



GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt GASP

**Ein innovativer Ansatz
zur Bestimmung von Atmosphärenparametern**

Sachbericht zum Schlussbericht

**Verbundprojekt von AWI, DLR, GFZ und GKSS
unter Federführung des GFZ**

Laufzeit: 07/99 bis 12/2002

FKZ: 01SF9922

Projektleiter: Prof. Dr. Christoph Reigber (GFZ)

Leiter Teilprojekt 1: Dr. Gerd Gendt (GFZ)

Leiter Teilprojekt 2: Dr. Jens Wickert (GFZ)



Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung und Planung

- 1.1 Aufgabenstellung
- 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
- 1.3 Planung des Vorhabens
- 1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand
- 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2. Ergebnisse des Vorhabens

- 2.1 Ergebnisse
- 2.2 Verwertung der Ergebnisse
- 2.3 Fortschritt bei anderen Stellen
- 2.4 Veröffentlichungen

Anlage: Veröffentlichungen



1 Aufgabenstellung und Planung

1.1 Aufgabenstellung

Obwohl der Wasserdampf eines der wichtigsten Treibhausgase ist, Energie durch die Atmosphäre transportiert, und das Strahlungsbudget durch Wolkenbildung beeinflusst, ist seine sehr variable zeitliche und räumliche Verteilung bis heute unzureichend erfasst, insbesondere unter Wolken und während Niederschlagsereignissen, wo seine Kenntnis am wichtigsten wäre. Die GPS-Technik bietet sich als wetterunabhängiges Verfahren an, diese Lücke zu schließen.

Im Rahmen des Projektes sollte in Deutschland eine Infrastruktur (Empfängernetz, Kommunikation, Auswertesoftware) zur Nutzung der bodengebundenen und satellitengestützten GPS-Technik aufgebaut werden. Insbesondere sollte eine operationelle, flächendeckende Erfassung des atmosphärischen Wasserdampfes in einem dichten, deutschlandweiten Netz von GPS-Bodenstationen demonstriert werden, und der Einfluss dieser neuen Messwerte auf die Wettervorhersage und die Klimaforschung untersucht werden.

Im zweiten Projektschwerpunkt sollte die innovative GPS-Radiookkultationstechnik, als Fernerkundungsmethode zur globalen Sondierung der Atmosphäre/Ionosphäre mit vielfältigen Anwendungen in der Wettervorhersage, Klima-, Atmosphären- und Ionosphärenforschung in Deutschland etabliert werden.

Hierzu gehört die Installierung einer entsprechenden operationellen Infrastruktur für die Datenanalyse zur Bereitstellung der atmosphärischen Information in Near-Real-Time (Polarempfangsstation, globales unterstützendes GPS-Bodennetz, operationelle Satellitenbahnbestimmung und Okkultationsdatenanalyse und Datenarchivierung und –bereitstellung). Weiterhin sollte mit vielfältige Validierungsaktivitäten unter Einbeziehung verschiedener unabhängiger meteorologischer Datensätze die Genauigkeit und die Brauchbarkeit der GPS-Okkultationsmethode bewertet und Assimilationsverfahren entwickelt werden, die eine Anwendung der Daten für die Wettervorhersage ermöglichen. Zusätzlich sollten die ionosphärischen GPS-Okkultationsdaten auf ihre Eignung für ein kontinuierliches Monitoring des Weltraumwetters untersucht werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die GPS-Technik hat in den letzten zehn Jahren die Geodäsie revolutioniert und im globalen Maßstab den mm-Genauigkeitsbereich erschlossen. Die Bahnen der GPS-Satelliten, die Positionen der GPS-Stationen und ihre Veränderungen können nun mit höchster Genauigkeit bestimmt und überwacht werden. Aus diesen Bedingungen heraus wurden seit Anfang der 90-iger Jahre Analysestrategien entwickelt, um aus den GPS-Messungen auch atmosphärische Parameter abzuleiten.

Mit einem Pilot-Projekt konnte 1999 vom GFZ die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Algorithmen zur landesweiten Erfassung des atmosphärischen Wasserdampfes in nahezu Echtzeit demonstriert werden. Um ein für die meteorologische Praxis benötigtes System aufzubauen, ist ein sehr dichtes Netz (mindesten 100) von GPS-Stationen erforderlich. In Deutschland gab es mit dem Satelliten Positionierungsdienst (SAPOS) der Landesvermessungsämter, der bis Ende des GASP-Projektes 250 Stationen geplant hatte und bereit war die Forschungen auf diesem Gebiet zu unterstützen, die besten Voraussetzungen.



Wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens war die vorhandene Expertise der beteiligten HGF-Zentren (gemeinsam mit den externen Partnern) auf den für Erreichung der Projektziele wesentlichen Gebieten. Zusätzlich ergab sich mit dem GPS-Radiokultationsexperiment an Bord des Geoforschungssatelliten CHAMP erstmals die Chance, dieses innovative Verfahren zur globalen Fernerkundung der neutralen Atmosphäre und Ionosphäre in Deutschland zur Anwendung zu bringen.

Die für das Vorhaben relevante Expertise der beteiligten Zentren wird im folgenden detaillierter aufgeschlüsselt:

GFZ: Betrieb von GPS Bodenstationen und damit verbundenes Datenmanagement; wissenschaftliche GPS-Datenverarbeitung, präzise Bahnbestimmung von GPS- und niedrigfliegenden Satelliten, mathematisch-physikalische Expertise zur Entwicklung numerischer Auswertalgorithmen, Entwicklung und Betrieb von operationellen Prozessierungssystemen, Management von umfangreichen Datenmengen (Archivierung, Verteilung), meteorologische Expertise zur Bewertung/Validierung/Anwendung der abgeleiteten Atmosphärenparameter

DLR: Expertise bei der Nutzung des GPS-Systems für die Ableitung ionosphärischer Parameter, Entwicklung und Betrieb von operationellen Prozessierungssystemen, Management von umfangreichen Datenmengen (Archivierung, Verteilung), Expertise zur Bewertung/Validierung/Anwendung der abgeleiteten Ionosphärenparameter

AWI: Entwicklung und Anwendung von regionalen Atmosphärenmodellen, Infrastruktur zur Validierung von GPS-RO-Atmosphärenparametern mit „in situ“ Atmosphärenmessungen

GKSS: Entwicklung und Anwendung von regionalen Atmosphärenmodellen, Handhabung von verschiedenen Satellitendaten zur Validierung von GPS-RO Daten.

1.3 Planung des Vorhabens

Zur effizienten Bearbeitung der Projektziele wurde das Vorhaben in Arbeitspakete eingeteilt. Wesentliche Unterteilung war hierbei neben der Administration (WP 100) die Separierung der Aktivitäten in boden- und satellitengestützte GPS-Verfahren (WP 200 und 300). In jedem Arbeitspaket wurden themenspezifische Teilpakete formuliert, und die verantwortlichen Zentren eindeutig festgelegt. Ein detaillierter Ablaufplan mit Meilensteinen diente zur Kontrolle des Bearbeitungsstandes. Die Federführung bei der Durchführung des Projektes lag beim GFZ.

Die bodengestützten Aktivitäten wurden in folgende Teilprojekte eingeordnet:

WP210 GPS-Bodennetz

WP 220 Produktgenerierung and Validierung

WP230 Modellvalidierung und Datenassimilation

Die satellitengestützten Aktivitäten wurden in folgende Teilprojekte aufgeteilt:

WP 310 Globales GPS-Bodennetz und präzise Satellitenbahnbestimmung,

WP 320 Retrievalmethoden und –prozeduren,

WP 330 Datenprozessierung und –verteilung,



WP 340 Atmosphärische Anwendungen und Validierung,

WP 350 Ionosphärische Anwendungen und Validierung.

Alle diese Hauptarbeitspakete sind noch in jeweils 2 bis 6 detaillierte Pakete unterteilt.

Der Zeitplan wurde an den verschobenen Start von CHAMP angepasst. Am Ende des Projektzeitraumes konnten alle Projektziele und zum Teil zusätzliche Ergebnisse erreicht werden.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Das Global Positioning System, ursprünglich für Navigationszwecke eingerichtet, hat sich zu einem herausragenden Werkzeug für die Geodäsie und Geodynamik entwickelt, insbesondere um geodätische Referenzsysteme mit mm-Genauigkeit zu realisieren sowie Krustendeformationen, plattentektonische Bewegungen und die Erdrotation zu überwachen. Seit Anfang der 90-iger Jahre demonstriert wurde, dass GPS auch für die Bestimmung atmosphärischer Parameter eingesetzt werden kann, hat sich dieses Anwendungsgebiet stürmisch entwickelt. Insbesondere ist dies darauf zurückzuführen, dass es sich hierbei um eine wetterunabhängige, kalibrationsfreie Technik handelt, die eine automatische, kostengünstige, zeitlich hochaufgelöste (im Minutenabstand) Überwachung von Zustandsgrößen der Atmosphäre ermöglicht. War bislang die Anwendung auf regionale Fallstudien begrenzt, so bot es sich mit dem Aufbau dichter Netze von GPS-Empfängern in vielen Ländern, wie auch in Deutschland, an, die operationelle Nutzung zur flächendeckenden Wasserdampfbestimmung für meteorologische Anwendungen zu etablieren. Die wesentliche Aufgabe in diesem Projekt bestand darin die notwendige Infrastruktur für eine NRT-Datenübertragung aufzubauen und ausgehend von den bekannten Basisalgorithmen eine automatisierte, zuverlässige, hocheffektive Softwarelösung zur Ableitung von Atmosphärenparametern aus den GPS-Messungen zu erarbeiten. Insbesondere sollte demonstriert werden, dass ein operationelles System betrieben werden kann und die erzeugten Produkte dem deutschen Wetterdienst zur weiteren Verarbeitung termingerecht und in ausreichender Qualität übergeben werden können. Die aus GPS abgeleiteten integralen Atmosphärenparameter stellen einen neuen Datentyp für die Wettermodelle dar, sodass eine Entwicklung neuer Assimilationsverfahren erforderlich war.

Die satellitengestützte GPS-Radiokkultationstechnik gestattet es, zusätzlich zu den integralen Atmosphärenparametern auch Informationen über die Vertikalstruktur der Atmosphäre/Ionosphäre im globalen Maßstab abzuleiten. An Bord eines einzigen Satelliten können pro Tag bis zu 500 global verteilte Messungen aufgezeichnet werden, die als Basis für die Ableitung präziser und vertikal hoch aufgelöster Temperatur- und Wasserdampfprofile dienen, die in der Genauigkeit mit Radiosondenmessungen vergleichbar sind. Damit ist es möglich, große Lücken im bisherigen meteorologischen Beobachtungsnetz, vor allem über Ozeanen und den Polargebieten, zu schließen.

Die Radiokkultationstechnik ist eine neuartige Fernerkundungsmethode und es besteht noch ein großer Forschungsbedarf bei ihrer praktischen Anwendung und der Nutzung des Verfahrens für z.B. Wettervorhersage und Klimaforschung. Mit dem GPS-Okkultationsexperiment an Bord des CHAMP-Satelliten war es möglich, wesentliche Beiträge zu diesen Aufgaben zu leisten. Wesentliche Ziele des Projektes waren:

- Entwicklung von Strategien und Methoden zur Ableitung atmosphärischer/ionosphärischer Vertikalprofile in Near-Real-Time, um eine Anwendung in der Wettervorhersage zu ermöglichen, wozu die Installierung einer operationellen



Infrastruktur für den Satellitendatenempfang, die schnelle Bahnbestimmung und die Analyse der Okkultationsmessungen notwendig war;

- umfangreiche Vergleiche der Okkultationsprodukte mit unabhängigen meteorologischen Messungen, um deren Qualität bewerten zu können und
- die Entwicklung von Methoden, um die abgeleiteten Daten in der globalen Wettervorhersage verwenden zu können (Assimilationsverfahren).

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Sofern erforderliche Expertise bei den beteiligten HGF-Zentren nicht vorhanden war, wurde mit externen Partnern zusammengearbeitet:

AdV (SAPOS): Bereitstellung von GPS-Bodendaten auf der Basis eines Kooperationsvertrages.

DWD: Validierung der GPS-Produkte mit dem hochauflösenden Wettermodell des DWD. Durchführung von Fallstudien zur Demonstration des Einflusses von GPS auf die Vorhersage. Bereitstellung von Validierungsdaten anderer Instrumente (Radiosonden, Wasserdampfradiometer)

MPI : Entwicklung von Verfahren zur Assimilation von GPS RO Daten in numerische Wettervorhersagemodelle.

IRE : Entwicklung von Verfahren zur GPS RO Datenanalyse in der unteren Troposphäre mit wellenoptischen Verfahren, Analyse des Ionosphäreninflusses auf GPS Radiookkultationsmessungen.

JPL : Zusammenarbeit bei der Experimentplanung des CHAMP GPS RO Experiments, Entwicklung von Auswerteverfahren zur Datenanalyse in der unteren Troposphäre und bei der Simulation von GPS-Radiookkultationssignalen.

FU Berlin: Validierung von GPS Radiookkultationsmessungen, Unterstützung bei der Bereitstellung von unabhängigen Datensätzen für die Validierung von GPS RO Messungen.

Uni Leipzig: Validierung von GPS Radiookkultationsmessungen in der neutralen Atmosphäre und Ionosphäre, Zusammenarbeit bei der Entwicklung von tomografischen Verfahren für die 3D Charakterisierung der Ionosphäre.



2 Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes GASP wurde eine Infrastruktur (GPS-Netze, Kommunikation, Analyse-Zentren, Daten- und Archivzentren) zur Nutzung von boden- und satellitengestützten GPS-Anwendungen für die atmosphärische und ionosphärische Forschung und Anwendung geschaffen bzw. verfügbar gemacht. Durch die gemeinsamen Anstrengungen von Satellitengeodäten, Meteorologen und Atmosphärenphysikern konnte die Wetterunabhängigkeit von GPS ausgenutzt werden, um den Zustand der Atmosphäre und Ionosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung als auch mit globaler Überdeckung zu sondieren sowie die Ergebnisse zu validieren.

2.1.1 Teilprojekt 1: "Water Vapor Estimation from Ground GPS Networks and Assimilation into Atmospheric Models"

Die im Plan aufgestellten Ziele konnten für alle Arbeitspakete des Teilprojektes GASP1 erreicht werden.

Es wurden folgende wesentlichen Vereinbarungen, die die Bereitstellung grundlegender Daten absichern, getroffen:

- Kooperationsvertrag zwischen der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) und dem GeoForschungsZentrum Potsdam, unterzeichnet am 22. März 2000.
- Kooperationsvereinbarung zwischen dem GeoForschungsZentrum Potsdam und dem Deutschen Wetterdienst, unterzeichnet am 25. April 2000.

Die quasi-operationelle Erfassung des vertikal integrierten Wasserdampfes (IWV) in nahe Echtzeit (near real-time, NRT) wurde seit Mai 2000 für ein dichtes Netz von GPS-Stationen demonstriert. Das Netz umfasst etwa 100 Stationen des Satellitenpositionierungssystems SAPOS der Landesvermessungsämter, 22 GFZ Empfänger, die auf synoptischen Stationen des DWD installiert wurden, und einige zusätzliche Stationen in benachbarten Ländern. Die Datenübertragung konnte wesentlich verbessert werden. Waren anfänglich bis zu 25 Minuten Verzögerungszeit zu veranschlagen, treffen die meisten Daten heute innerhalb weniger Minuten ein. Stündlich wird das gesamte Netz von etwa 170 Stationen innerhalb von 15 Minuten auf einem LINUX-PC analysiert. Dazu wurde eine optimal der Aufgabenstellung angepasste Technologie auf der Basis des GFZ-EPOS-Softwarepaketes entwickelt. Die NRT-Ergebnisse wurden regelmäßig mit den Ergebnissen anderer Messverfahren wie Wasserdampf-Radiometer, Radiosonden als auch mit post-prozessierten Ergebnissen validiert. Die Konsistenz mit anderen GPS-Reihen ist sehr hoch ($< 1 \text{ kg/m}^2$) und die Vergleiche mit anderen Instrumenten liegen im Fehlerbereich der jeweiligen Verfahren. Pünktlichkeit ($< 1:45 \text{ h}$), Zuverlässigkeit ($>90\%$) und Qualität der abgeleiteten Wasserdampfwerte (systematischer Fehler $\sim 1 \text{ kg/m}^2$, Standardabweichung $\sim 1 \text{ kg/m}^2$) sind für eine Einführung in die numerische Wettervorhersage ausreichend. Seit Mai 2000 werden die GPS-IWV-Daten von allen GFZ Stationen mit den IWV-Werten des Lokal-Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes verglichen. Die Statistiken zeigen einen systematischen Unterschied (Bias) von etwa $+0.5 \text{ mm}$ und eine Streuung von 2.5 mm . Die Vergleiche zeigen, dass die GPS-Daten ein für die Datenassimilation akzeptable Qualität haben und bestätigen das hohe Potential von GPS für die Detektion von sich

schnell entwickelnden meteorologischen Phänomenen, wie Frontsystemen. Als ein erstes Ergebnis wurde ein interessanter Einblick in den täglichen Zyklus der Luftfeuchte erhalten, was eine wichtige Hilfestellung bei der Problemlösung in der Modellierung des täglichen Wasserkreislaufes darstellt. Es ist die Nutzung der GPS/IWV-Werte im Nudging-Verfahren implementiert und getestet worden. Fallstudien ergaben einen positiven Einfluss von GPS bei der kurzfristigen Vorhersage (bis 12 Stunden) der relativen Feuchte (bis 10% relative Verbesserung), geringe Verbesserung auch bei Temperatur und Wind. Der Einfluss in der Niederschlagsvorhersage ist gemischt, wobei GPS in einigen extremen Fällen einen positiver Einfluss brachte, aber auch dazu tendierte, die Vorhersage in Gebieten ohne Niederschlag zu verschlechtern. Die Probleme können in der Regel auf die Differenz im täglichen Wasserzyklus zwischen GPS und Model zurückgeführt werden. Hier besteht noch ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Modellverbesserungen. Die Nowcasting-Experten des DWD können aus den GPS-IWV-Feldern ebenfalls interessante Information ableiten. Hierzu sollte alle Anstrengung unternommen werden, um die Verzögerung des Produktes in Zukunft noch weiter zu verringern. Derzeit laufen erste Untersuchungen, ob die GPS-Ergebnisse auch zu einer Verbesserung der Hochwasservorhersagen an Flüssen beitragen können.

GPS Ground Network WP 210 (GFZ):

GPS-Sensorstationsnetz. Ende des Jahres 2002 stehen 147 deutschlandweite GPS Station für das Projekt bereit. Dabei wird der überwiegende Teil (100 Stationen) direkt von den SAPOS Betreibern aus 15 Bundesländern zur Verfügung gestellt. Von diesen 100 Stationen werden 5 Stationen über Mailbox-Systeme abgefragt, die übrigen Daten werden mittels Internet-Technologie direkt auf den FTP-Server des GFZ übertragen.

Das GFZ betreibt ein eigenes Netz von 22 GPS-Stationen an Wetterstationen des DWD sowie in Potsdam und Oberpfaffenhofen. Weitere 5 Stationen werden vom DWD, DLR und der Fraunhofer Gesellschaft zur Verfügung gestellt. Das BKG sammelt ebenfalls die Daten von 20 GPS-Stationen und stellt diese auf einem Server bereit.

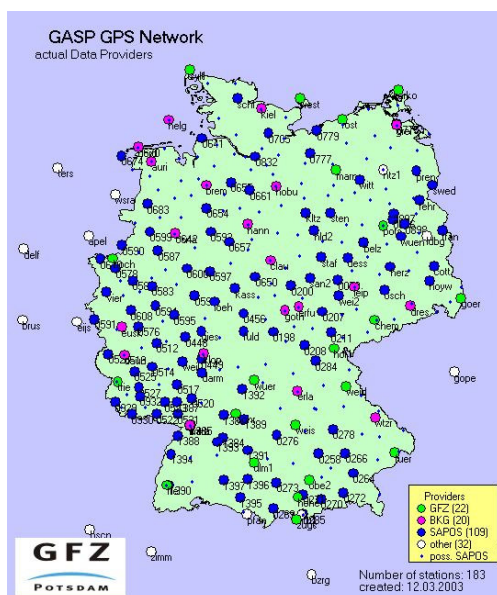


Abbildung 1: Stationsnetz des Projektes GASP (Stand: März 2003)

Die Netzqualität, d.h. die Datenverfügbarkeit und -verzögerung, konnte im Projektzeitraum deutlich verbessert werden. Dies wurde durch Weiterentwicklungen der Hard- und Software, vor allem aber durch das automatische Benachrichtigungssystem



bei Datenausfall erreicht. Die Performance aller Datenanbieter (GFZ, BKG und SAPOS) konnte auf ein vergleichbares Maß gebracht werden.

Die Datenverfügbarkeit aller deutschlandweiten GPS-Stationen beträgt im Mittel ca. 95%. Innerhalb der ersten 30 Minuten ist die Übertragung von etwa 90% aller Daten abgeschlossen. Berücksichtigt man nur diese Daten, dann beträgt die mittlere Verzögerung etwa 5 Minuten.

Interpolation meteorologischer Bodenwerte (GFZ, DWD)

Zur Konvertierung der direkten GPS-Ergebnisse in Wasserdampfwerte werden meteorologische Bodendaten (Druck, Temperatur) benötigt. Die Bodendaten der Stationen, die über keine eigenen Sensoren verfügen (Regelfall bei SAPOS-Stationen), werden durch Interpolation im dichten Netz der synoptischen Stationen (~200) des DWD gewonnen. Die Daten werden auf der Grundlage der Vereinbarung mit dem DWD kostenlos bereitgestellt. Die Interpolation erfolgt mit einer sehr hohen Genauigkeit von 0.3 - 0.5 hPa und ist somit für die Konvertierung der NRT GPS-Ergebnis ausreichend.

Product Generation and Validation WP220 (GFZ):

Datenvorverarbeitung. Die stündlich eintreffenden Daten aus dem deutschen Netz, europaweit und global werden einer unmittelbaren Qualitätsprüfung und Vorverarbeitung zugeführt und zu üblichen RINEX-Dateien verarbeitet. Alle Daten werden archiviert, um jederzeit Fallstudien durchführen zu können.

Bahnprädiktionen. Genaue Prädiktionen der GPS-Satellitenbahnen bilden eine wichtige Voraussetzung zur Schätzung des Wasserdampfes in NRT. Während im IGS sogenannte Ultra-Rapid-Produkte alle 12 Stunden generiert werden, werden im GASP Projekt 3-stündliche Produkte unter Nutzung von weltweiten GPS-Daten berechnet. Die damit verbundene Verkürzung des maximalen Vorhersagezeitraumes von 15 auf 4 Stunden führt zu einer signifikanten Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit in der Bahnvorhersage (~10-20 cm).

Datenanalyse in NRT. Die operationelle Bestimmung des integrierten Wasserdampfes (IWV) erfolgt stündlich für ein Netz von etwa 160 Stationen (neben den deutschen werden noch Stationen der Nachbarländer mit herangezogen). Da nur etwa 15 Minuten für die Analyse veranschlagt werden können, war es erforderlich, effektive Technologien auf der Basis der GFZ-EPOS-Software zu entwickeln. Es wurde ein 2-Schritt-Verfahren implementiert, wobei zuerst ausgehend von den Ultra-Rapid-Vorhersagen mit einem kleinen globalem Netz präzise Bahnen und Satellitenuhren über Deutschland berechnet werden, die in einem weiteren Schritt die Nutzung der Präzisen-Punkt-Positionierung (PPP), d.h. eine stationsweise Auswertung, gestatten. Diese Technik ermöglicht neben einer Erhöhung der Stationsanzahl auch eine feinere zeitliche Auflösung der Ergebnisse (30 Minuten) und die Einführung von troposphärischen Gradienten ohne die Auswertzeit signifikant zu verlängern. Um die Genauigkeit der IWV-Werte bei Frontdurchgängen zu erhöhen, wurden stündliche Gradienten eingeführt. Die aus den GPS-Daten originär abgeleiteten Laufzeitverzögerungen durch die Atmosphäre werden in den vertikal integrierten Wasserdampf über der Station konvertiert. Die Software hat sich nun bereits über zwei Jahre in ihrem stündlichen Einsatz bewährt. Auf Internetseiten (http://www.gfz-potsdam.de/pb1/gasp1/index_GASP1.html) werden in NRT die Wasserdampf-Zeitreihen aller Stationen, eine Animation der Entwicklung des Wasserdampffeldes über Deutschland sowie eine stündlicher Vergleich zwischen GPS und dem LM-Modell dargestellt. Die Produkte werden in verschiedenen Formaten für die weitere Verwendung

für Studien in der numerischen Wettervorhersage beim DWD sowie für Untersuchungen in den regionalen Modellen bereitgestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse eines Teilnetzes als deutscher Beitrag zur COST Aktion 716 "Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications" (1999-2003) übermittelt.

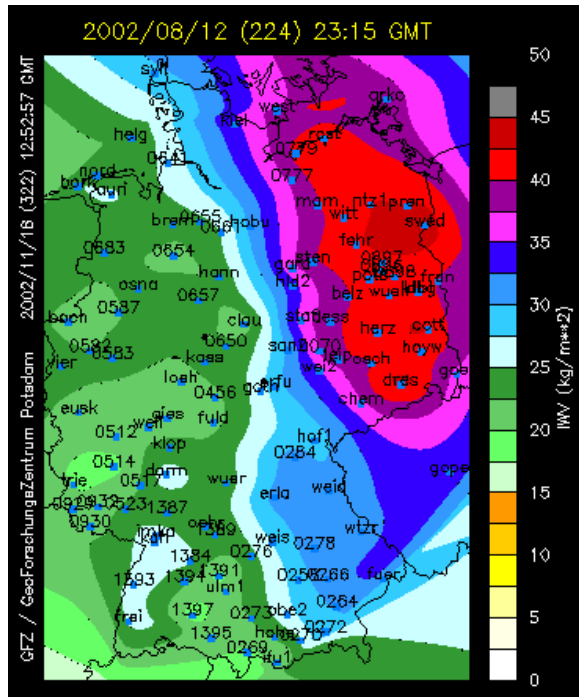


Abbildung 2: Wasserdampfdruck über Deutschland mit extremen Werten im östlichen Bereich zur Zeit der Flutkatastrophe an der Elbe (12. August 2002)

Post-Prozessierung Die Post-Prozessierung zur Generierung von Resultaten mit höchster Qualität wird regelmäßig mit einer Verzögerung von etwa 10 Tagen durchgeführt. Diese Wasserdampfdrücken werden zum einen für eine erste Validierung der NRT-Ergebnisse und zum anderen für Studien in regionalen Wettermodellen (WP231, 232) eingesetzt. Zusätzlich werden dabei die verwendeten Stationskoordinaten regelmäßig überprüft.

Validierung, allgemein. Eine permanente Validierung der Ergebnisse ist ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten. Um den Einfluss der NRT-Technik auf die Ergebnisse zu beurteilen, werden Vergleiche zu den post-prozessierten Ergebnissen berechnet. Dabei zeigt sich, dass die NRT-Ergebnisse mit Biasschwankungen von unter 1 mm IWV und Standardabweichungen im Bereich von 0.5 bis 1 mm eine sehr hohe Qualität haben. Die Vergleiche mit dem Wasserdampfradiometer in Potsdam und Radiosonden liefern Genauigkeiten von etwa 1-1.5 mm IWV, was im Fehlerbudget der beteiligten Verfahren liegt. Die umfangreichen Validierungen mit dem LM-Modell des DWD zeigen Werte im ähnlichen Bereich, nur die Streuung liegt mit 2.5 mm etwas höher, was aber auf Modellprobleme zurückzuführen sein dürfte.

Interessant sind Differenzen im Tageszyklus des Wasserdampfes zwischen GPS einerseits und Radiosonden und dem Modell andererseits. Es wurden dazu Mittel stündlicher Werte über ein bis zwei Jahre berechnet. Während GPS maximale Werte mittags und am frühen Nachmittag zeigt, waren bei den anderen Reihen hier minimale Werte zu verzeichnen. Ursache könnten Probleme bei den Radiosonden sein. Temperatureffekte bei Radiosondenaufstiegen werden in den letzter Zeit in der Literatur diskutiert. Hierzu gibt es jedoch noch keine abschließende Erklärung.

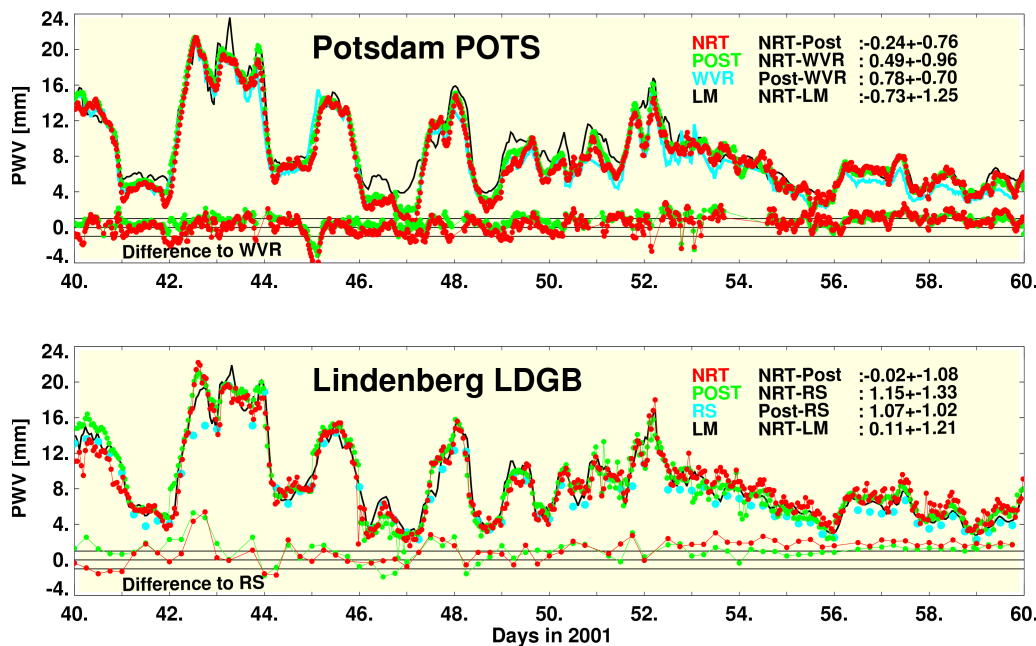


Abbildung 3: Vergleich von Wasserdampfneigen an den Stationen Potsdam und Lindenberg, die aus GPS (NRT und Post-Prozessierung), Radiosonden und Wasserdampfradiometer gewonnen wurden.

Validierung, arktische Stationen (AWI). Die Arktis ist gekennzeichnet durch eine geringe räumliche Dichte von meteorologischen Stationen. GPS-Bodenstationen sollen hier zusätzliche Beiträge für die Messung des integrierten Wasserdampfs (IWV) liefern. Gleichzeitig beobachtet man in der arktischen Atmosphäre eine im allgemeinen geringe Feuchte, so dass der Beitrag des Wasserdampfs zur GPS-Phasenwegverlängerung (Zenith Path Delay ZPD) ebenfalls gering ist. Aufgrund der geringen Stationsdichte muss sich die Validierung der GPS-Messungen zunächst auf einzelne Orte beschränken (6 von 13 GPS-Stationen in der Arktis), an denen neben GPS-ZPD-Daten Radiosondendaten benachbarter Stationen zur Verfügung standen. Am Standort Ny-Ålesund (79°N, 12°O) wurden zusätzliche Instrumente wie Radiometer und Spektrometer herangezogen. Es wurden acht Monate aus verschiedenen arktischen Sommern und Wintern betrachtet. Von den sechs möglichen Vergleichsstationen lieferten nur zwei zumindest zeitweise auch meteorologische Bodendaten. In den übrigen Fällen wurden Radiosondenprofile herangezogen. Im allgemeinen ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung von Radiosonden- und GPS-Messungen mit einem Bias von meist weniger als 1 mm IWV im Winter und 2 mm im Sommer (je ca. 10%) und einem Korrelationskoeffizienten von meist größer als 0,95. Die jeweils größte Abweichung ergab sich für Reykjavik, was zumindest teilweise auf ungenaue Druckmessungen am GPS-Empfänger oder Druckkorrekturen zurückgeführt werden kann. Für einzelne Standorte und Monate wurde jahreszeitenunabhängig eine starke Störung durch Mondzeiten identifiziert, die bis zu 50% der IWV-Werte ausmachte.

Zur Vergrößerung der Datenbasis wurde die Eignung von Modelldaten für meteorologische Bodenwerte (Druck, Temperatur) geprüft. Die Modelldaten wurden dem regionalen Klimamodell HIRHAM entnommen (vgl. WP 233). Es wurde für die sechs gemeinsamen Radiosonden-/GPS-Stationen gezeigt, dass der Einfluss der Datenquelle (Radiosonde, Modell) für die IWV-Berechnung gering ist. Die Abweichung zwischen den beiden GPS-IWV-Varianten war jeweils geringer als zwischen IWV-Werten aus

Radiosonden und den GPS-Datensätzen. Auch für die übrigen sieben GPS-Bodenstationen ohne Vergleichsradiosonden ergaben sich plausible Zeitreihen der integrierten Feuchte bei Nutzung der Modell-Meteorologie. Unterschiede zwischen GPS- und Modell-IWV können u.a. auf die räumliche Auflösung des Modells zurückgeführt werden (siehe WP 233). Unter Verwendung von Atmosphärenmodellen können damit alle dreizehn GPS-Bodenstationen in der Arktis für die IWV-Bestimmung genutzt werden.

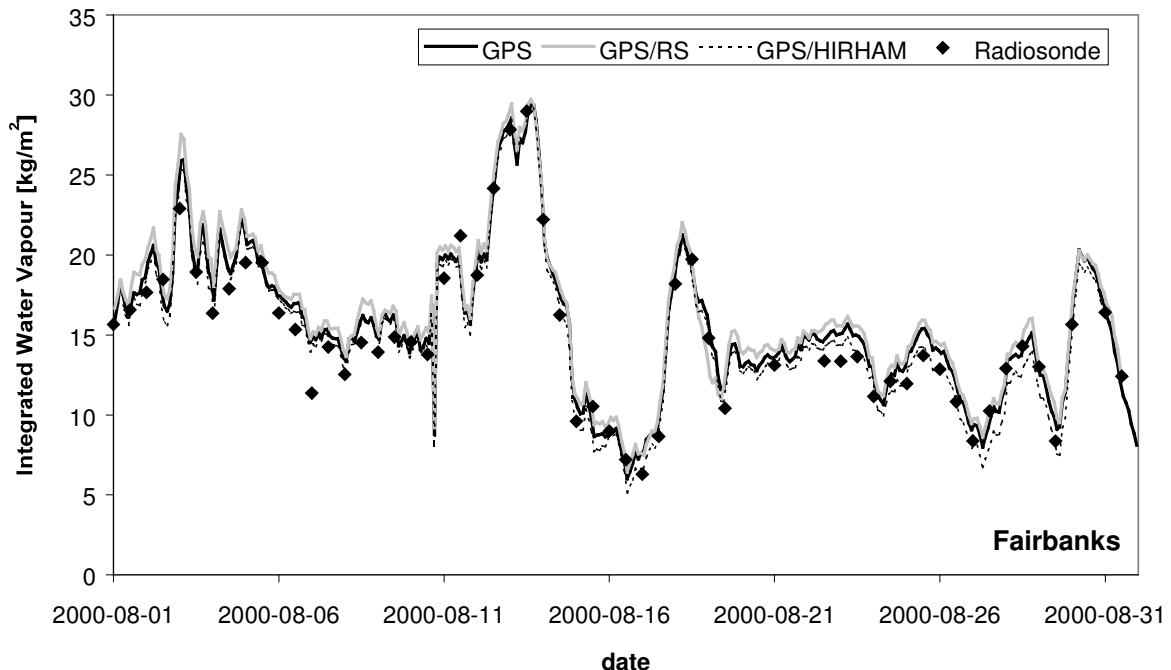


Abbildung 4: Zeitverlauf der integrierten Feuchte (IWV) über Fairbanks im August 2000, berechnet aus GPS-Bodendaten mit verschiedenen meteorologischen Datensätzen. Schwarz durchgezogen: met. Daten von GPS-Station, grau durchgezogen: Daten aus Radiosondenprofil interpoliert, gestrichelt: Daten aus HIRHAM interpoliert. Zum Vergleich sind die IWV-Werte aus Radiosondenaufstiegen als Rauten eingezeichnet.

Model Validation and Data Assimilation (WP230):

Datenassimilation für die numerische Wettervorhersage (GFZ/DWD):

Von Mai 2000 bis Dezember 2002 wurden die GPS-IWV-Daten regelmäßig mit den Wasserdampferten des Lokal-Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes und mit Radiosonden-Daten von 8 Stationen verglichen. Die Differenzen zu den Radiosonden sind stark stations- und zeitabhängig. Im Mittel ist GPS um etwa 1 kg/m^2 feuchter. Im Sommer ist der Bias um die Mittagszeit besonders hoch, und der Tagesgang zwischen beiden deutlich verschieden, während GPS um 12 UT ein Maximum hat, zeigen die Radiosonden hier oft die minimalen Werte. Die Differenzen zum LM haben einen Bias von etwa ± 0.5 und eine Streuung von $1\text{-}3 \text{ kg/m}^2$. Ein erstes interessantes Ergebnis der Vergleiche über die drei Jahre ist, dass der tägliche Feuchtzyklus vom Modell und den Radiosonden nicht korrekt erfasst wird. Dieser interessante Einblick in den täglichen Zyklus der Luftfeuchte ist eine wichtige Hilfe bei der Modellierung des täglichen Wasserkreislaufes.

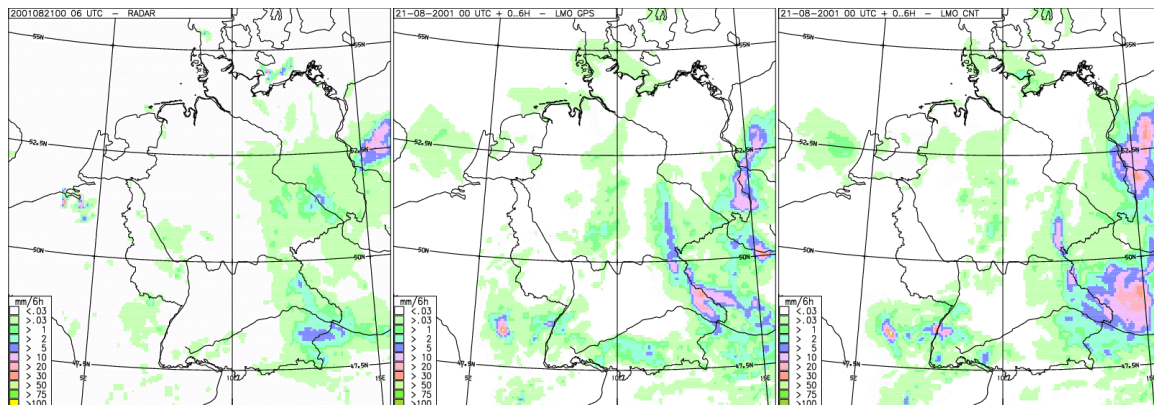


Abbildung 5: Akkumulierter Niederschlag von 00 bis 06 UTC am 21. August 2001 aus Radarmessungen (links) und in den ersten 6 Stunden der Vorhersage, die um 00 UTC von der Analyse der GPS Daten startet (Mitte), und dem Kontrollexperiment ohne GPS (rechts).

Die Vergleiche zeigen, dass die GPS-Daten eine für die Datenassimilation ausreichende Qualität haben und bestätigen das hohe Potential von GPS für die Detektierung von sich schnell entwickelnden meteorologischen Phänomenen, wie Frontsystemen. Es ist die Nutzung der GPS-IWV-Werte im Nudging-Verfahren implementiert und getestet worden. Fallstudien ergaben einen positiven Einfluss von GPS bei der kurzfristigen Vorhersage (bis 12 Stunden) der relativen Feuchte (bis 10% relative Verbesserung), geringe Verbesserung auch bei Temperatur und Wind. Der Einfluss in der Niederschlagsvorhersage ist gemischt, wobei GPS in einigen extremen Fällen einen positiven Einfluss brachte, aber auch dazu tendierte die Vorhersage in Gebieten ohne Niederschlag zu verschlechtern. Die Probleme können in der Regel auf die Differenz im täglichen Wasserzyklus zwischen GPS und Model zurückgeführt werden. Hier besteht noch ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Modellverbesserungen.

Evaluierung und Assimilation von GPS-IWV-Daten waren erfolgreich. Jedoch sollte der Einfluss der GPS-IWV-Daten auf die Vorhersage, besonders im Winter, vor einer operationellen Anwendung verbessert werden. Eine entscheidende Fragestellung ist dabei die vertikale Verteilung der integrierten Feuchte, wobei hier möglicherweise Wolkenanalysen aus Satellitendaten herangezogen werden können.

Die Nowcasting-Experten des DWD können aus den GPS-IWV-Feldern ebenfalls interessante Informationen ableiten. Hierzu sollten alle Anstrengungen unternommen werden, um die Verzögerung des Produktes in Zukunft noch weiter zu verringern.

Validierung regionaler Modelle – BALTEX (GKSS):

Das regionale hydrostatische Wettervorhersagemodell HRM des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde mit dem vertikal integrierten Wasserdampf, der mit Hilfe von bodengestützten GPS Empfängern bestimmt wurde, verglichen. Verwendet wurden GPS Datensätze des SWEPOS Netzwerkes (Schweden, Finnland) im PIDCAP Zeitraum (Pilot Study for Intensive Data Collection and Analysis of Precipitation, 1.8.-17.11.1995) sowie der Datensatz des GASP-Projektes im ersten Jahr des BALTEX/BRIDGE Zeitraumes mit GPS Daten (Mai 2000 bis April 2001). Das Modell wurde mit Analyse- und sechsstündigen Randdaten des ECMWF sowie des DWD (EM3AN Analysedaten) angetrieben. Es berechnete u.a. den Wasserdampf mit einer horizontalen Auflösung von etwa 14x14 km² auf 30 vertikalen Schichten bis zu einer Höhe von etwa 25 km. Ein Zeitschritt betrug 90 s. Aufeinanderfolgende 30 h Vorhersagen, die um 0 h UTC begannen, wurden berechnet. Dabei wurde für die Vergleiche die 6-stündige



Einschwingphase des Modells nicht verwendet. Bei dem Vergleich mit den GPS Bodendaten zeigte sich, dass das Modell die Messungen im Mittel geringfügig ($0,08 \text{ kg/m}^2$ für ECMWF Analysedaten) überschätzt. Diese Überschätzung lässt sich hauptsächlich auf die verwendeten Analysedaten zurückführen. Dabei zeigten sich etwas niedrigere mittlere Differenzen zu den GPS Wasserdampfdaten bei Verwendung der ECMWF Analysedaten als bei Verwendung der EM3AN Analysedaten. GPS Stationen, die mit Drucksensoren ausgestattet waren, zeigten im Vergleich mit GPS Stationen mit interpolierten Druckwerten eine um $0,29 \text{ kg/m}^2$ niedrigere Standardabweichung zu den HRM-Modellergebnissen. Der Wasserdampf-Vorhersagefehler des HRM Modells (d.h. Standardabweichung der Differenz zu den GPS Messungen) stieg erwartungsgemäß mit der Vorhersagedauer. Die Korrelationskoeffizienten zwischen GPS Wasserdampfdaten und den Modelldaten waren hoch (größer als 0,92).

Validierung regionaler Modelle – Arktis (AWI)

Im Rahmen von GASP wurden mit dem hochaufgelösten regionalen Klimamodell für die Arktis HIRHAM verschiedenen Modellläufe über jeweils einen Monat durchgeführt, um so ein aussagekräftiges Bild für typische Sommer- und Winterszenarien zu erhalten. Daten der integrierten Feuchte (IWV) wurden mit Ergebnissen aus GPS-Bodenmessungen sowie – mit schlechterer zeitlicher Auflösung – aus Radiosondenprofilen verglichen. Dabei ergab sich eine von Ort zu Ort unterschiedlich gute Übereinstimmung. Innerhalb eines Monats (z.B. Februar 1997) fanden sich sowohl geringe Unterschiede zwischen GPS und HIRHAM (z.B. Fairbanks: Bias 0,1, Korrelation 0,77), als auch größere Abweichungen (z.B. Ny-Ålesund: Bias 1,5, Korrelation 0,7). Untersuchungen ergaben große Einflüsse der Grenzschicht auf den IWV. Zusätzliche Probleme bereiten Vergleiche mit Lokalmessungen in orografisch stark gegliederten Regionen wie z.B. Spitzbergen, dessen kleinräumige Struktur von Bergen (Gletschern), offenem und eisbedecktem Wasser im Modell mit 50 km Gitterpunktsabstand nicht aufgelöst wird. Im Monatsmittel und auf regionalen Skalen zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den Radiosonden- und GPS-Messungen und dem Klimamodell HIRHAM.

Durch Nutzung einer stark erweiterten ECMWF-Modellversion für den seitlichen und unteren Randantrieb von HIRHAM bei Verfeinerung der vertikalen Auflösung (60 statt 31 Modellschichten) konnte die Simulation der integrierten Feuchte verbessert werden. Im Projektzeitraum erfolgte eine Umstellung der Großrechner am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg, auf denen die HIRHAM-Läufe durchgeführt wurden. Dies erforderte umfangreiche Portierungsarbeiten der Software.

Das Gebiet der Arktis leidet allgemein an einer geringen räumlichen Dichte von Messstationen. Nur wenige GPS-Stationen befinden sich in der unmittelbaren Nähe meteorologischer Stationen, die die für die IWV-Berechnung notwendigen Bodendaten von Druck und Temperatur liefern. Es wurde gezeigt, dass an Stelle von Messdaten auch der „flächendeckend“ vorhandene HIRHAM-Datensatz für die Berechnung des IWV aus ZPD-Messungen genutzt werden kann. Die sich ergebenden IWV-Unterschiede aus der Nutzung gemessener und modellierter Bodendaten sind geringer als die Unterschiede zwischen Radiosonden- und GPS-IWV (rund 10%) und sehr viel geringer als die Abweichung von GPS-IWV und HIRHAM-IWV (teils mehr als 100%).



2.1.2 Teilprojekt 2: "Radio Limb Sounding with Spaceborne GPS"

Im Rahmen des Teilprojektes 2 wurde vom GFZ und DLR eine operationelle Infrastruktur und die Expertise zur Analyse, Validierung, Archivierung und Verteilung sowie Anwendung von GPS-Radiookkultationsdaten am Beispiel der CHAMP-Satellitenmission aufgebaut. Damit steht ein innovatives Fernerkundungsverfahren zur Sondierung der Atmosphäre/ Ionosphäre im globalen Maßstab zur Verfügung, das vielfältige Anwendungen in Klimatologie/Wettervorhersage und Atmosphären- und Ionosphärenforschung ermöglicht. GPS-Radiookkultationsexperimente werden (neben den momentan laufenden Experimenten von CHAMP und SAC-C) schon in naher Zukunft als Bestandteil von Einzel- und Mehrsatellitenmissionen zum Tragen kommen (z.B. GRACE, TerraSAR-X, COSMIC, SWARM/ACE+, EQUARS, METOP, NPOESS), wodurch eine bisher nicht erreichte Anzahl von präzisen Messungen zur Bestimmung vertikaler atmosphärisch/ionosphärischer Parameter im globalen Maßstab zur Verfügung stehen wird.

Das GPS-Radiookkultationsexperiment an Bord von CHAMP wurde im Februar 2001 erfolgreich gestartet. Bis zum GASP-Projektende wurden mehr als 100.000/70.000 atmosphärische/ionosphärische Okkultationsmessungen durchgeführt. Ca. 80.000/50.000 Vertikalprofile von Temperatur und Wasserdampf bzw. Elektronendichte werden über das Datenzentrum am GFZ Potsdam der internationalen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt. Die Messungen konnten praktisch vom ersten Tag an erfolgreich und auch operationell ausgewertet werden, was die gute Vorbereitung des Experimentes mit allen Komponenten (Satellitendatenempfang, GPS-Bodennetz, Satellitenorbitberechnung, Prozessierungssysteme und Datenzentrum, siehe Abbildung 6) unter Beweis stellte. Dabei wurde die Erweiterbarkeit der Prozessierungssysteme auf andere Satellitenmissionen mit Daten der argentinischen SAC-C Mission erfolgreich getestet. Innerhalb des Projektes konnte auch erstmals eine kontinuierliche Near-Real-Time Datenprozessierung von GPS-Radiookkultationsdaten mit durchschnittlicher Zeitverzögerung zwischen Messungen und Bereitstellung von Analyseergebnissen von ca. 5 Stunden demonstriert werden. Die Qualität der abgeleiteten atmosphärischen/ionosphärischen Parameter wurde kontinuierlich durch Vergleiche mit unabhängigen Daten (Wetteranalysen, Satellitenmessungen und Radiosonden) kontrolliert. In Ergebnis dieser Vergleiche wurden Schwachpunkte bei der Datenauswertung aufgedeckt und die Analysesoftware verbessert. Die Temperaturprofile weisen im globalen Mittel im Höhenbereich von 10 bis 35 km nahezu keinen Bias gegenüber den Analysen und auch den Radiosonden auf. Standardabweichungen von 1-2 K wurden festgestellt. In der unteren Troposphäre wird ein negativer Refraktivitätsbias der CHAMP-Daten relativ zu Analysen und Radiosonden von bis zu 5% in den Tropen beobachtet. Diese Abweichung hat einen Bias in der mittleren spezifischen Feuchte von bis zu 30-40% zur Folge. Mit den am Ende des Projektes zur Verfügung stehenden Auswertemethoden kann der Bias deutlich (ca. Faktor 3) reduziert werden.

Vor allem im Bereich der Okkultationsdatenanalyse kam es zu einer Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen, mit denen wesentlich zur Verbesserung der GPS-Radiookkultationstechnik beigetragen wurde. Weiterhin wurden Entwicklungsarbeiten für die zukünftige Assimilation von GPS-Okkultationsdaten in Wettermodelle abgeschlossen, also für eine zukünftige Verwendung zur Verbesserung globaler Wettervorhersagen.

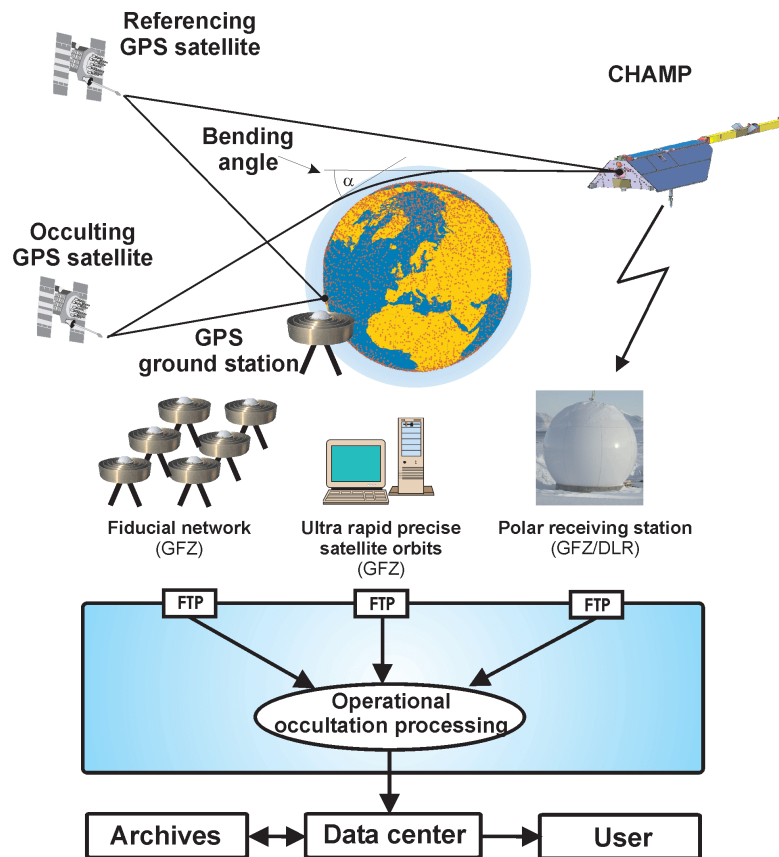


Abbildung 6: Im Rahmen von GASP installierte Infrastruktur zur operationellen Prozessierung und Bereitstellung von GPS-Okkultationsdaten bzw. Analyseresultaten der CHAMP-Satellitenmission.

WP 310: Bodenstationsnetz und präzise Orbitbestimmung GFZ

Bodenstationsnetz – Konzept und operationeller Betrieb (WP 311, 314)

Zum Projektende besteht das Netz aus insgesamt 33 global verteilte 1 Hz GPS Stationen mit schnellem Datenzugang (19 vom JPL und 14 vom GFZ betriebene). Die Datenverfügbarkeit in 2002 war wegen Problemen beim Austausch von defekten Geräten etwas schlechter als in 2001. Im vierten Quartal 2002 wurde die Firmware der GPS-Empfänger des GFZ gegen eine deutlich zuverlässigere Version ausgetauscht. Gleichzeitig musste die entsprechende Data-Logger-Software neuentwickelt, getestet und auf den 1-Hz-Stationen installiert werden. Durch diese Maßnahmen wurden Datenverzögerung und Datenverfügbarkeit merklich verbessert. Die Datenverzögerung hat sich auf etwa 5 Minuten reduziert und die Datenverfügbarkeit von GFZ-Stationen ist zu Projektende auf ca. 97 % gestiegen, womit das Bodennetz operationellen Anforderungen gerecht wird.

Die globale Verteilung der Bodenstationen gestattet weiterhin eine Prozessierung global verteilter GPS-Okkultationsdaten mit der Doppeldifferenzenmethode mit einer durchschnittlichen Redundanz von 3-4 Stationen pro Ereignis.

Orbitbestimmung – Konzept und operationeller Betrieb (WP 312, 316)

Seit April 2002 werden vom GFZ die sogenannten Ultra-rapid Science Orbits (USOs) für CHAMP und die GPS-Satelliten bereitgestellt. Die USOs werden im 3-Stunden-Takt drei Stunden nach dem jeweils letzten Zeitpunkt der gerechneten Bahnen bereitgestellt. Die



Genauigkeit der CHAMP USOs liegt bei ca. 5 cm in jeder Koordinatenachse, die der GPS-Satelliten bei ca. 12 cm. Die Bereitstellung der USO Orbits ist eine wichtige Voraussetzung für die Near-Real-Time Prozessierung der Okkultationsdaten (siehe auch WP 330) als einem der wesentlichsten Ziele von GASP. Die Bereitstellung der USO kann bei Bedarf noch schneller erfolgen und/oder durch die Verlängerung der Orbits um einen prädierten Teil zur Realzeit herangeführt werden.

Die seit März 2001 erzeugten Rapid Science Orbits (RSO), die mit einer Verzögerung von 15 Stunden einmal täglich erzeugt werden, wurden in ihrer Genauigkeit verbessert. Die CHAMP RSO liegen jetzt bei 4 cm, die GPS RSOs bei 8 cm.

Die USOs und RSOs sind am CHAMP Information System and Data Center (ISDC), erhältlich.

WP 320: Retrievalverfahren und –prozeduren GFZ/DLR

Neutrale Atmosphäre (WP 321) GFZ

Die ersten Okkultationsmessungen der CHAMP-Mission wurden am 11. Februar 2001, durchgeführt. Die Messungen konnten mit der im Rahmen des CHAMP- und GASP-Projektes vorbereiteten Infrastruktur (globales GPS-Bodennetz, operationelle präzise Satellitenbahnbestimmung, operationelles wissenschaftliches Okkultationsprozessierungssystem) auf Anhieb erfolgreich prozessiert werden, vertikale Temperatur- und Feuchteprofile wurden abgeleitet. Schon bei den ersten Messungen zeigte sich, dass die Okkultationen unabhängig vom Anti-Spoofing Status (A/S) des GPS prozessiert werden können, was einer neuen Qualität der GPS-Radiookkultationstechnik entspricht. Somit konnten bis Ende 2002 in operationeller Weise mehr als 75,000 präzise Vertikalprofile von Temperatur und Wasserdampf im Datenzentrum bereitgestellt werden. Das wissenschaftliche Prozessierungssystem erwies sich damit als geeignet für eine operationelle Datenanalyse und der Generierung von atmosphärischen Datenprodukten, sowie deren Bereitstellung an das Datenzentrum (ISDC) am GFZ Potsdam. Weiterhin wurde das System an die Analyse von Daten des argentinischen SAC-C Satelliten angepasst, womit die Erweiterbarkeit für zukünftige Einzel- und Mehrsatellitenmissionen unter Beweis gestellt wurde.

Neben der operationellen Prozessierung wurden die Auswertalgorithmen (Abbildung 7) kontinuierlich weiterentwickelt, wobei die ebenfalls im Rahmen des Projektes durchgeführten Validierungen mit unabhängigen Datensätzen und in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wesentliche Informationen über Schwachstellen der Prozessierung lieferten. Die Arbeiten unterteilten sich dabei in die Weiterentwicklung der Algorithmen zur GPS-Datenprozessierung bei der Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung und der Ableitung von atmosphärischen Vertikalprofilen unter Verwendung geeigneter Inversionsverfahren. Weiterhin wurden leistungsfähige Werkzeuge zur Simulation von GPS-Radiookkultationsmessungen bis hin zur Simulation eines GPS-Empfängers entwickelt. Am Ende des Projektes lag eine wesentlich verbesserte Analysesoftware vor.

GPS-Datenverarbeitung/Ableitung atmosphärische Phasenwegverlängerung

Für die GPS-Datenverarbeitung konnte erstmals ein Einfachdifferenzenverfahren zur präzisen Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung eingesetzt werden. Die Anwendung dieses Verfahrens wurde durch die Deaktivierung des Selective Availability (SA) Modus des GPS am 2. Mai 2000 möglich. Die entwickelte Methode wurde im Vergleich mit dem Standardverfahren (Doppeldifferenzen) getestet, wobei sich nahezu

identische Ergebnisse ergaben. Die Anwendung der Methode ermöglicht neben der drastischen Vereinfachung zukünftiger Okkultationsprozessierungssysteme (da die Verarbeitung der 1 Hz Daten des globalen Bodennetzes zur Doppeldifferenzenbildung (ca. 1 GB pro Tag)) entfällt, eine Erhöhung der Genauigkeit der Datenprodukte. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei weiterer Anwendung der Doppeldifferenzenmethode eine Reduzierung der Standarddatenrate von 1 Hz auf bis zu 1/30 Hz bei gleichbleibender Produktqualität möglich ist (Abbildung 8).

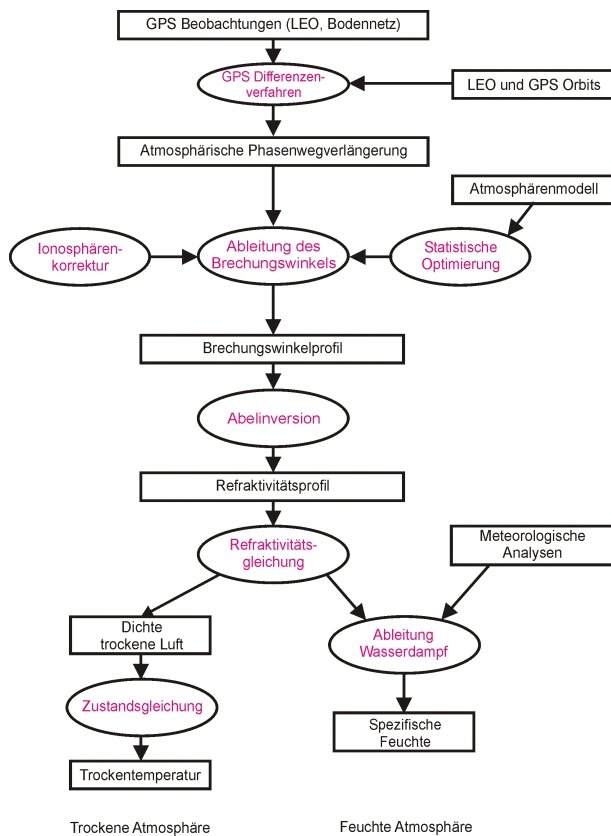


Abbildung 7: Übersicht über die entwickelten und weiterentwickelten Algorithmen zur Ableitung von atmosphärischen Vertikalprofilen aus GPS-Okkultationsmessungen. Die schematisch dargestellten Algorithmen bilden die Grundlage für das operationelle Okkultationsprozessierungssystem zur Ableitung global verteilter Vertikalprofile von Temperatur und Wasserdampf im Rahmen der CHAMP-Satellitenmission.

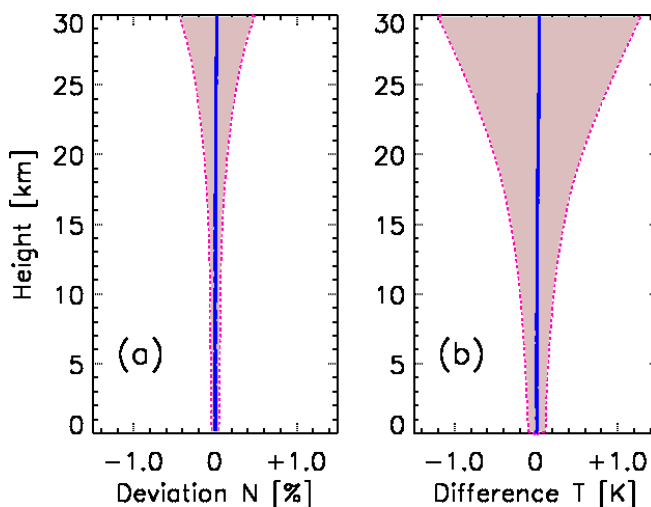


Abbildung 8: Statistischer Vergleich (mittlere und Standardabweichung) von Vertikalprofilen der Refraktivität und Temperatur, abgeleitet unter Anwendung von Einfach- und Doppeldifferenzenmethode bei der GPS-Datenverarbeitung. Der Vergleich ergibt zwei nahezu identische Datensätze, was die Gleichwertigkeit der Einfachdifferenzenmethode zur Okkultationsdatenprozessierung unter Beweis stellt. Die verbleibenden Abweichungen werden mit zusätzlichen Fehlereinflüssen bei Anwendung der Doppeldifferenzenmethode erklärt.

Inversionsmethoden

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung der Inversionssoftware erfolgten mit folgenden Schwerpunkten: Verbesserung der Qualitätskontrolle, Implementierung verschiedener wellenoptischer Methoden zur Datenanalyse in der unteren Troposphäre und Implementierung eines 1D-Var Verfahrens zur statistisch optimalen Ableitung von Temperatur- und Feuchteprofilen.

Qualitätskontrolle

Eine empirische Methode zur Plausibilitätskontrolle der Okkultationsdaten schon auf dem Prozessierungslevel der atmosphärisch induzierten Dopplerverschiebung wurde implementiert. Damit können unplausible Daten (verursacht durch fehlerhafte Messwerte, z.B. „Loss of Lock“ des GPS-Empfängers) aufgespürt und beseitigt werden. Weiterhin wurde ein Interface der operationellen Inversionssoftware zu ECMWF Analysen installiert. Dies ermöglicht eine Qualitätskontrolle der atmosphärischen Parameter schon während der Prozessierung und gestattet auch die Verwendung der ECMWF-Daten für die Initialisierung der hydrostatischen Gleichung am oberen Rand der Vertikalprofile.

Entwicklung von 1D-var Retrievalverfahren

Zusätzlich zur implementierten Standardmethode für die operationelle Wasserdampfableitung wurde ein 1D-Var-Verfahren implementiert. Dieses Verfahren gestattet eine statistisch optimale Separierung des trockenen und feuchten Anteils der Refraktivität unter Berücksichtigung der Messfehlercharakteristika. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass mit diesem Verfahren bei genauer Kenntnis der Fehlercharakteristika eine Verbesserung des Wasserdampf retrievals möglich ist. Am Ende des Projektes lag eine Programmversion vor, die in die operationelle Datenprozessierung implementiert werden kann (Abbildung 9). Die abgeleiteten Temperatur- und Wasserdampfprofile werden dann als zusätzliches Datenprodukt (CH-3-ATM-VAR) bereitgestellt.

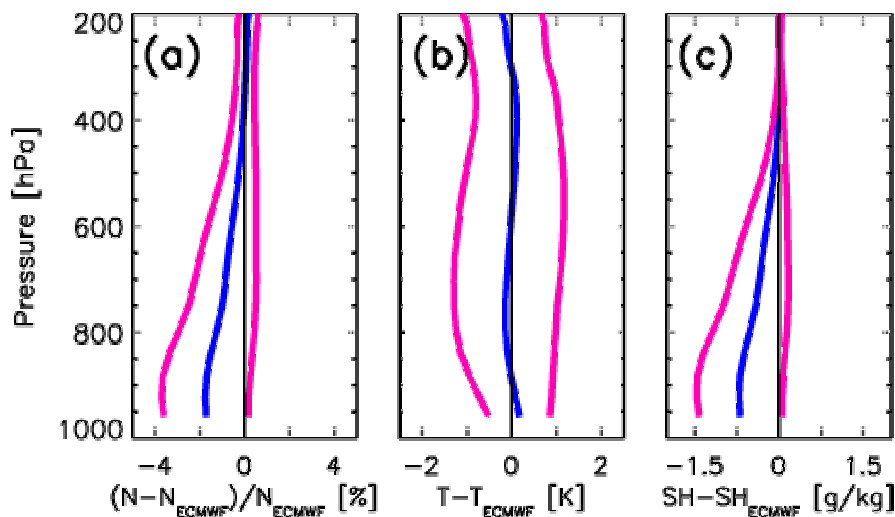


Abbildung 9: Ergebnisse der operationellen Prozessierung mit der Implementierung eines 1D-Var Verfahrens zur Ableitung von Temperatur- und Wasserdampfprofilen aus GPS-Radiookkultationsdaten. Die Abbildung zeigt einen Vergleich der abgeleiteten Temperaturen und spezifischen Feuchte mit ECMWF-Daten.

Mehrwegeeffekte und Retrieval in der unteren Troposphäre

Bei der Analyse und Validierung der ersten CHAMP-Messungen unter Annahme der Gültigkeit der geometrischen Optik wurde ein signifikanter negativer Refraktivitätsbias gegenüber meteorologischen Analysen festgestellt. Dieser Bias ist in tropischen Breiten am größten und erreicht dort Werte von ~5%. Als Ursachen werden gesehen: unkorrigierte Mehrwegeeffekte bei der Signalausbreitung in der unteren Troposphäre und Einfluss des GPS-Empfängers bei der Signalverfolgung.

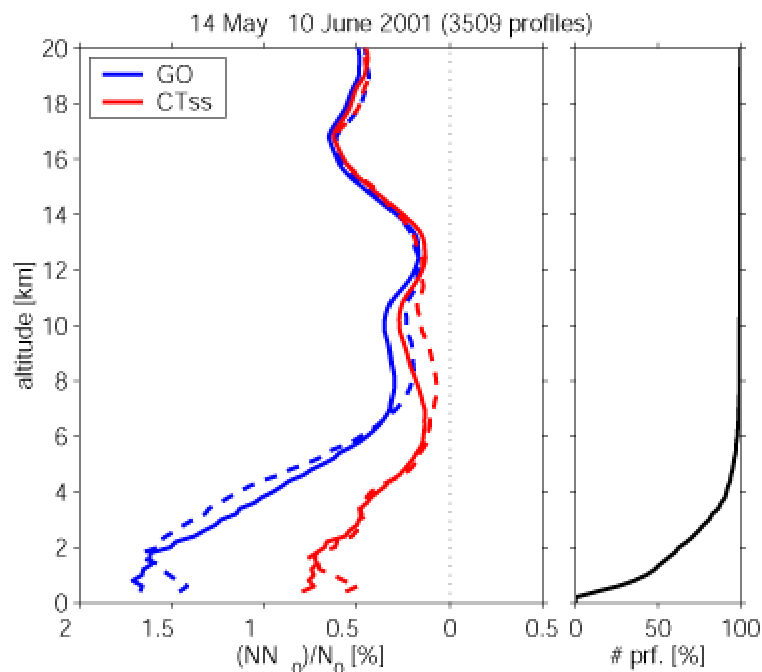


Abbildung 10: Statistischer Vergleich von ~3.500 vertikalen Refraktivitätsprofilen, abgeleitet aus CHAMP-Messungen 2001, mit Ergebnissen von meteorologischen Analysen von ECMWF (durchgezogene Linie: gesamter Datensatz; gestrichelte Linie: Messungen auf der Nordhemisphäre). Die Anwendung der CTss Methode bringt eine deutliche Reduzierung negativen Refraktivitätsbias gegenüber der Anwendung der geometrischen Optik (GO).

Ein neues Auswerteverfahren, basierend auf der Methode „Kanonischer Transformationen“ (CT), verspricht eine Lösung des Problems der Mehrwegeeffekte in der unteren Troposphäre. Mit einer modifizierten Form dieser Methode (CTss) konnte eine deutliche Verbesserung bei der Ableitung der Refraktivität (Verringerung des Bias um z.T. mehr als die Hälfte, siehe Abbildung 10) erreicht werden.

Simulation mit GPS-Empfängern

Erste Arbeiten zum Einfluss des Signalempfangs durch den GPS-Empfänger wurden durchgeführt (End-to-End Simulationen). Hierzu wurde ein einfacher Software-GPS-Empfänger implementiert. Die simulierten atmosphärischen Signale wurden mit der Multiple-Phase-Screen-Methode aus realistischen Radiosondenprofilen generiert. Dabei konnte u.a. ein Einfluss der verwendeten Messfrequenz des Empfängers nachgewiesen werden.

Mit den Simulationen konnte auch ein Zusammenhang zwischen dem Trackingverfahren des GPS-Empfängers (Costas Phasenschleife/2 Quadrantenphasendetektor) und dem o.g. negativen Refraktivitätsbias hergestellt werden. Ein alternatives Trackingverfahren

wurde vorgeschlagen und ist für die Implementierung in die GPS-Empfängersoftware an Bord von CHAMP vorgesehen.

Weitere Arbeiten wurden zur Verbesserung der radioholografischen Methode (einem Alternativerfahren zur Kanonischen Transformation) in Zusammenarbeit mit dem IRE Moskau durchgeführt. Mit dieser Methode wurden nicht nur Beiträge von an Ozean- und Eisoberflächen reflektierten Signalen in den Okkultationssignalen (siehe Abbildung 11) nachgewiesen, es konnten auch ionosphärische Einflüsse auf die Signale detektiert und kategorisiert werden.

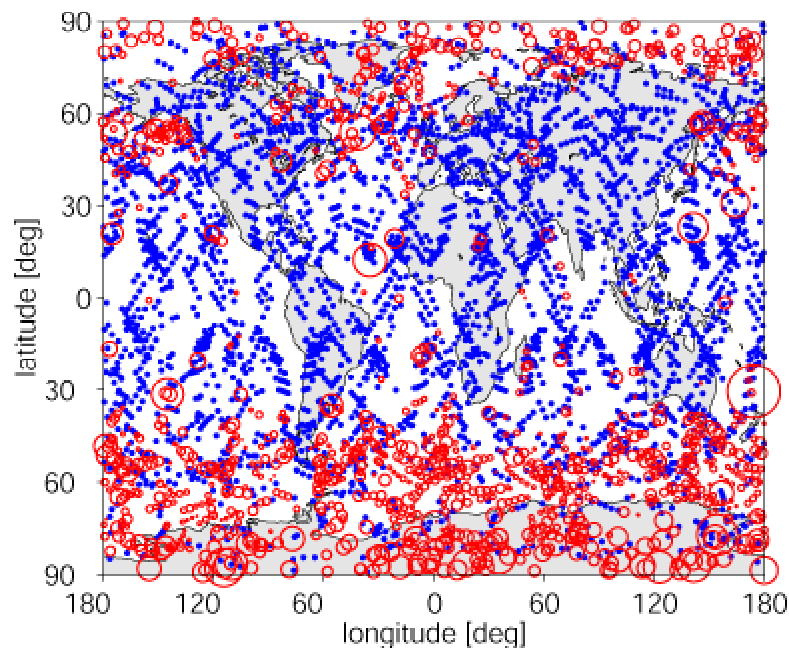


Abbildung 11: Geografische Verteilung von 3.783 CHAMP-Okkultationen, aufgezeichnet im Mai/Juni 2001. 2.571 Okkultationen ohne Reflexionssignaturen sind blau markiert. 1.212 Okkultationen (rote Kreise) weisen Komponenten von reflektierten Signalen auf. Der Durchmesser der Kreise ist proportional zur Intensität der reflektierten Komponente.

Ionosphäre (WP 322)

Die entwickelten Algorithmen zur Ableitung der Elektronendichte aus GPS-Phasenmessungen auf L1 und L2 arbeiten stabil. Die Datenausbeute (Verhältnis erfolgreich abgeleiteter Elektronendichteprofile zur Anzahl der Radiookkultationsmessungen) liegt seit März 2002 unverändert bei ca. 70%, d.h. bei etwa 150 global verteilten Elektronendichteprofilen täglich. Diese Zahl ist vergleichbar mit dem insgesamt aus dem klassischen weltweiten Ionosondennetzwerk täglich zur Verfügung gestellten Datenvolumen. Als Hauptursache für die nicht erfolgreich abgeleiteten Profile lassen sich fehlerhafte Messdaten und unzureichende Messgeometrie benennen. Fehlerhafte oder unzureichend konditionierte Eingangsdaten werden von der Software größtenteils erkannt und automatisch zurückgewiesen.

Physikalische Faktoren, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Inversionsalgorithmen beeinflussen, sind auf Verbesserungsmöglichkeiten hin untersucht worden.

Von besonderem Interesse sind hierbei Fragen einer nichtsphärischen Elektronendichteverteilung und der oberen Randbedingung der Inversion. Unterstützt durch ein NATO-Projekt "Development of an ionosphere/plasmasphere model driven by GPS data"

wurden Fortschritte in Richtung eines verbesserten Profiling erzielt. Diese Aktivitäten sollen auch nach GASP mit der Entwicklung eines globalen Topside-Skalenhöhenmodells fortgesetzt werden.

Wie in den vorhergehenden Zwischenberichten bereits ausgeführt, haben horizontale Elektronendichtegradien einen signifikanten Einfluss auf die Struktur des abgeleiteten Profils. Es wurde eine Methode erarbeitet, die die in TEC-Karten enthaltene horizontale Information im Profiling berücksichtigt. Wegen der fehlenden globalen TEC Information basieren die operationellen Retrievalalgorithmen aber nach wie vor auf der Annahme einer sphärisch symmetrischen Elektronendichteverteilung in der Ionosphäre.

Unabhängig von diesen Verbesserungen der Profiling-Algorithmen erbrachten die seit 11. April 2001 vorliegenden ersten Messungen bemerkenswert gute Resultate.

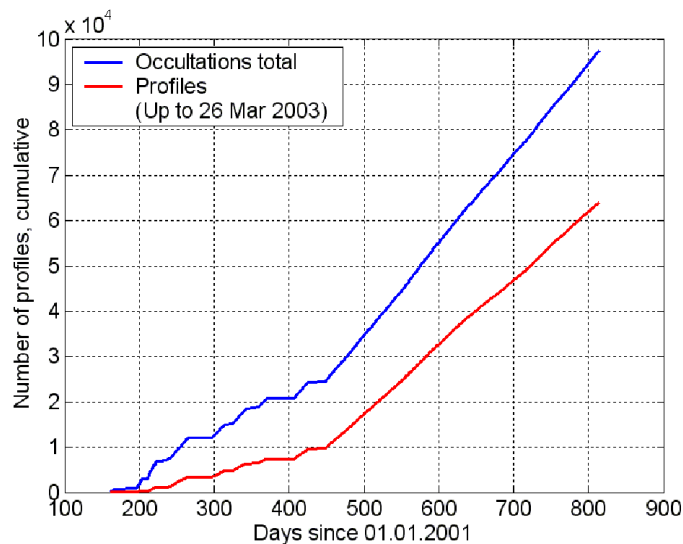


Abbildung 12: Gesamtzahl der erfolgreich abgeleiteten Elektronendichteprofile im Vergleich zur Gesamtzahl der ionosphärischen Radiookkultations- (IRO)-Messungen seit Beginn der GPS-Okkultationsmessungen auf CHAMP.

Für die GPS-Navigationsmessungen mit der Zenith-Antenne wurden Algorithmen zur Kalibrierung des differentiellen TEC (GPS- und CHAMP-Biases) entwickelt, die im Mittel eine Kalibriergenauigkeit von ca. $1 \times 10^{16} \text{ m}^2$ ermöglichen. Diese Kalibrierung ist die Grundlage für die Untersuchung der Ionisationsverteilung in der oberen Ionosphäre/Plasmasphäre. Als Hintergrundmodell der Assimilation wurde das PIM-Modell ausgewählt, da es auch die Plasmasphäre in die Modellierung einschließt. Die entwickelten Assimilationstechniken arbeiten stabil. Die Validierungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den unabhängigen Elektronendichtemessungen der an Bord von CHAMP installierten Langmuirprobe.

Die entwickelten Prozessierungs- und Assimilationstechniken sind in einer Doktorarbeit umfassend dargelegt.



WP 330 Datenprozessierung und –verteilung

Analyse und Optimierung des CHAMP AIP Prozessor-Systems (WP 331)

Das CHAMP Atmosphären/Ionosphären-Prozessierungssystem ist durch zwei unabhängig voneinander laufende Prozessoreinheiten realisiert (IP – Ionosphärenprozessor beim DLR Neustrelitz; AP - Atmosphärenprozessor beim GFZ Potsdam). Beide Systeme laufen seit dem Start des CHAMP Satelliten und prozessieren automatisch und operationell die an Bord von CHAMP empfangenen Okkultationsdaten. Im Berichtszeitraum sind ständig Verbesserungen an den Modulen vorgenommen worden, um die Qualität und die Verfügbarkeit der Daten sowie die Prozessierungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Darüber hinaus wurden die Bedieneroberflächen der jeweiligen Prozessierungssysteme an die speziellen Erfordernisse angepasst, um so die Arbeit des Gesamtsystems, der Einzelmodule sowie die Ergebnisausgabe, optimal zu kontrollieren. Seit Beginn des CHAMP-Radiookkultationsexperimentes wurden ca. 100.000/70.000 Atmosphären/Ionosphären-Okkultationsmessungen verarbeitet und daraus mehr als 80.000/50.000 Vertikalprofile abgeleitet. Die Datenprodukte werden automatisch im CHAMP ISDC archiviert und stehen für die Validierung bzw. eine weitere Verarbeitung zur Verfügung.

Atmosphärenprozessor (AP)

Das Prozessierungssystem für die Neutralgasatmosphäre am GFZ Potsdam läuft seit Beginn des Radiookkultationsexperimentes im automatischen Mode. Wenn alle Inputdaten (CHAMP-50Hz-Daten, 1Hz-GPS-Bodenstationsdaten, CHAMP- und GPS-Orbitdaten, meteorologische Daten) verfügbar sind, werden die Auswertemodule gestartet und liefern die Produkte (Vertikalprofile Temperatur/Wasserdampf) automatisch ins GFZ-Datenzentrum. Kontinuierlich werden im AP pro Tag etwa 1,5 GB an Daten verarbeitet.

Schwerpunkte bei der Weiterentwicklung des AP waren: die Generierung von Kontrollsoftware, die das Gesamtsystem (Input, Datenverarbeitung, Output) beobachtet und so Unregelmäßigkeiten und Fehler lokalisiert; Entwicklung von Software, die automatisch geeignete Statistiken über den aktuellen Stand der Prozessierung erstellt; Weiterentwicklung des graphischen Userinterfaces und eines webbasiertes Übersichtstools.

Near-Real-Time Prozessierung

Die Nutzung des kontinuierlichen Datenstromes von der polarnahen Empfangsantenne in Ny Ålesund (Spitzbergen), des operationellen globalen GPS-Bodennetzes und von schnell prozessierten GPS und CHAMP Satellitenorbits ermöglichte erstmals eine Near-Real-Time Okkultationsdatenprozessierung. Erste Demonstrationsstudien erfolgten im April 2002. Zum Ende des GASP-Projektes (Ende 2002) begann die kontinuierliche Datenbereitstellung für die Entwicklung von Datenassimilationswerkzeugen am MPI Hamburg. Dabei wird kontinuierlich eine durchschnittliche Verzögerung (für alle Okkultationsmessungen) von 5 Stunden zwischen Messung und Produktbereitstellung (atmosphärische Phasenwegverlängerung) für das MPI erreicht (Abbildung 13). Hiermit ist ein wesentliches Projektziel erreicht worden, das bisher weltweit einzigartig ist.

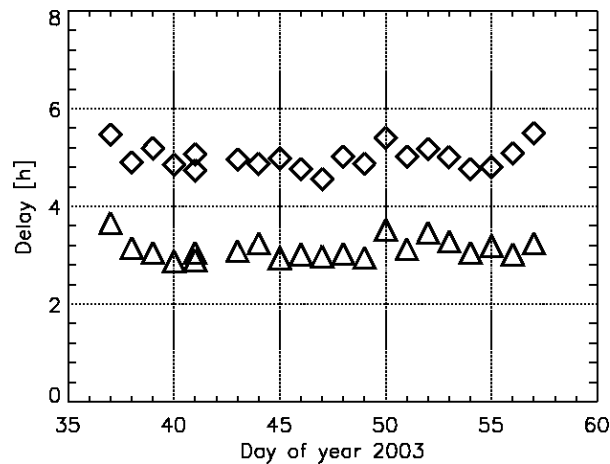


Abbildung 13: Durchschnittliche Verzögerung zwischen Messung und Bereitstellung am Datenzentrum (ISDC) von atmosphärischen Phasenwegverlängerungen für die operationelle Near-Real-Time Datenprozessierung seit dem 6. Februar 2003 (Karos). Die Dreiecke zeigen die minimale Verzögerung pro Tag.

Ionosphärenprozessor

Das IP-Prozessorsystem am DLR/IKN prozessiert seit dem Start des GPS-Radiokkultationsexperimentes der Ionosphäre (April 2001) ebenfalls erfolgreich in operationeller Weise die GPS-Okkultationsdaten.

Das Prozessierungssystem und die Module wurden im Verlaufe des Projekts, insbesondere im Hinblick auf die Fehlererkennung optimiert. Verbesserte Module wurden nach erfolgreichen Tests in den Prozessor implementiert.

Multi-Satellite-Missions AIP (WP 332)

Für die Anpassung des Systems an Daten aus anderen Satellitenmissionen (GRACE, SAC-C) wurden die notwendigen Anforderungen an die Hardware, das Steuerungssystem und die entsprechenden Schnittstellen definiert. Die Funktionalität der Systemmodule wurde erweitert, um Daten aus anderen Missionen mit den bereits eingesetzten Systemen verarbeiten zu können. Unter Einhaltung der definierten Namenskonventionen ist es nach entsprechender Systemkonfiguration möglich, die zusätzlichen Daten durch die Input-Module in das System einlesen zu lassen. Sollte die Einhaltung der Namenskonventionen nicht gewährleistet werden können, kann ein für diese Zwecke entwickeltes Konvertierungsmodul angepasst und eingesetzt werden, um so intern eine entsprechende Benennung zu erreichen und so eine korrekte Zuordnung von Eingabedaten zueinander zu gewährleisten. Durch eine entsprechende Konfiguration des Job-Control-Systems kann bei einer großen Anzahl von zu bearbeitenden Eingabedaten eine parallele Abarbeitung von Jobs auf mehreren Rechnern ausgeführt werden, um so die Einhaltung der für die Bearbeitung geforderten Zeitschranken zu gewährleisten. Durch eine entsprechende Konfiguration des Steuersystems können weitere missionsspezifische Verarbeitungsmodul in das Gesamtsystem integriert werden.

Am GFZ Potsdam konnten mit o.g. Anpassungen ca. 12.000 Radiokkultationen (September/Oktober 2001) der SAC-C-Mission aufgezeichnet und etwa 9.500 Vertikalprofile abgeleitet werden. Die verwendeten Orbitdaten wurden vom JPL bereitgestellt. Die Prozessierung von SAC-C-Daten erfolgte noch nicht im operationellen Modus.



User Interface (WP 333) GFZ/DLR

Die Anbindung der AP- und IP-Prozessoren an das ISDC wurde abgeschlossen.

Produktgenerierung (WP 334) GFZ/DLR

Nach Einschalten des Radiookkultationsexperimentes an Bord von CHAMP erfolgte die in der Produktbeschreibung spezifizierte Generierung von Produkten:

CH-AI-1-HR,
CH-AI-1-FID,
CH-AI-2-PD,
CH-AI-2-TAB,
CH-AI-3-ATM,
CH-AI-3-WVP,
CH-AI-3-TCR,
CH-AI-3-IVP.

Die Bereitstellung der Produkte erfolgte für alle GPS-Radiookkultationsereignisse.

GPS-Prozessierungs-, Archivierungs- und Verteilungszentrum (WP 335) GFZ

Die in WP 331-334 beschriebenen Prozessierungssysteme bilden zusammen mit dem Informationssystem und Datenzentrum (ISDC) am GFZ Potsdam ein GPS-Prozessierungs-, Archivierungs- und Verteilungszentrum (PAD-Zentrum, Processing Archiving & Distribution).

Das IT-Management aller GASP2-Produkte – sowohl der für die wissenschaftliche Prozessierung notwendigen Input-Produkte (z.B. Okkultationsdaten, CHAMP- und GPS-Orbits und meteorologische Analysen) als auch der Analyse-Produkte selbst (Excess Phasen und Atmosphären/Ionosphärenprofile) – wird durch unterschiedliche Komponenten des CHAMP- und des GASP-ISDC realisiert. Mehr als 350.000 Okkultationsprodukte (mit täglich steigender Tendenz) in sechs verschiedenen Produkttypen sind im online-Archiv des ISDC gespeichert und von registrierten und autorisierten CHAMP/GASP-ISDC-Nutzern (Atmo/Ionosphäre weltweit ca. 50) recherchier- und zugreifbar. Die Schnittstelle für den Produkt-Input bzw. -Output erfolgt über dedizierte nutzereigene Verzeichnisse des GFZ FTP-Servers.

Entsprechend der CHAMP-Produktphilosophie besteht jedes wissenschaftliche Produkt aus einem Datenfile und dem zugehörigen Metadatenfile. Das Metadatenfile – strukturiert gemäß dem „Extended DIF“-Standard – beinhaltet alle relevanten Informationen zur Beschreibung des Datenfiles, wie z.B. inhaltlicher, zeitlicher und räumlicher Datenbezug, Generierungszeit und Zitiervorlagen.

Die in einer relationalen Datenbank des ISDC gespeicherten Information des Metadatenfiles bilden die Grundlage für das CHAMP/GASP-ISDC Clearinghouse. Diese ISDC-Komponente ermöglicht produktspezifische Recherchen mittels differenzierter Suchmasken. Diese werden durch ISDC-Web-Applikationen zur Verfügung gestellt. Im Ergebnis der Recherche enthalten die entsprechenden Web-Seiten neben der tabellarischen Darstellung relevanter Metadaten auch Links zu Metadokumenten im ursprünglichen „Extended DIF“-Format und OGC-konformen XML-ISO 19115 Format. Darüber hinaus erlauben Verknüpfungen den direkten Zugriff auf die angeforderten Produkte.

Neben der textbasierten Suche ermöglicht ein spezieller ISDC-Datawarehouse-Service die räumliche Produktsuche und als Resultat die räumliche Projektion der

Ergebnismenge als geografische, Mollweide oder stereografische Projektion mit ebenfalls verweissensitiven Links auf Metadokumente und die Produkte selbst. Darüber hinaus erlaubt ein online Visualisierungsservice die grafische Darstellung der Parameterprofile auf Knopfdruck.

WP 340: Atmospheric Application and Validation GFZ/AWI/GKSS

Validierung (WP 341) GFZ

Am GFZ erfolgten umfangreiche Validierungsstudien mit globalen meteorologischen Analysen vom ECMWF und Radiosonden. In Ergebnis der Studien und der Validierungsstudien der Projektpartner konnte die Analysesoftware deutlich verbessert werden. Die aktuellste Produktversion (004) weist im globalen Mittel im Höhenbereich von 10 bis 35 km nahezu keinen Bias gegenüber den Analysen und auch den Radiosonden auf. Standardabweichungen von 1-2 K wurden festgestellt (Abbildung 14). Die Standardabweichungen sind stark von Länge/Breite abhängig und weisen zum Teil auf mögliche Unzulänglichkeiten in den Analysedaten hin. In der unteren Troposphäre wird ein negativer Bias in den CHAMP Daten relativ zu Analysen und Radiosonden von bis zu 5% in den Tropen beobachtet (siehe auch WP 321). Dieser Bias verursacht einen Bias in der spezifischen Feuchte von bis zu 30-40% ebenfalls in den Tropen. Erste Validierungsstudien von Feuchten, die nach Anwendung einer modifizierten kanonischen Transformationsmethode (CTss, WP 321) gewonnen wurden, deuten auf eine deutliche Reduzierung des Feuchtebias hin (Abbildung 15).

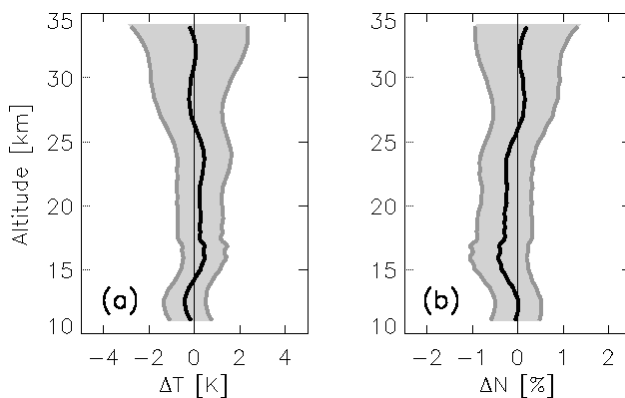


Abbildung 14: Statistischer Vergleich (mittlere und Standardabweichung) von ~46.000 (a) Temperatur- und (b) Refraktivitätsprofilen, abgeleitet aus CHAMP-Messungen zwischen März und Dezember 2002 mit meteorologischen Analysen von ECMWF.

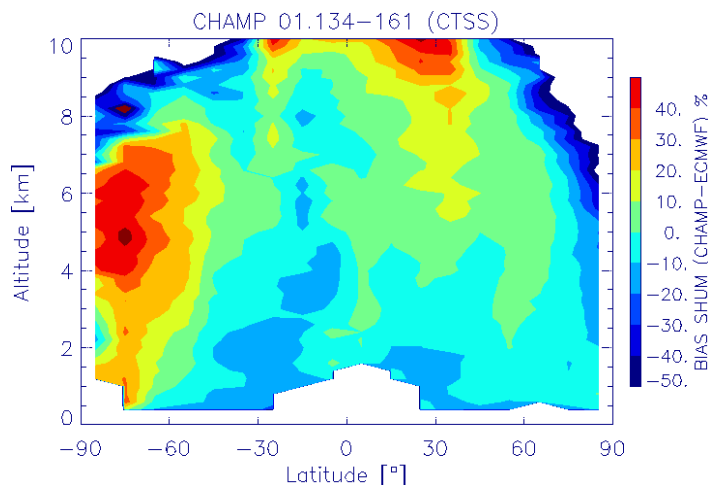


Abbildung 15: Statistischer Vergleich der mittleren meridionalen spezifischen Feuchte, abgeleitet aus ca. 4.000 CHAMP-Messungen im Mai/Juni 2001 mit entsprechenden ECMWF Analysedaten. Die CHAMP-Profile wurden mit der CTss Analyse-methode abgeleitet.

Validierung (WP 341) AWI

Die für die Validierung der CHAMP-Radiosondierungsdaten in der Arktis notwendigen Methoden wurden zunächst mit Daten des U.S.-amerikanischen GPS/MET-Experiments aus dem Februar 1997 (Prime-Time 4) entwickelt. Diese Daten wurden über das GFZ zur Verfügung gestellt. Der wichtigste Vergleichsdatensatz besteht aus den Radiosondenaufstiegen an rund 70 Stationen nördlich von 60°N, die über das Global Telecommunications System (GTS) der WMO zugänglich sind. Während das Radiosondennetz über dem Arktischen Ozean und Zentralgrönland große Lücken aufweist, stehen die Daten des regionalen Klimamodells HIRHAM flächendeckend zur Verfügung. Außerdem wurden Analysedaten des ECMWF herangezogen. Die erste längere CHAMP-Validierungsperiode erstreckte sich von Mitte Mai bis Mitte Juni 2001. Es wurden die CHAMP Profile der ersten Produktversion (2001) validiert. Von rund 800 GPS-Radiosondierungen (RO) fanden nur ca. 60 in der Nähe eines Radiosondenstarts statt (± 3 h, ± 300 km). Einzelvergleiche zeigen teils gute Übereinstimmung der Profile, teils aber auch erhebliche Abweichungen der spezifischen Feuchten. Für die Gesamtheit der „simultanen“ Sondierungen ergibt sich eine Korrelation von 0,51 bzw. 0,56 (850 / 500 hPa Höhe) bei einer Standardabweichung von 1,5 g/kg bzw. 0,45 g/kg. Auch eine Einschränkung des zeitlichen und räumlichen Fensters verbessert die Vergleichsergebnisse nicht. Insbesondere in den Polargebieten ist aufgrund der geringen Feuchte mit einem großen statistischen Fehler der Feuchtwerte aus GPS-RO zu rechnen. Die Datensätze wurden darum zeitlich über den gesamten Vergleichszeitraum gemittelt. Zusätzlich wurde regional nach Landgebieten, offenem Ozean und eisbedecktem Ozean unterschieden, die zumindest die unteren Kilometer des Feuchteprofils beeinflussen. Die GPS-RO-Daten zeigen hier in allen Höhen (und Regionen) die geringsten Feuchtwerte. Die Auswertung der HIRHAM-Simulation ergibt je nach Region und Höhe rund 10-50% höhere spezifische Feuchten als aus GPS-RO (vgl. WP 343 AWI). Die mittleren Radiosondenprofile sind gegenüber HIRHAM teils nochmals zu größeren Werten verschoben, jedoch oft in guter Übereinstimmung.

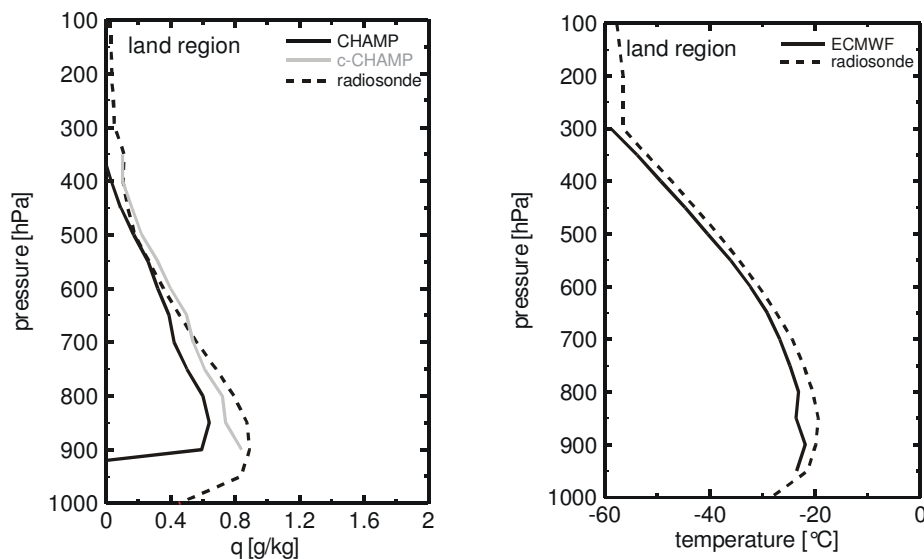


Abbildung 16: Mittleres Profil der spezifischen Feuchte (links) und Temperatur (rechts) im Februar 2002. Es wurden nur CHAMP- und Radiosondenprofile über dem arktischen Landgebiet berücksichtigt. Für das graue Feuchteprofil wurden negative Feuchtwerte bei der Mittelung vernachlässigt. Das durchgezogene Temperaturprofil (ECMWF) wurde aus den in das CHAMP-Retrieval eingehenden Analysen ermittelt.

Die geringe Korrelation der spezifischen Feuchten aus Radiosonden und GPS-RO und die insgesamt geringeren Feuchtwerte aus GPS-Messungen werden in einem zweiten Vergleichszeitraum (Februar 2002) bestätigt. Im gesamten Herbst/Winter 2001/2002 sind außerdem Vergleiche mit dem Wasserdampf-Raman-Lidar an der Koldewey-Station in Ny-Ålesund (79°N, 12°O) durchgeführt worden. 14 Okkultationen fanden in zeitlicher und räumlicher Nähe zu Lidar-Messungen statt. Wiederum ergeben sich oft erhebliche Abweichungen sowie meist geringere GPS-Feuchten.

Zur Analyse der großen Diskrepanzen zwischen GPS-RO-Messungen und anderen Datensätzen wurden mittlere Temperaturprofile aus Radiosonden für die o.g. Regionen mit ECMWF-Daten verglichen. Die ECMWF-Temperaturfelder gehen erheblich in die Bestimmung der spezifischen Feuchte aus GPS-RO ein. Im regionalen Mittel ergeben sich dabei jeweils geringere Temperaturwerte in den Analysen. Die Unterschiede betragen bis zu ca. 2 K. Eine Unterschätzung der wahren Temperatur führt bei der Berechnung spezifischer Feuchten aus GPS-Messungen zu einer Unterschätzung der atmosphärischen Feuchte.

Validierung (WP 341) GKSS

Das hochaufgelöste regionale Wettervorhersagemodell HRM des Deutschen Wetterdienstes wurde mit der ersten GFZ-Produktversion von CHAMP-Daten im Zeitraum vom 14.5.2001 bis zum 20.1.2002 im BALTEX-Gebiet (etwa Europa) verglichen. Es zeigte sich, dass das HRM Modell die spezifischen Feuchten überschätzt, am meisten in der niedrigsten Schicht (ca. 400 m Höhe), bis etwa 1.2 g/kg. Die Differenz zwischen den spezifischen Feuchten, die das Modell bestimmte, und den spezifischen Feuchten aus CHAMP Daten nimmt mit steigender Höhe ab.

Die Standardabweichungen der spezifischen Feuchte-Differenzen zwischen HRM Modell und CHAMP Daten sind denen zwischen Radiosonden-Daten und dem HRM Modell ähnlich: Ein Vergleich von Radiosondendaten und HRM Modell zwischen dem 1.Mai und dem 6.Juni 2000 an der Station Lindenberg ergab als Standardabweichung der Differenzen bis zu 1.5 g/kg, ebenfalls abnehmend mit steigender Höhe.

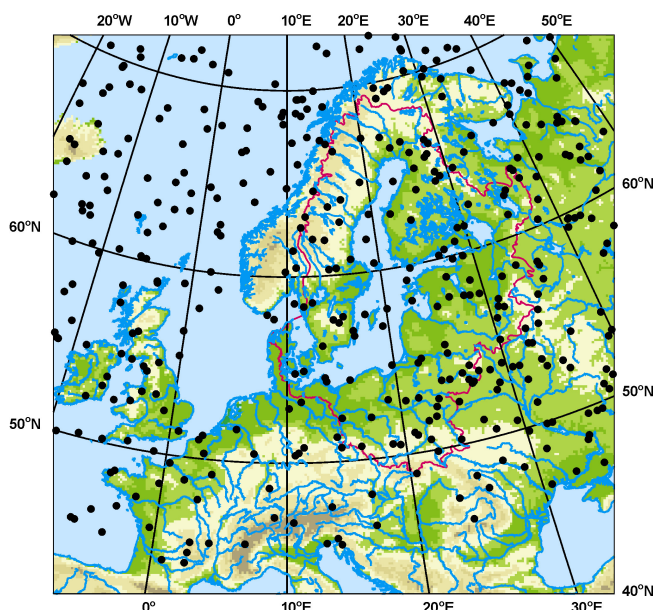


Abbildung 17: BALTEX Modellgebiet mit den mittleren Tangentenberührungspunkten der 415 CHAMP Radiookkultationen zwischen dem 14.5.2001 und dem 20.1.2002.

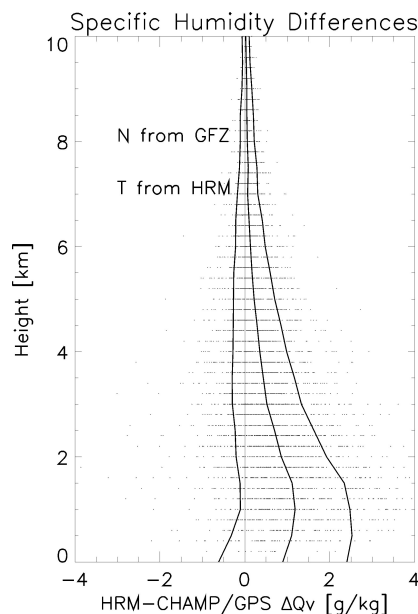


Abbildung 18: Differenzen und Standardabweichungen der spezifischen Feuchte zwischen CHAMP/GPS und dem HRM Modell bei Verwendung der vom GFZ bestimmten Refraktivitäten (erste Produktversion).

Aus CHAMP Profilen über der Antarktis wurden vertikal integrierte Wasserdampfwerte mit solchen, die aus Daten der Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) des amerikanischen NOAA Polar Operational Environmental Satellite bestimmt wurden, verglichen. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Datensätzen (Standardabweichung 0.79 kg/m^2). Es ließ sich zeigen, dass sich aus CHAMP-Okkultationsdaten eine ähnliche mittlere Verweildauer des Wasserdampfes in der antarktischen Atmosphäre wie aus SSMT/2 Daten ableiten lässt (etwa 3-4 Tagen).

Assimilation von GPS-Radiookkultationsdaten im Rahmen von 3DVAR (WP 342) MPI

Im Projektverlauf wurde ein auf geometrischer Optik beruhender Datenassimilationsalgorithmus entwickelt, der sowohl mit Modellen arbeiten kann, die auf einem Gauß'schen Gitter beruhen (wie IFS/ECMWF oder ECHAM5/MPI-MET), als auch mit Modellen, die ein hexagonales bzw. trianguläres Gitter benutzen (DWD/GME).

Im Rahmen des Datenassimilationsalgorithmus wird zunächst eine vorbereitende, erste Prozessierung vorgenommen. In diesem ersten Schritt werden die bereitgestellten Phasenverschiebungen in Refraktionsindex umgerechnet. Dieser Schritt beinhaltet sowohl die Verwendung der 'Backpropagation', zur Auflösung von 'Multipath', als auch die kanonische Transformation zur Qualitätskontrolle. Diese erste Qualitätskontrolle ist von besonderer Bedeutung, da die atmosphärische Refraktion eine nicht eindeutige Funktion der Temperatur und spezifischen Feuchte ist und in einer variationellen Datenassimilation schwerwiegende Störungen initiieren kann.

Die für die Datenassimilation bereitgestellten Komponenten beruhen auf dem Beobachtungsoperator, der aus Modellvariablen auf dem Modellgitter mit Hilfe der geometrischen Optik ('raytracing') die atmosphärische Refraktion berechnet. Dieser Algorithmus beinhaltet ein sehr flexibles Interpolationsverfahren, das für die oben erwähnten unterschiedlichen Gitter verwendet werden kann.

Der tangent-lineare Teil wird aus dem Beobachtungsoperator abgeleitet (Differentiation). Mit dessen Hilfe werden Störungen erster Ordnung der Observablen aus Variationen der Modellvariablen berechnet.

Das adjungierte Modell der atmosphärischen Refraktion erlaubt die Berechnung der Ableitungen des Beobachtungsoperators bezüglich der Modellvariablen, welche dann in der Minimierung des Datenassimilationsverfahrens verwendet werden kann.

Im Rahmen des Teilprojekts wurden zunächst CHAMP-Daten für einfache Datenassimilationsexperimente verwendet. Basis für diese Experimente sind die primären Beobachtungsdaten, also die atmosphärischen Phasenwegverlängerungen und alle Hilfsdaten (Positionen und Geschwindigkeiten der beteiligten Satelliten, CHAMP-Datenprodukt CH-AI-2). Außerdem wird eine detaillierte Beschreibung der Fehlercharakteristiken des Beobachtungsinstruments benötigt. Das Verständnis der Fehlereigenschaften des Empfängers auf CHAMP hat sich im Laufe des Projekts entscheidend verbessert (auch auf Grund der in WP 321 durchgeführten Arbeiten), so dass eine bessere Qualitätskontrolle möglich wurde.

Zum Ende des Förderungszeitraums ist es möglich, ein Langzeitexperiment mit dem zukünftigen Datenassimilationssystem des DWD durchzuführen. In diesem Experiment werden die Datenprodukte des GPS-Empfängers auf CHAMP in einem quasi-operationellen Verfahren durch das GFZ zur Verfügung gestellt (mittlere Dauer bis zum Eintreffen der Daten etwa fünf Stunden, WP 331). Die Präprozessierung wird durchgeführt und anschließend werden die Beobachtungsdaten innerhalb der Datenassimilation mit der sechsständigen Modellvorhersage verglichen. Dies ist die Vorbereitung für eine spätere Nutzung dieser Beobachtungsdaten. Während dieses Experiments wird die Biaskorrektur bestimmt und eine genaue Analyse und Anpassung der Strukturfunktion vorgenommen.

Es ist vorgesehen, das gesamte entwickelte System in der nahen Zukunft am DWD zu implementieren.

Klimatologie (WP 343) GFZ

Prozeduren zur Berechnung zonaler Mittel aller meteorologischer Größen wurden in einer Form implementiert, die die quasi-operationelle Berechnung entsprechender Felder aus CHAMP-Profilen ermöglicht.

Es wurden Arbeiten zur Berechnung von Tropopausenparametern („lapse rate“ und „cold point“ Tropopausendruck, -temperatur und -höhe) durchgeführt (Abbildung 19).

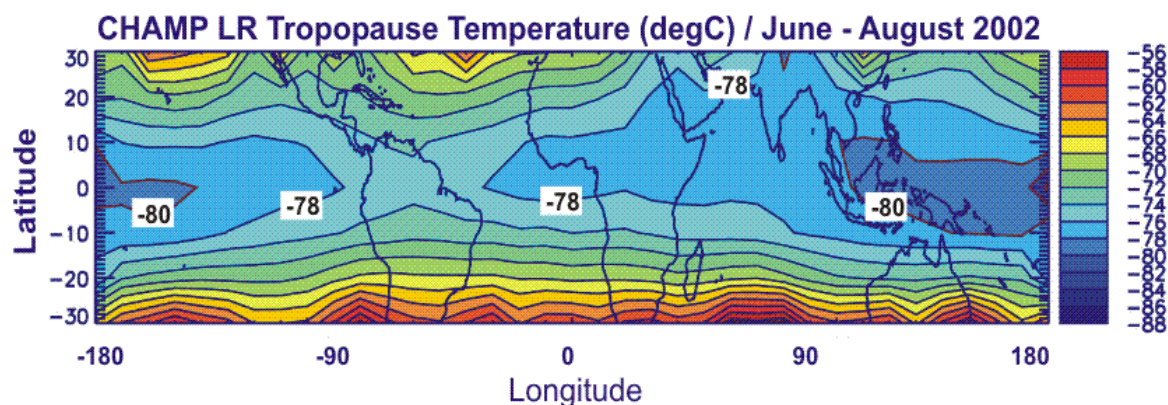


Abbildung 19: Mittlere globale Tropopausentemperatur für den Zeitraum Juni-August 2002, abgeleitet aus CHAMP GPS-Okkultationsmessungen.



Klimatologie (WP 343) AWI

GPS-Radiookkultationsmessungen (RO) bieten ein hohes Potential für klimatologische Messungen. Sie sind im Falle von Refraktivitätsmessungen selbst-kalibrierend, die Ableitung der spezifischen Feuchte erfordert jedoch außerdem Temperaturinformationen z.B. aus meteorologischen Analysen. Zusätzliche Wichtigkeit für Klimauntersuchungen erlangen GPS-RO durch die Abdeckung der Polargebiete. Hier werden nach Ergebnissen globaler Zirkulationsmodelle die stärksten Effekte des globalen Klimawandels erwartet, jedoch ist die Abdeckung durch „konventionelle“ Messsysteme, wie z.B. Radiosonden, lückenhaft. Im Rahmen von GASP wurden Vergleiche zwischen GPS-RO und dem hochaufgelösten regionalen Klimamodell HIRHAM sowie „konventionellen“ Radiosondenmessungen angestellt. Dabei wurde der HIRHAM-Datensatz auch zur Ergänzung der Radiosondierungen über dem zentralen arktischen Ozean und dem grönländischen Inlandeis genutzt (vgl. WP 341 AWI). Erste Ergebnisse zeigen, dass sowohl HIRHAM als auch die HIRHAM antreibenden ECMWF-Analysen über der arktischen Landmasse eine zu kalte und trockene Atmosphäre modellieren. Vergleiche über dem offenen Meer und küstennahen Radiosondenstationen zeigen dagegen eine gute Übereinstimmung. Der troposphärische Polarwirbel wird durch das Regionalmodell HIRHAM besser beschrieben als durch die als Randantrieb dienenden ECMWF-Analysen.

Spezielle Datenanwendungen – Ozeanreflexionen (WP 344) GFZ

In Analogie zum Nachweis von an Wasseroberflächen reflektierten Signalbeiträgen in GPS/MET Okkultationsmessungen konnten auch in ca. 30% der CHAMP-Okkultationen Beiträge von reflektierten Signalen nachgewiesen werden. Dabei wurde die radioholografische Methode angewandt (siehe WP 321). Die Auswertung der reflektierten Signale kann eine Reihe von neuen Anwendungen der Okkultationstechnik ermöglichen, u.a. die Ableitung der Relativen Feuchte am Reflexionspunkt.

Spezielle Datenanwendungen - BALTEX (WP 344) GKSS

Neben den Daten des GPS-Bodennetzes des GFZ wurden auch die Radiookkultationsdaten der Satelliten CHAMP und SAC-C verwendet, um sie mit dem HRM Modell über dem BALTEX-Gebiet zu vergleichen. Dazu wurde eine Zeitreihe des HRM-Modells für den BRIDGE-Zeitraum (Oktober 1999 bis Februar 2002) berechnet: Die Initialisierung des HRM Modells erfolgte durch Interpolation der 0 UTC Daten des ECMWF. Dann wurden über einen Zeitraum von jeweils 30 Stunden stündliche Vorhersagen berechnet. Alle 6 Stunden wurden Randdaten vom ECMWF verwendet.

Zur Bestimmung der spezifischen Feuchten aus CHAMP Daten wurde ein Algorithmus von Gorbunov und Sokolovskij verwendet. Dabei zeigte sich, dass das Modell die CHAMP Daten im Mittel bis maximal 1.2 g/kg überschätzt. Vergleiche zwischen ECMWF-Daten und HRM zeigen hingegen nur geringfügige mittlere Differenzen (maximal etwa 0.3 g/kg). Somit werden die Unterschiede auch hier, wie zwischen GPS-Bodendaten und dem HRM-Modell, im wesentlichen auf Unterschiede zwischen ECMWF und den GPS Daten zurückgeführt.

WP 350: Ionosphärische Anwendung und Validierung DLR

Validierung (WP 351) DLR

Seit dem 11. April 2001 liegen die ersten Ionosphären- Radiookkultationsmessungen (IRO) vor. Seit dieser Zeit wurden bis zum 31.12. 2002 ca. 50390 global verteilte Elektronendichteprofile abgeleitet. Systematische Vergleiche mit verschiedenen Ionosphärenmodellen erbrachten nicht nur eine qualitativ gute Übereinstimmung, sondern auch Hinweise auf noch bestehende Mängel in den betrachteten Modellen.

Die quantitativen Validierungsarbeiten konzentrierten sich dem Projektplan entsprechend auf den Vergleich mit den Elektronendichtewerten der an Bord von CHAMP installierten planaren Langmuirsonde, auf den Vergleich mit Ionosondenmessungen und Incoherent Scatter-Messungen (EISCAT).

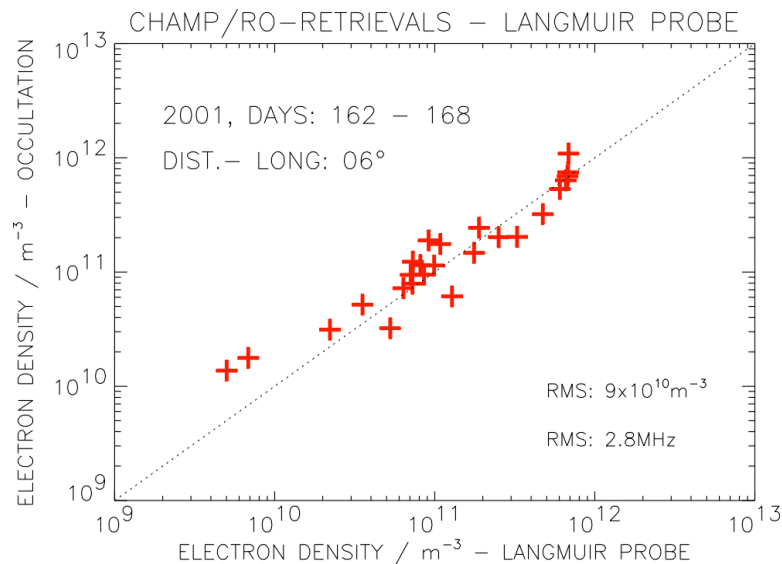


Abbildung 20: Streudiagramm der aus IRO-Messungen abgeleiteten Elektronendichte in CHAMP-Orbithöhe im Vergleich mit korrespondierenden in situ-Messungen der Langmuirsonde an Bord von CHAMP. Der Abstand der IRO-Messungen zur CHAMP-Bahnebene ist kleiner als 715 km (vgl. Jakowski et al., 2002).

Durch die anfänglich leider nur alternativ mögliche Durchführung von Radiookkultationen des Neutralgases und der Ionosphäre war die Zahl der Ionosphärenokkultationen zunächst bedeutend kleiner als ursprünglich geplant.

Da die Validierung mit Bodenmessungen (z.B. Ionosonde, Incoherent Scatter) eine räumliche und zeitliche Koinzidenz der Ereignisse voraussetzt, benötigt die Validierung einen längeren Zeitraum und wird deshalb auch wegen der Neuartigkeit dieses Datentyps nach Abschluss des Projekts weiter fortgesetzt.

Die aus den CHAMP-Daten ableitbare Grenzfrequenz und Höhe der F2-Schicht stimmen mit zeitlich und räumlich koinzidierenden Ionosonden Daten relativ gut überein. Die Standardabweichungen der Differenzen liegen für f_oF_2 bei 1,2 MHz und für h_mF_2 bei 45 km. In mittleren Breiten liegt die Standardabweichung der Plasmafrequenz unabhängig von der Höhe unverändert bei ca. 1 MHz, was als sehr gut angesehen werden kann.

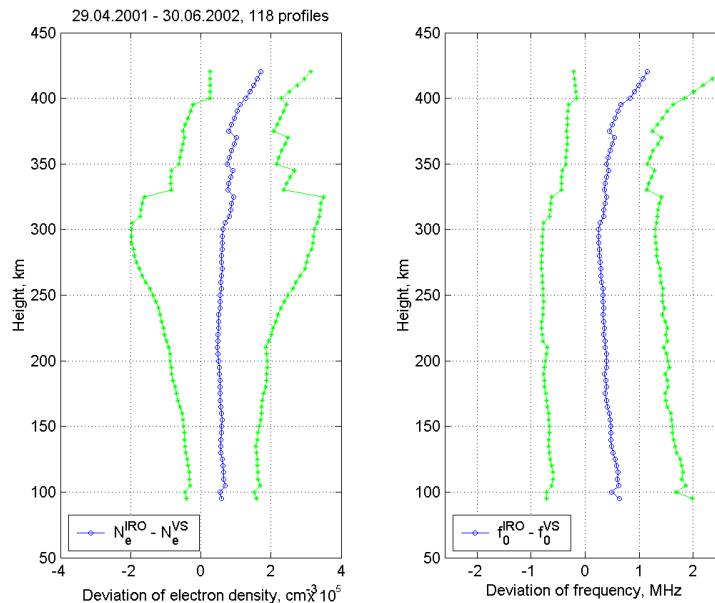


Abbildung 21: Vergleich von IRO-abgeleiteten Elektronendichteprofilen mit korrespondierenden vertikalen Elektronendichteprofilen der Ionosonde Juliusruh/Rügen (vgl. Jakowski et al. 2003). Die Standardabweichung (grün) ist beiderseits der mittleren Abweichung (blau) sowohl für die Elektronendichte (linke Seite) als auch für die entsprechende Grenzfrequenz (rechte Seite) eingezeichnet.

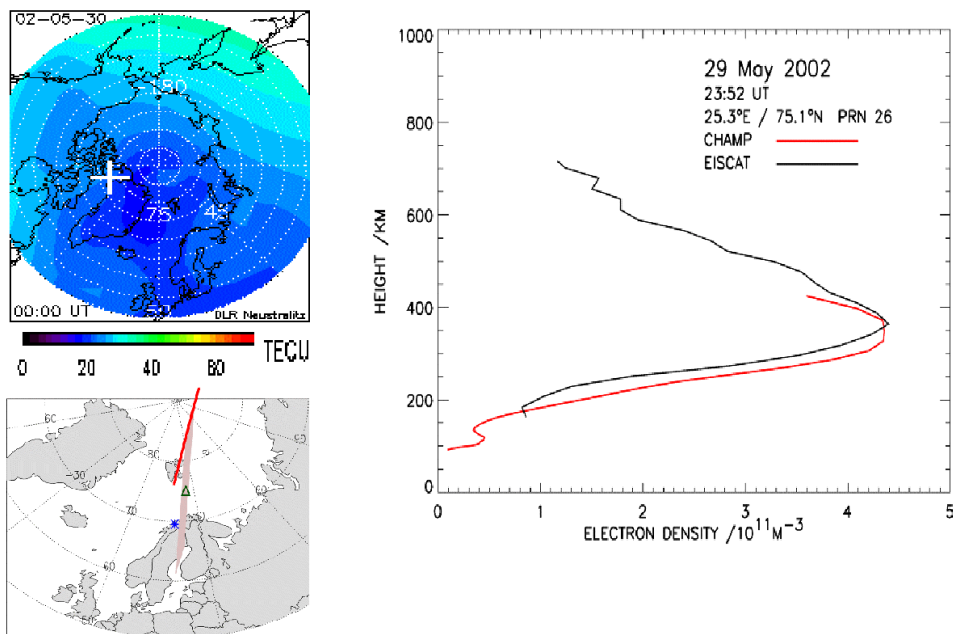


Abbildung 22: Vergleich eines IRO-abgeleiteten Elektronendichteprofiles mit einem korrespondierenden EISCAT-Profil am 29. Mai 2002 (rechte Seite). Ergänzend sind Lage der Okkultation und die korrespondierende TEC-Karte um Mitternacht gegeben (linke Seite).

Seit 11. April wurden drei Messkampagnen zur Validierung der IRO-Messungen mit EISCAT-Beobachtungen durchgeführt (November 2001, Februar 2002 and Mai/Juni 2002). Die IRO-Messungen zeigen eine prinzipiell gute Übereinstimmung mit den aus den EISCAT-Radar abgeleiteten Elektronendichteprofilen. Jedoch ist die Feinstruktur der

vertikalen Profile wegen der in hohen Breiten häufig auftretenden Irregularitäten gelegentlich sehr unterschiedlich. Hier macht sich der Unterschied zwischen dem über größere Flächen mittelnden Charakter der IRO-Messungen und dem lokalen Charakter der EISCAT-Messungen deutlich bemerkbar. In mittleren Breiten fällt dies wegen der schwächeren Gradienten weniger ins Gewicht.

Modellierung der Topside Ionosphäre / Plasmasphäre (WP 352) DLR

Für die Kalibrierung der TEC-Messungen aus den GPS-Navigationssignalen ist ein stabil laufendes Verfahren entwickelt worden. Das modellgestützte Kalibrationsverfahren hat sich bewährt; die Kalibrationswerte des CHAMP-Empfängers sind nur wenig variabel.

Eine gute Kalibrierung ist die Grundlage für die Untersuchung der Ionisationsverteilung in der oberen Ionosphäre/Plasmasphäre. Das im Projektzeitraum entwickelte Verfahren zur Assimilation der an Bord von CHAMP gemessenen TEC-Daten in das Ionosphärenmodell PIM liefert in mittleren und hohen Breiten sehr gute Ergebnisse, was beispielsweise im Vergleich mit den Langmuirdaten deutlich wird. Grenzen der räumlichen Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung werden in niederen Breiten in der Nähe des geomagnetischen Äquators infolge der dort auftretenden Plasmainstabilitäten und resultierenden Inhomogenitäten deutlich. Die kleinskaligen Plasmastrukturen erfordern naturgemäß eine angemessene räumliche Auflösung der Messungen, was die 0,1 Hz-Messungen auf CHAMP prinzipiell nicht leisten können.

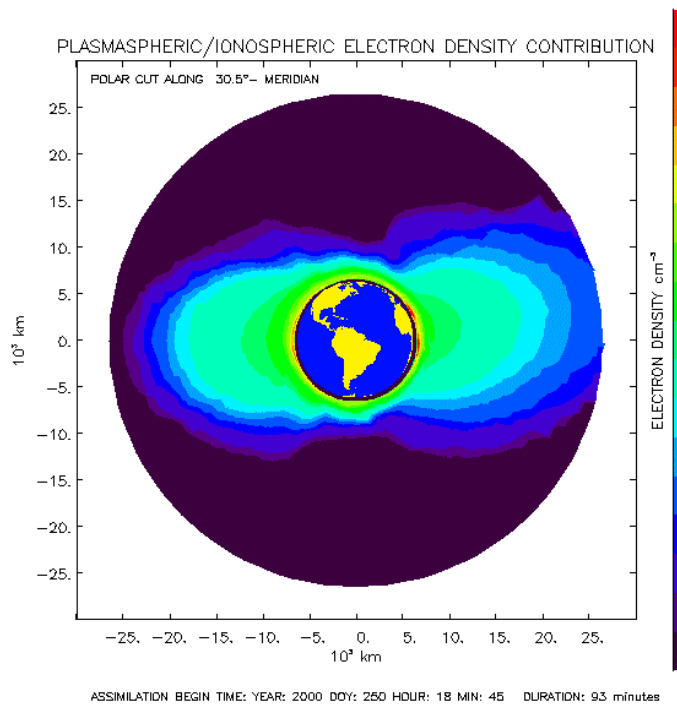


Abbildung 23: Beispiel für eine Rekonstruktion der 2D-Elektronendichteverteilung in der oberen Ionosphäre/Plasmasphäre und Assimilation der GPS-Messungen in das Ionosphärenmodell PIM (vgl. Heise et al., 2002).

Zur Verbesserung des Modells und zur Validierung der Daten wurde eine Kooperation mit dem Institut für Geophysik der bulgarischen Akademie der Wissenschaften in Sofia genutzt, die auch durch ein NATO-Projekt zum Thema *Development of an Ionosphere/Plasmasphere Model Driven by GPS Data* unterstützt wurde.

Die erreichten Rekonstruktions- und Validierungsergebnisse sind in einer Doktorarbeit umfassend diskutiert.

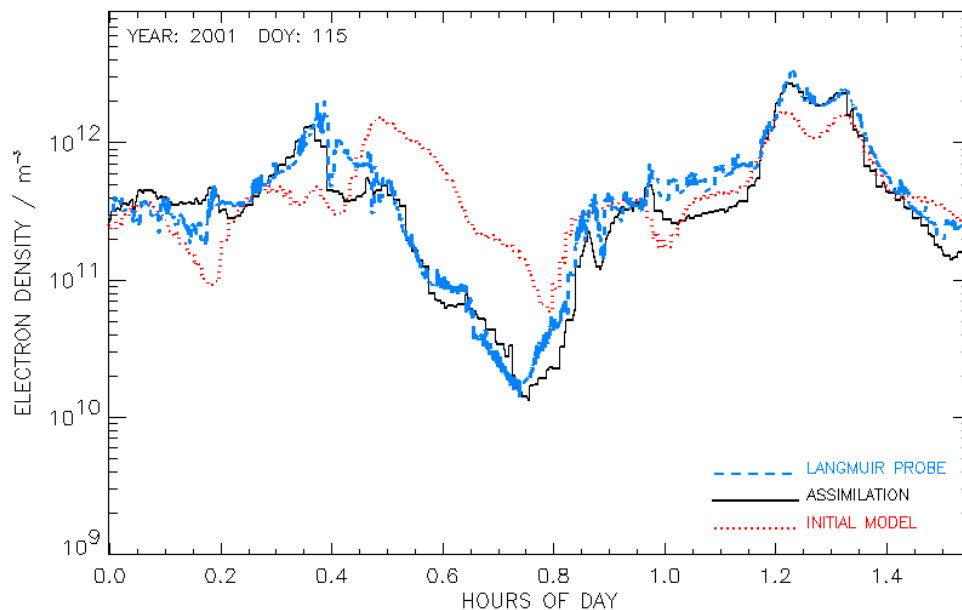


Abbildung 24: Validierung von Rekonstruktionsergebnissen der 2D-Elektronendichteverteilung nach Datenassimilation in PIM in CHAMP-Bahnhöhe mit in situ Langmuirsonden-Messungen und Vergleich mit den ursprünglichen PIM-Werten.

Space Weather (WP 353) DLR

Wie die bisherigen Ergebnisse der GPS-Datenanalyse gezeigt haben, besitzen sowohl die CHAMP- Radiokkultationsmessungen als auch die Topside-Assimilationen ein hohes Potenzial für das Weltraumwetter-Monitoring. Dieses Potenzial wird erheblich verstärkt, wenn bodengestützte GPS-Messungen in das Monitoring mit einbezogen werden.

So wurde nach Installation eines verbesserten Prozessierungssystems für die reguläre und automatische Bereitstellung stündlicher TEC-Karten über Europa nun auch ein reguläres Monitoring der nördlichen Polarkappe etabliert. Hierzu wurde ein polares Modell der Gesamtelektronenzahl der Ionosphäre entwickelt. Das Monitoring der Ionosphäre der hohen Breiten liefert neuartige Einblicke in die Entstehung ionosphärischer Stürme. Während die mit Hilfe von IGS- Stationen gewonnenen bodengestützten GPS-Messungen eine gute horizontale Auflösung der Sturmausbreitung liefern, gewähren die vertikalen Informationen der auf CHAMP durchgeführten GPS-Messungen tiefere Einblicke in die Dynamik magnetosphärisch-ionosphärischer Kopplungsprozesse. Die Arbeiten lieferten eine wertvolle Grundlage für die erfolgreiche Bewerbung zur Mitwirkung am ‚Space Weather Pilot Project‘ der ESA (SWIPPA, Laufzeit 2003/04).

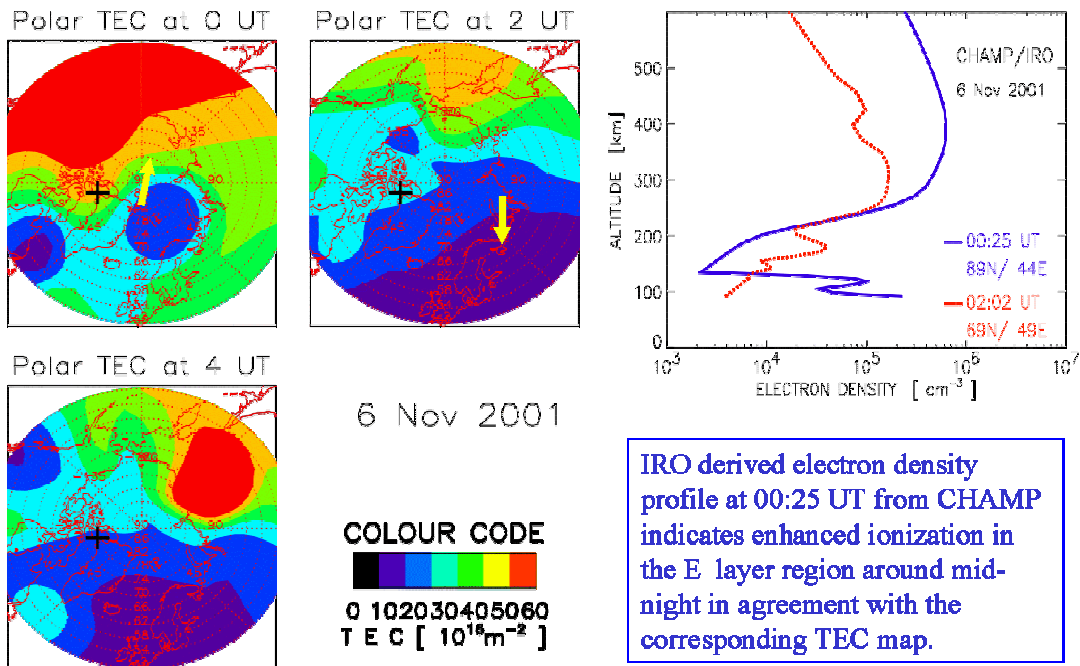


Abbildung 25: Koordinierte IRO-Messungen der vertikalen Elektronendichte mit bodengestützten TEC-Messungen während des Space Weather- Ereignisses am 6./7. November 2001. Die Ergebnisse ergänzen einander in der physikalischen Aussage (vgl. Jakowski et al., 2003).

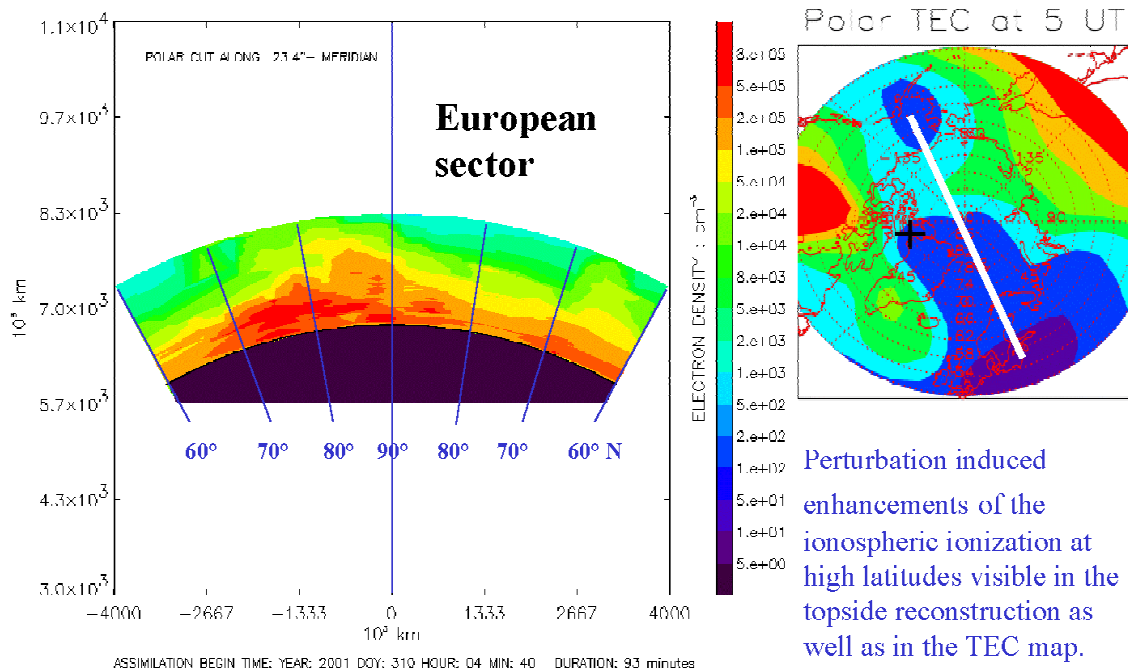


Abbildung 26: Koordinierte 2D-Rekonstruktion der vertikalen Elektronendichte mit bodengestützten TEC-Messungen während des Space Weather- Ereignisses am 6./7. November 2001. Die TEC-Karte zeigt ebenfalls die Schnittebene der Rekonstruktion. Die Ergebnisse ergänzen einander in der physikalischen Aussage.



2.2 Verwertung der Ergebnisse

GPS Techniken bieten langfristig gute Aussichten für die operationelle Meteorologie und für eine permanente, wetterunabhängige, kalibrationsfreie Erfassung wichtiger Parameter der Atmosphäre und Ionosphäre.

Die im Verlaufe des Projektes etablierten bzw. weiterentwickelten boden- und satellitengestützten GPS-Techniken zur Fernerkundung der Atmosphäre/Ionosphäre bieten strategisch gesehen exzellente Datenquellen für die operationelle Meteorologie und für ein präzises Monitoring klimarelevanter Parameter. Angesichts der rasanten Entwicklung beim Aufbau räumlich dichter GPS-Bodennetze, bei den entsprechenden Datenkommunikations- und Informationssystemen, und der Vielzahl zukünftiger Einzel- und Mehrsatellitenmission mit Radiookkultationsexperimenten ist die Entwicklung der Infrastruktur und Methodologie zur Nutzung dieser Techniken in der Meteorologie und in den atmosphärischen Wissenschaften von grundlegender Bedeutung.

1. Nach erfolgreicher Demonstration einer Verbesserung der Numerischen Wettervorhersage bzw. Nutzung der GPS-Daten für das Studium von Wasserkreislauf und von Klimaeinflüssen wird diese Technologie nach einer Pilotphase in den operativen Dienst des DWD integriert werden können. Das beinhaltet sowohl die entwickelten Algorithmen und Auswertetechniken als auch die im Laufe des Projektes aufgebaute und optimierte Infrastruktur zur Nutzung der GPS-Daten in nahezu Echtzeit.
2. Datenprozessierungs-, -archivierungs- und -verteilungssysteme, die im Rahmen des Projektes entwickelt und implementiert werden, bilden die Basis, um auch bei zukünftigen Projekten einen optimalen Service für breite Nutzerkreise zu gewährleisten.
3. Die GPS-Bodendaten werden im Rahmen der GKSS-Aktivitäten zur Validierung des integrierten Wasserdampfes, welcher für das BALTEX-Gebiet mit Hilfe des hochauflösenden Regionalmodells HRM bestimmt wurde, mit verwendet. Bei erfolgreichem Abschluss des Projektes kann diese Validierung als Grundlage der Weiterentwicklung des HRM-Modells sowie der Assimilation von GPS-Daten in das HRM-Modell dienen.
4. Ein entsprechender Vergleich wird auch zwischen den GPS-Bodendaten und den Analysedaten durchgeführt, welcher nach Ende dieses Projektes eine Weiterentwicklung des Analysedatensatzes ermöglicht.
5. Die GPS-Bodendaten werden zur Validierung des IWV sowohl im hochaufgelösten regionalen Klimamodell HIRHAM der Arktis als auch für ECMWF-Analysen im polaren Gebiet nördlich von 65°N verwendet. Entsprechendes gilt für die Radiookkultationsergebnisse zum höhenabhängigen Wasserdampfgehalt, wie sie aus GPS/MET- und CHAMP-Messungen erhalten werden.
6. Die Radiookkultationsdaten der CHAMP-Mission dienen zur Validierung und damit Verbesserung verschiedener Wettermodelle (HRM; HIRHAM, ECMWF, UKMO, GME).
7. Die installierte Infrastruktur für die GPS-Radiookkultationsmessungen der CHAMP-Mission bildet die Basis, auch die Daten zukünftiger GPS-Radiookkultationsexperimente zu prozessieren (GRACE, TerraSAR-X) und die Analyseresultate einer weltweiten Nutzergemeinschaft zur Verfügung zu stellen.



8. Die CHAMP-Daten und -Analyseergebnisse dienen zur Vorbereitung internationaler GPS-Radiokkultationsexperimente (TerraSAR-X, EQUARS, COSMIC, SWARM/ACE+), speziell zur Vorbereitung der entsprechenden Prozessierungssysteme.
9. Die entwickelten Analyse- und Assimilationsmethoden sind die Basis für eine zukünftige Nutzung der GPS-Radiokkultationsdaten in der operationellen Wettervorhersage.
10. Die Weiterentwicklung des verwendeten Atmosphärenmodells zu einem gekoppelten regionalen Klimamodell des Systems Atmosphäre-Ozean-Meer ist nach Projektende unter Nutzung der verfügbaren GPS-Daten, von Daten des CHAMP-Satelliten und weiterer Satellitenexperimente vorgesehen.
11. Innerhalb von zukünftigen Forschungsprojekten der Helmholtzgemeinschaft werden CHAMP-, und zukünftig auch GRACE-Daten genutzt, um globale Informationen über Langzeitveränderungen von Temperatur- und Wasserdampfverteilungen abzuleiten.

2.3 Fortschritt bei anderen Stellen

Während des Projektzeitraumes liefen im Rahmen der COST Aktion 716 „Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications“ europaweite Aktivitäten zum Aufbau eines Systems für die Bereitstellung von GPS-Troposphärenprodukten aus Bodendaten zur Nutzung in der Wettervorhersage. Sehr erfolgreich war dabei eine Demonstrationenkampagne aller beteiligten GPS-Analyse-Zentren. Das GFZ sowie der DWD engagierten sich maßgeblich in diesem Projekt.

Während des Projektzeitraumes erfolgten umfangreiche Aktivitäten zur Verbesserung der GPS RO-Technik an verschiedenen Stellen. Für den Zeitraum 2001/2002 standen zusätzlich zu den CHAMP-Messungen Radiokkultationsdaten des argentinisch-U.S.amerikanischen SAC-C Satelliten zur Verfügung. Damit verdoppelt sich für diesen Zeitraum nahezu die Anzahl der zur Verfügung stehenden globalen Okkultationsmessungen. Die im Rahmen von GASP demonstrierte NRT-Prozessierung von GPS-RO Daten ist international einzigartig.

Die Ergebnisse von GASP liefern wertvolle Erfahrungen für die Vorbereitung und Realisierung einer Vielzahl von internationalen Satellitenmissionen, die die GPS RO Technik zur globalen Sondierung der Erdatmosphäre/Ionosphäre einsetzen werden (GRACE, TerraSAR-X, COSMIC, SWARM/ACE+, EQUARS, METOP, NPOESS).

Parallel zu diesen Aktivitäten erfolgen vielschichtige Studien zur Anwendung der Radiokkultationsdaten in der Klimaforschung und numerischen Wettervorhersage.

Diese Aktivitäten konnten ebenfalls von den GASP Ergebnissen profitieren.

2.4 Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden die Arbeitsergebnisse in zahlreichen Veröffentlichungen publiziert und auf Tagungen vorgestellt (siehe Anlage).

Ausgewählte Arbeiten sind als pdf-File diesem Bericht angefügt:

Beyerle, G., K. Hocke, J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt, and Ch. Reigber: GPS radio occultations with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation



in the troposphere and surface reflections. *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JD001402, 2002.

Dick, G., G. Gendt, Ch. Reigber: First Experience with Near Real-Time Water Vapor Estimation in a German GPS Network, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 1295-1304, 2001.

Gendt, G., G. Dick, Ch. Reigber, M. Tomassini, Y. Liu and M. Ramatschi: Demonstration of NRT GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. *Journal of the Met. Society of Japan*, submitted March 2003.

Gerding, M., A. Weisheimer, K. Dethloff, and R. Neuber: Ground-based GPS: Benefit in the data sparse Arctic region, *Proceedings of the COST Action 716 Workshop: Exploitation of ground-based GPS for meteorology*, 28./29. January 2002, Potsdam.

Gerding, M. und A. Weisheimer: Water vapour profiles from GPS radio occultation soundings in the Arctic, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 441-446, 2003.

Reigber Ch., G. Gendt, G. Dick and M. Tomassini: Near Real-Time Water Vapor Monitoring in a German GPS Network and Assimilation into Weather Forecast Model. *Proceedings of ION GPS 2001 Meeting, Salt Lake City, USA, September 2001*.

Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, Ch. Marquardt, T. Schmidt, L. Grunwaldt, R. Galas, T. Meehan, W. G. Melbourne, and K. Hocke: Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First Results from CHAMP, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3263-3266, 2001.

Wickert, J., G. Beyerle, G.A. Hajj, V. Schwieger, and Ch. Reigber: GPS radio occultation with CHAMP: Atmospheric profiling utilizing the space-based single difference technique, *Geophys. Res. Lett.*, highlighted, 29(8), 10.1029/2001GL013982, 2002.



Anlage

Veröffentlichungen

Beyerle, G., J. Wickert, Ch. Reigber, T. Schmidt, C. Marquardt, R. Galas, L. Grunwaldt, R. König, T.K. Meehan and T.P. Yunck: The radio occultation experiment aboard CHAMP (Part II): Advanced retrieval techniques in atmospheric sounding and GPS reflectometry, Proc. Of International Workshop for GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, 14.-16. Januar 2003.

Beyerle, G., Ch. Reigber, R. Galas, L. Grunwaldt, R. König, C. Marquardt, T. K. Meehan, T. Schmidt, J. Wickert, T. P. Yunck: Radio occultation results and lessons learnt from the CHAMP mission, Proc. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, September 2-6, 2002, Dublin, Ireland.

Beyerle, G., K. Hocke, J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt and Ch. Reigber: GPS radio occultations with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation in the troposphere and surface reflections. J. Geophys. Res., 10.1029/2001JD001402, 2002.

Beyerle, G. and K. Hocke: Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in radio occultation experiments, Geophys. Res. Lett., 28, 1895-1898, 2001.

Beyerle, G., J. Wickert, R. Galas, K. Hocke, R. König, C. Marquardt, A.G. Paveljev, Ch. Reigber and T. Schmidt: GPS Occultation Measurements with GPS/MET and CHAMP, U.R.S.I. News, Vol. 8, No.1/2, 1-6, 2001.

Dick, G., G. Gendt, Ch. Reigber: First Experience with Near Real-Time Water Vapor Estimation in a German GPS Network, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 63, 1295-1304, 2001.

Fang, P, G. Gendt, T. Springer and T Manucci: IGS Near Real-time Products and their Applications, IGS Analysis Center Workshop, 25-29 Sept 2000, Washington, GPS Solutions, Vol. 4, 2-8, 2001.

Förster, M. und N. Jakowski: Geomagnetic Storm Effects on the Topside Ionosphere and Plasmasphere: A Compact Tutorial and New Results, Surveys in Geophysics, 21(1), 47-87, 2000.

Galas, R. and W. Köhler: A binary exchange format for GPS data, Phys. Chem. Earth (A), 26, 645-648, 2001.

Galas, R., J. Wickert and W. Burghardt: High rate low latency GPS Ground Tracking Network for CHAMP, Phys. Chem. Earth (A), 26, 649-652, 2001.

Ge, S., C.K. Shum, J. Wickert and Ch. Reigber: GPS Radio Occultation—A New Data Source for Improvement of Antarctic Pressure Field, Wuhan Journal of Natural Sciences, in print, 2003.

Gendt, G., G. Dick, A. Rius and P. Sedo: Comparison of software and techniques for water vapor estimation using German near real-time GPS data, Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol.26, No.6-8, 417-420, 2001.



- Gendt, G., Ch. Reigber and G. Dick: Near real-time water vapor estimation in a German GPS network – First results from the ground program of HGF GASP Project, Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol.26, No.6-8, 413-416, 2001.
- Gendt, G., G. Dick, S. Goebell, M. Ramatschi, Ch. Reigber und M. Tomassini: Nutzung von SAPOS-Referenzstationen zur Wettervorhersage und Klimaforschung. ZfV, 127(5), 310-318, 2002.
- Gendt, G., G. Dick, Ch. Reigber, M. Tomassini, Y. Liu and M. Ramatschi: Demonstration of NRT GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. Proceedings International Workshop on GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, January 14-17, 2003.
- Gendt, G., G. Dick, Ch. Reigber, M. Tomassini, Y. Liu und M. Ramatschi: Demonstration of NRT GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. Journal of the Met. Society of Japan, submitted March 2003.
- Gerding, M. und A. Weisheimer: Water vapour profiles from GPS radio occultation soundings in the Arctic, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 441-446, 2003.
- Gerding, M., A. Weisheimer, K. Dethloff, and R. Neuber: Ground-based GPS: Benefit in the data sparse Arctic region, Proceedings of the COST Action 716 Workshop: Exploitation of ground-based GPS for meteorology, 28./29. January 2002, Potsdam.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and H. Lühr: Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding Based on GPS Data Obtained on Board CHAMP, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 408-414, 2003.
- Heise, S.: Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen, Dissertation, Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften, September 2002.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and H. Lühr: Sounding of the opside Ionosphere/Plasmasphere Based on GPS Measurements from CHAMP: Initial Results, Geophysical Research Letters, Vol. 29, No.14, 10.1029/2002GL014738, 2002.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and H. Lühr: Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding Based on GPS Data Obtained Onboard CHAMP, Proceedings ESA Space Weather Workshop, ESTEC, Noordwijk, 17-19 Dez. 2001, submitted 2002.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber, R. König and I. Kutiev: Preliminary Results on Ionosphere/Plasmasphere Imaging Based on GPS data Obtained Onboard CHAMP. Proc. International Beacon Satellite Symposium, 346-350, Boston, June 4-6, 2001.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber und H. Lühr: Erste Ergebnisse der Sondierung von Ionosphäre und Plasmasphäre basierend auf GPS Messungen an Bord von CHAMP: Tagungsband Kleinheubacher Berichte, in print, 2001.



Hocke, K., K. Igarashi, M. Nakamura, P. Wilkinson, J. Wu., A. Pavelyev, and J. Wickert: Global sounding of sporadic E layers by the GPS/MET radio occultation experiment, *J. Atmos. and Sol. Terr. Phys.*, Vol. 63 (18), 1973-1980, 2001.

Igarashi K., A. Pavelyev, J. Wickert, K. Hocke and D. Pavelyev: Application of radio holographic method for observation of altitude variations of the electron density in the mesosphere/lower thermosphere using GPS/MET radio occultation data, *J. Atmosphere and. Solar-Terrestrial Physics*, 64, 959-969, May 2002.

Igarashi K., N.A. Armand, A.G. Pavelyev, Ch. Reigber, J. Wickert, K. Hocke, G. Beyerle, S.S. Matyugov and O.I. Yakovlev: Application of small satellites for high precision measuring effects of radio waves propagation, *Proceedings of IAA Konferenz*, 2.-6. April 2001, Berlin, 43-47, 2001.

Jakowski, N., S. Heise, A. Wehrenpfennig, S. Schlüter and R. Reimer: GPS/GLONASS based TEC measurements as contributor for space weather forecast, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 64, Issues 5-6, Pages 729-735, March-April 2002.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, Ch. Reigber, H. Lühr, L. Grunwaldt und T. K. Meehan: GPS Radio Occultation Measurements of the Ionosphere from CHAMP: Early Results, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, No. 10, 10.1029/2001GL014364, 2002.

Jakowski N., A. Wehrenpfennig, S. Heise and I. Kutiev: Space Weather Effects on Transionospheric Radio Wave Propagation on 6 April 2000, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 37(2-3), pp. 213-220, 2002.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, Ch. Reigber and H. Lühr: Initial GPS Radio Occultation Measurements of the Ionosphere Onboard CHAMP, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 37(2-3), pp. 221-226, 2002.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig and S. Heise: Ionospheric Space Weather Effects Monitored by GNSS Signals, *Proc. Ionospheric Effects Symposium*, May 7-9, 2002, Alexandria, Virginia, 1A3, 2002.

Jakowski, N., I.S. Kutiev, S. Heise and A. Wehrenpfennig: A topside ionosphere/plasmasphere model for operational applications, *Proc. XXVIIth General Assembly of URSI*, 17-24 August 2002, Maastricht, Netherlands, CD.

Jakowski N., S. Heise, A. Wehrenpfennig, and K. Tsybulya: Ionospheric Radio Occultation Measurements and Space Weather, *Proc. 1st Workshop on 'Occultations for Probing the Atmosphere and Climate (OPAC-1)* 16-20 September 2002, Graz, Austria, Springer Series, submitted.

Jakowski, N., S. Heise, A. Wehrenpfennig and K. Tsybulya: Ionosphere sounding by ground and space based GNSS measurements, *Proc. 4th Oerstedt International Science Team (OIST-4) Meeting*, 23-27 September 2002, Copenhagen, Denmark, submitted.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, S. Schlüter and T. Noack: Space Weather Effects in the Ionosphere and their impact on positioning, *subm. for Proc. 'Space weather workshop'*, ESTEC, 17-19 December 2001.

Jakowski, N., S. Heise, A. Wehrenpfennig and S. Schlüter: TEC Monitoring by GPS- a possible Contribution to Space Weather Monitoring, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 609-613, 2001.



- Jakowski, N., K. Hocke, S. Schlüter and S. Heise: Space Weather Effects detected by GPS based TEC Monitoring, Workshop on Space Weather, WPP-155, ESTEC, Noordwijk, 241-244, 1999.
- Jakowski, N., Wehrenpfennig, A., Heise, S., Reigber, C. and Lühr, H.: Status of Ionospheric Radio Occultation CHAMP Data Analysis and Validation of Higher Level Data Products, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 462-472, 2003.
- Johnsen, K.-P.: NWP model specific humidities compared with CHAMP/GPS and TERRA/MODIS data, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 473-478, 2003.
- Johnsen, K.-P., J. Miao and S.Q. Kidder: Comparison of atmospheric water vapor over Antarctica derived from CHAMP/GPS and AMSU-B data, submitted to Physics and Chemistry of the Earth, 2003.
- Johnsen, K.-P. and S.Q. Kidder: Water vapor over Europe obtained from remote sensors and compared with a hydrostatic NWP model. Phys. Chem. Earth, 27, 4-5, 371-375, 2002.
- Johnsen, K.-P. and B. Rockel: Validation of a regional weather forecast model with GPS data, Physics and Chemistry of the Earth, Part B, Vol.26, No.5-6, 415-419, 2001.
- Johnsen, K.-P. and B. Rockel: Validation of the NWP model HRM with groundbased GPS data, Physics and Chemistry of the Earth, Part A, Vol.26, No.6-8, 463-466, 2001.
- Johnsen, K.-P. and S.Q. Kidder: Water vapor over Europe obtained from remote sensors and compared with a hydrostatic NWP model. Phys. Chem. Earth, 27, 4-5, 371-375, 2001.
- König, R. and Neumayer, K.H.: Thermospheric events in CHAMP precise orbit determination, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 112-119, 2003.
- König, R., Neumayer, K.H., Michalak, G. and Grunwaldt, L.: CHAMP Clock Error Characterization, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 32-37, 2003.
- König, R., Reigber, Ch., Neumayer, K.H., Schmidt, R., Zhu, S., Baustert, G., Flechtner, F. and Meixner, H.: Satellite Dynamics of the CHAMP and GRACE LEOs as Revealed from Space- and Ground-Based Tracking, Advances in Space Research, in press, 2003.
- König, R., S.Y. Zhu, Ch. Reigber, K.-H. Neumayer, H. Meixner, R. Galas and G. Baustert: CHAMP Rapid Orbit Determination for GPS Atmospheric Limb Sounding, Adv. Space Research, Vol. 30, No. 2, pp. 289-293, 2002.
- Kunitzyn, V., V. Zakharov, K. Dethloff, A. Weisheimer, M. Gerding, R. Neuber, A. Rinke, and I. Hebestadt: Sounding of the Arctic atmosphere by a radio occultation technique and numerical simulations with a regional atmospheric model, Phys. Chem. Earth, submitted, 2003.



- Leitinger, R., N. Jakowski, K. Davies, G.K. Hartmann und E. Feichter: Ionospheric Electron Content and Space Weather: Some Examples, Physics and Chemistry of the Earth (A), 25, 629-634, 2000.
- Liou, Y.A. A.G. Pavelyev, J. Wickert, C.Y. Huang, K. Igarashi and K. Hocke: Generalization of radioholographic method for study the ionosphere, troposphere and terrestrial surface from space, Proc. 27th General Assembly of the International Union of Radio Science, Maastricht, Aug 17-24, in print, 2003.
- Marquardt, C., K. Labitzke, Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: An assessment of the quality of GPS/MET radio limb soundings during February 1997, Phys. Chem. Earth (A), 26, 125-130, 2001.
- Marquardt, C., K. Schöllhammer, G. Beyerle, T. Schmidt, J. Wickert and Ch. Reigber: Validation and Data Quality of CHAMP Radio Occultation Data, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 384-396, 2003.
- Michalak, G., Baustert, G., König, R. and Reigber, Ch.: CHAMP Rapid Science Orbit Determination - Status and Future Prospects, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 98-103, 2003.
- Neumayer, K.H., König, R., Reigber, Ch. and Zhu, S.Y.: Approaches to CHAMP precise orbit determination, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 78-84, 2003.
- Pavelyev, A., Wickert, J., Liou, Y.-A., Igarashi, K., Hocke, K. and Huang, Ch.-Y.: Vertical Gradients of Refractivity in the Mesosphere and Atmosphere Retrieved from GPS/MET and CHAMP Radio Occultation Data, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 500-507, 2003.
- Pavelyev, D., Wickert, J., Pavelyev, A., Kucherjavenkov, I., Matyugov, S., Hocke, K., Beyerle, G., Yakovlev, O. and Kucherjavenkov, A.: Observation of Reflected Signals in MIR/GEO and GPS/MET Radio Occultation Missions, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 508-514, 2003.
- Pavelyev, A.G., Y. A. Liou, K. Igarashi, J. Wickert, K. Hocke, and C. Y. Huang, The radiography approach in GNSS occultation data analysis: Review and application to resolving fine structures in the atmosphere and ionosphere, Proc. 1st International Workshop on occultations for probing atmosphere and climate (OPAC), Graz 2002, Springer series, in print, 2003.
- Pavelyev, A.G., Y.A. Liou, Ch. Reigber, J. Wickert, K. Igarashi, K. Hocke and C.Y. Huang: GPS radio holography as a tool for remote sensing of the atmosphere and mesosphere from space, GPS Solutions, 6, 96-99, DOI: 10.1007/s10291-002-0022-6, 2002.
- Pavelyev, A.; Igarashi, K.; Reigber, C.; Hocke, K.; Wickert, J.; Beyerle, G.; Matyugov, S.; Kucherjavenkov, A.; Pavelyev, D. and Yakovlev, O.: First application of the



radioholographic method to wave observations in the upper atmosphere, 10.1029/2000RS002501, 19 June 2002, Radio Science, 2002.

Reigber Ch., G. Gendt, G. Dick and M. Tomassini: Near Real-Time Water Vapor Monitoring in a German GPS Network and Assimilation into Weather Forecast Model. Proceedings of ION GPS 2001 Meeting, Salt Lake City, USA, September 2001.

Reigber Ch., G. Gendt, G. Dick and M. Tomassini: Near-real-time water vapor monitoring for weather forecasts. GPS-World, Vol 13, No.1, 18-27, 2002.

Reigber, Ch., König, R., Schmidt, T. and Wickert, J.: Ultra rapid orbits for CHAMP atmosphere sounding, Geophysical Research Abstracts, EGS 27th General Assembly, Vol. 4, Abstract No. EGS02-A-05209, 2002.

Reigber C.; Lühr H. and Schwintzer P. (Eds.): First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, 2003.

Schmidt, R., Baustert, G., König, R. and Reigber, Ch.: Orbit Predictions for CHAMP - Development and Status, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 404-411, 2003.

Schmidt T., J. Wickert, C. Marquardt, G. Beyerle, C. Reigber, R. Galas and R. König: GPS radio occultation with CHAMP: An innovative remote sensing method of the atmosphere, Adv. Space Research, in print, 2003.

Spalla, P., N. Jakowski, C. N. Mitchell, P. S. J. Spencer and A. Wehrenpfennig: Validation of CHAMP ionospheric radio-occultation observations over Europe, Proc. Ionospheric Effects Symposium, May 7-9, 2002, Alexandria, Virginia, 4C-5.

Stolle C., S. Schlüter, Ch. Jacobi and N. Jakowski: Ionospheric tomography and first interpretations of including space-based GPS; Report Inst. für Meteorologie, Univ. Leipzig, 2002.

Stankov, S.M., I.S. Kutiev, N. Jakowski and S. Heise: Electron Density Profiles Deduced from GPS TEC, O⁺-H⁺ Transition Height and Ionosonde Data, Acta Geod. Geoph. Hung., Vol. 37(2-3), pp. 171-181, 2002.

Stankov, S.M., N. Jakowski, P. Muhtarov, I. Kutiev, S. Heise and R. Warnant: A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere, Journal of Geophysical Research – Space Physics, accepted 2002.

Stankov, S. M., I. S. Kutiev, N. Jakowski and A. Wehrenpfennig: A New Method for TEC Forecasting Using GPS Measurements, subm. Proc. 'Space weather workshop', ESTEC, 17-19 December 2001.

Tomassini, M., G. Gendt, G. Dick, M. Ramatschi and C Schraff: Monitoring of Integrated Water Vapour from ground-based GPS observations and their assimilation in a limited-area model, Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol 27 (2002), 341-346,

Wehrenpfennig, A.: Aufbau von Monitoringsystemen als Voraussetzung für die Vorhersage, Tagungsber. 'Nationaler Workshop zum Weltraumwetter', DLR Neustrelitz, 26-27 Oktober 2000, (Herausg.: D. Adrian, N. Jakowski, A. Wehrenpfennig), 141-148, 2001.



- Wehrenpfennig, A., N. Jakowski and J. Wickert: A dynamically configurable system for operational processing of space weather data, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 601-604, 2001.
- Weisheimer, A., A. Rinke and M. Gerding: Model studies of winter Arctic temperature and humidity profiles in comparison with observations. *Geophys. Res. Abstr.*, 3, 26th EGS General Assembly, Nice, France, March 25-30, 2001.
- Weisheimer, A. and M. Gerding: Comparison of Observed and Simulated Water Vapor Distribution in the Arctic Atmosphere, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2001.
- Wickert, J., G. Beyerle, G.A. Hajj, V. Schwieger and Ch. Reigber: GPS radio occultation with CHAMP: Atmospheric profiling utilizing the space-based single difference technique, *Geophys. Res. Lett.*, highlighted, 29(8), 10.1029/2001GL013982, 2002.
- Wickert J., R. Galas, T. Schmidt, G. Beyerle, Ch. Reigber, Ch. Förste and M. Ramatschi:, Atmospheric sounding with CHAMP: GPS ground station data for occultation processing, *Phys. Chem. Earth*, in print, 2003.
- Wickert, J., T. Schmidt, G. Beyerle, R. König, Ch. Reigber and N. Jakowski: The radio occultation experiment aboard CHAMP: Operational data analysis and validation of atmospheric profiles, *J. Met. Soc. Japan*, submitted 2003.
- Wickert, J., G. Beyerle, T. Schmidt, R. König, Ch. Reigber and C. Marquardt: Highlights of CHAMP atmospheric occultation results, invited talk, *Proc. 4th Oersted International Science Team Conference*, Copenhagen, September 23-27, 2002, in print, 2003.
- Wickert, J., G. Beyerle, T. Schmidt, C. Marquardt, R. König, L. Grunwaldt and Ch. Reigber: GPS radio occultation with CHAMP, in: Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. (Eds.), *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 371-383, 2003.
- Wickert, J.: Das CHAMP-Radiookkultationsexperiment: Algorithmen, Prozessierungssystem und Erste Ergebnisse, Dissertation, GFZ Scientific Technical Report 07/02, GeoForschungsZentrum Potsdam, 2002.
- Wickert, J., Beyerle, G., Hajj, G. A., Schwieger, V. and Reigber, Ch.: GPS radio occultation with CHAMP: Atmospheric profiling utilizing the space-based single difference technique, *Geophys. Res. Lett.*, 29(8), 10.1029/2001GL013982, 2002.
- Wickert J., G. Beyerle, N. Jakowski, T. Schmidt, R. König, C. Marquardt and Ch. Reigber: Status of GPS radio occultation with CHAMP, *Proc. COSMIC Radio occultation science workshop 2002*, Boulder, USA, 2002.
- Wickert, J., Schmidt, T., Marquardt, C., Reigber, Ch., Neumayer, K.-H., Beyerle, G., Galas, R., and Grunwaldt, L.: GPS radio occultation with CHAMP: First results and status of the experiment, *Proc. of IAG Scientific Assembly 2001, Vistas for Geodesy in the New Millenium*, September 2-7, Budapest, Hungary, Springer Series, 125, 273-278, 2002.
- Wickert, J.: Zum Einfluss der Ionosphäre auf Radiookkultationsmessungen, *Tagungsber. 'Nationaler Workshop zum Weltraumwetter'*, DLR Neustrelitz, 26-27 Oktober 2000, (Herausg.: D. Adrian, N. Jakowski, A. Wehrenpfennig), 69-74, 2001.



Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, T. Meehan, L. Grunwaldt and R. Galas: GPS radio occultation with CHAMP: Initial results. Proc. Beacon Satellite Symp., June 3-6, Boston, (available on CD), 59-62, 2001.

Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, Ch. Marquardt, T. Schmidt, L. Grunwaldt, R. Galas, T. Meehan, W. G. Melbourne and K. Hocke: Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First Results from CHAMP, Geophys. Res. Lett., 28, 3263-3266, 2001.

Wickert, J., R. Galas, G. Beyerle, R. König and Ch. Reigber: GPS Ground station data for CHAMP Radio Occultation Measurements, Phys. Chem. Earth (C), 26, 503-511, 2001.

Yakovlev O.I., A.G. Paveljev, S.S. Matyugov, D.A. Paveljev and V.A Anufried: Advanced Algorithms of Inversion of GPS Limb Sounding Data, GFZ Scientific Technical Report STR 01/06, GFZ Potsdam, 2001.

Yakovlev O.I., A.G. Paveljev, S.S. Matyugov, D.A. Paveljev and V.A Anufried: Radioholografic Analysis of Radiooccultation data, GFZ Scientific Technical Report STR 02/05, GFZ Potsdam, 2002.



Vorträge/Poster:

Beyerle G., M. E. Gorbunov, Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: Detection and analysis of GPS radio occultation signals under multipath conditions: Results from simulation studies, talk, 1st International Workshop on occultations for probing atmosphere and climate, Graz, September 16-20, 2002.

Beyerle, G., K. Hocke, A. Paveljev, C. Marquardt, Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: GPS signal surface reflections and signal propagation in the troposphere: First results from CHAMP observations, EGS General Assembly, Nice, 2002.

Beyerle, G., M. E. Gorbunov, C. Marquardt, Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: Inverting GPS radio occultation data using the canonical transform method: Results from simulation studies and CHAMP observations, Poster, EGS General Assembly, Nice 2002.

Beyerle G., K. Hocke, J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt and Ch. Reigber: GPS signal surface reflections and signal propagation in the troposphere, Poster & talk, 1. CHAMP Science Meeting, 2002.

Beyerle, G., J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt and Ch. Reigber: Observations of temperature and water vapour profiles by GPS radio occultation: activities at GeoForschungsZentrum Potsdam, International Workshop on Wind and Temperature measurements by Radio and Optical Remote Sensing & The 3rd US/Japan Meeting on Mesopause Gravity Waves and Sprite Studies", Kyoto, Japan, March 2001.

Beyerle, G., J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt, Ch. Reigber, K. Hocke and A. Pavelyev: GPS Occultation Measurements with CHAMP/GRACE, Meteorological Research Institute, Tsukuba symposium, March 2001.

Beyerle, G., J. Wickert, T. Schmidt, C. Marquardt, Ch. Reigber, K. Hocke and A. Pavelyev: GPS occultation measurements with CHAMP/GRACE, ISAS (Institute of Space and Astronautical Science, Tokio), Symposium, March 2001.

Dick, G., G. Gendt and Ch. Reigber: First Experience with Near Real-Time Water Vapor Estimation in a German GPS Network, XXII General Assembly IUGG, July 18-30, 1999, Birmingham, UK.

Ge, S., C.K. Shum, J. Wickert and Ch. Reigber: GPS Radio Occultation—A New Data Source for Improvement of Antarctic Pressure Field, talk, International Symposium on GPS/GNSS held in Wuhan, China from November 6-8, 2002.

Ge, S., C. K. Shum and J. Wickert: Contributions of GPS occultations to Antarctica ice sheet mass balance studies, Poster, 1st International Workshop on occultations for probing atmosphere and climate, Graz, September 16-20, 2002.

Gendt, G, G. Dick, A. Rius and P. Sedo: Comparison of software and techniques for water vapor estimation using German near real-time GPS data, COST-716 Workshop, Oslo, 10-12 July 2000.

Gendt, G., Ch. Reigber and G. Dick: Near real-time water vapor estimation in a German GPS network – First results from the ground program of HGF GASP Project COST-716 Workshop, Oslo, 10-12 July 2000.



- Gendt, G.: Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes mittels GPS-Bodenstationen, Seminarvortrag, Forschungszentrum Karlsruhe, Inst. für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruhe, 10. Nov 2000.
- Gendt, G., Ch. Reigber and G. Dick: Ultra Rapid GPS Orbits and its Application in Near Real-Time Water Vapor Estimation, Suppl. EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 81, No. 48, p. F315, 2000.
- Gendt, G.: Surface based systems in Germany, experiences and plans. Invited talk, Workshop on the use of GPS observations for atmospheric analysis and validation, University of Reading, UK, 30. August 2001.
- Gendt, G., G. Dick, S. Goebell, M. Ramatschi, Ch. Reigber and M. Tomassini: Nutzung von SAPOS-Referenzstationen zur Wettervorhersage und Klimaforschung, 4. SAPOS Symposium, 21-23 Mai 2002, Hannover.
- Gerding, M., H. Deckelmann, R. Neuber and A. Weisheimer: Validation of CHAMP temperature and humidity observations in the Arctic by radiosonde, lidar, and regional model, 1st International Workshop on Occultations for Probing Atmosphere and Climate, Graz, 16.-20. September 2002.
- Gerding, M., A. Weisheimer and H. Deckelmann: Validation of water vapour profiles from GPS radio occultation soundings on the Arctic region, Institut für Umweltphysik at Bremen University, Seminar „Fernerkundung der Atmosphäre“, 01. February 2002.
- Gerding, M., A. Weisheimer, H. Deckelmann and R. Neuber: Validation of GPS-based humidity measurements in the Arctic troposphere by radiosonde and Raman-lidar observations. 8. General Assembly of IAMAS International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, July 10-18, Innsbruck, Austria, 2001.
- Gerding, M., A. Weisheimer, H. Deckelmann and R. Neuber: Validierung von GPS-Feuchtemessungen in der Arktis mit Radiosonden- und Lidar-Daten, Blockseminar der Universität Bremen zum Thema "Selected Problems in Upper Troposphere, Lower Stratosphere", 12./13. Februar 2001, Bremen.
- Gerding, M., A. Weisheimer, K. Dethloff and R. Neuber: Ground-based GPS: Benefit in the data sparse Arctic region, COST 716 Workshop "Exploitation of Ground-Based GPS for Meteorology", Potsdam, 28./29. January 2002.
- Gerding, M., A. Weisheimer, K. Dethloff and R. Neuber: Validation of water vapour profiles from GPS radio occultation soundings in the Arctic region, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 22.-25. January 2002.
- Gooding, R.H., Wagner, C.A., Klokocnik, J., Kostelecky, J., König, R., Reigber, Ch. and Schwintzer, P.: CHAMP, orbit resonances and gravity field parameters, Geophysical Research Abstracts, EGS 27th General Assembly, Vol. 4, Abstract No. EGS02-A-02305, 2002.
- Heise, S.: Imaging the Ionosphere/Plasmasphere Based on GPS Data Obtained Onboard CHAMP, Seminarvortrag, Institute of Environmental Physics, Universität Bremen, 29. 10. 2002.
- Heise, S.: Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen, Vortrag zur Promotionsverteidigung, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, 03.12. 2002.



- Heise, S., N. Jakowski and A. Wehrenpfennig: Imaging the Ionosphere/Plasmasphere Based on GPS Data Obtained Onboard CHAMP, EGS XXVII General Assembly, Nice, France, April 2002.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and H. Lühr: Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding Based on GPS Data Obtained Onboard CHAMP, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 21-25 Jan. 2002.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and R. König: Preliminary Results on Ionosphere/Plasmasphere Imaging Based on GPS data Obtained Onboard CHAMP, Poster presented at the IBSS, Boston, 4-6 June, 2001.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber and H. Lühr: Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding Based on GPS Data Obtained Onboard CHAMP, Talk presented at the 'Space weather workshop', ESTEC, 17-19 December 2001.
- Heise, S., N. Jakowski, J. Wickert und K. Hocke: GPS-gebundene Fernerkundung der Ionosphäre im Rahmen des CHAMP-Projekts, Inst. für Meteorologie, FU Berlin, 6. Juli 1999.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig und S. Heise: Validation of GPS Radio Occultation Measurements from CHAMP, EGS XXVII General Assembly, Nice, France, April 2002.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, Ch. Reigber and H. Lühr: Status of Ionospheric Radio Occultation CHAMP Data Analysis and Validation of Higher Level Data Products, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 21-25 Jan. 2002.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, K. Tsybulya and C. Stolle, Validation of GPS Radio Occultation Measurements Onboard CHAMP, COST 271 Workshop, 1-5 October 2002, Faro, Portugal, Univ. of Algarve, Faro, COST271.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig and K. Tsybulya: Comparison of ionospheric radio occultation CHAMP data with IRI 2000, World Space Congress (WSC 2002), 10-19 October 2002, Houston, TX, USA.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig and S. Heise: Ionosphere Monitoring by ground and space based GNSS techniques, Solicited Talk at Int. Space Weather WS, Boston, 7-8 June 2001.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise and I. Kutiev: Space Weather Effects on Transionospheric Radio Wave Propagation on 6 April 2000, Talk presented at the 1st COST271 Workshop, Sopron, 24-29 Sept. 2001.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, Ch. Reigber and H. Lühr: GPS Radio Occultation Measurements of the Ionosphere on CHAMP - Initial Results, Talk presented at the 1st COST271 Workshop, Sopron, 24-29 Sept. 2001.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, S. Schlüter and T. Noack: Space Weather Effects in the Ionosphere and their impact on positioning, Talk presented at the 'Space weather workshop', ESTEC, 17-19 December 2001.
- Jakowski, N.: Space Based Atmosphere and Ionosphere Sounding, Solicited talk, Summer school Alpbach, July 2001.
- Jakowski, N.: TEC variations during major geomagnetic storms, Solicited Talk at EGS XXVI Gen. Assembly, Nice, France 25-30 March 2001.



Jakowski, N., S. Heise, A. Wehrenpfennig and S. Schlüter: TEC Monitoring by GPS- a possible contribution to Space Weather Monitoring, EGS 2000, Nizza, April 2000.

Jakowski, N., S. Heise, A. Wehrenpfennig, S. Schlüter, R. Reimer und W. Mai: Use of GPS/GLONASS measurements for monitoring Space Weather effects in the ionosphere, COSPAR 2000, Warschau, Juli 2000.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig und S. Heise: Verifikation ionosphärischer Einflüsse auf satellitengestützte Navigationssysteme, Nationaler Workshop zum Weltraumwetter, DLR Neustrelitz, Oktober, 2000.

Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, A. and S. Heise: GNSS based TEC estimations for continuous ionosphere space weather now and forecast, ESA Workshop on the Utilization of a Future European Space Weather Service, ESTEC, December 2000.

Jakowski, N., S.Heise, K. Hocke, A. Wehrenpfennig and S. Schlüter: Capabilities of GPS based TEC measurements for Monitoring Space Weather Effects, Kleinheubacher Tagung 1999, 27 Sept.-1 Okt., 1999.

Johnsen, K.-P.: GPS water vapour estimates compared with a NWP model within the BALTEX region. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Sydney, Australia, 2001.

Johnsen, K.-P.: Water vapour within the BALTEX region obtained from groundbased and spaceborne sensors. Third Study Conference on BALTEX, 2-6 July, Mariehamn, Åland, Finland, 2001.

Johnsen, K.-P. and S.Q. Kidder: Water vapor over Europe obtained from remote sensors and compared with a hydrostatic NWP model. Presented at EGS Meeting Nice, March 25-30, 2001.

Johnsen, K.-P. and B. Rockel: Validation of a regional weather forecast model with GPS data, COST-716 Workshop, Oslo, 10-12 July 2000.

Johnsen, K.-P. and B. Rockel: Validation of the NWP model HRM with groundbased GPS data, COST-716 Workshop, Oslo, 10-12 July 2000.

Johnsen K.P., B. Rockel, G. Beyerle, J. Wickert, G. Gendt, Ch. Reigber and N. Jakowski: GPS Atmosphere Sounding - An Innovative Approach for the Recovery of Atmospheric Parameters, eingeladener Vortrag am Institut für Umweltphysik in Bremen, 22.10.2002.

Johnsen, K.-P.: Comparison of a regional weather forecast model with groundbased GPS and NOAA/AMSU-A data, COST Action 716 Workshop, 28./29.1.2002, GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany 2002.

Johnsen, K.-P.: GPS water vapour estimates compared with a NWP model within the BALTEX region, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Sydney, Australia, 2001.

Johnsen, K.-P.: Water vapour within the BALTEX region obtained from groundbased and spaceborne sensors, Third Study Conference on BALTEX, 2-6 July, Mariehamn, Åland, Finland, 2001.

König, R.: Thermospheric events in CHAMP precise orbit determination, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 23.01.2002.



- König, R.: CHAMP clock error characterization, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 24.01.2002.
- König, R.: CHAMP Orbit & Gravity Processor & Products, IGS LEO Pilot Project Meeting, Potsdam, 06.02.2001.
- König, R.: CHAMP Orbit Restitution Results by GFZ, CHAMP Project and IGS LEO working group meeting, Potsdam, 09.11.2001.
- König, R., G. Baustert, R. Galas, H. Meixner, K.-H. Neumayer, V. Schwieger and S.Y. Zhu: CHAMP Near-real-time Precise Orbit Determination, Suppl. EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 81, No. 48, p. F315, 2000.
- König, R., Baustert, G., Neumayer, K.-H., Meixner, H., Schwieger, V., Zhu, S. and Reigber, Ch.: Precise Orbit Determination for CHAMP, Geophysical Research Abstracts, EGS 26th General Assembly, Vol. 3, 2001.
- König, R., Reigber, Ch., Neumayer, K.H., Schmidt, R., Zhu, S., Baustert, G., Flechtner, F. and Meixner, H.: Satellite Dynamics of the CHAMP and GRACE LEOs as Revealed from Space- and Ground-Based Tracking, The World Space Congress 2002, 34th COSPAR Scientific Assembly, Houston, Texas, USA, 10-19 October 2002.
- König, R., S.Y. Zhu, Ch. Reigber, K.-H. Neumayer, H. Meixner, R. Schmidt, R. Galas and G. Baustert: Die genaue Bahnverfolgung von CHAMP, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2000, Leipzig, September 2000.
- Kunitsyn, V., V. Zakharov, A. Weisheimer, M. Gerding, R. Neuber, K. Dethloff, and A. Rinke, Probing the Arctic atmosphere with occultation technique: Modeling by the regional atmospheric model HIRHAM4, 27th EGS General Assembly, Nice, 21-26 April, 2002.
- Kunitsyn, V., V. Zakharov, A. Weisheimer, M. Gerding, R. Neuber, K. Dethloff, A. Rinke and H.-W. Hubberten: Atmospheric sounding by occultation technique using the regional atmospheric model HIRHAM of the Arctic, AGU Fall Meeting, December 10-14, 2001, San Francisco, USA.
- Liou, Y.A. A.G. Pavelyev, J. Wickert, C.Y. Huang, K. Igarashi and K. Hocke: Generalization of radioholographic method for study the ionosphere, troposphere and terrestrial surface from space, 27th General Assembly of the International Union of Radio Science, Maastricht, Aug 17-24, 2002.
- Marquardt, C., G. Beyerle, S.B. Healy, T. Schmidt, J. Wickert, R. Galas, R. König, W. Köhler, L. Grunwaldt and Ch. Reigber: Variational retrieval of CHAMP radio occultation data, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Marquardt, C., K. Schöllhammer, J. Wickert, T. Schmidt, G. Beyerle, R. Galas, R. König, L. Grunwaldt, W. Köhler and Ch. Reigber: Tropopause characteristics obtained from CHAMP radio occultation soundings, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Marquardt C., K. Schöllhammer, M. Schrödter, M. Tomassini, G. Beyerle, T. Schmidt, J. Wickert, R. Galas, R. König, L. Grunwaldt and Ch. Reigber: Validation of 1 year of CHAMP radio occultation data, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Marquardt, C., J. Wickert, T. Schmidt, Ch. Reigber, R. König, L. Grunwaldt, R. Galas and G. Beyerle: Remote Sensing of Tropopause Characteristics with CHAMP RADIO



OCCULTATION SOUNDING, Posterbeitrag SPARC Tropopausenworkshop Bad Tölz, 17.-20.04.2001.

Marquardt, C., G. Beyerle, J. Wickert, T. Schmidt and Ch. Reigber: Water vapour measurements with GPS radio occultation: First Results from CHAMP (germ.), talk, DACH meteorological conference, Vienna, Austria, September 18-21, 2001.

Marquardt, C., J. Wickert, G. Beyerle, T. Schmidt and Ch. Reigber: GPS based limb sounding in the stratosphere: First results from CHAMP, DACH meteorological conference, Vienna, Austria, Sept. 18-21, 2001.

Marquardt, C., J. Wickert, T. Schmidt, R. König and Ch. Reigber: Gravity Wave Parameters from CHAMP radio occultation measurements, IAMAS 2001, Innsbruck, Austria, July 10-18, talk session 8.1., 2001.

Marquardt, C., T. Schmidt, J. Wickert and Ch. Reigber: Remote sensing of tropospheric water vapour with GPS radio occultation limb sounding, poster contribution, European Geophysical Society, XXVI General Assembly, Nice, France, March 25-30, 2001.

Marquardt, C., K. Labitzke, Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: Stratospheric temperatures measured by GPS radio limb sounding, EGS 2000, Nizza, April 2000.

Marquardt, C., Ch. Reigber, T. Schmidt and J. Wickert: An Assessment of the Quality of GPS/MET Radio Limb Soundings in the Neutral Atmosphere, EGS 2000, Nizza, April 2000.

Marquardt, C., Ch. Reigber, J. Wickert, K. Hocke and T. Schmidt: The HGF Strategy Fund GPS Atmospheric Sounding Project (GASP), ESA/ESTEC Radio Occultation Workshop, Noordwijk, Januar 2000.

Marquardt, C., J. Wickert, G. Beyerle, Ch. Reigber and T. Schmidt: GPS based global atmospheric sounding with Low Earth Orbiters, SPARC 2000 General Assembly, Mar del Plata, November 2000.

Michalak, G., Baustert, G., König, R. and Reigber, C.: Operational Rapid Precise Orbit Determination for the Low Earth Orbiter CHAMP, Geophysical Research Abstracts, EGS 27th General Assembly, Vol. 4, Abstract No. EGS02-A-03513, 2002

Neumayer, K.-H., S.Y. Zhu, Ch. Reigber, R. König and H. Meixner: CHAMP Orbit Recovery - Algorithmic Approaches and Results, Suppl. EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 81, No. 48, p. F309, 2000.

Peng, G., J.H. Hecht, J.E. Wessel, R.W. Farley and J. Wickert: Comparison of Rayleigh Lidar and GPS Radio Occultation Temperature Profiles between 30-60 Kilometers in Altitude, Eos. Trans. AGU, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract A71D-0131, 2002.

Pavelyev, A.G., Y. A. Liou, K. Igarashi, J. Wickert, K. Hocke and C. Y. Huang: The radiology approach in GNSS occultation data analysis: Review and application to resolving fine structures in the atmosphere and ionosphere, , invited talk, 1st International Workshop on occultations for probing atmosphere and climate (OPAC), Graz, September 16-20, 2002.



- Reigber, C. and König, R.: Die CHAMP-Mission - Stand und erste wissenschaftliche Ergebnisse, Astrodynamik Kolloquium im GSOC, Oberpfaffenhofen, 18.02.2002.
- Reigber Ch., R. König, T. Schmidt and J. Wickert: Ultra Rapid Orbits for CHAMP Atmosphere Sounding, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Reigber, Ch., G. Gendt and G. Dick: Near Real-Time Water Vapor Monitoring in a German GPS Network. Second Workshop of the COST Action 716 "Exploitation of Ground-Based GPS for Meteorology" GFZ, January 28, 2002
- Reigber, Ch., G. Gendt, Ch. Marquardt, G. Dick and J. Wickert: GASP – "GPS Atmospheric Sounding Project" in Germany, Asian Pacific Space Geodynamic Project Meeting, Shanghai, May 14-18, 2001.
- Reigber, Ch., G. Gendt and Ch. Marquardt: GPS Atmosphärensondierung - ein innovatives Verfahren zur Bestimmung atmosphärischer Parameter. Invited presentation. Jahrestagung der Meteorologischen Gesellschaft Deutschland-Österreich-Schweiz (DACH), Juli 2001.
- Reigber, Ch., H. Lühr and P. Schwintzer: CHAMP Mission Status and Perspectives, Suppl. EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol. 81, No. 48, p. F307, 2000.
- Reigber, Ch., J. Wickert, G. Beyerle, R. Galas, L. Grunwaldt, R. König, C. Marquardt and T. Schmidt: GPS radio occultation with CHAMP, SPARC 2000 General Assembly, Mar del Plata, November 2000.
- Schlüter, S., C. Stolle, N. Jakowski and C. Jacobi: Monitoring of 3 Dimensional Ionospheric Electron Density Distributions Based on GPS Measurements, Poster presented at the 1st CHAMP Science Meeting at GFZ Potsdam, 22-25 Jan, 2002.
- Schmidt, T., J. Wickert, C. Marquardt, G. Beyerle, Ch. Reigber and A. Wehrenpfennig: The near real time data processing system for GPS radio occultation data at GFZ Potsdam, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Schmidt, T., J. Wickert, C. Marquardt, G. Beyerle, C. Reigber, R. Galas and R. König: GPS radio occultation with CHAMP: An innovative remote sensing method of the atmosphere, COSPAR conference, Houston, October 10-19, 2002.
- Schmidt, T., J. Wickert, C. Marquardt, G. Beyerle and Ch. Reigber: Remote Sounding of the atmosphere by using GPS occultation technique with CHAMP, IAMAS 2001, Innsbruck, Austria, July 10-18, session 11.2., 2001.
- Schmidt, T., Wehrenpfennig, A., Wickert, J. and Reigber, Ch.: Das operationelle Prozessierungssystem für die Atmosphärensondierung mit CHAMP, Vortrag, Geodätische Woche, Potsdam, 2000.
- Schwieger, V., G. Baustert and R. König: Optimization of the GPS Observation Plan for CHAMP Rapid Orbit Determination," Geophysical Research Abstracts, EGS 26th General Assembly, Vol. 3, 2001.
- Shum, C., D. Brzezinska, S. Ge, B. Hazelton, Y. Yi, C. Zhao, M. Bevis, K. Hocke, J. Wickert, G. Jeffress, D. Martin and M. Szabados: The use of GPS for measuring water vapor and sea level, paper 7.2, Fifth Symposium on Integrated Observing Systems, American Meteorological Society meeting, Albuquerque, NM, January 15-19, 2001.



Spalla, P., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Paul S. Spencer and C.N. Mitchell: Verification of CHAMP radio occultation observations in the ionosphere using MIDAS, Poster presented at the 1st CHAMP Science Meeting at GFZ Potsdam, 22-25 January, 2002.

Stankov, S.M., N. Jakowski and A. Wehrenpfennig: Upper Electron Density Distribution Deduced from Low-Earth-Orbiting Satellite Measurements of TEC, COST 271 Workshop, 1-5 October 2002, Faro, Portugal.

Stankov, S.M., I. S. Kutiev, N. Jakowski and S. Heise: Two-slope electron density profiles based on GPS TEC, O⁺- H⁺ transition height and ionosonde data, Poster presented at the 'Space weather workshop', ESTEC, 17-19 December 2001, Talk presented at the 1st COST271 Workshop, Sopron, 24-29 Sept. 2001.

Stankov, S.M., I.S. Kutiev, N. Jakowski and A. Wehrenpfennig: A New Method for TEC Forecasting Using GPS Measurements, Poster presented at the 'Space weather workshop', ESTEC, 17-19 December 2001.

Tomassini, M., G. Gendt, G. Dick, M. Ramatschi and C Schraff: Monitoring of Integrated Water Vapour from ground-based GPS observations and their assimilation in a limited-area model, presented at EGS Meeting Nice, France, March 25-30, 2001.

Tomassini, M., Ch. Reigber, G. Gendt and G. Dick: Use of GPS data in the regional forecast model of DWD. Second Workshop of the COST Action 716 "Exploitation of Ground-Based GPS for Meteorology" GFZ, January 29, 2002.

Vey, S., K.-P. Johnsen, J. Miao and G. Heygster: Cross Validation of Water Vapor Retrievals from Ground Based GPS and Satellite Radiometric Measurements over Antarctica, International Workshop on GPS meteorology, Tsukuba, Japan, 2003.

Wehrenpfennig, A., N. Jakowski, S. Heise and Ch. Reigber: Processing Systems for CHAMP Radio Occultations and for Space Weather Data, First CHAMP Science Meeting, Potsdam, 21-25 Jan. 2002.

Wehrenpfennig, A.: Aufbau von Monitoringsystemen als Voraussetzung für die Vorhersage, Nationaler Workshop zum Weltraumwetter, DLR Neustrelitz, Oktober 2000.

Wehrenpfennig, A., N. Jakowski und J. Wickert: A Dynamically Configurable System for Operational Processing of Space Weather Data, EGS 2000, Session ST 19 (Space Weather), April 2000.

Weisheimer, A., M. Gerding and A. Rinke: Model Studies of Winter Arctic Temperature and Humidity Profiles in Comparison with Observations, 26th EGS General Assembly, March 25-30, 2001, Nice, France.

Wickert, J., R. König, T. Schmidt, Ch. Reigber, N. Jakowski, G. Beyerle, R. Galas, L. Grunwaldt, T.K. Meehan and T.P. Yunck: The radio occultation experiment aboard CHAMP (Part I): Operational data processing, technical aspects, atmospheric excess phase calibration and ionospheric profiling, invited talk, International Workshop for GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, 14.-16. Januar 2003.

Wickert, J., G. Beyerle, L. Grunwaldt, R. König, T. K. Meehan, Ch. Reigber and T. Schmidt: The CHAMP GPS occultation experiment: Results achieved and future prospects, eingeladener Vortrag, 1st International Workshop on occultations for probing atmosphere and climate, Graz, September 16-20, 2002.



- Wickert, J., G. Beyerle, G. Hajj, G. Kirchengast, T. Schmidt, C. Marquardt and R. König: Space-based single differencing: An alternative approach for CHAMP occultation processing, Poster&talk, 1. CHAMP Science Meeting, 2002.
- Wickert, J., G. Beyerle, T. Schmidt, C. Marquardt, R. König, L. Grunwaldt and Ch. Reigber: GPS Radio occultation with CHAMP, invited talk, 1. CHAMP Science Meeting, Potsdam, 2002.
- Wickert, J., T. Schmidt and Ch. Förste: GPS Ground station data for CHAMP occultations, Poster&talk, 1. CHAMP Science Meeting, 2002.
- Wickert, J., G. Beyerle, T. Schmidt and C. Marquardt: Overview of GFZ Results during GASP 2 project, GASP Final Progress Meeting, Potsdam, 02.12. 2002.
- Wickert, J., G. Beyerle, C. Marquardt, T. Schmidt, Ch. Reigber, R. König, R. Galas, and L. Grunwaldt, GPS Radio occultation with CHAMP: The first year of the experiment, EGS General Assembly, invited talk, NICE; 2002.
- Wickert, J., G. Beyerle, G. Kirchengast, R. König, T. Schmidt, C. Marquardt and Ch. Reigber: Space-based single differencing: An alternative approach for CHAMP GPS occultation data processing, Poster, EGS General Assembly, Nice 2002.
- Wickert, J., R. Galas, T. Schmidt, Ch. Reigber and Ch. Förste; GPS Ground station data for the CHAMP occultation experiment, Poster, EGS General Assembly, 24.04.02., Nice, 2002.
- Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, T. Schmidt, N. Jakowski and C. Marquardt: GPS Radiookkultation mit CHAMP - Innovative Fernerkundung der Erdatmosphäre, eingeladener Vortrag, Geodätische Woche, 16. October, Frankfurt/Main, 2002.
- Wickert, J.: Erzeugung und Bereitstellung von CHAMP GPS-Radiookkultationsdaten, GASP Statusmeeting mit dem DWD, Offenbach, 21. Juni 2002.
- Wickert, J., Beyerle, G., Reigber, Ch., Grunwaldt, L., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T. and Galas R.: GPS Radiookkultation mit CHAMP – Erste Ergebnisse, eingeladener Vortrag Institutsseminar IAP Kühlungsborn, 24.04.01.
- Wickert, J., G. Beyerle, Ch. Reigber, L. Grunwaldt, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt and R. Galas: GPS Radiookkultation mit CHAMP – Erste Ergebnisse, eingeladener Vortrag Institutsseminar Universität Graz, 14.03.01.
- Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, T. Meehan, L. Grunwaldt and R. Galas: Initial results from CHAMP radio occultation experiment, Eos. Trans. AGU, 82(20), Spring Meet. Suppl., Abstract A31C-08, 2001.
- Wickert, J., G. Beyerle, R. Galas, L. Grunwaldt, R. König, Ch. Marquardt, T. Schmidt and Ch. Reigber: GPS Radio Occultation with CHAMP, Vortrag IGS LEO Project Meeting, 06.02.01, Potsdam.
- Wickert, J., Reigber, Ch., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Meehan, T., Grunwaldt, L. and Galas, R.: Initial Results of CHAMP Radio Occultation Experiment, Vortrag AGU Spring, Boston, 29.05.-02.06.2001.
- Wickert, J.: GPS Radio occultation with CHAMP, Status & Data processing, invited talk, GRAS-SAG, EUMETSAT Darmstadt, 29. 11.01.
- Wickert, J.: GPS Radiookkultation mit CHAMP: Erste Ergebnisse, Doktorandenseminar Institut für Geowissenschaften, Uni Potsdam, 08.05.01.



GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt
Sachbericht

FKZ: 01SF9922
Datum: 25.03.2003
Seite: 57 von 57

- Wickert, J., K. Hocke, C. Marquardt, Ch. Reigber and T. Schmidt: Atmospheric Profiling with CHAMP, ESA/ESTEC Radio Occultation Workshop, Noordwijk, 2000.
- Wickert, J.: Science Mission Requirements for High Rate Data, GFZ/JPL Ground station meeting, Potsdam, Januar 2000.
- Wickert, J.: Atmospheric Profiling with CHAMP, NOAA/NESDIS Workshop on GPS Radiooccultation, Washington, Mai 2000.
- Wickert, J., R. Galas, R. König, Ch. Reigber and G. Beyerle: GPS Ground Station Data for CHAMP Radio Occultation Measurements, IGS Network Workshop Oslo, eingeladener Vortrag, Juli 2000.
- Wickert, J., R. Galas, G. Beyerle und T. Schmidt: Aspekte der Nutzung von GPS Bodenmessungen für das CHAMP Okkultationsexperiment, Geodätische Woche 2000, Potsdam, Vortrag, Oktober 2000.
- Wickert, J., Jakowski, N., Wehrenpfennig, A., Hocke, K., Heise, S.: CHAMP Atmosphere/Ionosphere Processor, IGS-GFZ-JPL Workshop on Low Earth Orbiter Missions, GFZ Potsdam, 9-11 März, 1999.



GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt GASP

**Ein innovativer Ansatz
zur Bestimmung von Atmosphärenparametern**

Erfolgskontrollbericht zum Schlussbericht

**Verbundprojekt von AWI, DLR, GFZ und GKSS
unter Federführung des GFZ**

Laufzeit: 07/99 bis 12/2002

FKZ: 01SF9922

Projektleiter: Prof. Dr. Christoph Reigber (GFZ)

Leiter Teilprojekt 1: Dr. Gerd Gendt (GFZ)

Leiter Teilprojekt 2: Dr. Jens Wickert (GFZ)



1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Projekt GASP (GPS Atmosphärensondierung) wurde als empfohlenes Strategiefondsprojekt der HGF gefördert. Es zielt auf die Implementierung neuartiger Verfahren zur Datengewinnung im Rahmen der Wettervorhersage und Klimaforschung und trägt dadurch zu den umfassenden Aktivitäten zum Verständnis und zur Wahrung des menschlichen Lebensraums bei.

Mit der Einrichtung und dem Betrieb des deutschlandweiten GPS-Netzes und dem erfolgreichen Verlauf von Radiookkultationsmessungen an Bord des deutschen Geoforschungssatelliten CHAMP und den damit zusammenhängenden Datenauswertungen hat sich das GASP-Projekt zu einem auch international herausragenden Projekt zur Sondierung der Erdatmosphäre mit der GPS-Technologie entwickelt. Die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen beteiligten HGF-Einrichtungen und mit den Projektpartnern an Universitäten, dem Wetterdienst und sonstigen Forschungseinrichtungen hat sich gut entwickelt.

2 Wissenschaftlicher oder technischer Erfolg des Vorhabens inkl. erreichter Nebenergebnisse und Erfahren

Im Rahmen des Projektes GASP wurde eine Infrastruktur (GPS-Netze, Kommunikation, Analyse Zentren, Daten und Archivzentren) zur Nutzung von boden- und satellitengestützten GPS-Anwendungen für die atmosphärische und ionosphärische Forschung und Anwendung geschaffen bzw. verfügbar gemacht. Durch gemeinsame Anstrengungen von Satellitengeodäten, Meteorologen und Atmosphärenphysikern konnte ein wesentlicher Beitrag in Richtung operationeller Nutzung der GPS-Technologie für die Fernerkundung der Atmosphäre geleistet werden, um z.B. den Zustand der Atmosphäre und Ionosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung als auch mit globaler Überdeckung zu sondieren sowie die Ergebnisse zu validieren.

Teilprojekt 1: "Water Vapor Estimation from Ground GPS Networks and Assimilation into Atmospheric Models"

Ein quasi-operationelles Monitoring des vertikal integrierten Wasserdampfes (IWV) in nahe Echtzeit (near real-time, NRT) wurde seit Mai 2000 für ein dichtes Netz von GPS-Stationen demonstriert. Das Netz umfasst etwa 100 Stationen des SAPOS-Netzes der deutschen Landesvermessungsämter, 22 GFZ Empfänger, die auf synoptischen Stationen des DWD installiert wurden, und einige zusätzliche Stationen in benachbarten Ländern. Die Datenübertragung konnte wesentlich verbessert werden. Waren anfänglich bis zu 25 Minuten Verzögerungszeit zu veranschlagen, treffen die meisten Daten zum Projektende innerhalb weniger Minuten ein. Stündlich wird das gesamte Netz von etwa 170 Stationen innerhalb von 15 Minuten auf einem LINUX-PC analysiert. Dazu wurde eine optimal der Aufgabenstellung angepasste Technologie auf der Basis des GFZ-EPOS-Softwarepaketes entwickelt. Die NRT-Ergebnisse wurden regelmäßig mit anderen Instrumenten wie Wasserdampf-Radiometer, Radiosonden als auch mit postprozessierten Ergebnissen validiert. Die Konsistenz mit anderen GPS-Reihen ist sehr



GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt
Erfolgskontrollbericht

FKZ: 01SF9922
Datum: 26.03.2003
Seite: 3 von 7

hoch ($< 1 \text{ kg/m}^2$) und die Vergleiche mit anderen Instrumenten liegen im Fehlerbereich der jeweiligen Verfahren. Pünktlichkeit ($< 1:45 \text{ h}$), Zuverlässigkeit ($> 90\%$) und Qualität der abgeleiteten Wasserdampfwerte (systematischer Fehler $\sim 1 \text{ kg/m}^2$, Standardabweichung $\sim 1 \text{ kg/m}^2$) sind für eine Einführung in die numerische Wettervorhersage ausreichend. Seit Mai 2000 wurden die GPS-IWV-Daten von allen GFZ Stationen mit den IWV-Werten des Lokal-Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes verglichen. Die Statistiken zeigen einen Bias von etwa $\pm 0.5 \text{ mm}$ und eine Streuung von 2.5 mm . Die Vergleiche zeigen, dass die GPS-Daten eine für die Datenassimilation akzeptable Qualität haben und bestätigen das hohe Potential von GPS für die Detektierung von sich schnell entwickelnden meteorologischen Phänomenen, wie Frontsystemen.

Als ein erstes wichtiges Ergebnis wurde ein neuer Einblick in den täglichen Zyklus der Luftfeuchte erhalten, eine wichtige Hilfestellung bei der Problemlösung in der Modellierung des täglichen Wasserkreislaufes. Es ist die Nutzung der GPS/IWV-Werte im Nudging-Verfahren implementiert und getestet worden. Fallstudien ergaben einen positiven Einfluss von GPS bei der kurzfristigen Vorhersage (bis 12 Stunden) der relativen Feuchte (bis 10% relative Verbesserung), geringe Verbesserung auch bei Temperatur und Wind. Der Einfluss in der Niederschlagsvorhersage ist gemischt, wobei GPS in einigen extremen Fällen einen positiver Einfluss brachte, aber auch dazu tendierte die Vorhersage in Gebieten ohne Niederschlag zu verschlechtern. Die Probleme können in der Regel auf die Differenzen im täglichen Wasserzyklus zwischen GPS und Model zurückgeführt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich Modellverbesserungen. Die Nowcasting-Experten des DWD können aus den GPS-IWV-Feldern ebenfalls wichtige Informationen ableiten. Es sollten deshalb alle Anstrengungen unternommen werden, um die Verzögerungszeit der Produkterstellung in Zukunft noch weiter zu verringern. Derzeit laufen auch erste Untersuchungen zur Möglichkeit, dass GPS-Ergebnisse zu einer Verbesserung von Hochwasservorhersagen an Flüssen beitragen können.

Für die Validierung der NRT-GPS-IWV-Ergebnisse, aber insbesondere auch für die Nutzung in Klimamodellen, wurden zusätzlich post-prozessierte Lösungen mit höchster Qualität berechnet.

In diesem Teilprojekt wurde der mit Hilfe von bodengestützten GPS Empfängern bestimmte vertikal integrierte Wasserdampf mit demjenigen aus Modellrechnungen des hydrostatischen regionalen Wettervorhersagemodells HRM (High resolution Regional Model) des Deutschen Wetterdienstes verglichen. Verwendet wurden Datensätze des SWEPOS Netzwerkes (Schweden, Finnland) im PIDCAP Zeitraum (Pilot Study for Intensive Data Collection and Analysis of Precipitation, 1.8.-17.11.1995) sowie der Datensatz des GASP-Projektes im ersten Jahr des BALTEX/BRIDGE Zeitraumes mit GPS Daten (Mai 2000 bis April 2001). Der Einfluss der Fehler der Wasserdampffelder der verwendeten Analysedaten (ECMWF, DWD EM3AN) auf die Modellvorhersagen wurde von den Fehlern des Modells getrennt. Eine Zeitreihe aus Modellrechnungen wurde erfolgreich für den gesamten BRIDGE Zeitraum (1.10.1999-28.2.2002) berechnet.

Die Wasserdampfsäulen-(IWV)-Messungen aus GPS-Bodendaten konnten für die Arktis erfolgreich mit Hilfe von Radiosondendaten validiert werden. Am Standort Ny-Ålesund (79°N , 12°O) standen zudem weitere Messsysteme zur Verfügung. Die erforderlichen meteorologischen Bodendaten zur IWV-Berechnung aus *Zenith Path Delay* (ZPD) Messungen wurden an sechs Stationen aus benachbarten Radiosondenprofilen ermittelt. Der Bias zwischen den Datensätzen liegt im allgemeinen bei unter 1 mm IWV im Winter und unter 2 mm im Sommer. Der Korrelationskoeffizient ist meist größer als $0,95$.



Darüber hinaus befinden sich im Gebiet der Arktis sieben weitere GPS-Stationen in größerer räumlicher Entfernung zu unabhängigen Messgeräten. Hier ergaben Vergleiche mit dem Regionalmodell HIRHAM und ECMWF-Analysen teils größere Abweichungen, die insbesondere für das Regionalmodell auf die nicht aufgelöste Orografie und kleinräumige Strukturen in der Eisbedeckung des Ozeans zurückgeführt wurden. Auf regionalen Skalen bzw. im Monatsmittel ergab sich jedoch eine gute Übereinstimmung im o.g. Rahmen zwischen modelliertem und gemessenem IWV. Es konnte gezeigt werden, dass die Datensätze von Bodendruck und -temperatur im HIRHAM-Modell ausreichend genau sind, um die Ableitung des IWV aus ZPD-Daten an allen GPS-Stationen in der Arktis (zur Zeit dreizehn) mit 1-2 mm Genauigkeit zu ermöglichen.

Teilprojekt 2: "Radio Limb Sounding with Spaceborne GPS"

Im Rahmen des Teilprojektes 2 wurde in Deutschland eine operationelle Infrastruktur zur Datenakquisition, zur Datenanalyse, Produktvalidierung, Archivierung und Verteilung für GPS-Radiookkultationsdaten am Beispiel der CHAMP-Satellitenmission aufgebaut. Damit steht ein innovatives Fernerkundungsverfahren zur Sondierung der Atmosphäre/Ionosphäre im globalen Maßstab zur Verfügung, das vielfältige Anwendungen in Klimatologie/Wettervorhersage und Atmosphären- und Ionosphärenforschung ermöglicht. GPS-Radiookkultationsexperimente werden (neben den momentan laufenden Experimenten von CHAMP und SAC-C) schon in naher Zukunft auf weiteren Einzel- und Mehrsatellitenmissionen aktiviert bzw. installiert werden (z.B. GRACE, TerraSAR-X, COSMIC, SWARM/ACE+, EQUARS, METOP, NPOESS), wo mit in naher Zukunft eine bisher nicht erreichte Anzahl von präzisen Messungen zur Bestimmung vertikaler atmosphärisch/ionosphärischer Parameter im globalen Maßstab zur Verfügung stehen wird.

Das GPS-Radiookkultationsexperiment an Bord von CHAMP wurde im Februar 2001 erfolgreich gestartet. Bis zum GASP-Projektende wurden mehr als 100.000/70.000 atmosphärische/ionosphärische Okkultationsmessungen durchgeführt. Ca. 80.000/50.000 Vertikalprofile von Temperatur und Wasserdampf bzw. Elektronendichte wurden über das Datenzentrum am GFZ Potsdam der inter-nationalen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt. Die Messungen konnten praktisch vom ersten Tag an operationell ausgewertet werden, was die gute Vorbereitung des Experimentes mit allen Komponenten (Satellitendatenempfang, GPS-Bodennetz, Satellitenorbitberechnung, Prozessierungssysteme und Datenzentrum) unter Beweis stellte. Dabei wurde die Erweiterbarkeit der Prozessierungssysteme auf andere Satellitenmissionen mit Daten der argentinischen SAC-C Mission erfolgreich getestet. Innerhalb des Projektes konnte erstmals eine kontinuierliche Near-Real-Time Datenprozessierung von GPS-Radiookkultationsdaten mit durchschnittlicher Zeitverzögerung zwischen Messungen und Bereitstellung von Analyseergebnissen von ca. 5 Stunden demonstriert werden.

Die Qualität der abgeleiteten atmosphärischen/ionosphärischen Zustandsparameter wurde kontinuierlich durch Vergleiche mit unabhängigen Daten (Wetteranalysen, Satellitenmessungen und Radiosonden) kontrolliert. In Ergebnis dieser Vergleiche wurden Schwachpunkte bei der Datenauswertung aufgedeckt und die Analysesoftware verbessert. Die Temperaturprofile weisen im globalen Mittel im Höhenbereich von 10 bis 35 km nahezu keinen Bias gegenüber den Analysen und auch den Radiosonden auf. Im allgemeinen liegen Standardabweichungen bei 1-2 K. In der unteren Troposphäre wird ein negativer Refraktivitätsbias der CHAMP-Daten relativ zu Analysen und Radiosonden von bis zu 5% in den Tropen beobachtet. Diese Abweichung hat einen Bias in der



mittleren spezifischen Feuchte von bis zu 30-40% zur Folge. Mit den am Ende des Projektes zur Verfügung stehenden Auswertemethoden kann der Bias deutlich (ca. Faktor 3) reduziert werden.

Vor allem im Bereich der Okkultationsdatenanalyse kam es zu einer Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen, mit denen wesentlich zur Verbesserung der GPS-Radiookkultationstechnik beigetragen wurde. Hervorzuheben ist hier die erstmalige und erfolgreiche Anwendung einer Einfachdifferenzenmethode, die eine erhebliche Vereinfachung der GPS-Okkultationsdatenprozessierung (keine direkte Verwendung von GPS-Bodendaten) ermöglicht und die Genauigkeit der abgeleiteten Parameter durch Eliminierung von Fehlereinflüssen erhöht. Mit großem Erfolg wurde weiterhin die Verbesserung von Auswertealgorithmen in der unteren Troposphäre vorangetrieben. Hierbei konnten als Ergebnis komplexer Simulationsstudien, einschließlich der Simulation des GPS-Empfängerhaltens und wellenoptischer Effekte bei der Strahlausbreitung, wesentliche Beiträge zur Klärung der Ursachen und zur Reduzierung des negativen Refraktivitätsbias von GPS-Radiookkultationsmessungen in der unteren Troposphäre geliefert werden. Ein in dieser Form nicht erwartetes Ergebnis ist die Entdeckung und umfassende Charakterisierung von Beiträgen an Wasser- bzw. Eisoberflächen reflektierter Signale in ca. 30% der Okkultationsmessungen. Diese Signalstrukturen gestatten es, zusätzliche Informationen über den Atmosphärenzustand am jeweiligen Reflexionspunkt zu gewinnen.

Bei der Anwendung der GPS RO Daten sind erste Ergebnisse von Langzeituntersuchungen zur Charakterisierung von klimatischen Veränderungen der Tropopausenregion hervorzuheben. In dieser Region besitzen die Okkultationsdaten eine große Genauigkeit bei hoher vertikaler Auflösung.

Weiterhin wurden Entwicklungsarbeiten für die zukünftige Assimilation von GPS-Okkultationsdaten in Wettermodelle abgeschlossen, also für eine zukünftige Verwendung zur Verbesserung globaler Wettervorhersagen des DWD.

3 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplanes

Finanzierungsplan

Die Finanzierung des Vorhabens erfolgte zu ca. 50 % (AWI, GKSS, GFZ) bzw. 100 % (DLR) aus Mitteln der institutionellen Förderung. Die zusätzliche Förderung folgte der Praxis der HGF-Strategiefondsprojekte (Pauschalförderung mit 200 TDM pro Personalstelle und Jahr). Die Mittel sind bestimmungsgemäß verbraucht worden.

Zeitplan

Wegen der sehr kurzen Zeitspanne zwischen der Förderbewilligung und dem Beginn des Projekts im Juli 1999 konnten nicht alle zusätzlichen Stellen von Anfang an besetzt werden. Dem Antrag zu einer kostenneutralen Verlängerung der Laufzeit der Förderung bis zum 31.12.2002 wurde stattgegeben. Der modifizierte Zeitplan, der auch den verspäteten Start von CHAMP und die verzögerte Inbetriebnahme der Okkultationssoftware auf CHAMP berücksichtigte, wurde eingehalten.



4 Fortschreibung des Verwertungsplanes

GPS-Techniken bieten langfristig gute Aussichten für die operationelle Meteorologie und für eine permanente, wetterunabhängige, kalibrationsfreie Erfassung wichtiger Zustandsparameter der Atmosphäre und Ionosphäre.

Die im Verlaufe des Projektes etablierten bzw. weiterentwickelten boden- und satellitengestützten GPS-Techniken zur Fernerkundung der Atmosphäre/Ionosphäre bieten strategisch gesehen exzellente Datenquellen für die operationelle Meteorologie und für ein präzises Monitoring klimarelevanter Parameter. Angesichts der rasanten Entwicklung beim Aufbau räumlich dichter GPS-Bodennetze, bei den entsprechenden Datenkommunikations- und Informationssystemen, und der Vielzahl zukünftiger Einzel- und Mehrsatellitenmission mit Radiookkultationsexperimenten ist die Entwicklung der Infrastruktur und Methodologie zur Nutzung dieser Techniken in der Meteorologie und in den atmosphärischen Wissenschaften von grundlegender Bedeutung.

1. Nach erfolgreicher Demonstration einer Verbesserung der Numerischen Wettervorhersage bzw. Nutzung der GPS-Daten für das Studium von Wasserkreislauf und von Klimaeinflüssen soll diese Technologie in den operativen Dienst des DWD überführt werden. Das beinhaltet sowohl die entwickelten Algorithmen und Auswertetechniken als auch die im Laufe des Projektes aufgebaute und optimierte Infrastruktur zur Nutzung der GPS-Daten in nahezu Echtzeit.
2. Datenprozessierungs-, -archivierungs und -verteilungssysteme, die im Rahmen des Projektes entwickelt und implementiert werden, bilden die Basis, um auch bei zukünftigen Projekten einen optimalen Service für breite Nutzerkreise der Meteorologie und Klimaforschung zu gewährleisten.
3. Die GPS-Bodendaten wurden im Rahmen der GKSS-Aktivitäten zur Validierung des integrierten Wasserdampfes, der für das BALTEX-Gebiet mit Hilfe des hochauflösenden Regionalmodells HRM bestimmt wurde, mit verwendet. Bei erfolgreichem Abschluss des Projektes kann diese Validierung als Grundlage der Weiterentwicklung des HRM-Modells sowie zur Assimilation von GPS-Daten in das HRM-Modell dienen.
4. Ein entsprechender Vergleich wird auch zwischen den GPS-Bodendaten und den Analysedaten durchgeführt. Er wird nach Ende dieses Projektes eine Weiterentwicklung des Analysedatensatzes ermöglichen.
5. Die GPS-Bodendaten werden zur Validierung des IWV sowohl im hochaufgelösten regionalen Klimamodell HIRHAM der Arktis als auch der ECMWF-Analysen im polaren Gebiet nördlich von 65°N verwendet. Entsprechendes gilt für die Radiookkultationsdaten des höhenabhängigen Wasserdampfgehaltes wie sie aus GPS/MET- und CHAMP-Messungen erhalten werden.
6. Die Radiookkultationsdaten der CHAMP-Mission dienen zur Validierung und damit Verbesserung verschiedener Wettermodelle (HRM, HIRHAM, ECMWF, UKMO, GME).
7. Die installierte Infrastruktur für die GPS-Radiookkultationsmessungen der CHAMP-Mission bildet die Basis, auch Daten zukünftiger GPS-Radiookkultationsmissionen mit deutscher Beteiligung zu prozessieren (GRACE,



TerraSAR-X) und die Analyseresultate einer weltweiten Nutzergemeinschaft zur Verfügung zu stellen.

8. Die CHAMP-Daten und -Analyseergebnisse dienen zur Vorbereitung internationaler GPS-Radiokultationsexperimente (EQUARS, COSMIC, SWARM/ACE+), speziell zur Vorbereitung der entsprechenden Prozessierungssysteme.
9. Die entwickelten Analyse- und Assimilationsmethoden sind die Basis für eine zukünftige Nutzung der GPS-Radiokultationsdaten in der operationellen Wettervorhersage.
10. Die Weiterentwicklung des verwendeten Atmosphärenmodells zu einem gekoppelten regionalen Klimamodell des Systems Atmosphäre-Ozean-Meer ist nach Projektende unter Nutzung der verfügbaren GPS-Bodendaten, von Daten des CHAMP-Satelliten und weiterer Satellitenexperimente vorgesehen.
11. Innerhalb der zukünftigen Forschungsprogramme der Helmholtz-Gemeinschaft (Programm 2: Atmosphäre und Klima) werden CHAMP-, und zukünftig auch GRACE-Daten genutzt, um globale Informationen über Langzeitveränderungen von Temperatur- und Wasserdampfverteilungen abzuleiten.
12. Patente werden aller Voraussicht nach nicht anfallen.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Ein Überblick über Projektinhalt und erreichte Ergebnisse kann auf den Internetseiten von GASP erhalten werden: <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/GASP/>. Dieser Webbereich stellt auch aktuelle Informationen über den Status der operationellen Analyse von boden- und satellitengestützten GPS-Atmosphärendaten bereit.

Vom GASP-Partner GKSS wurde als Projektergebnis ebenfalls ein Internetbereich gestaltet: <http://w3.gkss.de/~johnsen/gasp.html>.

Auswerteergebnisse des GPS-Radiokultationsexperimentes von CHAMP werden über das CHAMP-Datenzentrum bereitgestellt: <http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>.

Die Projekt-Ergebnisse sind beim GASP-Partner AWI in die hochaufgelöste Regionalmodellierung der arktischen Atmosphäre eingeflossen. Die Ergebnisse mit dem HIRHAM Modell finden sich unter <http://www.awi-potsdam.de/www-pot/hirham/index.html>.

6 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

keine

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Sachbericht	
3a. Titel des Berichts GPS-Atmosphärensondierungsprojekt (GASP) Ein innovativer Ansatz zur Bestimmung von Atmosphärenparametern		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Gendt, Gerd (GFZ), Wickert, Jens (GFZ), Neuber, Roland (AWI), Johnsen, Klaus-Peter (GKSS), Jakowski, Norbert (DLR)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2002	
	6. Veröffentlichungsdatum	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GeoForschungsZentrum Potsdam (federführend), Telegrafenberg, 14473 Potsdam Alfred-Wegener-Institut für Meeres- und Polarforschung, Postfach 12 01 61, 27515 Bremerhaven GKSS, Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str., 21502 Geesthacht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation, Kalkhorstweg 53, 17230 Neustrelitz	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GeoForschungsZentrum Potsdam (federführend), Telegrafenberg, 14473 Potsdam Alfred-Wegener-Institut für Meeres- und Polarforschung, Postfach 12 01 61, 27515 Bremerhaven GKSS, Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str., 21502 Geesthacht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation, Kalkhorstweg 53, 17230 Neustrelitz	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen *) 01SF9922	
	11a. Seitenzahl Bericht	
	11b. Seitenzahl Publikation	
	12. Literaturangaben	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen	
	15. Abbildungen	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Strategiefonds (DLR), Bonn, 31.3.2003		
18. Kurzfassung In GASP wurde eine Infrastruktur (GPS-Netze, Kommunikation, Analyse-Zentren, Daten- und Archivzentren) zur Nutzung von boden- und satelliten-gestützten GPS-Anwendungen für die atmosphärische und ionosphärische Forschung und Anwendung geschaffen bzw. verfügbar gemacht. Durch die gemeinsamen Anstrengungen von Satellitengeodäten, Meteorologen und Atmosphärenphysikern konnte die Wetterunabhängigkeit von GPS ausgenutzt werden, um den Zustand der Atmosphäre und Ionosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung als auch mit globaler Überdeckung zu sondieren sowie die Ergebnisse zu validieren. Ein quasi-operationelles Monitoring des vertikal integrierten Wasserdampfes (IWV) in nahe Echtzeit wurde seit Mai 2000 für ein dichtes Netz von GPS-Stationen demonstriert. Das Netz umfasst u.a. 100 Stationen des SAPOS-Netzes der Landesvermessungsämter und 22 GFZ-Stationen. Pünktlichkeit (<1:45 h), Zuverlässigkeit (>90%) und Qualität der abgeleiteten Wasserdampf-werte (systematischer Fehler ~1 kg/m ² , Standardabweichung ~1 kg/m ²) sind für eine Einführung in die numerische Wettervorhersage ausreichend. Fallstudien beim Deutschen Wetterdienst ergaben einen positiven Einfluss von GPS bei der kurzfristigen Vorhersage. Eine operationelle Infrastruktur und die Expertise zur Analyse und Validierung von GPS-Radiookkultationsdaten wurde am Beispiel der CHAMP Satellitenmission aufgebaut. Damit steht ein innovatives Fernerkundungsverfahren zur Sondierung der Atmosphäre/Ionosphäre im globalen Maßstab zur Verfügung, das vielfältige Anwendungen in Klimatologie/Wettervorhersage und Atmosphären- und Ionosphärenforschung ermöglicht. Bis Ende 2002 wurden mehr als 100.000/70.000 atmosphärische/ionosphärische Okkultationsmessungen durchgeführt, ca. 80.000/50.000 Vertikalprofile von Temperatur (Genauigkeit 1-2 K) und Wasserdampf bzw. Elektronendichte werden über das Datenzentrum am GFZ Potsdam der internationalen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt. Neue Algorithmen zur Assimilation von Okkultationen in den Wettermodellen wurden entwickelt. Die GPS-Resultate konnten mit Daten des globalen Radiosondennetzes und mit globalen (z.B. ECMWF und NCEP) meteorologischen Analysen sowie regionalen (z.B. HIRHAM) Atmosphärenmodellen erfolgreich validiert werden. Umfangreiche Validierungen mit dem hochauflösenden Wettervorhersagemodell HRM im Rahmen von BALTEX/BRIDGE demonstrierten ebenfalls die hohe Qualität der GPS-Produkte.		
19. Schlagwörter GPS, CHAMP, Troposphäre, Ionosphäre, Wasserdampf, Radiookkultationen, Wettervorhersage, Elektronendichte, Temperatur, Fernerkundung		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Report Title GPS Atmosphere Sounding Project (GASP) An Innovative Approach for the Recovery of Atmospheric Parameters		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Gendt, Gerd (GFZ), Wickert, Jens (GFZ), Neuber, Roland (AWI), Johnsen, Klaus-Peter (GKSS), Jakowski, Norbert (DLR)	5. End of Project 31.12.2002	
	6. Publication Date	
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	7. Form of Publication	
	8. Performing Organization(s) (Name, Address) GeoForschungsZentrum Potsdam (federführend), Telegrafenberg, 14473 Potsdam Alfred-Wegener-Institut für Meeres- und Polarforschung, Postfach 12 01 61, 27515 Bremerhaven GKSS, Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str., 21502 Geesthacht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation, Kalkhorstweg 53, 17230 Neustrelitz	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) GeoForschungsZentrum Potsdam (federführend), Telegrafenberg, 14473 Potsdam Alfred-Wegener-Institut für Meeres- und Polarforschung, Postfach 12 01 61, 27515 Bremerhaven GKSS, Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str., 21502 Geesthacht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation, Kalkhorstweg 53, 17230 Neustrelitz	9. Originator's Report No.	
	10. Reference No. 01SF9922	
	11a. No. of Pages Report	
	11b. No. of Pages Publication	
	12. No. of References	
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. No. of Tables	
	15. No. of Figures	
	16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date) Projekträger Strategiefonds (DLR), Bonn, 31.3.2003		
18. Abstract Within the GASP project the infrastructure for the use of ground and space based GPS technique for atmospheric and ionospheric research and applications (GPS networks, communication, analysis centers, data and archive centers) was established. By joint efforts of satellite geodesists, meteorologists und atmospheric physicists the weather independence of the GPS system could be exploited to monitor the state of the atmosphere and ionosphere with high temporal and spatial resolution and with global coverage. A system for validating the products could be established as well. Since May 2000, vertical integrated water vapor (IWV) has been monitored quasi-operationally in near-real time in a dense GPS network. The network comprises among others 100 sites from the SAPOS network of the German Land Surveying Agencies and 22 GFZ sites. Timeliness (<1:45 h), reliability (>90%) and quality of the derived water vapor estimates (bias ~1 kg/m ² , standard deviation ~1 kg/m ²) are sufficient for their introduction into numerical weather prediction. Case studies at the German Weather Service showed a positive impact of GPS in the short-range forecast. The operational infrastructure and expertise for the analysis and validation of GPS limb sounding data was established during the CHAMP satellite mission. An innovative remote sensing system for monitoring the atmosphere/ionosphere on a global scale has thus been provided, enabling many applications in climatology/weather prediction and atmospheric and ionospheric research. Until the end of 2002, more than 100,000/70,000 atmospheric/ionospheric occultations were measured, with about 80,000/50,000 vertical profiles of temperature (accuracy 1-2 K) / water vapor and electron density, respectively, being provided by the GFZ data center to the international user community. New algorithms for assimilating limb sounding profiles into weather models were developed. The GPS results have been successfully validated with radiosonde data, meteorological analyses (ECMWF, NCEP) and the regional regional model HIRHAM in the Arctic region. Comprehensive validations with the high-resolution weather prediction model HRM in the framework of BALTEX/BRIDGE demonstrated the high quality of the GPS atmospheric products.		
19. Keywords GPS, CHAMP, troposphere, ionosphere, water vapor, limb sounding, weather forecast, electron density, temperature, remote sensing		
20. Publisher	21. Price	