for Geophys., Astrophys., and Meteorol., Univ. of Graz, Austria, 1998.
- Kirchengast, G., Steiner, A.K., Foelsche, U., Kornblueh, L., Manzini, E., and Bengtsson, L., Spaceborne climate change monitoring by GNSS occultation sensors, *Proc. 11th Symp. on Global Change Studies*, AMS Annual Meeting 2000, Long Beach/CA, U.S.A., 62-65, 2000.
- Kuo, Y.-H., Rocken, C., Sokolovskiy, S., Kursinski, E.R., Chu, D., and Lee, L., Constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate—COSMIC: An overview, *Proc. 4th Symp. on Integrated Observing Systems*, AMS Annual Meeting 2000, Long Beach/CA, U.S.A., 86-92, 2000.
- Kursinski, E.R., Hajj, G.A., Bertiger, W.I., Leroy, S.S., Meehan, T.K., Romans, L.J., Schofield, J.T., McCleese, D.J., Melbourne, W.G., Thornton, C.L., Yunck, T.P., Eyre, J.R., and Nagatani, R.N., Initial results of radio occultation of Earth's atmosphere using the global positioning system, *Science*, 271, 1107-1110, 1996.
- Kursinski, E.R., Hajj, G.A., Schofield, J.T., Linfield, R.P., and Hardy, K.R., Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 102, 23429-23465, 1997.
- Leitinger, R., and Kirchengast, G., Inversion of the plasma signal in GNSS occultations – simulation studies and sample results. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, 32, 379-394, 1997.
- Leitinger, R., Titheridge, J.E., Kirchengast, G., and Rothleitner, W., A “simple” global empirical model for the F layer of the ionosphere (in German; English version avail. from corresponding author). *Kleinheubacher Ber.*, 39, 697-704, 1996.
- Manzini, E., and McFarlane, N.A., The effect of varying the source spectrum of a gravity wave parameterization in a middle atmosphere GCM. *J. Geophys. Res.*, 103, 31,523-31,539, 1998.
- Melbourne, W.G., Davis, E.S., Duncan, C.B., Hajj, G.A., Hardy, K.R., Kursinski, E.R., Meehan, T.K., Young, L.E., and Yunck, T.P., The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring, *JPL Publication 94-18*, 147 pp., Jet Propulsion Lab, Pasadena, CA, 1994.
- Phinney, R.A., and Anderson, D.L., On the radio occultation method for studying planetary atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 73, 1819-1827, 1968.
- Ramsauer, J., and G. Kirchengast, End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator Version 3 (EGOPS3) Software User Manual (SUM), *Techn. Report for ESA/ESTEC No. 1/2000*, 467p., Inst. for Geophys., Astrophys., and Meteorol., Univ. of Graz, Austria, 2000.
- Rieder, M.R., and Kirchengast, G., Error analysis and characterization of atmospheric profiles retrieved from GNSS occultation data, *J. Geophys. Res.*, in press, 2001.

- Rocken, C., Anthes, R., Exner, M., Hunt, D., Sokolovskiy, S., Ware, R., Gorbunov, M., Schreiner, W., Feng, D., Herman, B., Kuo, Y.-H., and Zou, X., Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *102*, 29849-29866, 1997.
- Roeckner, E., Bengtsson, L., Feichter, J., Lelieveld, J., and Rodhe, H., Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. *J. Climate*, *12*, 3004-3032, 1999.
- Steiner, A.K., Kirchengast, G., and Ladreiter, H.P., Inversion, error analysis, and validation of GPS/MET occultation data, *Ann. Geophys.*, *17*, 122-138, 1999.
- Steiner, A.K., Kirchengast G., Foelsche U., Kornblueh L., Manzini E., and Bengtsson, L., GNSS occultation sounding for climate monitoring, *Phys. Chem. Earth (A)*, *26*, 113-124, 2001.
- Syndergaard, S., Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique. *DMI Scient. Report 99-6*, 131 pp., Danish Meteorol. Institute, Copenhagen, Denmark, 1999.
- UCAR, COSMIC Introduction and Overview, [Available on-line from <http://www.cosmic.ucar.edu>], cited 2000.
- Vorob'ev, V.V., and Krasil'nikova, T.G., Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system, *Phys. of Atmos. and Oceans*, *29*, 602-609, 1994.
- Ware, R., Exner, M., Feng, D., Gorbunov, M., Hardy, K., Herman, B., Kuo, Y., Meehan, T., Melbourne, W., Rocken, C., Schreiner, W., Sokolovskiy, S., Solheim, F., Zou, X., Anthes, R., Businger, S., and Trenberth, K., GPS Sounding of the atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary results, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *77*, 19-40, 1996.