

**GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM**  
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

**Jens Wickert**

**Das CHAMP-Radiokultationsexperiment:  
Algorithmen, Prozessierungssystem  
und erste Ergebnisse**

---

Scientific Technical Report STR02/07



**Das CHAMP-Radiokkultationsexperiment:  
Algorithmen, Prozessierungssystem  
und erste Ergebnisse**

**Dissertation**

zur Erlangung des Grades

**Doktor der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)**

der Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Karl-Franzens-Universität  
zu Graz

vorgelegt im März 2002

von

**Dipl. Phys. Jens Wickert**

aus Potsdam

Graz, Österreich (2002)

Scientific Technical Report STR02/07

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Karl-Franzens-Universität  
zu Graz zur Erlangung der Doktorwürde  
genehmigte Dissertation.

Erstbetreuer: Prof. Dr. rer. nat. G. Kirchengast (Karl-Franzens-Universität Graz)  
Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Ch. Reigber (GeoForschungsZentrum Potsdam)

Tag der mündlichen Prüfung: 25. März 2002

### **Impressum**

GeoForschungsZentrum Potsdam  
Telegrafenberg  
D-14473 Potsdam

e-mail: [postmaster@gfz\\_potsdam.de](mailto:postmaster@gfz_potsdam.de)

www: <http://www.gfz-potsdam.de>

Gedruckt in Potsdam  
Juli 2002

# VORWORT



*Abb. I: Sonnen- und GPS-Satellitenuntergang mit dem kleinen Prinzen und einer Antenne für den Empfang der GPS-Satellitendaten (erweitert nach [Saint-Exupéry, 1986]).*

„Ach, kleiner Prinz, so nach und nach habe ich dein kleines schwermütiges Leben verstanden. Lange Zeit hast du, um dich zu zerstreuen, nichts anderes gehabt als die Lieblichkeit der Sonnenuntergänge. Das erfuhr ich am Morgen des vierten Tages, als Du mir sagtest: „Ich liebe die Sonnenuntergänge sehr. Komm lass uns einen Sonnenuntergang anschauen...“ „Da muss man noch warten.“ „Worauf denn warten?“ „Warten, bis die Sonne untergeht.“ Du hast zuerst ein sehr erstauntes Gesicht gemacht und dann über dich selber gelacht. Und du hast zu mir gesagt: „Ich bilde mir immer ein, ich sei zu Hause!“ In der Tat. Wenn es in den Vereinigten Staaten Mittag ist, geht die Sonne, wie jedermann weiß, in Frankreich unter. Um dort einem Sonnenuntergang beizuwohnen, müsste man in einer Minute nach Frankreich fliegen können. Unglücklicherweise ist Frankreich viel zu weit weg. Aber auf deinem so kleinen Planeten genügte es, den Sessel um einige Schritte weiterzurücken. Und du erlebtest die Dämmerung, so oft du es wünschtest... „An einem Tag habe ich die Sonne dreiundvierzigmal untergehen sehn!“ [Saint-Exupéry, 1986].

CHAMP, ein deutscher Satellit, beobachtet keine Sonnenuntergänge, sondern mit wissenschaftlicher Zielstellung täglich mehr als zweihundert Untergänge von GPS-Navigationssatelliten (Global Positioning System). Die Beobachtung dieser Satellituntergänge ist das Thema der vorliegenden Arbeit und Grundprinzip der GPS-Radiookkultationstechnik, einem neuen Verfahren, präzise Informationen über die Erdatmosphäre im globalen Maßstab zu gewinnen, die für Wettervorhersage und Klimaforschung genutzt werden können. CHAMP empfängt Signale von den GPS-Satelliten, kurz bevor sie unter dem Horizont verschwinden.

Der Einfluss der Erdatmosphäre auf die Ausbreitung der Sonnenstrahlen verursacht das Farbspiel, das bei Sonnenuntergängen beobachtet werden kann. In ähnlicher Weise werden auch die von den GPS-Satelliten ausgesandten Signale verändert. Aus der Art der Änderung können wichtige Eigenschaften der Atmosphäre wie Temperatur und Wasserdampfgehalt abgeleitet werden.

Der kleine Prinz versetzte auf seinem Miniplaneten den Stuhl, um wieder und wieder einen neuen Sonnenuntergang zu beobachten. Als er besonders traurig war, tat er das an einem Tag dreiundvierzig Mal. In Analogie dazu versetzt das Auge von CHAMP, der GPS-Signalempfänger, ständig seinen Stuhl (den Satelliten). In ca. 90 Minuten umkreist er einmal die Erde. Hinzu kommt, dass CHAMP nicht nur die Signale einer Sonne (Strahlungsquelle), sondern von fast 30 GPS-Satelliten empfängt. Somit kann CHAMP im Laufe eines Tages mehr als zweihundert Satellitenuntergänge beobachten und damit von vielen verschiedenen Punkten der Erde Temperatur- und Wasserdampfinformationen liefern.

Als ich das erste Mal von diesem neuen Fernerkundungsverfahren hörte, wurde ich neugierig und fand die Methode sehr elegant, da sie eine Art Neben- oder auch Abfallprodukt der Satellitennavigation ist. Bei der Positionsbestimmung mit GPS-Satelliten erzeugt das Ausbreitungsmedium, die Atmosphäre, einen Fehler, der für die Ermittlung der genauen Koordinaten korrigiert werden muss. Aus genau diesem Fehler werden bei der GPS-Okkultationstechnik die Temperatur- und Wasserdampfverteilungen abgeleitet. Die Berechnung kann an einem einfachen Arbeitsplatzcomputer erfolgen und liefert Informationen im globalen Maßstab.

Aus eigener Erfahrung kann ich beurteilen, wieviel Aufwand betrieben werden muss, um in schwer zugänglichen, klimatisch extremen Gebieten, Informationen über die Atmosphäre zu gewinnen. Während einer Überwinterung in der Antarktis war ich auch für das Starten der Wetterballone zuständig. Durch die extremen Windverhältnisse kam es häufig zu Fehlstarts, die zu Datenlücken in den Messreihen führten. Vor allem hier, in den Polargebieten, und auch über den Ozeanen kann die wetterunabhängige GPS-Radiookkultationsmethode als neue Datenquelle dienen.

Mit dieser Arbeit möchte ich einen Teil meiner Erfahrungen weitergeben, die ich bei der Mitarbeit im CHAMP-Projekt machen konnte und hoffe dazu beizutragen, die GPS-Radiookkultationstechnik und ihre Anwendung zu verbessern.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1 FERNERKUNDUNG DER ATMOSPHÄRE.....</b>	<b>3</b>
1.1 STRUKTUR DER ATMOSPHÄRE.....	3
1.1.1 Vertikalstruktur des Neutralgases .....	3
1.1.2 Vertikaler Aufbau der Ionosphäre.....	5
1.1.3 Allgemeine Zirkulation, Wetter und Klima.....	6
1.2 RADIOSONDIERUNGEN .....	6
1.2.1 Messgenauigkeit .....	7
1.2.2 Globale Bedeckung und Verfügbarkeit.....	8
1.2.3 Horizontale Ballondrift .....	9
1.3 FLUGZEUGMESSUNGEN .....	10
1.4 SATELLITENFERNERKUNDUNG .....	11
1.4.1 Polarumlaufende Satelliten .....	12
1.4.2 Geostationäre Satelliten .....	13
1.4.3 Zukünftige operationelle polarumlaufende Satellitensysteme.....	15
1.5 DATENASSIMILATION UND WETTERVORHERSAGE.....	15
1.5.1 Datenassimilation für Wettervorhersagen.....	15
1.5.2 Globale Wettervorhersagen.....	16
1.5.3 Operationelle Bereitstellung von meteorologischen Daten .....	16
<b>2 GNSS-RADIOOKKULTATION .....</b>	<b>19</b>
2.1 GESCHICHTE DER RADIOOKKULTATION .....	19
2.1.1 Planetare Atmosphärensondierung .....	19
2.1.2 Sondierung der Erdatmosphäre mit Okkultationsverfahren.....	20
2.2 GLOBALE NAVIGATIONSSATELLITENSYSTEME (GNSS) .....	21
2.2.1 Global Positioning System (GPS).....	21
2.2.2 GLONASS (GLObales NAVigations Satelliten System).....	23
2.2.3 GALILEO .....	24
2.3 GPS/MET-EXPERIMENT .....	25
2.4 ZUKÜNFTIGE GNSS-OKKULTATIONSMISSIONEN .....	27
<b>3 PROZESSIERUNG VON GNSS-OKKULTATIONSDATEN .....</b>	<b>29</b>
3.1 PHASENWEGVERLÄNGERUNG DURCH DIE ATMOSPHÄRE.....	29
3.1.1 Atmosphärischer Brechungsindex .....	29
3.1.2 Geometrische Optik und Fermat'sches Prinzip.....	32

3.1.3 Variablen in den GPS-Beobachtungsgleichungen .....	33
3.1.4 Mehrdeutigkeitsterm und Cycle-slips.....	34
3.2 DOPPELDIFFERENZENMETHODE .....	35
3.2.1 Linearkombination von GPS-Phasenmessungen .....	35
3.2.2 Doppeldifferenzen für GPS-Okkultationsmessungen.....	36
3.2.3 Genauigkeitsanforderungen.....	37
3.2.4 Stabilität der CHAMP-Satellitenuhr.....	38
3.2.5 Stabilität der GPS-Satellitenuhren .....	40
3.2.6 Ionosphärenkalibrierung des Referenzlinks.....	40
3.2.7 Signallaufzeiten .....	41
3.2.8 Relativistische Effekte.....	42
3.2.9 Lage der Antennenphasenzentren.....	42
3.3 ABLEITUNG ATMOSPHERISCHER PARAMETER.....	46
3.3.1. Ableitung des Brechungswinkels.....	46
3.3.2 Ellipsoidkorrektur.....	48
3.3.3 Ionosphärenkorrektur.....	49
3.3.4 Statistische Optimierung des Brechungswinkels.....	54
3.3.5 Abel-Transformation und Ableitung der Refraktivität .....	56
3.3.6 Berechnung der atmosphärischen Parameter.....	58
3.3.7 Genauigkeit der abgeleiteten Temperaturen.....	62
3.3.8 Datenprozessierung in der unteren Troposphäre .....	63
3.3.9 Horizontale und vertikale Auflösung der Messungen .....	64
<b>4 CHAMP-MISSION .....</b>	<b>65</b>
4.1 WISSENSCHAFTLICHE ZIELE .....	65
4.2 ATMOSPHERENSONDIERUNG MIT CHAMP .....	66
4.3 SATELLIT UND WISSENSCHAFTLICHE INSTRUMENTE .....	67
4.3.1 CHAMP-Satellit.....	67
4.3.2 Wissenschaftliche Instrumente.....	67
4.4 CHAMP-MISSIONSBETRIEB .....	69
4.4.1 Orbit und Missionsdauer .....	69
4.4.2 Bodensegment und Datenflüsse .....	70
<b>5 CHAMP-OKKULTATIONSEXPERIMENT.....</b>	<b>71</b>
5.1 SATELLITENDATENEMPfang UND ROHDATENZENTRUM .....	72
5.2 GPS-BODENNETZ FÜR CHAMP .....	75
5.3 BEREITSTELLUNG DER SATELLITENBAHNEN .....	78
5.3.1 GPS-Satellitenbahnen.....	78
5.3.2 CHAMP-Satellitenbahn .....	78
5.4 PROZESSIERUNGSSYSTEM FÜR OKKULTATIONS DATEN .....	79
5.4.1 Umsetzung der Algorithmen in Softwaremodule.....	79

5.4.2 Operationelles Prozessierungssystem.....	85
5.4.3 Praxistest des Systems mit GPS/MET-Daten.....	88
5.4.4 Operationelle Gesichtspunkte.....	91
5.5 DATENPRODUKTE.....	92
<b>6 ERSTE ERGEBNISSE DES CHAMP-OKKULTATIONSEXPERIMENTES .....</b>	<b>93</b>
6.1 ERSTE OKKULTATIONSMESSUNGEN VON CHAMP.....	93
6.2 VERGLEICH DER DATENQUALITÄT MIT GPS/MET.....	97
6.3 ANZAHL UND GLOBALE BEDECKUNG DER MESSUNGEN.....	99
6.3.1 Okkultationen pro Tag.....	99
6.3.2 Globale Verteilung.....	101
6.4 STATISTISCHER VERGLEICH MIT ECMWF-ANALYSEN.....	104
6.4.1 ECMWF-Daten.....	104
6.4.2 Statistischer Vergleich von Trockentemperaturprofilen.....	105
6.4.3 Statistischer Vergleich von Refraktivitäten.....	106
6.5 GLOBALES WASSERDAMPFMONITORING MIT CHAMP.....	108
6.6 UNTERE GRENZE DER VERTIKALPROFILE.....	110
6.7 IONOSPÄRENEINFLUSS.....	113
6.8 REDUNDANZ DER GPS-BODENDATEN.....	115
6.9 GPS-PROZESSIERUNG MIT EINFACHDIFFERENZEN.....	117
6.9.1 GPS-Uhrenstabilität ohne Selective Availability.....	118
6.9.2 Reduzierung der Datenrate des Bodennetzes.....	120
6.9.3 Anwendung der Einfachdifferenzenmethode.....	122
<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>127</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>131</b>
<b>ANHANG A.....</b>	<b>143</b>
<b>ANHANG B.....</b>	<b>147</b>
<b>DANKE.....</b>	<b>149</b>



# ABKÜRZUNGEN

ACARS	Aircraft Communications, Addressing, and Reporting System
AIREP	AIR REPort
AMDAR	Aircraft Meteorological DATA Reporting
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
AS	Anti Spoofing
ASDAR	Aircraft to Satellite DATA Relay
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder
ATN	Advanced TIROS New
ATOVS	Advanced TIROS Operational Vertical Sounder
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung
BINEX	BINARY receiver independent data EXchange format
CD	Compact Disc
CHAMP	CHALLENGING Minisatellite Payload
CHORB	CHamp ORBit Format
CMIS	Conical Microwave Imager/Sounder
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate
CrIS	Crosstrack Infrared Sounder
DARA	Deutsche Agentur für RaumfahrtAngelegenheiten
DFD	Deutsches Fernerkundungs Datenzentrum
DWD	Deutscher WetterDienst
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMG	Deutsche Meteorologische Gesellschaft
DJO	Daimler Chrysler Aerospace Jena Optronik GmbH
EC-GI	European Commission – Geo Information
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENVISAT	ENVIronmental SATellite
EPOS-OC	Earth Parameter and Orbit System - Orbit Computation
EPS	EUMETSAT Polar System
ERBE	Earth Radiation Budget Experiment
ERS	European Research Satellite
ESA	European Space Agency
ESF	Equatorial Spread F
EUMETSAT	EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites
EUV	Extreme UltraViolet radiation
FID	FIDucial network
FTP	File Transfer Protocol
GASP	Global Atmosphere Sounding Project
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam

GGI	GPS Geoscience Instrument
GIS	Geo Information System
GLONASS	GLObal'naya NAVigatsioannaya Sputnikovaya Sistema (russisch) (GLObales NAVigations Satelliten System)
GME	Globales ModEIl
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GPS	Global Positioning System
GPSOS	GPS Occultation Sensor
GRACE	GRAvity recovery and Climate Experiment
GRAS	GNSS Receiver for Atmospheric Sounding
GSOC	German Space Operation and Control Centre
GTS	Global Telecommunication Service
HGF	Helmholtz-Gemeinschaft für Forschung
HIRS	High resolution Infra Red radiation Sounder
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IFS	Integrated Forecast System
IGS	International GPS Service
IR	Infra Red
IRS	Indian Research Satellite
ISDC	Information System and Data Center
ITCZ	Inner Tropical Convergence Zone
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEO	Low Earth Orbiter
LM	Lokales Modell
LORAN-C	LOW frequency RADioNavigation system - Coast
METEOSAT	METEORological SATellite
METOP	METEorological OPERational
MHS	Microwave Humidity Sounder
MMP	MassenMittelPunkt
MSG	METEOSAT Second Generation
NASA	National AeroSpace Agency
NAVSTAR	NAVigation by Satellite Timing And Ranging
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPOESS	National Polar Orbiting Environmental Satellite System
NSF	National Science Foundation
OL	Open Loop
OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite
PLL	Phase Locked Loop
PLP	Planar Langmuir Probe
POD	Precise Orbit Determination
POES	Polar-Orbiting Environmental Satellites
PRN	Pseudo Random Number
PZ-90	Parameters of Earth 1990 (russ. Parametraja Zystema-90)

---

RADAR	RADio Detecting And Ranging
RDC	Raw Data Center
RINEX	Receiver INdependend data EXchange format
ROST	Radio Occultation Simulation and Tracking tool
SA	Selective Availability
SESS	Space Environment Sensor Suite
SLR	Satellite Laser Ranging
SSU	Stratospheric Sounding Unit
STAR	Space Triaxial Accelerometer for Research applications
STK	Satellite Tool Kit
SVN	Space Vehicle Number
TEC	Total Electron Content
TIROS	Television and InfraRed Observational Satellite
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder
TRSR	Turbo Rogue Space Receiver
UCAR	University Corporation of Atmospheric Research
UKMO	United Kingdom Meteorological Office
UTC	Universal Time Coordinated
UTH	Upper Troposphere Humidity
VIS	VISible
VIIRS	Visible/Infrared Imager Radiometer Suite
WGS-84	World Geodetic System 1984

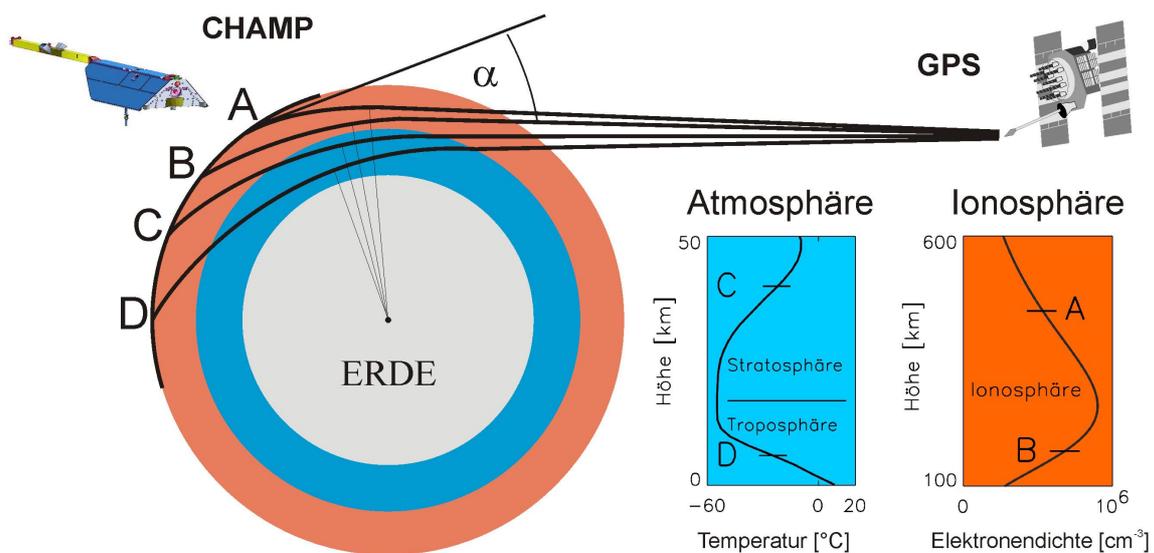


# EINLEITUNG

Mit der Realisierung des CHAMP-Projektes (CHALLENGING Minisatellite Payload) und dem erfolgreichen Start des Satelliten am 15. Juli 2000 erfolgte ein wichtiger Schritt zur Entwicklung und Etablierung einer neuen satellitengestützten Fernerkundungsmethode, der GPS-Radiookkultationstechnik. Dieses kalibrierungsfreie Verfahren ermöglicht eine genaue und wetterunabhängige Sondierung der Erdatmosphäre im globalen Maßstab mit hoher vertikaler Auflösung. Neben Anwendungen in der Klimaforschung können die neuen Daten wesentlich dazu beitragen, die Wettervorhersage zu verbessern.

In dieser Arbeit wird die operationelle meteorologische Anwendung der GPS-Limbsondierungen anhand des CHAMP-Radiookkultationsexperimentes untersucht. Dafür ist zunächst die Entwicklung eines automatischen Prozessierungssystems erforderlich. Die verschiedenen Eingabedatensätze (GPS-Okkultations- und Bodendaten, Satellitenbahn- und Hilfsdaten) müssen rechtzeitig bereitgestellt und verarbeitet werden. Die Ergebnisse der Prozessierung sind zu archivieren und für die Nutzung verfügbar zu machen. Das System muss modular strukturiert sein, um flexibel und einfach erweitert bzw. an neue Analyseaufgaben angepasst werden zu können (z.B. für neue Satellitenmissionen oder zusätzliche Analyseprodukte).

Neben diesen logistischen Aufgaben der Datenprozessierung muss eine korrekte mathematisch-physikalische Formulierung der neuen Fernerkundungsmethode gefunden und in entsprechende Datenanalyseprogramme umgesetzt werden. Die atmosphärische Phasenwegverlängerung der GPS-Signale und ihre Richtungsänderung (Brechungswinkel) werden dabei auf der Basis der Satellitengeodäsie und der geometrischen Optik abgeleitet. Die Ableitung vertikal hochaufgelöster Refraktivitätsprofile aus dem Brechungswinkel erfordert dagegen ein mathematisches Inversionsverfahren, die sogenannte Abelinversion. Mit Hilfe der Refraktivitätsbeziehung, der hydrostatischen Gleichung und der Zustandsgleichung werden schliesslich Dichte-, Druck- und Temperaturprofile der Atmosphäre bestimmt.



**Abb. II:** Fernerkundung der Atmosphäre mit GPS-Radiookkultation auf CHAMP. Der Brechungswinkel  $\alpha$  des Signalweges vom GPS-Satelliten zu CHAMP ist ein charakteristischer Parameter für die Okkultationen. Vertikale Verteilungen von Temperatur und Elektronendichte können abgeleitet werden.

Dieses Datenprozessierungs- und Analysesystem wird auf einen operationellen meteorologischen Einsatz hin getestet und optimiert. Dazu werden die Daten des CHAMP-GPS-Okkultationsexperiments genutzt. Kriterien dabei sind einerseits die globale Verteilung, Qualität und Genauigkeit der Messungen sowie die vertikale Auflösung der Atmosphärenprofile. Zum anderen werden Aufwand, Schnelligkeit, Kontinuität und Zuverlässigkeit der Prozessierung untersucht. Die Qualität der CHAMP-Profile wird durch einen statistischen Vergleich mit meteorologischen Analysen (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) bewertet, bei dem sich eine Übereinstimmung von durchschnittlich 1 K im Bereich der oberen Troposphäre/unteren Stratosphäre ergibt. Qualitätsmindernde Einflüsse durch die Ionosphäre sowie bei der Wasserdampfberechnung werden untersucht. Okkultationsereignisse werden simuliert, verschiedene Möglichkeiten der Berechnung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung werden getestet. Dabei wird festgestellt, dass bei deaktiviertem Selective Availability-Modus des GPS-Systems eine Prozessierung ohne GPS-Bodendaten ebenfalls präzise Atmosphäreninformation liefert. Die tägliche Routineauswertung der CHAMP-Daten ergibt weiterhin, dass mit dem neuen GPS-Empfänger weitgehend unabhängig von geografischer Lage, Tageszeit, Wetter und Aktivierungsstatus des GPS-Antispoofing Modus gemessen werden kann. Damit kann das CHAMP-Radiookkultationsexperiment als erster, erfolgreicher Test der neuen GPS-Radiookkultations-technik für den Einsatz in der operationellen Meteorologie angesehen werden.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert:

Im ersten Kapitel wird der Untersuchungsgegenstand, die Erdatmosphäre, vor allem deren Vertikalstruktur, genauer beschrieben. Derzeit etablierte Fernerkundungsverfahren zur Gewinnung globaler atmosphärischer Daten für die Wettervorhersage werden charakterisiert. Eine kurze Einführung in die Datenassimilation und Wettervorhersage wird gegeben.

Das nächste Kapitel führt die GNSS (Global Navigation Satellite System)-Radiookkultations-technik ein. Im folgenden Kapitel werden die physikalischen Grundlagen des Verfahrens am Beispiel des GPS dargestellt und die Ableitung atmosphärischer Parameter aus GPS-Satelliten- und Bodendaten wird detailliert beschrieben.

In den nächsten Kapiteln wird die praktische Umsetzung eines GNSS-Radiookkultations-experiments am Beispiel der CHAMP-Mission beschrieben. Dazu werden zunächst die Mission selbst und der Satellit im vierten Kapitel kurz charakterisiert.

Im fünften Kapitel werden das Experiment und die zugehörige Infrastruktur detailliert beschrieben. Im Mittelpunkt steht dabei das Prozessierungssystem für die Okkultationsdaten.

Im letzten Kapitel wird die erste Phase des CHAMP-Okkultationsexperiments (Februar bis Juli 2001) beschrieben, erste Ergebnisse der operationellen Datenprozessierung werden vorgestellt, u.a. erfolgt ein statistischer Vergleich von CHAMP-Profilen mit meteorologischen Analysen und die Beschreibung und Validierung einer neuen Prozessierungsmethode ohne direkte Nutzung von GPS-Bodendaten. Am Ende der Arbeit werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

# 1 FERNERKUNDUNG DER ATMOSPHÄRE

Ballongestützte Radiosondenmessungen waren lange Zeit die effektivste Möglichkeit, kontinuierliche und zuverlässige Informationen über den Zustand der freien Atmosphäre zu erhalten. Seit dem Start des ersten rein meteorologischen Satelliten, TIROS-1 am 1. April 1960 (Television and InfraRed Observational Satellite-1) spielen jedoch auch Wettersatelliten als Datenlieferanten eine immer wichtigere Rolle. Ein neues Zeitalter der meteorologischen Messtechnik begann [Kidder und Vonder Haar, 1995].

Eine der wesentlichen Hoffnungen, die in der GPS-Radiookkultationstechnik gesehen werden, ist das Potential, in naher Zukunft als wichtige Datenquelle u.a. für die globale Wettervorhersage zu dienen, also Informationen über die Erdatmosphäre im globalen Maßstab operationell zur Verfügung zu stellen. Damit würden die bisher dafür genutzten Fernerkundungsverfahren nicht überflüssig, sie können in exzellenter Weise ergänzt werden.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Prozessierungssystem für GPS-Radiookkultationsdaten wurde von Beginn an nach operationellen Gesichtspunkten entwickelt und ist in Zukunft für den Pilotbetrieb zur operationellen Bereitstellung atmosphärischer Daten für die Assimilation zur globalen Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vorgesehen. Diese Aktivitäten finden im Rahmen des deutschen HGF (Helmholtz-Gemeinschaft für Forschung)-Strategiefondsprojektes GASP statt (Global Atmosphere Sounding Project, Reigber *et al.* [2001c]; Reigber [1998c]). Ist dieses Projekt erfolgreich, wird ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Wettervorhersage geleistet.

Nach einer Kurzbeschreibung des zu untersuchenden Mediums, der Erdatmosphäre, werden die derzeit gebräuchlichsten Fernerkundungsverfahren für die globale Wettervorhersage und die mit ihnen verbundenen technischen Systeme charakterisiert. Dabei stehen Radiosondierungen und die Messungen von Wettersatelliten im Vordergrund.

Im Anschluss werden Datenassimilation und globale Wettervorhersage kurz beschrieben und Anforderungen an die zeitliche Verfügbarkeit von Atmosphären Daten für die operationelle Datenassimilation abgeleitet.

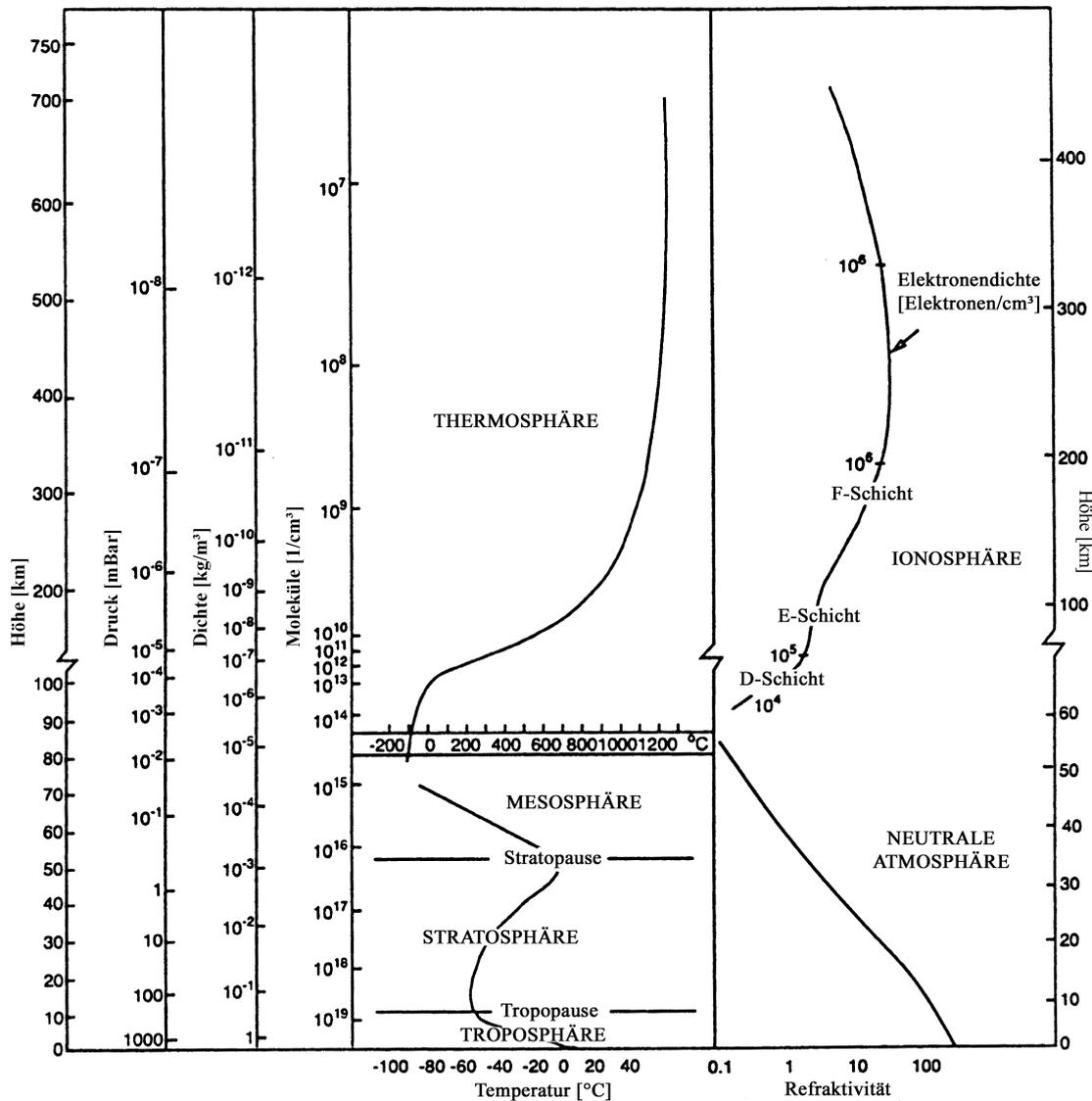
## 1.1 Struktur der Atmosphäre

Als Atmosphäre wird die Gashölle der Erde bezeichnet. Sie besitzt eine Gesamtmasse von ca.  $5,1 \cdot 10^{18}$  kg und ist ein Gemisch verschiedener Gaskomponenten. Verursacht durch die intensive Sonnenstrahlung kommt es in den oberen Schichten zu einer teilweisen Ionisation ihrer Moleküle und Atome. Es ist daher sinnvoll, den elektrisch neutralen und den ionisierten Atmosphärenanteil getrennt zu behandeln.

Detailliertere Darstellungen zum Aufbau und zur Zusammensetzung der Atmosphäre geben z.B. Liljequist und Cehak [1994], Roedel [1992] oder Kertz [1989].

### 1.1.1 Vertikalstruktur des Neutralgases

Nach dem Temperaturverlauf mit der Höhe über der Erdoberfläche werden folgende Höhenbereiche (Sphären) unterschieden: Tropo-, Strato-, Meso- und Thermosphäre



**Abb. 1.1:** Mittlere Vertikalstruktur der Erdatmosphäre mit Temperatur-, Refraktivitäts- und Elektronendichteverteilung (nach [Syndergaard, 1999]).

(Abb. 1.1). Die Grenzbereiche an den Oberseiten dieser Schichten zur jeweils darüberliegenden sind: Tropo-, Strato-, und Mesopause (altfranz.: „pose“ = „ruhen“, die Arbeit unterbrechen).

Die in ihrer Gesamtheit als Wetter und Klima bezeichneten atmosphärischen Vorgänge spielen sich hauptsächlich in der Troposphäre ab. Die Temperatur nimmt innerhalb der Troposphäre nach oben im Mittel mit 0,65 K pro 100 m ab. Da diese Temperaturabnahme am Äquator höher (bis etwa 17 km) hinaufreicht, werden dort an der Tropopause wesentlich tiefere Temperaturen (bis zu  $-70^{\circ}/80^{\circ}\text{C}$ ) als über den Polen (Sommer ca.  $-40^{\circ}\text{C}$ , Winter ca.  $-60^{\circ}\text{C}$ ) gemessen. In der Troposphäre ist die Hauptmenge des atmosphärischen Wasserdampfes enthalten. Die Stratosphäre dagegen ist sehr trocken und enthält die Ozonschicht der Erde. Die Ozonschicht verursacht durch Strahlungsabsorption eine Temperaturzunahme in der Stratosphäre, wodurch an der Stratopause wieder Temperaturen um  $0^{\circ}\text{C}$  erreicht werden.

In der Mesosphäre (ca. 50-80 km Höhe) nimmt die Temperatur wieder stark ab, in 80 km Höhe wird dabei im Mittel etwa  $-90^{\circ}\text{C}$  erreicht. In der darüber liegenden Thermosphäre kommt es dagegen wieder zu einer Temperaturzunahme. Ab einer Höhe von ca. 130 km zeigt sich hier, aufgrund der abnehmenden Wärmekapazität der Atmosphäre und des dominierenden Strahlungseinflusses, ein sehr großer Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht von bis zu einigen 100 K.

Ein zweites Einteilungsschema orientiert sich an der Art der Durchmischung der Atmosphäre. Bis zu einer Höhe von 100 km (Homosphäre) ist das Neutralgas durch atmosphärische Turbulenz gut durchmischt, die Hauptkomponenten sind molekularer Stickstoff (ca. 78 Vol.%) und Sauerstoff (ca. 21 Vol.%). Zu größeren Höhen hin (Heterosphäre) nimmt die mittlere freie Weglänge der Moleküle zu (diffusiver Transport) und dominiert die turbulente Vermischung. Es bildet sich ein diffusiver Gleichgewichtszustand heraus, bei dem der Anteil leichterer Gase (z.B. atomarer Sauerstoff, Helium, Wasserstoff) im Vergleich zu schwereren Gasen (molekularer Stickstoff und Sauerstoff) nach oben hin zunimmt (z.B. [Bauer, S. J., 1997]).

### 1.1.2 Vertikaler Aufbau der Ionosphäre

Auch im ionisierten Anteil der Atmosphäre existieren zwei Einteilungssysteme [Bauer, S. J., 1997; Kertz, 1989].

Eine Art der vertikalen Gliederung erfolgt nach dem Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die ionisierten Bestandteile der Erdatmosphäre. Auf geladene Teilchen, die sich quer zum Magnetfeld bewegen, wirkt die Lorentzkraft. Bewegte Elektronen werden wegen ihrer geringeren Masse stärker von dieser Kraft beeinflusst als Ionen gleicher Geschwindigkeit. Bis in eine Höhe von 70 km ist die Ionisation noch so gering, dass der ionisierte Anteil einfach den Bewegungen des Neutralgas folgt, der Einfluss des Erdmagnetfeldes ist gering. Etwas höher (70-130 km, die Ionisation nimmt nach oben hin zu) werden die Elektronen bei ihren Bewegungen quer zum Magnetfeld behindert, die Ionen folgen aber noch völlig den Bewegungen des Neutralgases. Es entstehen elektrische Felder, man spricht von der Dynamosphicht. Darüber, in der Magnetosphäre, ist die Dichte des Neutralgases soweit abgesunken, dass die Bewegungen aller ionisierten Teilchen im wesentlichen nur durch das Erdmagnetfeld gelenkt werden. Die Magnetosphäre erstreckt sich über mehrere Erdradien.

Das zweite Einteilungssystem orientiert sich an der vertikalen Verteilung der Elektronendichte, die durch Überlagerung mehrerer, sogenannter Ionisationsschichten charakterisiert ist. Die Ausbildung der einzelnen Ionisationsschichten kommt durch ein Wechselspiel zwischen nach oben hin abnehmender Dichte des ionisierbaren Gases und der nach unten hin abnehmenden Stärke der ionisierenden Strahlung zustande. Die Ionenproduktionsrate ist dem Produkt aus diesen beiden Größen proportional und besitzt somit bei einer bestimmten Höhe ein Maximum. Da die Atmosphäre aus verschiedenen Gasen besteht, entstehen verschiedene Ionisationsschichten (D-, E-, und F-Schicht, siehe Abb. 1.1) in unterschiedlichen Höhenbereichen, zu deren Entstehung je nach vorherrschender Molekülart unterschiedliche Spektralbereiche der einfallenden Strahlung wirksam werden.

### 1.1.3 Allgemeine Zirkulation, Wetter und Klima

Neben dem Vertikalaufbau der Atmosphäre charakterisieren auch horizontale Strukturen ihre Eigenschaften. Unterschiedliche Strahlungsbilanzen für verschiedene geografische Breiten führen zu großräumigen Luftströmungen in der Atmosphäre, der allgemeinen Zirkulation. Zusammen mit den Meeresströmungen wird ein Wärmetransport veranlasst, der mit einem teilweisen Temperatenausgleich zwischen den unterschiedlichen Breiten verbunden ist. Es bildet sich ein charakteristischer Zustand heraus, der die Klimazonen der Erde bestimmt.

Infolge der horizontalen Temperaturunterschiede und der Corioliskraft kann die allgemeine Zirkulation in drei geschlossene Teilzirkulationen unterteilt werden [*Liljequist und Cehak, 1994; Berth et al., 1972*]. Demnach ergeben sich an der Erdoberfläche Bereiche östlicher Winde in den Polargebieten, Westwindzonen in den gemäßigten (mittleren) Breiten und die Passatzone mit östlichen Winden beiderseits des Äquators.

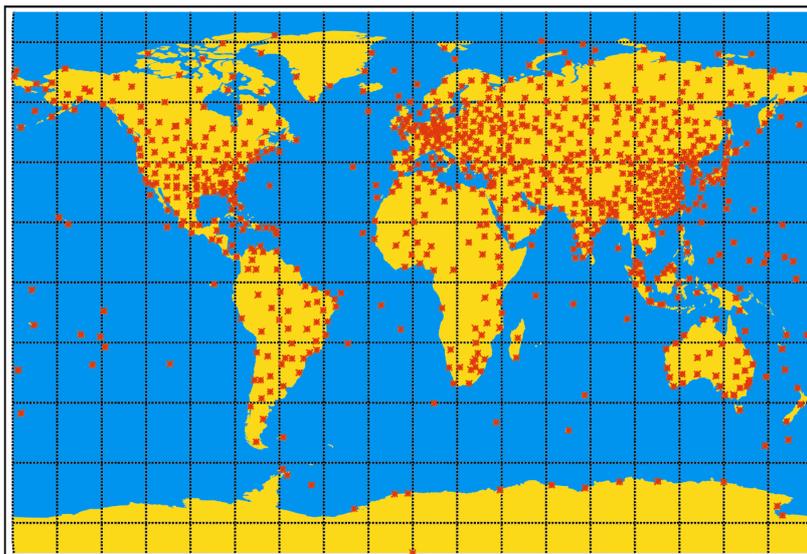
Unter dem Begriff Wetter versteht man den physikalischen Zustand der Atmosphäre (hauptsächlich charakterisiert durch Lufttemperatur, -druck, -feuchtigkeit, Wind, Bewölkung) zu einem bestimmten Zeitpunkt über einem abgegrenzten Raum. Das Wetter an einem Ort steht immer im Zusammenhang mit einer Wetterlage, d.h. mit atmosphärischen Zuständen und Prozessen über einem größeren Gebiet. Gleichzeitig jedoch wird es durch lokale Faktoren, besonders von der Gestalt und den physikalischen Eigenschaften der Erdoberfläche beeinflusst. Das Wettergeschehen spielt sich hauptsächlich in der Troposphäre ab.

Als Klima wird die Gesamtheit der in einem bestimmten Gebiet auftretenden mittleren Wetterzustände mit ihren zeitlichen Veränderungen über genügend lange Zeiträume bezeichnet. Es wird durch statistische Gesamteigenschaften repräsentiert (z.B. Mittelwerte, Häufigkeit extremer Ereignisse, Andauerwerte). Eine komplementäre, in der physikalischen Klimatologie ebenso wichtige Sichtweise, fasst das Klima als den veränderlichen Gesamtzustand des globalen Klimasystems (Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre-Biosphäre-Lithosphäre System) auf (z.B. [*Hantel, 1997*]).

## 1.2 Radiosondierungen

Die Basis für die operationelle Datenbereitstellung atmosphärischer Information für die Wettervorhersage bilden die Stationen eines weltweiten Beobachtungsnetzes. Die Messungen dieses Netzes werden zwischen den Wetterdiensten der jeweiligen Länder über ein spezielles Fernmeldesystem (GTS, Global Telecommunication Service) ausgetauscht. Die Beobachtungen stammen von Landstationen, Schiffen und von driftenden oder verankerten Messbojen. Hinzu kommen die Meldungen der Radiosondenstationen (Messungen mit Wetterballonen), die Informationen über die atmosphärische Vertikalstruktur enthalten. Die Ballonstarts werden zur überwiegenden Mehrheit von Landstationen zu fest vorgeschriebenen Zeitpunkten (synoptischen Terminen) durchgeführt. Vereinzelt existieren Meldungen von Ballonen, die von Schiffen gestartet werden und Informationen von Fallsonden (z.B. von Flugzeugen).

Globales Netz der Radiosondenstationen



**Abb. 1.2:** Globales Netz der Radiosondenstationen (Stand 09.01.1996, [DWD 1996]).

Die Radiosonde besteht aus einer Instrumentenkombination von Luftdruck-, Temperatur- und Feuchtesensor mit einem Kurzwellensender (Sendefrequenz ca. 400 MHz) und ist an einem gasgefüllten, freifliegenden Ballon befestigt. Die erreichbare vertikale Auflösung hängt von der Aufstiegsgeschwindigkeit des Ballons ab und beträgt im Mittel ca. 50 m. Die Messdaten werden durch den Kurzwellensender an die Bodenstation übertragen. Über die Positionsbestimmung des Ballons mittels Radar (Radio Detection and Ranging), Loran-C (LOW frequency RADioNavigation system – Coast) oder GPS [Trenberth, 1995] können auch vertikale Profile von Windrichtung und –geschwindigkeit abgeleitet werden.

Das globale Netzwerk der Radiosondenstationen (Abb. 1.2) bildet das Rückgrat der Datenbereitstellung für die Modellierung atmosphärischer Prozesse. Im Januar 1996 enthielt das Verzeichnis der synoptischen Stationen des DWD 918 Radiosondenstationen weltweit [DWD, 1996, Abb. 1.2].

### 1.2.1 Messgenauigkeit

Für die weltweit verbreitetste Radiosonde RS-80 gibt der Hersteller *Vaisala* [1991] folgende Genauigkeiten an (Laborbedingungen): Druck 0,5 hPa, Temperatur 0,2 K, relative Feuchte 2%. Während eines Aufstieges können die Genauigkeiten jedoch z.B. infolge des Strahlungseinflusses von diesen Angaben abweichen. Parallelaufstiege unter Idealbedingungen und mit sorgfältiger Kalibrierung [Antikainen und Hyvönen, 1983] ergaben für die Temperatur einen zufälligen Messfehler von 0,14 K, für die Feuchte von 2,2% und für die Bestimmung der Höhe aus der Druckmessung einen Fehler von 5,5 m.

Der systematische Fehler der Messung der relativen Feuchte wird wesentlich durch die vor dem Start durchgeführte Kalibrierung des Feuchtesensors bestimmt und kann zu einem Messfehler von bis zu 10% führen. Vor allem bei tiefen (ab ca.  $-30^{\circ}\text{C}$ ) Temperaturen treten große Fehler (15% und mehr) auf [Dzingle und Leiterer, 1995]. Elliot und Gaffen [1991] zweifeln generell (mit Ausnahmen in den Tropen) die Zuverlässigkeit der

Feuchtwerte oberhalb von 500 hPa (5-6 km) an. Mit geeigneten Kalibrierungsverfahren und dem Einsatz von parallelen Feuchtesensorenordnungen wird derzeit versucht, die Genauigkeit der Messungen zu verbessern [Leiterer et al., 1997].

Radiosonden liefern Daten von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von ca. 30 km. Bei günstigen Wetterbedingungen können Höhen bis zu 40 km erreicht werden. Auf Grund von Fehlern bei der Druckbestimmung in größeren Höhen und der daraus resultierenden fehlerhaften Höhenzuordnung der Messwerte ergeben sich im Bereich der oberen Tropo- und unteren Stratosphäre oberhalb von 10 km Messfehler von ca. 1 K, in größeren Höhen (30 km) kann dieser Fehler bis auf 4 K ansteigen [Ware et al., 1996].

### 1.2.2 Globale Bedeckung und Verfügbarkeit

Ein generelles Problem der Radiosondenmessungen sind, besonders auf der Südhalbkugel, räumliche und zeitliche Datenlücken. Neben der dort geringen Anzahl von Wetterstationen, die in der Lage sind, Radiosondierungen durchzuführen, scheitern z.B. in der Antarktis die Ballonstarts oftmals an den extremen Umweltbedingungen. Dort auftretende ionosphärische Störungen bereiten auch oft Probleme bei der Datenübertragung zu den Vorhersagezentren. Auf anderen Kontinenten (Afrika und Südamerika) stellen die Ballonstarts mit den nur einmalig verwendbaren Radiosonden und dem personellen Aufwand zu ihrer Durchführung und Auswertung ein Kostenproblem dar.

Während des globalen Wetterexperiments (1979) erreichte die Anzahl der weltweit durchgeführten Radiosondierungen ihr Maximum. In den darauf folgenden Jahren verringerte sich diese Anzahl um ca. ein Drittel, hauptsächlich bedingt durch die Umstellung von täglich zwei auf täglich nur noch einen Ballonaufstieg pro Station [Trenberth, 1995].

Die Anzahl der tatsächlich täglich verfügbaren Messungen von Radiosondenstationen ist z.T. deutlich geringer als deren Anzahl (Abb. 1.2). Tab. 1.1 zeigt dazu als Beispiel die für die Datenassimilation des DWD verfügbaren Radiosondenmessungen in verschiedenen Druckniveaus über der Erdoberfläche für den 7. Februar 1999. Für die synoptischen Haupttermine um 0 und 12 UTC gibt es Daten für ca. 500 Sondierungen. Also werden nur von jeder zweiten bekannten Radiosondenstation auch Messwerte für die Datenassimilation innerhalb der globalen Wettervorhersage zur Verfügung gestellt. Zu den Hauptterminen 6 und 18 UTC sind es drastisch weniger, hier werden nur noch von

	0 UTC	6 UTC	12 UTC	18 UTC
500 hPa	520	31	485	26
250 hPa	506	31	470	26
100 hPa	454	29	437	26
50 hPa	391	26	388	24
30 hPa	324	15	344	11
10 hPa	109	4	138	2

**Tab. 1.1:** Höhenabhängige Verfügbarkeit von globalen Radiosondenmessungen für die Datenassimilation zur globalen Wettervorhersage des DWD (07.02.1999).

ca. jeder 30. Station Vertikalprofile geliefert. Weiterhin werden die verfügbaren Temperaturdaten mit zunehmender Höhe deutlich weniger. So sind für das Druckniveau 10 hPa zu den Hauptterminen global nur noch ca. 100 Messungen erhältlich.

Die verfügbaren Messungen sind sehr ungleichmäßig über die Erde verteilt. Die Abdeckung über Europa und Nordamerika ist gut. Weiterhin gibt es Messungen über Australien, Russland (nahmen in den vergangenen Jahren stark ab) und China. Die verbleibenden Regionen weisen nahezu überhaupt keine Messungen auf.

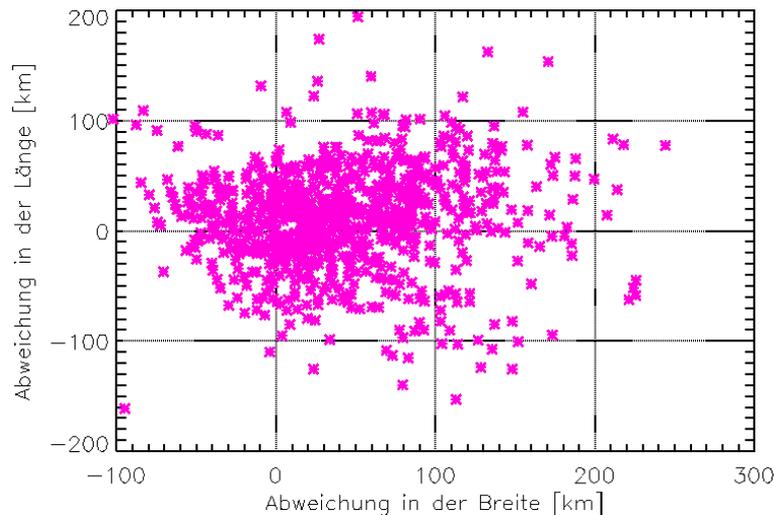
Quantitativ wird diese Tatsache durch Tab. 1.2 bestätigt. Zu den Hauptterminen 0 und 12 UTC sind auf der Nordhalbkugel in den unteren Höhenbereichen ca. 5-10 mal mehr Messungen erhältlich als auf der Südhalbkugel. Zu den Hauptterminen 6 und 18 UTC wird dieser Unterschied noch größer. Es gibt fast keine auf der Südhalbkugel durchgeführten Messungen. Tab. 1.2 zeigt auch deutlich, dass die Vertikalprofile auf der Südhalbkugel eine geringere Höhe erreichen als auf der Nordhalbkugel. Obwohl für den 17. Februar im Nordwinter schwierigere Aufstiegsbedingungen herrschen sollten, erreicht hier zu den Hauptterminen 0 und 12 UTC fast jede vierte Sonde die Höhe von 10 hPa, auf der Südhalbkugel ist es nur jede zehnte.

	0 UTC		6 UTC		12 UTC		18 UTC	
	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord	Süd
<b>500 hPa</b>	443	77	30	1	425	60	26	0
<b>250 hPa</b>	430	76	30	1	412	58	26	0
<b>100 hPa</b>	383	71	28	1	384	53	26	0
<b>50 hPa</b>	333	58	25	1	338	50	24	0
<b>30 hPa</b>	278	46	14	1	303	41	11	0
<b>10 hPa</b>	107	2	4	0	134	4	2	0

**Tab. 1.2:** Höhenabhängige Verfügbarkeit von Messungen des globalen Radiosondennetzes, unterschieden nach Messung auf der Nord- bzw. Südhalbkugel (07.02.1999).

### 1.2.3 Horizontale Ballondrift

Infolge der Windströmungen kommt es während der Radiosondierung zu einer horizontalen Ballondrift. Die in den verschiedenen Höhenstufen gemessenen Temperaturen können nicht mehr dem Längen- und Breitengrad des Startpunktes zugeordnet werden. Eine Vorstellung über die Größe dieser horizontalen Ballondrift gibt die Auswertung eines Beispieldatensatzes von Radiosondierungen an der deutschen Antarktisstation Neumayer (70,39°S; 8,15°W). Der Datensatz umfasst 1.159 Vertikalprofile, die im Zeitraum zwischen März 1992 und Februar 1995 gemessen wurden. Mit den Winddaten von 839 Profilen (komplett vorhandene Windinformation über den gesamten Höhenbereich nur bei 72,4% der gemessenen Profile) wurde der Ballonplatzpunkt bestimmt und die horizontale Entfernung zum Startpunkt ermittelt. Bei einer durchschnittlich erreichten Höhe von 26,925 km betrug die mittlere horizontale Abweichung zwischen Startpunkt und Subpunkt der Position beim Platzen des Ballons 72,3 km. Die Lage aller Subpunkte ist in Abb. 1.3 dargestellt. Der größte Abstand zum Startpunkt ergab sich am 5. September 1993. Die

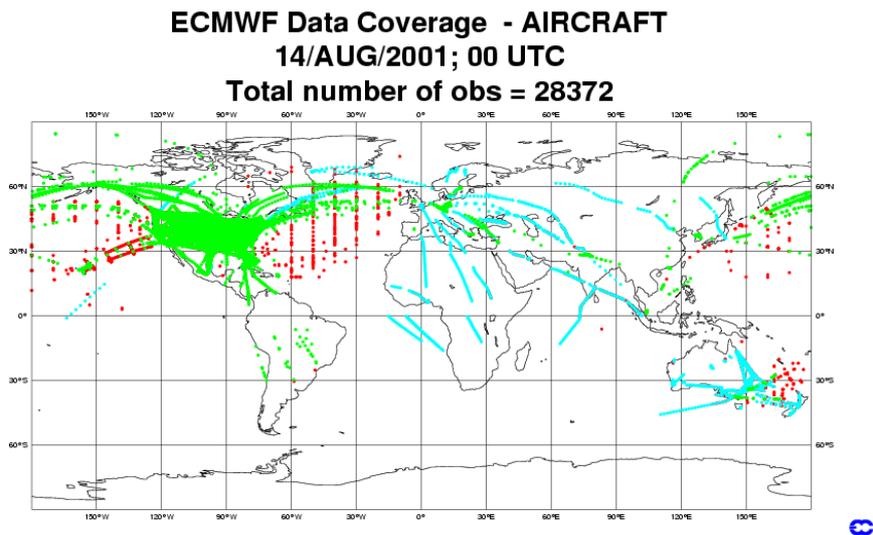


**Abb. 1.3:** Horizontale Drift der Radiosonden 1994, Neumayerstation (Antarktis).

19:33 UTC gestartete Radiosonde lieferte in 256 km horizontaler Entfernung (auf der Erdoberfläche) vom Startpunkt in nordöstlicher Richtung den letzten Messwert. Bei diesem Ballonflug wurden in der Stratosphäre Windgeschwindigkeiten (Westwind) von über 300 km/h gemessen. Diese hohen Geschwindigkeiten werden durch den zu dieser Zeit über der Antarktis stark ausgeprägten stratosphärischen Polarwirbel verursacht.

### 1.3 Flugzeugmessungen

Meteorologische Daten aus Flugzeugmessungen, werden umfangreich für die Datenassimilation verwendet. Abb. 1.4 zeigt die Positionen von 28.372 Flugzeugmessungen, die für einen speziellen Termin (14. August 2001, 0 UTC) in die globale ECMWF-Analyse assimiliert wurden.



**Abb. 1.4:** Globale Verteilung von Flugzeugmessungen, die für die Datenassimilation der globalen Wettervorhersage des ECMWF verwendet wurden (14.08.01, 00:00 UTC [ECMWF, 2001b]) Grün: ACARS; blau: AMDAR; rot: AIREP.

Den größten Anteil (64,2%) bilden die ACARS-Reports (Aircraft Communications, Addressing and Reporting System). Diese automatischen Wettermeldungen (i.a. Messwerte alle 5-6 min) werden vorwiegend von Linienflugzeugen erstellt und umfassen in der Regel Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die zugehörige Positions- und Zeitinformation. Nach einer neueren Studie von *Benjamin et al.* [1999] wird die Genauigkeit der gemessenen Windgeschwindigkeit mit 1,8 m/s bzw. der Temperatur mit 0,5 K angegeben. Einen Anteil von 27,1% besitzen die AIREP (Air Report), die mündlichen Wettermeldungen, die von den jeweiligen Piloten erstellt und vom Flugwetterdienst empfangen und weitergeleitet werden. AMDAR/ASDAR (Aircraft Meteorological Data Reporting/Aircraft to Satellite Data Relay) besitzen den kleinsten Anteil von 8,7%. Hierbei handelt es sich um automatische Systeme, die nur auf einer begrenzten Anzahl von Flugzeugen installiert sind.

Abb. 1.4 zeigt sehr deutlich, dass die Flugzeugmessungen nur eine unzureichende globale Überdeckung aufweisen. Die ACARS-Reports sind fast ausschließlich auf den Bereich über Nordamerika begrenzt. AIREP und AMDAR/ASDAR Messungen gibt es auch über anderen Regionen; es existieren allerdings grosse Erdbereiche, über denen keine Messungen erfolgen.

## 1.4 Satellitenfernerkundung

Eine der Gemeinsamkeiten der bisher behandelten Beobachtungssysteme (Boden- und Flugzeugmessungen) ist die ungleichmäßige und auch unzureichende globale Bedeckung. Nur durch die Anwendung von Satellitenverfahren können die so entstehenden Datenlücken, vor allem über den Ozeanen und Polargebieten geschlossen werden. Diese Verfahren besitzen das einzigartige Potential, die Erde als Ganzes im globalen Maßstab zu sondieren. Im Idealfall werden Messdaten zur Verfügung gestellt, die alle Regionen der Erdoberfläche abdecken. Bei Einrichtung und Betrieb operationeller Satellitensysteme können die Messdaten zudem mit geringer Zeitverzögerung bereitgestellt werden.

Seit dem Start des ersten meteorologischen Satelliten TIROS-1 am 1. April 1960 hat sich die Satellitenfernerkundung rasant entwickelt und ist aus der heutigen Meteorologie und Atmosphärenforschung nicht mehr wegzudenken (z.B. [*Kidder und Vonder Haar*, 2000]).

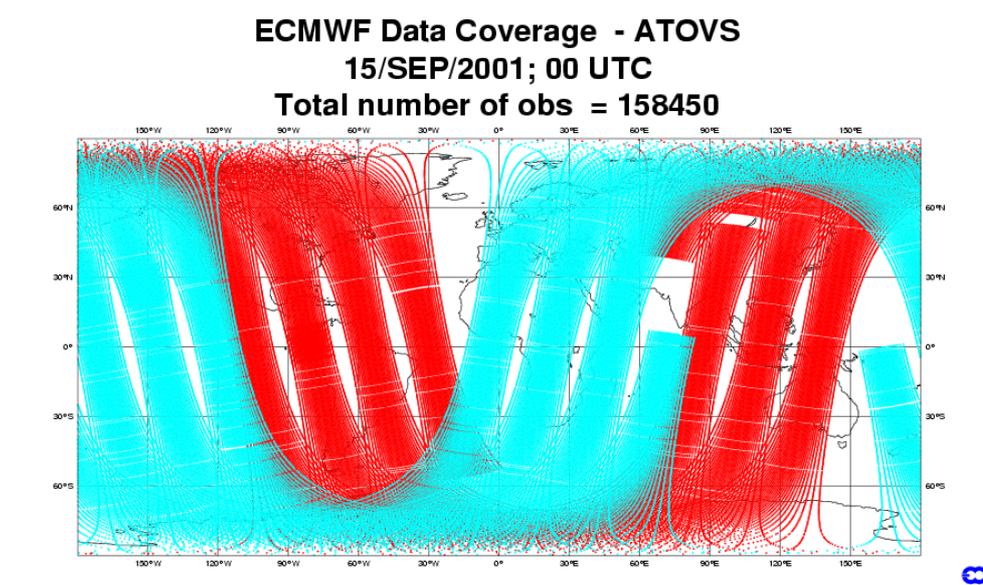
Die derzeit wichtigsten Sensorinstrumente an Bord der Satelliten sind hochauflösende Radiometer. Bei der Vertikalsondierung wird die empfangene Strahlung spektral analysiert, die Bestandteile können verschiedenen Atmosphärenschichten zugeordnet werden. Mit einem vorgegeben Temperatur- und Feuchteprofil (engl. „first guess“) als Startwert (abgeleitet aus numerischen Wettervorhersagen) können die Strahlungsübertragungsgleichungen „invertiert“ werden, um Temperatur- und Feuchteprofile zu erhalten. Die Qualität des „First Guess“ Profiles bestimmt dabei die Genauigkeit der abgeleiteten Profile mit [*Hayden*, 1988]. Die vertikale Auflösung der Profile beträgt nur ca. 5 km [*Ware et al.*, 1996].

Die derzeit operationell betriebenen Satellitensysteme werden nach polarumlaufenden und geostationären Satelliten unterschieden.

### 1.4.1 Polarumlaufende Satelliten

Als niedrigfliegend gelten Satelliten, deren Bahnhöhe unterhalb von ca. 1000 km liegt. Erreicht der Subsatellitenpunkt eines solchen Satelliten hohe Breiten (bis in die Nähe der Pole) wird er zusätzlich als polarumlaufend bezeichnet.

Die Sensoren der niedrigfliegenden Satelliten erreichen durch geringere Distanz zur Erdoberfläche im Vergleich zu geostationären Satelliten eine höhere räumliche Auflösung bei der Sondierung der Erdatmosphäre. Mit zwei polarumlaufenden Satelliten, deren Bahnen aufeinander abgestimmt sind und geeignetem Sichtwinkel der Instrumente ist innerhalb von 6 Stunden (siehe Abb. 1.5) eine nahezu komplette Sondierung der gesamten Erdatmosphäre möglich.



**Abb. 1.5:** Globale Verteilung von NOAA-Satellitendaten (ASMU-A) die für die Datenassimilation zur globalen Wettervorhersage des ECMWF verwendet wurden (15.09.01, 00:00 UTC [ECMWF, 2001b]) Rot: NOAA-15, Hellblau: NOAA-14.

Es werden zwei operationelle polarumlaufende Satellitensysteme betrieben, das russische METEOR-System und die von der US-amerikanischen NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) betriebenen TIROS-Satelliten (auch POES, Polar-Orbiting Environmental Satellites, genannt). Für die Datenbereitstellung im Rahmen der Globalen Wettervorhersage sind die Niedrigflieger der NOAA relevant. Die jetzige Generation dieser Satelliten wird als ATN bezeichnet (Advanced TIROS New).

Die US-amerikanische NOAA betreibt gegenwärtig 2 operationelle polarumlaufende Satelliten, NOAA-14 und -15. NOAA-15 wurde im März 1998 gestartet und ist bereits, im Gegensatz zu NOAA-14, mit der neuesten Generation wissenschaftlicher Geräte ausgerüstet. Beide Satelliten befinden sich in einer sonnensynchronen Erdumlaufbahn mit einer Orbithöhe von ca. 830 km bei einer Inklination der Bahnebene von  $98,7^\circ$ . Der parallele und aufeinander abgestimmte Betrieb beider Satelliten garantiert, dass die Datenlücken für jeden Ort der Erde nicht größer als 6 Stunden sind.

Die Radiometereinheit an Bord von NOAA-15 besteht aus drei Komponenten: dem Hauptinstrument zur Erzeugung von Bildern der Horizontalstruktur der Atmosphäre, dem

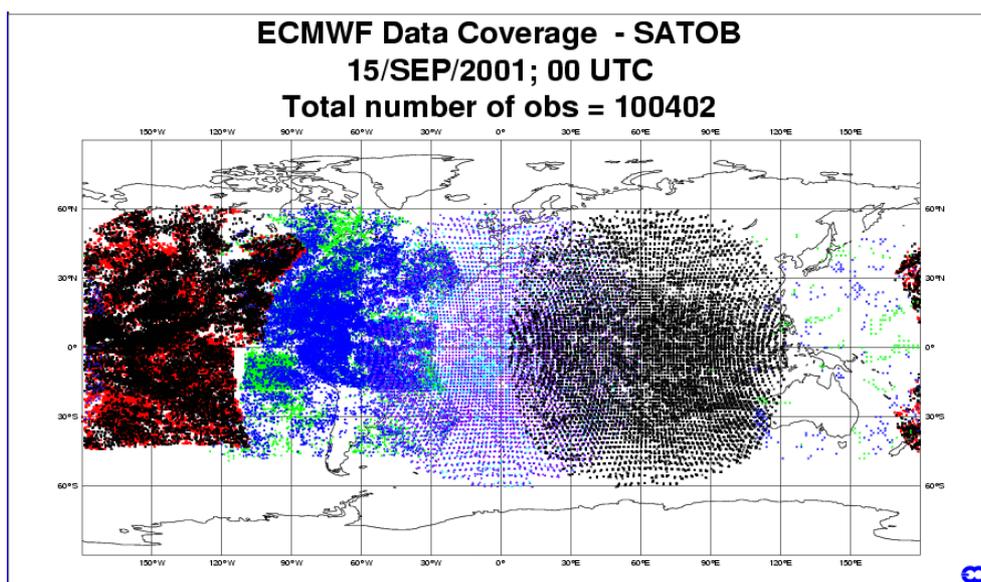
AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer), und dem Vertikalsondierungsinstrument ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder), das sich aus dem AMSU-A und -B (Advanced Microwave Sounder Unit), dem High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3) und dem SSU (Stratospheric Sounding Unit) zusammensetzt.

Das AVHRR/3 verfügt über 6 Spektralkanäle im Bereich von 0,58 bis 12,5  $\mu\text{m}$  und wird zur Fernerkundung der Bewölkung und von Oberflächentemperaturen (Land, Ozeane, Eis) eingesetzt. Die horizontale Auflösung beträgt ca. 1,1 km. Das AMSU-A misst im GHz-Bereich und erstellt Temperaturprofile mit 40 Druckniveaus von der Erdoberfläche bis zu 45 km Höhe, wobei eine horizontale Auflösung (Nadir) von 50 km erreicht wird. Mit dem AMSU-B können bewölkungsunabhängig Feuchteprofile bestimmt werden. Die horizontale Auflösung beträgt 15 km. Das HIRS/3-Radiometer dient ebenfalls zur Vertikalsondierung, allerdings unter wolkenfreien Bedingungen. Es kann Temperatur- und Feuchteprofile im Höhenbereich von der Erdoberfläche bis ca. 40 km in 20 Druckniveaus mit einer horizontalen Auflösung von ca. 20 km messen. Zusätzlich werden Ozongehalt und Wolkeneigenschaften bestimmt.

Unter wolkenfreien Bedingungen werden im Höhenbereich von 15 bis 40 km Temperaturdifferenzen zwischen TOVS-Daten und NCEP (National Centers for Environmental Prediction)-Wetteranalysen von 1 bis 2 K (Standardabweichung) beobachtet [Rocken *et al.*, 1997].

#### 1.4.2 Geostationäre Satelliten

Geostationäre Satelliten befinden sich ständig über derselben Stelle der sich drehenden Erde. Die Bahnebene dieser Satelliten liegt in der Äquatorebene der Erde, die Umlaufzeit entspricht der Erdrotationsdauer. Für die Wettervorhersage besitzen geostationäre Satelliten den Vorteil, dass der von der Erde sichtbare Bereich mit einer höheren zeitlichen



**Abb. 1.6:** Globale Verteilung von Daten geostationärer Satelliten, die für die Datenassimilation zur globalen Wettervorhersage des ECMWF verwendet wurden (15.09.01, 00:00 UTC [ECMWF, 2001b]).

Auflösung beobachtet werden kann, als es mit polarumlaufenden Satelliten möglich ist (Abb. 1.6). Somit können dynamische Vorgänge, die zeitliche Änderung von Wettersystemen, gut erfasst werden.

Derzeit werden 6 geostationäre Satelliten betrieben: GOES-W (USA), GOES-E (USA), METEOSAT (Europa), GMS-5 (Japan), INSAT-2E (Indien) und GOMS (Russland). Nur die Daten von GOES- und METEOSAT-Satelliten werden für die Wettervorhersage genutzt.

### **GOES-Satelliten**

Die NOAA betreibt zwei operationelle, geostationäre Satelliten, GOES-8 auf 75° West, auch als GOES-Ost bezeichnet, und GOES-10 auf 135° West (GOES-West).

Die Sensorsysteme der GOES-Satelliten unterteilen sich in die Bilderzeugungseinheit (GOES-I-M Imager) und die Sondierungseinheit (GOES-I-M Sounder). Der Imager besitzt 5 Kanäle (1 VIS, 4 IR) und zeichnet die terrestrische Strahlung und die von der Erde reflektierte Sonnenstrahlung auf und ermöglicht die regelmäßige Erzeugung (im 30 min-Abstand) von Satellitenbildern des sichtbaren Erdbereiches.

Die Sounder-Einheit ist ein 19-kanaliges Radiometer (Kanäle im VIS und kurz- bis langwelligem IR). Neben Ozonverteilungen und Oberflächeneigenschaften der Erde, werden Temperatur- und Wasserdampfprofile gemessen. Eine ausführliche Einführung in die neue Generation der GOES-Satelliten (GOES-I, erster Start 1994), die Datenprodukte und ihre operationelle Bereitstellung geben *Menzel und Purdom* [1994].

Vergleiche von GOES-Profilen mit NCEP-Analysen [*Rocken et al.*, 1997] ergaben bis 25 km Höhe Abweichungen von 2-3 K. Oberhalb dieser Höhe weisen die GOES-Messungen einen starken Warm-Bias (10 K) gegenüber den Analysen auf.

### **METEOSAT**

EUMETSAT betreibt ebenfalls ein geostationäres Satellitensystem, die METEOSAT-Satelliten. Der erste, METEOSAT-1, wurde 1977 gestartet. Seit Juni 1998 ist METEOSAT-7 der operationelle Satellit, ein weiterer (METEOSAT-6) steht als Reservesatellit zur Verfügung. Das hochauflösende Radiometer MVIRI der METEOSAT-Satelliten kann in drei Kanälen messen, dem VIS (0,5 bis 0,9  $\mu\text{m}$ ) für Fotos bei Tageslicht, dem WV (5,7 bis 7,1  $\mu\text{m}$ ) zur Bestimmung des Wassergehalts in der oberen Troposphäre und dem IR-Kanal (10,5 bis 12,5  $\mu\text{m}$ ) zur Bilderstellung zu Tages- und Nachtzeiten sowie zur Bestimmung von Wolken- und Meeresoberflächentemperaturen. Jeweils halbstündlich wird ein neues Bild des von METEOSAT aus sichtbaren Erdbereiches zur Verfügung gestellt. Aus den Satellitenbildern werden zusätzliche meteorologische Produkte, wie UTH (Upper Troposphere Humidity), Wolkenbedeckung und Wolkenbewegungen (Wind) abgeleitet und für die Datenassimilation bereitgestellt.

Der Start des ersten Satelliten (MSG-1) der zweiten METEOSAT-Generation (METEOSAT Second Generation) mit einer neuen und verbesserten Gerätegeneration ist für Anfang 2002 vorgesehen. Er wird die Erde mit einer Auflösung von 12 Spektralkanälen beobachten und alle 15 Minuten ein Bild zur Verfügung stellen und vertikale Temperatur- und Feuchteprofile liefern.

### 1.4.3 Zukünftige operationelle polarumlaufende Satellitensysteme

#### EPS (METOP)

Das EPS (EUMETSAT Polar System) ist die europäische Komponente eines zukünftigen, gemeinsamen US-amerikanisch/europäischen polarumlaufenden Satellitensystems. Die US-amerikanische Komponente ist das TIROS-Satellitensystem (Kap. 1.4.1).

Der Start des ersten Satelliten (METOP-1) ist für das Jahr 2005 vorgesehen. Die Orbithöhe wird 835 km betragen. Einige Instrumente an Bord werden mit denen der TIROS-Satelliten identisch sein: AVHRR, HIRS, AMSU-A (bereitgestellt durch die USA) und MHS (Microwave Humidity Sounder), welches durch Europa bereitgestellt wird. Weitere neue Geräte sind: IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer mit 8400 Kanälen), ASCAT (Advanced Scatterometer), GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2). Zusätzlich ist ein GNSS-Radiokkultationsempfänger (GRAS, GNSS Receiver for Atmospheric Sounding) als Nutzlast geplant. Eine detaillierte Beschreibung des EPS-Projektes ist über die Internetseiten der EUMETSAT zugänglich [EUMETSAT, 2001].

#### NPOESS (National Polar Orbiting Environmental Satellite System)

Das US-amerikanische NPOESS-Satellitensystem ist die Nachfolgeneration der TIROS-Satelliten. Es wird das derzeit getrennte militärische und zivile Wettersatellitenprogramm der USA vereinen. Der Start des ersten Satelliten ist für 2009 vorgesehen [NPOESS, 2001].

Im Rahmen des Programms werden eine Reihe neuer wissenschaftlicher Geräte entwickelt. Zur Nutzlast der Satelliten gehören: VIIRS (Visible/Infrared Imager Radiometer Suite), CMIS (Conical Microwave Imager/Sounder), CrIS (Crosstrack Infrared Sounder), OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite), SESS (Space Environment Sensor Suite) und der ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder). Auch NPOESS wird über GNSS-Radiokkultationsempfänger verfügen: GPSOS (Global Positioning System Occultation Sensor).

Für weiterführende Informationen und detaillierte Beschreibungen der wissenschaftlichen Geräte und des NPOESS-Projektes wird auf das Internet verwiesen [NPOESS, 2001].

## 1.5 Datenassimilation und Wettervorhersage

### 1.5.1 Datenassimilation für Wettervorhersagen

Mathematisch gesehen beinhaltet die numerische Wettervorhersage ein Differentialgleichungssystem, das die Entwicklung des Atmosphärenzustandes in einer räumlichen Diskretisierung (Gitterpunkte) beschreibt. Der Anfangszustand des Systems (Luftdruck, Temperatur, Feuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit) an den Punkten des Rechengitters muss bekannt sein, um die zukünftige Wetterentwicklung berechnen zu können.

Zur Bestimmung dieses Anfangszustandes werden die Daten des meteorologischen Beobachtungsnetzes benutzt. Informationen über die Vertikalstruktur der Atmosphäre liefern dabei die in Kap. 1.2 bis 1.4 beschriebenen Verfahren.

Da nicht für alle Gitterpunkte Werte vorhanden sind (u.a. Ozeane, Polargebiete), wird die Wettervorhersage zu einem unterbestimmten Anfangswertproblem - ein Grund für falsche

Vorhersagen. Die Unterbestimmtheit wird durch die Einbeziehung zusätzlicher Informationen reduziert. So werden physikalische Zusammenhänge zwischen den atmosphärischen Prozessen in die Festlegung des Anfangszustandes einbezogen, die allerdings aus vorherigen Messungen abgeleitet wurden. Damit werden aber Messungen von zurückliegenden Zeitpunkten für die Festlegung des augenblicklichen Zustandes (Anfangszustand für die Vorhersage) mitbenutzt. Die Definition des dreidimensionalen Anfangszustandes wird somit um die zeitliche (vierte) Dimension erweitert. Als Aufgabe der vierdimensionalen Datenassimilation kann formuliert werden: Der wahrscheinliche augenblickliche Zustand der Atmosphäre und die zugehörige Fehlerinformation (an allen Gitterpunkten) soll aus unvollständigen und fehlerhaften Beobachtungen zusammen mit einer näherungsweisen Beschreibung der Atmosphäre durch Modellgleichungen ermittelt werden.

Die vierdimensionale Datenassimilation steht gegenwärtig im Mittelpunkt intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, da eine genauere Erfassung des Anfangszustandes der Atmosphäre eine Verbesserung der numerischen Wettervorhersage verspricht. Es geht darum, die vorhandenen Beobachtungen optimal zu nutzen. Durch die Kombination verbesserter Assimilationsverfahren mit zusätzlichen Beobachtungen aus bisher datenleeren Gebieten wird eine spürbare Verbesserung der Vorhersagen erwartet.

### 1.5.2 Globale Wettervorhersagen

Regelmäßige operationelle und globale Wettervorhersagen werden z.B. vom ECMWF und vom DWD bereitgestellt, die für 10 bzw. 5 Tage (DWD) im voraus gültig sind. Grundlage für die Vorhersagen sind meteorologische Analysen, die jeweils für die synoptischen Termine (00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC) durchgeführt werden. Beim DWD werden die Analysen für die Zeitpunkte 06:00 und 18:00 UTC mit dem Global-Modell (GME) als Grundlage für zwei Vorhersagen täglich genutzt. Dabei wird die Analyse für den jeweiligen Atmosphärenzustand jeweils 7 Stunden später in Kombination mit der Vorhersage durchgeführt (13:00 und 01:00 UTC). Der durch die Analyse ermittelte wahrscheinlichste Atmosphärenzustand wird zur Initialisierung der Vorhersage genutzt. Vorhergesagt werden Temperatur, relative Feuchte, Windrichtung und –geschwindigkeit und eine Vielzahl zusätzlicher Parameter (z.B. Bewölkung, Niederschlagswahrscheinlichkeiten, Wellenhöhen und –richtungen). Diese Werte werden mit einer Maschenweite von 60 km (DWD) bzw. 40 km (ECMWF) auf der Erdoberfläche für 31 (bis 31 km Höhe, DWD) bzw. 60 (bis 65 km Höhe, ECMWF) vertikale Schichten bereitgestellt. Die Vorhersagen werden über den Vorhersagezeitraum mit jeweils 6 h zeitlichem Abstand bereitgestellt [ECMWF, 2001a; DWD, 2000].

### 1.5.3 Operationelle Bereitstellung von meteorologischen Daten

Die Eingabedaten für die Datenassimilation im Rahmen der operationellen Wettervorhersage müssen Anforderungen bezüglich ihrer zeitlichen Verfügbarkeit erfüllen, die hier kurz am Beispiel der Wettervorhersage des DWD erläutert werden, die um 01:00 UTC durchgeführt wird (Kap. 1.5.2). Diese Vorhersage basiert auf der meteorologischen Analyse des globalen Atmosphärenzustandes für den synoptischen Zeitpunkt 18:00 UTC des Vortages. Zu Berechnung werden meteorologische Daten benutzt, die im Zeitintervall zwischen 15:00 und 21:00 UTC gemessen werden. Ein Radiosondenprofil, das 21:00 UTC

gemessen wurde, muss demzufolge bis 01:00 UTC des folgenden Tages an das Vorhersagezentrum übertragen werden. Das Zentrum benötigt allerdings durch eine umfangreiche Qualitätskontrolle der Daten noch einen zeitlichen Vorlauf von ca. 1 h [DWD, 2000], woraus eine maximale Zeitspanne für die Datenübertragung der 21:00 UTC-Messungen von 3 Stunden resultiert. Für Messungen, die 15:00 UTC stattfanden, also auch noch für die 18:00 UTC-Analyse berücksichtigt werden, beträgt diese Zeitspanne 9 Stunden. Somit besteht die Anforderung einer maximalen Zeitdifferenz von 3 Stunden zwischen Messung und Datenbereitstellung für die Wettervorhersage des DWD (Verfügbarkeit der in diesem Falle aktuellsten, der 21:00 UTC-Messungen).



## 2 GNSS-RADIOOKKULTATION

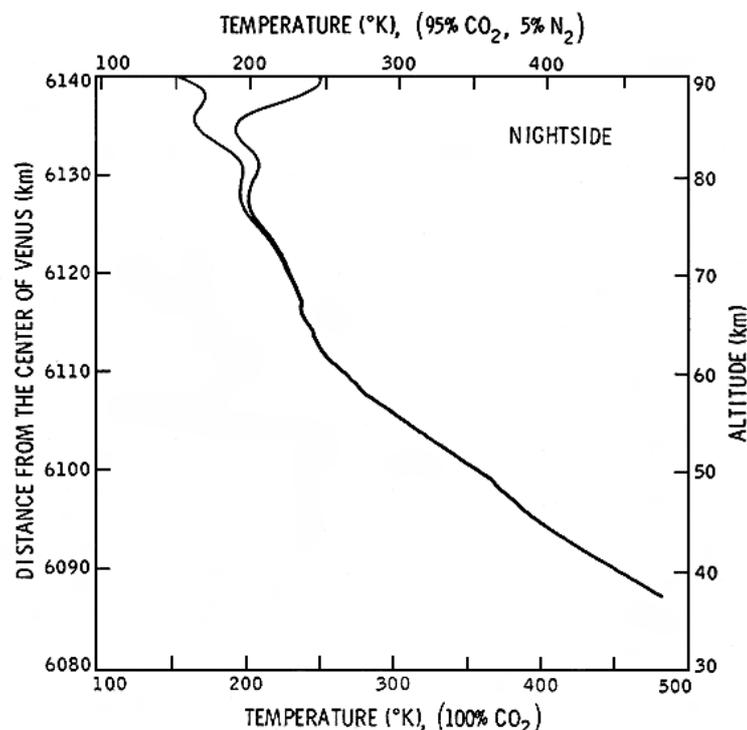
Nach der Kurzcharakterisierung der operationell für die globale Wettervorhersage genutzten Fernerkundungssysteme wird hier die GNSS-Radiookkultationsstechnik als neues Messverfahren detailliert eingeführt.

Die historischen Wurzeln der Okkultationsverfahren werden beschrieben. Erst mit dem Aufbau der globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS) wurde der Einsatz der Okkultationstechnik zur Sondierung der Erdatmosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung möglich. Die Systeme und die von ihnen ausgestrahlten Signale werden charakterisiert. Erstmals wurde das US-amerikanische GPS-System im Rahmen des GPS/MET-Experiments für eine Machbarkeitsstudie der neuen Technik für die Fernerkundung der Erdatmosphäre genutzt. Die Pilotstudie wird beschrieben, ein Überblick über derzeit laufende und zukünftige GNSS-Radiookkultationsmissionen wird gegeben.

### 2.1 Geschichte der Radiookkultation

#### 2.1.1 Planetare Atmosphärensondierung

Erste Vorschläge zur Nutzung der Radiookkultationsmethode für die Erforschung planetarer Atmosphären kamen im Jahr 1962 von einer Gruppe der Stanford Universität in Vorbereitung der Marsmissionen Mariner 3 und 4 der NASA [Yunck *et al.*, 2000; Melbourne *et al.*, 1994]. In der Folgezeit wurde die Radiookkultationstechnik zu einem wichtigen Instrument der Planetenforschung. Nahezu jeder Planet unseres Sonnensystems



**Abb. 2.1:** Temperaturprofile der Venusatmosphäre, abgeleitet aus Radiookkultationsdaten der Mariner-5-Satellitenmission (aus [Fjeldbo *et al.*, 1971]).

wurde mit dieser Technik untersucht. Dabei wurden u.a. auch zugehörige Monde, Planetenoberflächen und spezielle Erscheinungen, wie Ringsysteme erforscht. Detaillierte Beschreibungen dieser Aktivitäten auf US-amerikanischer Seite im Rahmen der Mariner-, Pioneer- und Voyager-Satellitenmissionen finden sich z.B. bei *Kliore et al.* [1965], *Fjeldbo und Eshleman* [1968], *Fjeldbo et al.* [1971], *Eshleman* [1973], *Lindal et al.* [1987, 1983], *Marouf et al.* [1986], *Tyler* [1987] und *Lindal* [1992]. Abb. 2.1 zeigt als Beispiel für die planetaren Untersuchungen ein Vertikalprofil der Venusatmosphäre, welches aus Radiookkultationsdaten der Mariner 5-Mission abgeleitet wurde.

Seltener sind in der Literatur die Aktivitäten russischer Wissenschaftler zur Erforschung der Venus erwähnt, die in den siebziger Jahren begannen. Einen guten Überblick geben z.B. *Yakovlev et al.* [1991].

### 2.1.2 Sondierung der Erdatmosphäre mit Okkultationsverfahren

Im Unterschied zu planetaren Atmosphären, deren Struktur weitestgehend unbekannt war, war der Aufbau der Erdatmosphäre in den Pionierzeiten der Okkultationstechnik schon recht gut bekannt. Für eine Sondierung der Erdatmosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung unter Verwendung von Okkultationsverfahren wäre eine entsprechende Vielzahl von Sendern und Empfängern nötig gewesen, um Atmosphären-daten im globalen Maßstab unter operationellen Maßstäben z.B. für die Wettervorhersage und die Atmosphärenforschung zur Verfügung zu stellen. Weiterhin wurden hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt, da die Refraktionseffekte der Erdatmosphäre sehr klein sind (Brechung in der Nähe der Erdoberfläche ca.  $1^\circ$ ). *Kursinski* [1997] formulierte diese Tatsache so, dass das Kostenniveau für die Schaffung einer geeigneten Infrastruktur das Interesse an einer solchen weit übersteigen würde.

Es gab jedoch schon in den 60er Jahren [*Lusignan*, 1969; *Fischbach*, 1965] Vorschläge, die Okkultationstechnik für die Sondierung der Erdatmosphäre einzusetzen. *Fischbach* [1965] schlug eine Kleinsatellitenmission mit einem optischen Sensor zur Aufzeichnung von täglich ca. 1.300 Sternenokkultation vor. Hierbei sollte der Brechungswinkel direkt gemessen werden. *Lusignan et al.* [1969] erkannten das Potential der Okkultationsmessungen für eine Verbesserung der globalen Wettervorhersage, vor allem wiesen die Autoren auf die Unabhängigkeit von der Bewölkung hin. Sie schlugen eine Mehrsatellitenmission vor, bei der jeweils zwei Satelliten phasenverschoben in einem polarumlaufenden Orbit kontinuierlich Okkultationsmessungen bei einer Frequenz von 5 GHz durchführen sollten. Drei dieser Systeme sollten ein komplettes globales Monitoring der Erdatmosphäre mit einer zeitlichen Auflösung von 12 Stunden ermöglichen.

Beide Projekte wurden nicht realisiert. In den 70er und 80er Jahren kam es jedoch zu einigen Experimenten im optischen Wellenlängenbereich und im C-Band [*Volkov et al.*, 1987; *Gurvich et al.*, 1982; *Rangaswamy*, 1976]. Parallel dazu gab es verschiedene theoretische Studien, die sich hauptsächlich mit der Ableitung der atmosphärischen Refraktivität und der erreichbaren Genauigkeit der abgeleiteten atmosphärischen Parameter beschäftigten (z.B. [*Sokolovskiy*, 1990; *Gorbunov*, 1990; 1988; *Douglas et al.*, 1980]).

Mit der Etablierung des Global Positioning Systems (GPS), einem Satellitensystem zur präzisen Navigation auf der gesamten Erde, änderte sich die Situation für die Nutzung der

Radiokkultations-technik drastisch. Durch die kontinuierliche Verfügbarkeit von ca. 30 Sendesatelliten und der Nutzung eines Systems mit sehr hohem Genauigkeitspotential entstand die Chance, sozusagen als Nebenprodukt der Navigation, die Radiokkultations-technik kostengünstig für die Sondierung der Erdatmosphäre einzusetzen.

Im Rahmen einer 1987 begonnenen NASA-Initiative („Mission to Planet Earth“) zur Langzeitbeobachtung der Erde entstand am JPL ein Expertenteam, das die vielfältigen Anwendungen von GPS-Empfängern auf Satelliten für die Geowissenschaften untersuchte. Bereits in dieser Zeit entstanden Abschätzungen des Genauigkeitspotentials von GPS-Okkultationsmessungen die durch das GPS/MET-Experiment (Kap. 2.3) bestätigt wurden [Yunck *et al.*, 2000]. Im Ergebnis der Arbeit dieser Expertengruppe entstand ein Vorschlag an die NASA zur Nutzung von GPS für die Erdbeobachtung: das GGI-Proposal (GPS Geoscience Instrument, [Melbourne *et al.*, 1988]). Auch auf russischer Seite entstanden bereits 1987 Vorschläge zur Nutzung von Navigationssatelliten für die Sondierung der Erdatmosphäre [Gurvich und Krasil'nikova, 1990].

## 2.2 Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS)

### 2.2.1 Global Positioning System (GPS)

Das NAVSTAR-GPS (NAVigation by Satellite Timing And Ranging), oft einfach auch als GPS bezeichnet, ist ein Ortungssystem, das ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt wurde. Es löste seit den 70er Jahren Schritt für Schritt das von der US-Marine betriebene TRANSIT-System ab.

GPS ist ein permanent verfügbares System, das eine kontinuierliche Positionsbestimmung durch Empfang der Signale von mindestens vier verschiedenen GPS-Satelliten erlaubt. Detaillierte Beschreibungen des Systems und verschiedener Anwendungen geben z.B. Bauer [1997], Kaplan [1996], Leick [1995] oder auch Hofmann-Wellenhof *et al.* [1992].

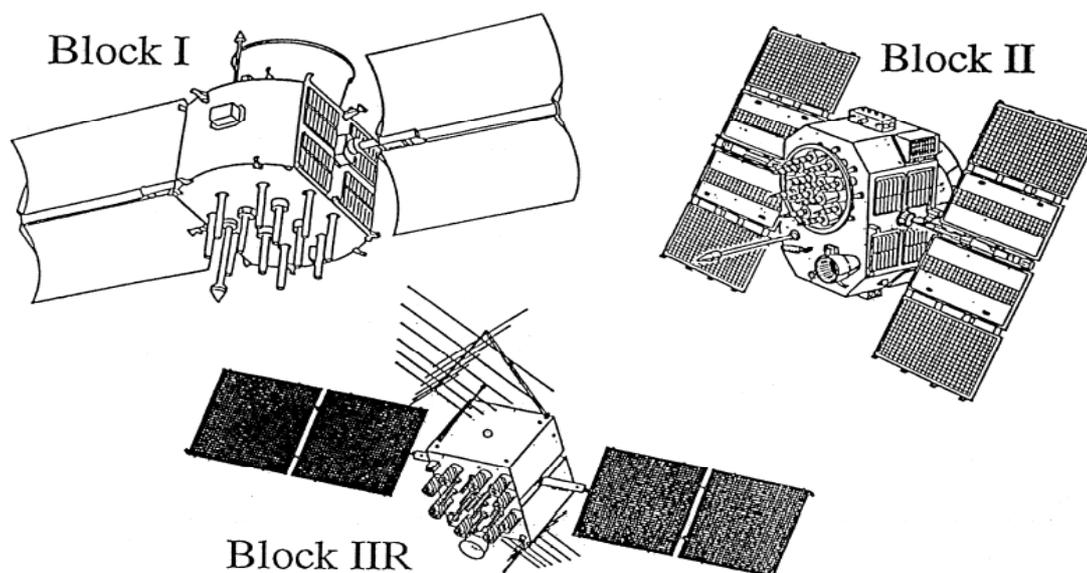


Abb. 2.2: GPS-Satelliten verschiedener Generationen (aus [Fliegel *et al.*, 1992]).

Die gegenwärtige Konstellation der GPS-Satelliten ermöglicht zu jedem Zeitpunkt an jedem Punkt der Erde die Beobachtung von mindestens vier Satelliten gleichzeitig. Dies wird durch eine Konstellation von ursprünglich 24 (derzeit 29) Satelliten (21 aktive und 3 aktive Reservesatelliten, aktueller Status: <http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>) erreicht. Diese umkreisen die Erde in einer Höhe von ca. 20.200 km in 6 nahezu kreisförmigen Bahnebenen, die um  $55^\circ$  gegenüber der Äquatorebene geneigt sind. Die Umlaufzeit der Satelliten beträgt 11 Stunden und 58 Minuten, wodurch die Satellitenspuren auf der Erdoberfläche um ca.  $1^\circ$  pro Tag westwärts wandern.

Der erste GPS-Satellit wurde im Februar 1978 gestartet und war der erste der sogenannten Block I-Serie, die aus insgesamt 11 Satelliten bestand und eine Inklination von  $63^\circ$  besaßen. Heute ist kein Block I-Satellit mehr aktiv. Die gegenwärtige Konstellation besteht hauptsächlich aus Block II/IIa-Satelliten, die durch Block IIR-Satelliten (Abb. 2.2) ergänzt sind. Der Start des ersten Block II-Satelliten erfolgte im Februar 1989. Die Satelliten besitzen eine charakteristische Nummer (SVN, Space Vehicle Number). Die Zuordnung innerhalb der jeweils aktuellen Gesamtkonstellation ist durch die sogenannte PRN (Pseudo Random Number) gegeben. Die PRN nicht mehr aktiver GPS-Satelliten wird wieder neu vergeben. Im Verlauf der weiteren Arbeit wird die PRN zur Kennzeichnung der GPS-Satelliten verwendet.

### Struktur der GPS-Satellitensignale

Die von den GPS-Satelliten verwendeten Frequenzen werden aus der Grundfrequenz  $f_0$  des Satellitenoszillators abgeleitet (Tab. 2.1). Jeder GPS-Satellit sendet permanent Signale auf zwei Trägerfrequenzen, die mit  $L1$  und  $L2$  bezeichnet werden. Diese Signale werden mit sogenannten PRN-Codes und der Navigationsnachricht moduliert, die wichtige Zusatzinformationen für den Nutzer enthält, z.B. Informationen über GPS-Uhrenfehler und Bahninformationen der GPS-Satelliten. Der C/A Code ist nur auf  $L1$  moduliert, der P-Code auf beiden Trägersignalen  $L1$  und  $L2$ .

Komponente	Frequenz [MHz]
Grundfrequenz	$f_0=10,23$ ( $\lambda_0=29,3$ m)
Trägerfrequenz L1	$f_1=154 \times f_0= 1575,42$ ( $\lambda_1=0,19$ m)
Trägerfrequenz L2	$f_2=120 \times f_0= 1227,60$ ( $\lambda_2=0,24$ m)
P-Code P(t)	$f_0=10,23$
C/A-Code C(t)	$f_0/10=1,023$
Navigationsnachricht D(t)	$f_0/204600=50 \times 10^{-6}$

**Tab. 2.1:** Zusammensetzung und Struktur der GPS-Signale.

Zwei Maßnahmen des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums (Department of Defense, DoD) führen zur Einschränkung der erreichbaren Positionierungsgenauigkeit für zivile Nutzer, Anti-Spoofing (AS) und Selective Availability (SA). SA wurde am 4. Mai 2000 gegen 04:00 UTC vorläufig abgeschaltet. Beide Maßnahmen haben bzw. hatten einen

wesentlichen Einfluss auf die Auswertung von GPS-Okkultationsmessungen und werden daher kurz erläutert.

Übersetzt bedeutet das englische Verb „to spoof“ beschwindeln. Mit AS soll verhindert werden, dass ein im militärischen Sinne „feindlicher“ Sender irreführende Signale ausstrahlen kann, die zu einer falschen Positionsbestimmung im GPS-Empfänger führen würden. Dies wird durch die Verschlüsselung des P-Codes verhindert, er wird zum geheimen Y-Code. Ohne spezielle Ausrüstung kann ein nichtautorisierter Nutzer bei aktiviertem AS in Echtzeit nur noch den C/A-Code und somit nur noch eine Frequenz nutzen, da das  $L_2$ -Signal mit dem geheimen Y-Code moduliert ist. Jedoch können mit verschiedenen Techniken, auch ohne Kenntnis des Y-Codes, beide Trägerfrequenzen genutzt werden. Im „Black-Jack“-GPS-Empfänger (TRSR-2) an Bord des CHAMP-Satelliten wird eine sogenannte Kreuzkorrelationstechnik verwendet (u.a. [Bauer, 1997]), die dieses Problem beseitigt.

Selective Availability bedeutet übersetzt soviel wie "ausgewählte Verfügbarkeit". Dabei steuert der Systembetreiber, welches Genauigkeitspotential allgemein, also für militärische und zivile Nutzer, zur Verfügung gestellt wird. Einerseits wurde dies mit der Übermittlung definiert falscher Orbitinformationen über die Navigationsnachricht erreicht. Zusätzlich wurden die Trägersignale durch Manipulation des Satellitenszillators künstlich verwascht (engl. „clock dithering“). Die Amplitude dieses unregelmäßigen Effekts beträgt bis zu ca.  $0,3 \mu\text{s}$  (ca. 100 m) bei einer Periode von wenigen Minuten. SA wurde am 2. Mai 2000 deaktiviert. Der Effekt und auch der Einfluss der Abschaltung von SA auf die Variationen des GPS-Satellitenuhrenfehlers wird in Kap. 3.2.5 und 6.9.1 näher untersucht (siehe auch [Wickert et al., 2001a; 2002a]).

Die Verwendung differentieller Techniken (Kap. 3.2.1) bei der GPS-Signalverarbeitung kann den GPS-Uhrenfehler, einschließlich des SA-Effektes, eliminieren. Bei der Prozessierung der GPS/MET-Okkultationsdaten (SA aktiviert) wurden dazu die Daten eines globalen GPS-Bodennetzes genutzt [Ware et al., 1996]. Dieses Bodennetz stellte Phasendaten mit einer Datenrate von 1 Hz zur Verfügung und erlaubte die Anwendung einer Doppeldifferenzentechnik zur Eliminierung der GPS-Satellitenuhrenfehler einschließlich des Effektes von SA (Kap. 3.2.2).

### 2.2.2 GLONASS (GLObales NAVigations Satelliten System)

Das russische Gegenstück zum US-amerikanischen GPS ist das GLONASS-System. Dessen Entwicklung wurde Anfang der siebziger Jahre in der ehemaligen UdSSR begonnen. Der Start des ersten GLONASS-Satelliten erfolgte im Oktober 1982. 1996 wurde die volle Ausbaustufe von 24 Satelliten fast erreicht (21 Satelliten). Anfang des Jahres 2001 waren allerdings nur noch 9 Satelliten verfügbar (aktuelle Konfiguration: <http://www.rssi.ru/SFCSIC/english.html>). Messungen mit GLONASS-Empfängern haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit des Systems dem des GPS (ohne aktiviertem SA) ebenbürtig ist [Bauer, 1997; Engler et al., 1997].

Die GLONASS-Satelliten umkreisen die Erde in 19.100 km Höhe und sind in drei Bahnebenen mit jeweils  $64,8^\circ$  Inklination angeordnet, also ca.  $10^\circ$  höher als die der GPS-Satelliten. Dies ermöglicht, im Gegensatz zu GPS eine (theoretisch) bessere Verfügbarkeit in höheren geografischen Breiten.

### Struktur der GLONASS-Satellitensignale

Die Trägerfrequenzen der GLONASS-Satelliten liegen im gleichen Frequenzbereich wie die der GPS-Satelliten (L-Band). Im Unterschied zu GPS besitzt jeder GLONASS-Satellit seine eigene Frequenz. Die nominalen Werte der GLONASS-Trägerfrequenzen werden durch folgende Formeln beschrieben:

$$f_1^k = f_{01} + k \cdot \Delta f_1, \quad (2.1)$$

$$f_2^k = f_{02} + k \cdot \Delta f_2; \quad (2.2)$$

mit den beiden Basisfrequenzen  $f_{01}=1,602$  GHz und  $f_{02}=1,246$  GHz. Die Frequenzen der mit  $k$  charakterisierten Satelliten unterscheiden sich um  $\Delta f_1=562,5$  kHz und  $\Delta f_2=437,5$  kHz.

Ebenso wie bei GPS werden beiden Trägersignalen durch Phasenmodulation Informationen aufmoduliert. Dem  $L1$ -Signal werden zwei PRN-Codes aufmoduliert, ein Grobcode (Modulationstakt 0,511 MHz) und ein präziser Code (5,11 MHz). Dem  $L2$ -Signal wird nur der präzise Code (P-Code) aufmoduliert. Dieser ist z. Zt. bekannt und wird in zivilen Empfängern verwendet. Die Nutzung wird jedoch vom russischen Verteidigungsministerium nicht empfohlen, da er jederzeit auf einen geheimen Code umgestellt werden kann. Analog zu GPS ist beiden Signalen die Navigationsnachricht aufmoduliert.

Die mit GLONASS bestimmten Positionen werden im russischen Referenzsystem PZ-90 (russ. Parametraja Systema-90) bestimmt. *Rossbach et al.* [1996] geben eine Transformationsvorschrift für die Koordinatentransformation der PZ-90 Koordinaten nach WGS-84 (World Geodetic System 1984) an. Danach werden die Systeme durch eine Drehung um die z-Achse um  $0,33''$  ineinander überführt, die Koordinaten unterscheiden sich also lediglich in der Längenangabe (in Mitteleuropa ca. 100 m).

### 2.2.3 GALILEO

Nach derzeitiger Planung wird im Jahr 2008 das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO mit insgesamt 30 Satelliten (27 aktive, 3 Reserve) vollständig operationell zur Verfügung stehen [ESA, 2001]. Die Satelliten werden die Erde in einer Höhe von ca. 23.200 km in drei Orbitebenen (Inklination  $56^\circ$ ) umkreisen. Es wird eine Echtzeit-Positionierungsgenauigkeit von bis zu 4 Metern erwartet. Diese soll für kommerzielle Nutzer mit einer hohen Zuverlässigkeit bereitgestellt werden. In einem ebenfalls kommerziell verfügbaren Modus ist auch die Nutzung differenzieller Techniken vorgesehen, die eine Positionierung mit mm-Genauigkeit erlauben.

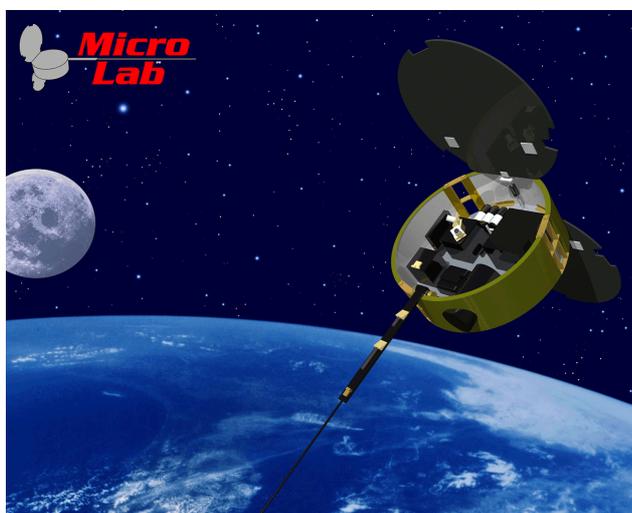
Die endgültige Signalstruktur der GALILEO-Satelliten ist derzeit (Mitte 2001) noch in der Definitionsphase [Benedicto et al., 2000]. Die Satelliten werden so konzipiert, dass bis zu 4 Trägersignale im L-Band ausgestrahlt werden können.

Mit der geplanten Etablierung von GALILEO noch vor 2010 als zweitem, gleichwertigen Satellitennavigationssystem neben GPS wird sich die Anzahl der Sendesatelliten für die Anwendung der GPS-Radiookkultation nahezu verdoppeln. Die Anzahl möglicher Okkultationsmessungen von niedrigfliegenden Satelliten wird damit deutlich vergrößert.

## 2.3 GPS/MET-Experiment

Im Jahr 1991 entstand bei UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) in Boulder ein Konzept für eine Satellitenmission (GPS/MET) zur Demonstration des Potentials der GPS-Radiokkulturation für die Sondierung der Erdatmosphäre. Das Projekt wurde von der NSF (National Science Foundation) gefördert [Yunck *et al.*, 2000]. Am 3. April 1995 wurde dann der wissenschaftliche Kleinsatellit Microlab-1 in der Nähe der Luftfahrtbasis Vandenberg (34,8° Nord; 120,5° West) mit einer Pegasus-Rakete von einem Flugzeug aus gestartet. Der Satellit wurde in einen kreisförmigen Orbit mit einer Inklination von 70° und einer Orbithöhe von ca. 740 km (Apogäum: 747 km, Perigäum: 733 km) gebracht. Für einen Erdumlauf benötigte der Satellit ca. 100 Minuten. An Bord von Microlab-1 (Abb. 2.3) befanden sich zwei wissenschaftliche Nutzlasten, ein optischer Sensor zur Detektierung von Blitzen und ein GPS-Empfänger (TRSR-1), der die Basis für das GPS/MET-Experiment bildete - dem Pilotprojekt für GPS-Radiokkultationsmessungen zur Sondierung der Erdatmosphäre im globalen Maßstab.

Der eingesetzte GPS-Empfänger verfügte über drei verschiedene Betriebsarten. Die ununterbrochene Aufzeichnung von GPS-Signalen mit einer Datenrate von 1/10 Hz (Low Rate) wurde zur präzisen Orbitberechnung für Microlab-1 genutzt. Weiterhin bestand die Möglichkeit, GPS-Radiokkultationsmessungen in der elektrisch neutralen (Phasenmessungen  $L1$  und  $L2$  mit 50 Hz Frequenz) und ionisierten Atmosphäre (Pseudorange- und Phasenmessungen  $P1$ ,  $P2$ ,  $L1$ ,  $L2$  mit 1 Hz) durchzuführen.

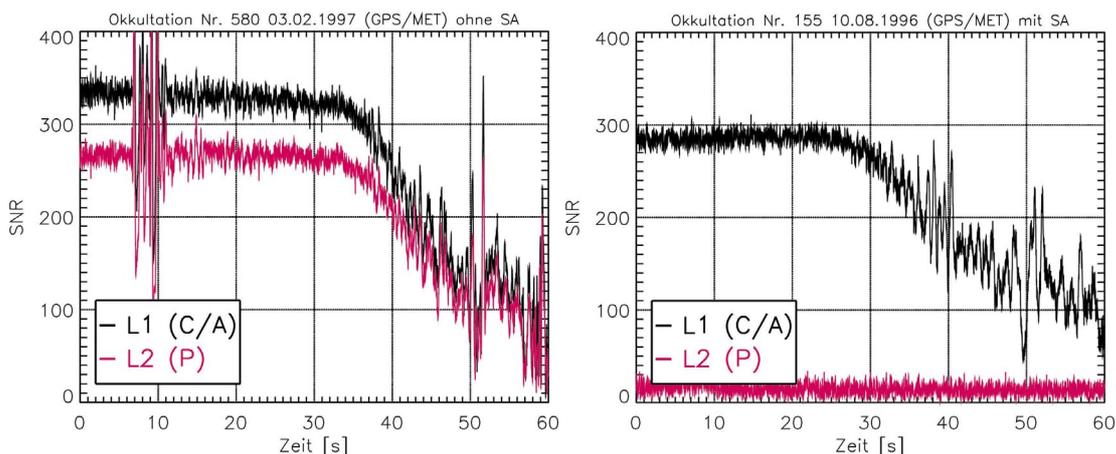


*Abb. 2.3: Der Satellit Microlab-1 mit dem GPS/MET-Experiment an Bord. Die Okkultationsantenne ist auf der rechten Seite zu sehen. Links davon befindet sich im Satelliteninnern der GPS-Empfänger (aus [Yunck *et al.*, 2000]).*

Während des GPS/MET-Experiments wurden ca. 50.000 Okkultationen aufgezeichnet. Davon wurden nur ca. 20% auch von UCAR ausgewertet (ca. 9.050, abgeschätzt nach [Rocken *et al.*, 1997], siehe auch Kap. 6.2). Die GPS-Messungen und auch die Ergebnisse ihrer Auswertung (siehe Tab. 2.2) wurden der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung gestellt. Für die Entwicklung des CHAMP-Prozessierungssystems

Verarbeitungsstufe	Kurzbeschreibung der Daten
Stufe 0 (Level 0)	wissenschaftlicher Datenstrom des Satelliten (GPS-Messungen und Daten der anderen wissenschaftlichen Instrumente)
Stufe 1 (Level 1)	50 Hz GPS-Okkultationsdaten ( $L1, L2$ ) des GPS/MET-Empfängers, 1 Hz Bodendaten ( $LC$ ) des GPS-Bodennetzes, Orbitdaten der GPS- und des GPS/MET-Satelliten
Stufe 2 (Level 2)	Atmosphärische Phasenwegverlängerung für jede Okkultation mit den zugehörigen Orbitinformationen im inertialen Koordinatensystem, Okkultationstabellen
Stufe 3 (Level 3)	Vertikalprofile atmosphärischer Parameter (Brechungswinkel, Refraktivität, atmosphärische Dichte, Trockentemperatur, spezifische Feuchte)

**Tab. 2.2:** Struktur der von UCAR zur Verfügung gestellten GPS/MET-Daten und -Prozessierungsergebnisse.



**Abb. 2.4:** Signalstärke (Signal zu Rauschverhältnis, SNR) der beiden Phasensignale ( $L1, L2$ ) während zweier GPS/MET-Okkultationen. **Links:** AS deaktiviert; **Rechts:** AS aktiviert.

wurden die GPS/MET-Daten schon im Vorfeld des Experimentes genutzt, um dessen Leistungsfähigkeit zu testen [Wickert et al., 2001a].

Das GPS/MET-Experiment verlief sehr erfolgreich. Erstmals wurde ein umfangreicher Datensatz eines neuartigen Messverfahrens für die Atmosphärenforschung bereitgestellt. Weiterhin konnten wichtige Erfahrungen über Eigenschaften und Verhalten der Okkultationssignale gewonnen werden. Diese Erfahrungen ermöglichten die Entwicklung einer neuen GPS-Empfängergeneration („BlackJack“, TRSR-2), die auch auf CHAMP eingesetzt wird.

Allerdings mussten bei der Realisierung des GPS/MET-Experiments folgende Einschränkungen in Kauf genommen werden:

- gute Datenqualität nur in Perioden mit deaktiviertem AS (Kap. 2.2.1) vorhanden, Signalstärke auf  $L2$  mit aktiviertem AS um Faktor 10 verringert (Abb. 2.4), die

Auswertung konzentrierte sich auf Perioden mit deaktiviertem AS (Prime Times, Tab. 6.3);

- Verwendung nur einer, relativ leistungsschwachen (low gain) Antenne, die Signale der GPS-Satelliten für die Orbitbestimmung und Okkultationssignale empfing, keine spezielle Antenne zum Empfang der Okkultationssignale;
- keine spezielle GPS-Empfängersoftware für den Signalempfang in der unteren Troposphäre (Kap. 3.3.8).

## 2.4 Zukünftige GNSS-Okkultationsmissionen

Als Ergebnis der erfolgreichen GPS/MET-Mission entstanden eine Reihe internationaler Satellitenprojekte, bei denen der Einsatz der GPS-Radiookkultationstechnik geplant ist bzw. war. Als unmittelbare Nachfolgeprojekte wurden der dänische Ørsted- und der südafrikanische SUNSAT-Satellit gemeinsam am 23. Februar 1999 (10:29 UTC; Vandenberg; 34,8°Nord, 120,5°West) gestartet. An Bord beider Satelliten befand sich der TRSR-1-GPS-Empfänger, der auch bei GPS/MET eingesetzt wurde. Bei diesen Missionen gab es jedoch durch geringe Datenqualität Schwierigkeiten mit der Datenanalyse [Yunck *et al.*, 2000].

Die nächste Generation des JPL-GPS-Empfängers („BlackJack“, TRSR-2 und -3) befindet sich nicht nur an Bord des CHAMP-Satelliten (TRSR-2, Kap. 4.3.2) sondern auch an Bord des argentinischen SAC-C-Satelliten (TRSR-3, Start am 21.11.2000, 18:24 UTC; Vandenberg). SAC-C besitzt zwei Okkultationsantennen, die in Flugrichtung und entgegengesetzt zur Flugrichtung weisen. Zusätzlich und analog zu CHAMP (Kap. 4.3.2) ist eine nadirgerichtete Antenne vorhanden, mit der von Meeres- oder Eisoberflächen reflektierte GPS-Signale empfangen werden können. Dies bildet die Basis für eine Pilotstudie zur GPS-Altimetrie bzw. Scatterometrie (u.a. [Beyerle und Hocke, 2001; Garrison und Katzberg, 2000; Komjathy *et al.*, 1999; Ruffini *et al.*, 1999]). SAC-C soll mit der in Flugrichtung weisenden Antenne erstmals Signale von sogenannten "aufgehenden" Okkultationen empfangen.

Bei der US-amerikanisch-deutschen Schwerefeldmission GRACE (Doppelsatellitenmission, derzeit geplanter Start Februar 2002) wird ebenfalls der bei CHAMP und SAC-C benutzte „Blackjack“-GPS-Empfänger eingesetzt. GRACE wird ebenso wie SAC-C über zwei in entgegengesetzte Richtungen weisende Okkultationsantennen verfügen.

Der Start der acht Satelliten der US-amerikanisch-taiwanesischen COSMIC-Mission [Rocken *et al.*, 2000] war ursprünglich für das Jahr 2003 vorgesehen. COSMIC sollte in dieser Konstellation ca. 4.000 global verteilte GPS-Atmosphärensondierungen täglich durchführen. Derzeit ist der Start der Mission für das Frühjahr 2005 mit sechs Satelliten für eine Missionsdauer von 5 Jahren vorgesehen [COSMIC, 2001].

Die EUMETSAT plant ein System polarumlaufender, operationell betriebener meteorologischer Satelliten (EPS oder auch METOP). Der Start des ersten von derzeit drei geplanten Satelliten ist für das Jahr 2004 vorgesehen. Die METOP-Satelliten werden erstmals mit einem komplett in Europa entwickelten GPS-Empfänger (mit Fähigkeit zur Aufzeichnung von Okkultationen) der Firma SAAB Ericsson (GRAS, GNSS Receiver for Atmospheric

Sounding) ausgerüstet und eine Antennenkonfiguration besitzen, die das Aufzeichnen „untergehender“ und „aufgehender“ Okkultationen ermöglicht.

Der Start des ersten Satelliten des Nachfolgesystems (NPOESS, Kap. 1.4.1) der polarumlaufenden NOAA-Wettersatelliten ist gegenwärtig für 2008 geplant. Diese Satelliten sollen einen dem europäischen GRAS-Empfänger sehr ähnlichen Empfänger zur Durchführung von GNSS-Okkultationsmessungen an Bord haben (GPS Occultation Sensor, GPSOS; auch von SAAB Ericsson entwickelt).

Am JPL Pasadena entstanden Studien [*Yunck et al.*, 2000], die auf der Verwendung nur noch kreditkartengrosser GPS-Empfänger basieren, die derzeit in Entwicklung sind. Mit solchen Empfängern ausgerüstet, könnten dutzende Kleinstsatelliten (Laptopgröße) mit einem einzigen Raketenstart in eine Erdumlaufbahn gebracht werden und eine Erfassung des Atmosphärenzustandes mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung ermöglichen. Alternativ dazu und kostengünstiger können diese GPS-Empfänger in bestehende oder zukünftige Mehrsatellitenkonfigurationen für globale Telekommunikation integriert werden.

# 3 PROZESSIERUNG VON GNSS-OKKULTATIONS DATEN

Die physikalischen Grundlagen der GNSS-Radiookkultationstechnik und die Auswertelgorithmen werden am Beispiel des US-amerikanischen GPS-Systems genauer beschrieben. Es wird eine Unterteilung in zwei Hauptschritte vorgenommen, die Kalibrierung der atmosphärischen Laufzeitverlängerung des Signals vom okkultierenden GNSS-Satelliten (hier GPS-Satellit) zum „niedrigfliegenden“ LEO-Satelliten (hier CHAMP) und die Ableitung der atmosphärischen Parameter aus dieser charakteristischen Laufzeitverlängerung.

## 3.1 Phasenwegverlängerung durch die Atmosphäre

Die der GPS-Radiookkultationstechnik zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien werden beschrieben. Die Beobachtungsgleichungen für GPS-Messungen werden eingeführt. Die dabei benutzte Notation wird bei der Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung aus GPS-Radiookkultationsmessungen verwendet (Kap. 3.2). Die zeitliche Änderung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung während der Okkultationsereignisse wird verwendet, um den atmosphärischen Brechungswinkel abzuleiten. Dieser ist Ausgangspunkt für die Berechnung der atmosphärischen Parameter (Kap. 3.3).

### 3.1.1 Atmosphärischer Brechungsindex

Die von den GPS-Satelliten ausgesandten elektromagnetischen Wellen treten beim Durchgang durch die Atmosphäre mit dieser in Wechselwirkung. Die Art und Weise dieser Wechselwirkung wird durch die räumliche und zeitliche Verteilung des atmosphärischen Brechungsindex bestimmt. Der Brechungsindex wiederum hängt charakteristisch von den atmosphärischen Parametern ab. Eine detaillierte Einführung in diese Zusammenhänge, die Physik der Refraktivität der Atmosphäre, findet sich z.B. bei *Foelsche* [1999] oder *Jeske* [1988].

Die Refraktivität  $N$  wird in der Atmosphärenphysik aus praktischen Gründen eingeführt. Sie kann sehr einfach aus dem Brechungsindex  $n$  berechnet werden:

$$N = (n - 1) \times 10^6 . \quad (3.1)$$

In erster, guter Näherung kann die atmosphärische Refraktivität als Summe von vier Termen dargestellt werden, dem Trocken-, Feuchte-, Ionosphären- und Streuterm:

$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{p_w}{T^2} - 4,03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1,4 \times W . \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $p$  der atmosphärische Luftdruck in hPa,  $T$  die atmosphärische Temperatur in K,  $p_w$  der Wasserdampfpartialdruck in hPa und  $n_e$  die Elektronendichte in  $\text{m}^{-3}$ .  $f$  ist die Frequenz der elektromagnetischen Welle in Hz und  $W$  ist der Gehalt an flüssigem Wasser

in  $\text{g/m}^3$ . Der Trockenterm charakterisiert die Polarisierbarkeit der Moleküle, d.h. die Fähigkeit eines äußeren elektrischen Feldes, in die zunächst elektrisch neutralen Moleküle ein Dipolmoment zu induzieren. Der Trockenterm ist proportional zur Dichte der Moleküle in der Atmosphäre. Der Feuchterm entsteht durch das permanente Dipolmoment der Wasserdampfmoleküle. Die Koeffizienten beider Terme wurden ursprünglich von *Smith und Weintraub* [1953] ermittelt. Die von ihnen angegebene Genauigkeit der Summe beider Terme beträgt ca. 0,5% in der feuchten und 0,02% in der trockenen Atmosphäre.

*Thayer* [1974] gibt eine genauere Formel für den Trocken- und Feuchterm an, die Abweichungen der Atmosphäre vom Verhalten eines idealen Gases berücksichtigt:

$$N = 77,6 \left( \frac{p_a}{T} \right) Z_a^{-1} + 64,8 \left( \frac{p_w}{T} \right) Z_w^{-1} + 3,776 \times 10^5 \left( \frac{p_w}{T^2} \right) Z_w^{-1}. \quad (3.3)$$

Hier ist  $p_a$  der Partialdruck der trockenen Atmosphäre in hPa.  $Z_a^{-1}$  und  $Z_w^{-1}$  sind die inversen Kompressibilitätsfaktoren für trockene Luft und Wasserdampf, die das Abweichen vom idealen Gasverhalten charakterisieren. Nach *Owens* [1967] gilt:

$$Z_a^{-1} = 1 + p_a \left[ 5,79 \times 10^{-8} \left( 1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \times 10^{-4} \frac{t}{T^2} \right] \quad (3.4)$$

und

$$Z_w^{-1} = 1 + 1.650 \left( \frac{p_w}{T^3} \right) \left( 1 - 0,01317 \times t + 1,75 \times 10^{-4} t^2 + 1,44 \times 10^{-6} t^3 \right). \quad (3.5)$$

Hier ist  $t$  die Temperatur in °C. Die Genauigkeit von (3.3) wird mit 0,05% für die gesamte Erdatmosphäre angegeben.

*Bevis* [1994] empfiehlt auf der Grundlage einer Zusammenstellung der Ergebnisse jüngerer Experimente die Benutzung der Thayer-Formel mit den numerischen Koeffizienten  $77,6 \pm 0,05$ ,  $70,4 \pm 2,2$  und  $(3,739 \pm 0,012) \times 10^5$ .

Der ionosphärische Term in (3.2) ist die erste Ordnung der Appleton-Larsen Formel (oft auch Appleton-Hartree) zur Berechnung der Elektronendichte [*Papas*, 1965]. *Bassiri und Hajj* [1993] leiten für die GPS-Signale (L-Band) aus dieser Formel eine Entwicklung des Brechungsindex nach Potenzen der inversen Frequenzen ab. Terme höher als erster Ordnung sind in dieser Formel nur geringfügig signifikant [*Syndergaard* 1999; *Melbourne et al.*, 1994].

Der Streuterm in (3.2) gilt für die Suspension von Wassertropfen in der Atmosphäre. Für Eiskristalle wird anstatt des Faktors 1,4 ein Skalierungsfaktor von 0,6 benutzt. Für die üblichen Mengen an Suspension von Wassertropfen oder Eiskristallen in der Atmosphäre ist dieser Term zu vernachlässigen [*Kursinski*, 1997].

Da die GPS-Satelliten ihre Signale auf zwei Trägerfrequenzen abstrahlen, kann der ionosphärische Term erster Ordnung durch geeignete Linearkombinationen der Signale auf beiden Frequenzen eliminiert werden (Kap. 3.3.3). Wird weiterhin der Wasserdampfterm vernachlässigt, bleibt eine sehr einfache Beziehung zwischen Refraktivität und dem Quotienten aus dem absoluten Luftdruck  $p$  und der Temperatur  $T$ :

$$N = 77,6 \frac{p}{T_d} . \quad (3.6)$$

$T_d$  wird hier als Trockentemperatur bezeichnet.

Mit einem einfachen Modell kann die vertikale Refraktivitätsverteilung  $N(h)$  der Atmosphäre in erster Näherung beschrieben werden. Die Gesamtrefraktivität wird in trockenem  $N_t(h)$  und feuchten Anteil  $N_f(h)$  der neutralen Atmosphäre und in den ionosphärischen Anteil  $N_i(h)$  aufgeteilt:

$$N(h) = N_t(h) + N_f(h) + N_i(h) . \quad (3.7)$$

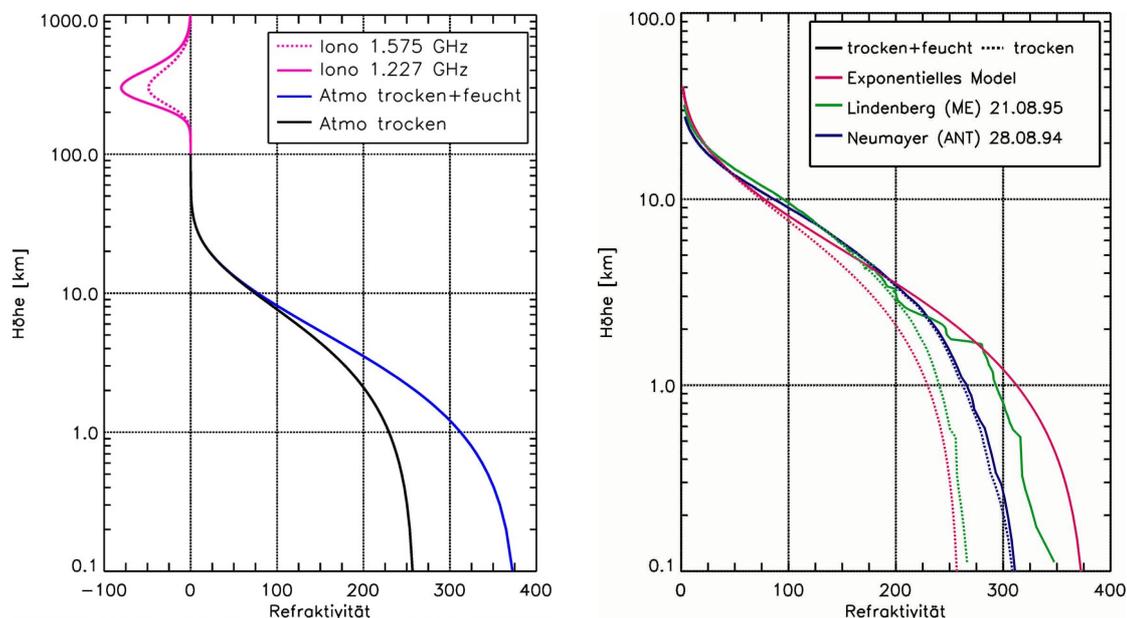
Für den trockenen und feuchten Anteil können jeweils exponentiell mit der Höhe ( $h$  in km) abfallende Refraktivitäten angesetzt werden:

$$N_t(h) = N_{t0} e^{-\frac{h}{H_{t0}}} \quad \text{und} \quad (3.8)$$

$$N_f(h) = N_{f0} e^{-\frac{h}{H_{f0}}} . \quad (3.9)$$

Ein Satz geeigneter Parameter ist z.B.  $N_{t0} = 260$  und  $H_{t0} = 8$  km für die trockene und  $N_{f0} = 120$  und  $H_{f0} = 2,7$  km für die feuchte Atmosphäre [Melbourne et al., 1994].  $H_{t0}$  und  $H_{f0}$  werden als Skalenhöhen bezeichnet. Sie entsprechen dabei einem Höhenbereich, über den sich die Refraktivität des trockenen bzw. feuchten Anteils um den Faktor  $1/e$  reduziert.

Für  $N_i(h)$  wird ein Chapman-Profil für eine F-Schicht bei Tag und im Maximum der solaren Aktivität angenommen [nach Syndergaard, 2000]:



**Abb. 3.1: Links:** Refraktivität der Modellatmosphäre (3.7). **Rechts:** Vergleich der Modellatmosphäre (3.7) mit realen Refraktivitäten in der unteren Troposphäre [Radiosondennmessungen in Lindenberg (Mitteleuropa; 52,13°N, 14,57°O) und auf der Neumayerstation (Antarktis; 70,39°S, 8,15°W)].

$$N_i(h) = -40,3 \frac{n_e(h)}{f^2} \times 10^6 \quad (3.10)$$

mit:

$$n_e(h) = n_e(h_0) \times \exp \left( \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{h-h_0}{H} - \exp \left( -\frac{h-h_0}{H} \right) \right] \right). \quad (3.11)$$

Die Einheit der Frequenz  $f$  in (3.10) ist Hz. Die Parameter in (3.11) sind: Elektronendichte im Maximum  $n_e(h_0) = 3 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ , Skalenhöhe  $H = 60 \text{ km}$  und Höhe des Elektronendichtemaximums über der Erdoberfläche  $h_0 = 300 \text{ km}$ . Abb. 3.1 zeigt die Refraktivität der Modellatmosphäre.

### 3.1.2 Geometrische Optik und Fermat'sches Prinzip

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen durch die Atmosphäre wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben. Das durchquerte Medium wird dabei durch eine räumlich und auch zeitlich variable, im allgemeinen Fall komplexe und dispersive Refraktivitätsverteilung repräsentiert.

Für GPS-Okkultationsmessungen wird angenommen, dass der Brechungsindex reell ist (keine Absorption) und dass die Signale monochromatisch sind. Weiterhin sind die betrachteten Wellenlängen ( $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$ ,  $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$ ) klein gegenüber den charakteristischen Skalenlängen der Atmosphäre (z.B. konvektive Erscheinungen, Hoch- und Tiefdruckgebiete, planetarische Wellen), womit die Gesetze der geometrischen Optik angewendet werden können. Bei dieser Näherung wird die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen als eine Ausbreitung von Strahlen angesehen, von deren Wellennatur völlig abgesehen wird. Bei Radiookkultationsmessungen treten jedoch auch Effekte auf, die mit der geometrischen Optik nicht mehr beschrieben werden können (Kap. 3.3.8). Die Skalenlängen dieser Effekte (z.B. kleinskalig variierende Wasserdampfverteilungen) liegen dann in der Größenordnung der Wellenlängen  $\lambda_1$  bzw.  $\lambda_2$ .

Bei Anwendung der geometrischen Optik gilt für Ausbreitung des elektromagnetischen Strahles vom Sender  $S$  zum Empfänger  $E$  das Fermat'sche Prinzip:

$$\int_S^E n(s) ds = \min. \quad (3.12)$$

Das Fermat'sche Prinzip besagt, dass die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in einem Medium, das durch die Refraktivitätsverteilung  $n(s)$  charakterisiert wird, entlang eines Strahlenweges  $s$  erfolgt, der das Integral des Brechungsindex entlang dieses Weges (optische Weglänge) minimiert.

Die optische Weglänge ist die für Radiookkultationsexperimente entscheidende Größe. Sie wird mit der präzisen Phasenmessung auf beiden GPS-Trägerfrequenzen bestimmt. In der Praxis sind diese Phasenmessungen, also die optischen Weglängen, nur jeweils bis auf eine unbekannte Konstante (Mehrdeutigkeitsfaktor oder engl. „ambiguity“ multipliziert mit der Wellenlänge) bekannt. In Kap. 3.3.1 wird gezeigt, dass der Brechungswinkel des Strahles zwischen Sende- und Empfangsatellit nicht aus der gemessenen Phase selbst, sondern primär aus ihrer zeitlichen Änderung abgeleitet wird. Die Bestimmung des Mehrdeu-

tigkeitsfaktors ist demzufolge nicht notwendig, da die zeitliche Ableitung des konstanten Mehrdeutigkeitsterms verschwindet.

### 3.1.3 Variablen in den GPS-Beobachtungsgleichungen

Die hier eingeführte Notation der GPS-Beobachtungsgleichungen wird in neueren Arbeiten u.a. von *Springer* [1999] verwendet. Umfangreichere und vertiefende Darstellungen zu GPS-Beobachtungsgleichungen geben z.B. *Kleusberg und Teunissen* [1996], *Leick* [1995], *Hofmann-Wellenhof et al.* [1992] oder *Seeber* [1989]. Es bedeuten:

$k$	Index des jeweiligen Empfängers,
$i$	Index des jeweiligen Satelliten,
$t$	Empfangszeit des Signals (GPS-Zeit),
$t_k$	vom Empfänger zugeordnete Empfangszeit des Signals,
$\delta_k$	Fehler der Empfängeruhr, es gilt: $t = t_k - \delta_k$ ,
$\tau$	Laufzeit des Signals zwischen GPS-Satellit und Empfänger,
$\delta^i$	Fehler der GPS-Satellitenuhr zum Zeitpunkt $t - \tau$ ,
$\vec{r}_k(t)$	Position des Empfängers zur Empfangszeit $t$ ,
$\vec{r}^i(t - \tau)$	Position des GPS-Satelliten zum Sendezeitpunkt des Signals,
$\rho_k^i$	Geometrische Entfernung zwischen GPS-Satellit zur Sendezeit $t - \tau$ und Empfänger zur Zeit $t$ .

Bei der Ableitung der atmosphärischen Laufzeitverzögerung wird mit den präzisen Phasenmessungen des GPS-Empfängers gerechnet, mit denen das vollständige Genauigkeitspotential des GPS-Systems ausgenutzt werden kann. Als eigentliche Beobachtungsgröße steht die Phasendifferenz zwischen der Phase des vom Satelliten empfangenen Signals und der Phase eines im Empfänger generierten Referenzsignals zur Verfügung. Diese Beobachtung lässt sich wie folgt darstellen:

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_F^i(t - \tau) + n_{Fk}^i \quad (3.13)$$

mit:

$\psi_{Fk}^i(t)$	Phasenmessung zur Epoche $t$ bei der $F$ ten Frequenz,
$\phi_{Fk}(t)$	Phase des im Empfänger generierten Referenzsignals zur Empfangszeit $t$ ,
$\phi_F^i(t - \tau)$	Phase des durch den Satellitenoszillator erzeugten Signals zur Sendezeit $t - \tau$ ,
$n_{Fk}^i$	unbekanntes Vielfaches von Wellenzyklen (Mehrdeutigkeitsfaktor).

Nach Reihenentwicklung um die Empfangszeit  $t$  bei Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung ergibt sich:

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_F^i(t) + \tau f_F + n_{Fk}^i, \quad (3.14)$$

wobei  $f_F$  die jeweilige Trägerfrequenz ist. Nach Einführung der Empfänger- und Satellitenuhrenfehler  $\delta_k$  bzw.  $\delta^i$  kann die Phasendifferenz umgeschrieben werden:

$$\phi_{Fk}^i(t) - \phi_F^i(t) = (\delta_k - \delta^i) f_F. \quad (3.15)$$

Dann ergibt sich die Beobachtungsgleichung wie folgt:

$$\psi_{Fk}^i(t) = (\delta_k - \delta^i) f_F + \mathcal{T}_F + n_{Fk}^i. \quad (3.16)$$

Wird diese Gleichung mit der Wellenlänge  $\lambda_F$  des Trägersignals multipliziert, ergibt sich die Beobachtungsgleichung für die Phasen:

$$L_{Fk}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \lambda_F n_{Fk}^i. \quad (3.17)$$

In (3.17) sind außer den Uhrenfehlern noch keine weiteren Fehler berücksichtigt. Die Phasenmessungen werden jedoch durch weitere systematische als auch zufällige Fehler beeinflusst, z.B. Fehler der Satellitenorbits, Ausbreitungseffekte im durchstrahlten Medium (für die Atmosphärensondierung das gesuchte Signal), relativistische Effekte, Variationen der Phasenzentren der Antennen und Mehrwegeeffekte. Für die weiteren Rechnungen werden eingeführt:

- $T_k^i$  die Phasenwegverlängerung durch die neutrale Atmosphäre,
- $I_k^i$  die frequenzabhängige ionosphärisch bedingte Phasenwegverlängerung,
- $\delta_r^i$  relativistische Korrektur durch Einfluss der allgemeinen (gravitationsabhängig) und speziellen (geschwindigkeitsabhängig) Relativitätstheorie.

Die Beobachtungsgleichung für die Phasen (3.17) erweitert sich damit zu:

$$L_{Fk}^i = \rho_k^i - I_{Fk}^i + T_k^i - c\delta_r^i + c\delta_k - c\delta^i + \lambda_F n_{Fk}^i. \quad (3.18)$$

### 3.1.4 Mehrdeutigkeitsterm und Cycle-slips

In Kap. 3.1.2 wurde bereits erwähnt, dass der Mehrdeutigkeitsterm  $\lambda_F n_{Fk}^i$  in der Beobachtungsgleichung für die Phasen (3.18) bei der Auswertung von GPS-Okkultationsmessungen nicht berechnet werden muss.

Für andere Anwendungen (z.B. präzise Positionsbestimmung) ist jedoch die genaue Bestimmung des Mehrdeutigkeitsterms notwendig. Verfahren zu dessen Bestimmung sind daher von großem Interesse. In den vergangenen Jahren wurden Algorithmen entwickelt, die mit kurzen Beobachtungszeiten, ja sogar mit der Auswertung von Beobachtungen nur einer Messepoche auskommen, um die Berechnung des Mehrdeutigkeitsterms durchführen zu können (z.B. [Bauer, 1997; Kleusberg und Teunissen, 1996; Mervart, 1995]).

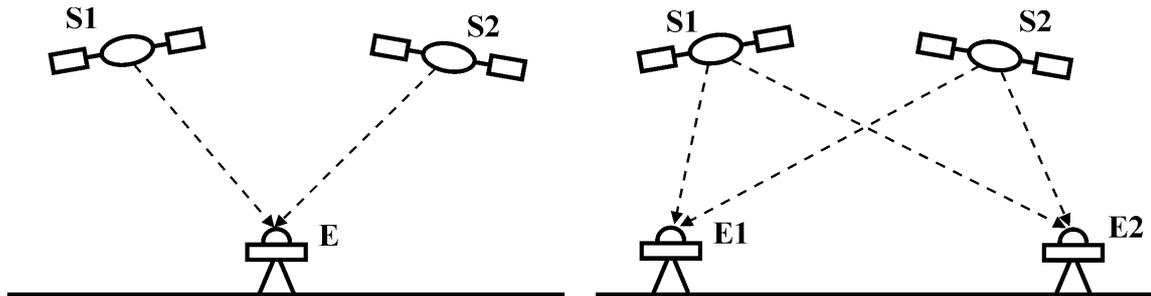
Relevant für GPS-Okkultationsmessungen können jedoch Phasensprünge (engl. „Cycle-Slips“) sein, der Mehrdeutigkeitsterm in (3.18) ist dann nicht mehr zeitlich konstant und ändert sich sprungartig. Die Phasensprünge können folgende Ursachen haben: Unterbrechung der „Sicht“verbindung zum GPS-Satelliten, niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis (z.B. durch ionosphärischen Einfluss, Mehrwegeeffekte, hohe Signaldynamik), Fehler in der Empfängersoftware oder durch Fehler im GPS-Satellitenoszillator [Mervart, 1995]. Die Cycle-Slips können durch geeignete Vorprozessierung der GPS-Daten eliminiert werden (z.B. [Bauer, 1997; Kleusberg und Teunissen, 1996; Mervart, 1995]). Bei GPS-Okkultationsmessungen werden jedoch derzeit Phasendaten, in denen offensichtlich Cycle-Slips auftreten von der Prozessierung ausgenommen (siehe auch Kap. 6.6 oder [Hajj et al., 2002]).

## 3.2 Doppeldifferenzenmethode

Der erste Schritt bei der Ableitung atmosphärischer Parameter ist die Verarbeitung der GPS-Beobachtungsdaten zur Kalibrierung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung des Okkultationslinks, d.h. der Phasenwegverlängerung, die das GPS-Signal auf dem Weg vom okkultierten zum LEO-Satelliten (hier CHAMP) erfährt. Für das CHAMP-Prozessierungssystem wurde dazu eine Doppeldifferenzenmethode verwendet, ein Auswertungsverfahren, welches in der präzisen Prozessierung von GPS-Daten eine weite Verbreitung hat (z.B. [Bauer, 1997; Kaplan, 1996; Hofmann-Wellenhof et al., 1992; Seeber, 1989]). Das Verfahren eignet sich zur Eliminierung der Fehler der Satellitenuhr (Empfänger) des LEO-Satelliten und der GPS-Satelliten (Sender). Für die Anwendung dieses Verfahrens werden, zusätzlich zu den GPS-Satellitendaten, die Daten eines globalen GPS-Bodennetzes (Kap. 5.2) benötigt.

In diesem Kapitel wird diese Methode und spezifische Aspekte ihrer Anwendung bei der Auswertung von GPS-Radiookkultationsmessungen behandelt.

### 3.2.1 Linearkombination von GPS-Phasenmessungen



**Abb. 3.2:** Zur Differenzenbildung von GPS-Beobachtungen. **Links:** Satelliten-Einfachdifferenz. **Rechts:** Empfänger-Satelliten-Doppel-Differenz.

Bei der Auswertung von GPS-Beobachtungen ist die Linearkombination von Phasenbeobachtungen eine verbreitete Technik, um überflüssige Parameter, aber auch Fehlerinflüsse, zu eliminieren. Abb. 3.2 zeigt Messanordnungen für zwei mögliche Differenzenbildungen, die für die Radiookkultationstechnik von Relevanz sind: Satelliten-Einfach- und Empfänger-Satelliten-Doppeldifferenz. Bei der Satelliten-Einfachdifferenz (engl. „single difference“) werden die Differenz der an einem Empfänger  $E$  simultan gemessenen Trägerphasen zweier Satelliten ( $S1$  und  $S2$ ) gebildet. Für die Beobachtungsgleichungen auf beiden Frequenzen  $F$  gilt:

$$L_{F1}^1 = \rho_1^1 - I_{F1}^1 + T_1^1 - c\delta_r^1 + c\delta_1 - c\delta^1 + \lambda_F n_{F1}^1 \quad \text{bzw.} \quad (3.19)$$

$$L_{F1}^2 = \rho_1^2 - I_{F1}^2 + T_1^2 - c\delta_r^2 + c\delta_1 - c\delta^2 + \lambda_F n_{F1}^2. \quad (3.20)$$

Die Differenzenbildung führt zur Beobachtungsgleichung für die Empfänger-Einfachdifferenz:

$$\Delta L_{F1} = L_{F1}^1 - L_{F1}^2. \quad (3.21)$$

In (3.21) ist der Empfängeruhrenfehler  $c\delta_1$  eliminiert.

Die Empfänger-Satelliten-Doppeldifferenz (engl. „double difference“) ist definiert als die Differenz zweier Satelliten-Einfachdifferenzen für zwei verschiedene Empfänger  $E1$  und  $E2$ :

$$\Delta\Delta L_F = \Delta L_{F1} - \Delta L_{F2}. \quad (3.22)$$

Durch die Doppeldifferenzenbildung (3.22) werden sowohl die Fehler beider Empfängeruhren  $c\delta_1$  und  $c\delta_2$ , als auch die Satellitenuhrenfehler  $c\delta^1$  und  $c\delta^2$  eliminiert. Bei der Differenzenbildung von GPS-Messungen ist zu beachten, dass Laufzeiteffekte zur Synchronisierung der Messungen zu berücksichtigen sind [Bauer, 1997].

### 3.2.2 Doppeldifferenzen für GPS-Okkultationsmessungen

Hier wird die Bildung von Doppeldifferenzen speziell für die Auswertung von GPS-Okkultationsmessungen diskutiert. Eine Skizze der zugehörigen Geometrie zeigt Abb. 3.3. Für die Empfängereinfachdifferenzen des LEO (L) gilt unter Verwendung von (3.18):

$$\Delta L_{FL} = \rho_L^O - \rho_L^R - I_{FL}^O + I_{FL}^R + T_L^O - T_L^R - c\delta_r^O + c\delta_r^R - c\delta^O + c\delta^R + \varepsilon_B. \quad (3.23)$$

Der Term  $\varepsilon_B$  in (3.23) ist ein Restfehler, der sich z.B. aus Messrauschen oder unkorrigierten Mehrwegeeffekten zusammensetzt, hier enthält er auch den Mehrdeutigkeitsterm, der in (3.13) eingeführt wurde (siehe auch Kap. 3.1.4). Die ionosphärischen Beiträge in den Bodenmessungen  $I_{FB}^O$  und  $I_{FB}^R$  werden durch eine Linearkombination der Phasenmessungen auf beiden Messfrequenzen in zweiter Ordnung eliminiert:

$$\Delta L_B = L_B^O - L_B^R \quad (3.24)$$

mit:

$$L_B^O = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_{1B}^O)^2 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_{2B}^O)^2, \quad (3.25)$$

analog zu (3.25) berechnet sich  $L_B^R$ .

Zur Korrektur der frequenzunabhängigen Troposphärenbeiträge  $T_B^O$  und  $T_B^R$  wird ein Troposphärenmodell von Hopfield verwendet [Bauer, 1997]:

$$T_B^O = \frac{K_d}{\sin \sqrt{E^2 + 1,5^2}} + \frac{K_w}{\sin \sqrt{E^2 + 1,5^2}}. \quad (3.26)$$

Analog zu (3.26) wird  $T_B^R$  berechnet. In (3.26) sind:

$$K_d = 77,6 \frac{p}{T} [40,136 + 148,72 (T - 273,16)] \quad (3.27)$$

und

$$K_w = 77,6 \frac{4,810e}{T} (1,100 - h) 2 \times 10^{-7}. \quad (3.28)$$

In (3.26), (3.27) und (3.28) sind  $E$  der Elevationswinkel des Satelliten in Grad,  $h$  die Stationshöhe in Meter,  $p$  der Atmosphärendruck in hPa,  $e$  der Wasserdampfpartialdruck in hPa und  $T$  die Temperatur in K.

Die Gleichung für die Empfängereinfachdifferenz der Bodenstation vereinfacht sich nach der Modellierung und Eliminierung von ionosphärischem und troposphärischem Anteil zu:

$$\Delta L_B = \rho_B^O - \rho_B^R - c\delta_r^O + c\delta_r^R - c\delta^O + c\delta^R + \varepsilon_B. \quad (3.29)$$

Für die Doppeldifferenz:

$$\Delta\Delta L_F = \Delta L_{FL} - \Delta L_B \quad (3.30)$$

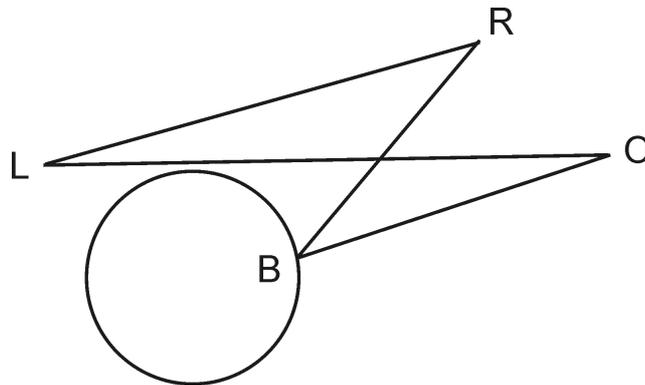
ergibt sich:

$$\Delta\Delta L_F = \rho_L^O - \rho_L^R - \rho_B^O + \rho_B^R - I_{FL}^O + I_{FL}^R + T_L^O - T_L^R + \varepsilon'. \quad (3.31)$$

Sämtliche Empfänger- und Satellitenuhrenfehler sowie die relativistischen Terme sind eliminiert. Der Ionosphärenanteil  $I_{FL}^R$  kann in analoger Weise wie in den Bodenmessungen [(3.24) und (3.25)] bis zur zweiten Ordnung eliminiert werden. Der Troposphärenbeitrag im Referenzlink  $T_L^R$  wird vernachlässigt. Die gesuchte Größe ist der atmosphärische Beitrag im Okkultationslink  $T_L^O$ . Für diesen ergibt sich aufgrund des enthaltenen dispersiven Ionosphärenbeitrages  $I_{FL}^O$  eine Frequenzabhängigkeit:

$$T_{FL}^O = \rho_L^R + \rho_B^O - \rho_L^O - \rho_B^R - \Delta\Delta L_F + I_{FL}^O + \varepsilon'. \quad (3.32)$$

In (3.32) sind  $\rho_k^i$  die geometrischen Abstände zwischen den jeweiligen Sendern und Empfängern,  $\Delta\Delta L_F$  die Doppeldifferenzen auf beiden Messfrequenzen, die direkt aus den Messungen gebildet werden können.  $I_{FL}^O$  wird im Verlauf der weiteren Prozessierung korrigiert (Kap. 3.3.3). In der Praxis wird die Konstante  $\varepsilon'$  so gewählt, dass  $T_{FL}^O$  zum Beginn der Okkultation auf 1 m normiert wird.

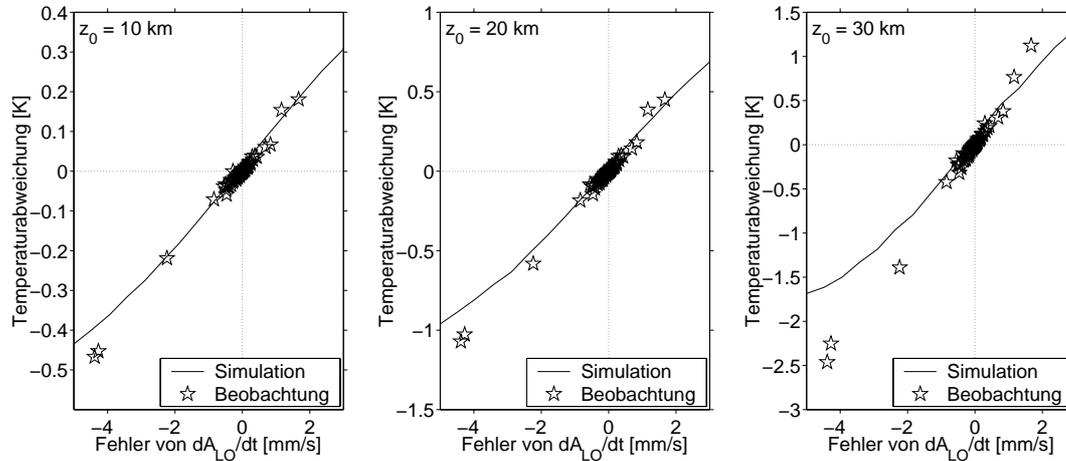


**Abb. 3.3:** Skizze zur Anwendung der Doppeldifferenzenmethode bei der Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung. L: LEO (CHAMP), B: GPS-Bodenempfänger, O: GPS-Okkultationsatellit, R: GPS-Referenzsatellit.

### 3.2.3 Genauigkeitsanforderungen

Von Wickert *et al.* [2001a] wurde ein Zusammenhang zwischen dem Fehler in der Zeitableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung (die entscheidende Größe zur Ableitung des atmosphärischen Brechungswinkels  $\alpha$ , Kap. 3.3.1) und dem Temperatur-

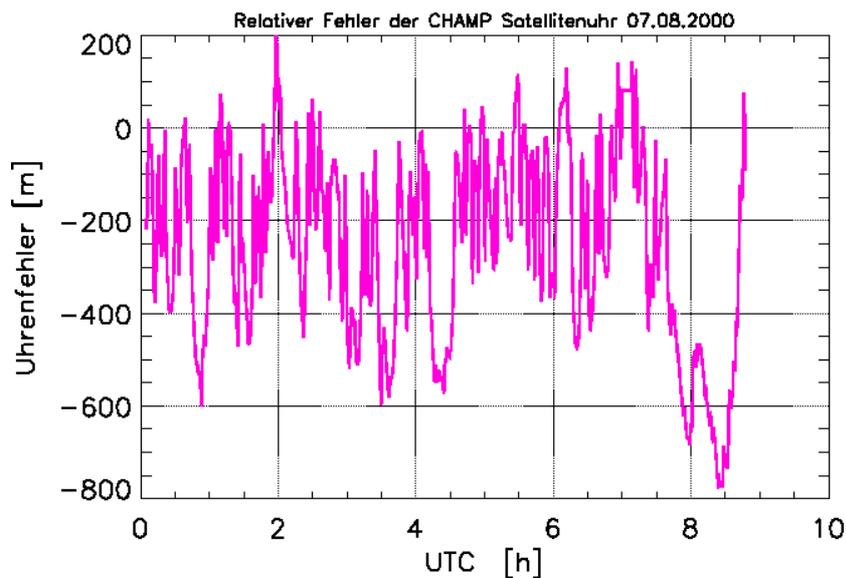
fehler in den abgeleiteten Vertikalprofilen angegeben (Abb. 3.4). Demnach verursachen Fehler von 2 mm/s in der Zeitableitung einen Temperaturfehler von 1 K in einer Höhe von 30 km. Zur präzisen Auswertung von Okkultationsmessungen ergeben sich demzufolge Genauigkeitsanforderungen im Bereich von  $\leq 1$  mm/s.



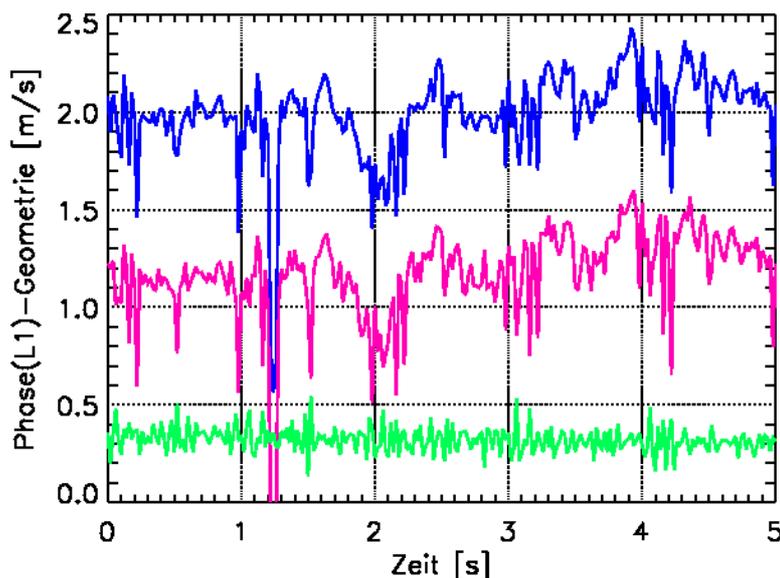
**Abb. 3.4:** Temperaturfehler als Funktion des Fehlers in der Zeitableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung. **Links:** Höhe=10 km; **Mitte:** 20 km; **Rechts:** 30 km (nach [Wickert et al., 2001a]).

### 3.2.4 Stabilität der CHAMP-Satellitenuhr

In Abb. 3.5 ist das Zeitverhalten des CHAMP-Satellitenuhrenfehlers über einen Zeitraum von 9 h dargestellt. Dieser wird in 10 s zeitlicher Auflösung im Rahmen der präzisen Satellitenbahnbestimmung für CHAMP bereitgestellt. Erkennbar sind unregelmäßige Instabilitäten in der Größenordnung von mehreren hundert Metern z.T. im Minutenbereich.



**Abb. 3.5:** Relatives zeitliches Verhalten des CHAMP-Satellitenuhrenfehlers (10 s- Uhrenlösungen dargestellt in Längeneinheiten; 7. August 2000).



**Abb. 3.6:** Relatives zeitliches Verhalten des CHAMP-Satellitenuhrenfehlers, abgeleitet aus 50 Hz-GPS-Okkultations- und CHAMP- und GPS-Satellitenbahndaten. Berechnet aus **Blau:** dem Okkultationslink; **Rot:** dem Referenzlink. **Grün:** Zeitverhalten der Einfachdifferenz zwischen Okkultations- und Referenzlink.

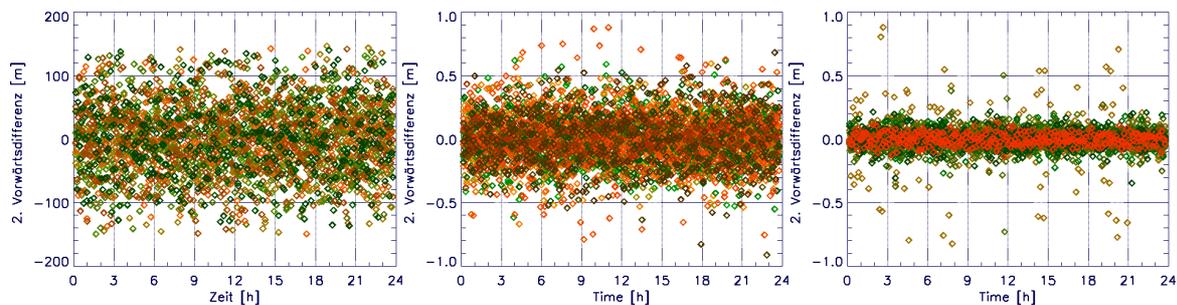
Mit einer einfachen Methode wurde das Kurzzeitverhalten der CHAMP-Satellitenuhr im Sekundenbereich untersucht (Abb. 3.6). Verwendet wurden dazu die 50 Hz-L1-CHAMP-Messungen  $L_{1k}^i$  (siehe 3.18) der Signale des GPS-Okkultations- bzw. Referenzsatelliten. In der Beobachtungsgleichung für die Phasen (3.18) wurde der geometrische Abstand der Satelliten  $\rho_k^i$  unter Benutzung der präzisen Satellitenbahndaten (GPS-Satellit und CHAMP) berücksichtigt. Die Kurzzeitvariabilität des ionosphärischen  $I_{1k}^i$ , troposphärischen  $T_k^i$  (Betrachtung von Okkultationsmessungen am oberen Rand der Atmosphäre, ca. 100 km) und des relativistischen Anteils  $c\delta_r^i$  sowie des GPS-Satellitenuhrenfehler  $c\delta^i$  wurde vernachlässigt. Der Mehrdeutigkeitsterm  $\lambda_1 n_{1k}^i$  ist zeitlich konstant. Wird dann (3.18) nach dem Empfängeruhrenfehler  $c\delta_k$  umgestellt, kann dessen Zeitverhalten untersucht werden.

Dieses Zeitverhalten ist in Abb. 3.6 dargestellt. Es wurde aus den voneinander unabhängigen Daten des Okkultations- (blau) und Referenzsatelliten (rot) abgeleitet. Beide Kurven weisen ein nahezu identisches Zeitverhalten auf (des CHAMP-Satellitenuhrenfehlers), was zeigt, dass mit der beschriebenen Methode tatsächlich das Verhalten des CHAMP-Satellitenuhrenfehlers charakterisiert werden kann. Es treten recht starke Schwankungen des Satellitenoszillators in der Größenordnung von 1 m/s auf, also einem Bereich, der für eine präzise Atmosphärensondierung (siehe Kap. 3.2.3) unakzeptabel ist.

Die grüne Kurve in Abb. 3.6 zeigt das Zeitverhalten der Differenz der Residuen aus den L1-Messungen, die wie oben beschrieben, abgeleitet wurden. Diese Differenz entspricht einer Empfänger-Einfachdifferenz (3.21). In dieser Differenz ist der CHAMP-Satellitenuhrenfehler eliminiert, die Einfachdifferenz ist deutlich zeitstabiler.

### 3.2.5 Stabilität der GPS-Satellitenuhren

Im Zusammenhang mit den in Kap. 6.9 vorgestellten Ergebnissen der Anwendung einer Einfachdifferenzenmethode auf die Prozessierung von GPS-Okkultationsdaten [Wickert *et al.*, 2002a] wird in Kap. 6.9.1 die Stabilität der GPS-Uhren nach dem Abschalten von SA am 2. Mai 2000 charakterisiert. Hier wird der Einfluss der Deaktivierung von SA auf das Uhrenverhalten untersucht.



**Abb. 3.7:** Nichtlineare Residuen (zweite Vorwärtsdifferenzen) der GPS-Uhrenfehler (5-min GFZ IGS Uhrenlösungen). **Links:** 1. Mai 2000, SA aktiviert; **Mitte:** 3. Mai 2000, SA deaktiviert, Cäsium Frequenznormal; **Rechts:** 3. Mai 2000, SA deaktiviert, Rubidium Frequenznormal (nach [Wickert *et al.*, 2001a]).

Da für die Ableitung des Brechungswinkels die Zeitableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung die entscheidende Größe ist (Kap. 3.3.1) und der GPS-Uhrenfehler bzw. die Differenz der Uhrenfehler von Okkultations- und Referenzsatellit direkt in die Berechnung der Phasenwegverlängerung eingehen [Wickert *et al.*, 2001a], ist das Zeitverhalten, spezieller das Kurzzeitverhalten (Variationen im Bereich weniger Minuten), der GPS-Uhren für die Okkultationsmessungen entscheidend. Diesen Kurzzeitvariationen ist ein linearer Trend überlagert, der bei GPS-Uhren mit Rubidiumfrequenznormal mehr als 1.000 m pro Tag (Trend von ca. 10 mm/s) erreichen kann (Kap. 6.9.1). Ein Maß für das Kurzzeitverhalten ist die zweite Vorwärtsdifferenz (linearer Trend wird eliminiert) der 5-min Uhrenlösungen [IGS-Analysezentrum (International GPS Service) am GFZ Potsdam], die in Abb. 3.9 dargestellt ist. Bei aktiviertem SA erreichten die Kurzzeitänderung eine Dimension von ca. 0,3 m/s (100 m pro 300 s). Nach der Abschaltung von SA wurde diese Rate um zwei Größenordnungen reduziert. Es zeigt sich zusätzlich ein deutlicher Unterschied zwischen GPS-Uhren mit Zäsium-(Cs, ca. 1,5 mm/s) bzw. Rubidium-(Rb, ca. 0,5 mm/s) Frequenznormal.

Obwohl die Dimension der Kurzzeitänderungen nach der Deaktivierung um 2 Größenordnungen reduziert wurde, sind Kurzzeitänderungen in der Dimension von ca. 1,5 mm/s (Cs) bzw. 0,5 mm/s (Rb) für die Okkultationsprozessierung signifikant. Fehler in der Zeitableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung von 2 mm/s verursachen in 30 km Höhe einen Temperaturfehler von 1 K [Wickert *et al.*, 2001a].

### 3.2.6 Ionosphärenkalibrierung des Referenzlinks

Eine zu (3.25) alternative Korrekturmethode für den Ionosphärenanteil  $I_{FL}^R$  im Referenzlink  $L_{FL}^R$  wurde u.a. von Schreiner *et al.* [1998] beschrieben und auf die Pro-

zessierung der GPS/MET-Daten angewendet. Hierbei wird die Differenz der Trägerphasen ( $L_{1L}^R - L_{2L}^R$ ) zur Reduzierung des Messrauschens gefiltert, es entsteht  $\langle L_{1L}^R - L_{2L}^R \rangle$ , eine modifizierte Differenz. Jetzt wird in Analogie zu (3.25) eine Linearkombination zur Ionosphärenkorrektur gebildet:

$$L_L^R = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_{1L}^R)^2 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_{1L}^R - \langle L_{1L}^R - L_{2L}^R \rangle)^2. \quad (3.33)$$

Bei Verwendung von (3.33) kann das Messrauschen im Referenzlink reduziert werden.

### 3.2.7 Signallaufzeiten

Bei der zeitlichen Synchronisation der Messungen zur Differenzenbildung müssen die Laufzeiten  $\tau_k^i$  der Signale vom GPS-Satelliten  $i$  zu den jeweiligen Empfängern  $k$  berücksichtigt werden.

Die Laufzeiten sind bei der Ermittlung des geometrischen Abstands zwischen Sende- und Empfangssatellit  $\rho_k^i$  (Kap. 3.2.2) in Gleichung (3.31) zu berücksichtigen. Dabei wird die Position des Sendesatelliten zum Empfangszeitpunkt  $t$  ( $\vec{r}^i(t)$ ) auf die Position zum Sendezeitpunkt  $t - \tau$  transformiert. Da die genaue Bahn der Satelliten bekannt ist (Kap. 5.3), kann die Laufzeit und damit die exakte Position zum Sendezeitpunkt in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Begonnen wird dabei mit der Anfangsnäherung für die Laufzeit  $\tau'$ :

$$\tau' = \frac{|\vec{r}^i(t) - \vec{r}_k(t)|}{c} \quad (3.34)$$

mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Mit der berechneten Laufzeit  $\tau'$  kann die Position des Sendesatelliten  $\vec{r}^i(t - \tau')$  zum Zeitpunkt  $t - \tau'$  ermittelt werden. Mit dieser Position wird mit (3.34) die nächste Näherung für die Laufzeit  $\tau''$  ermittelt. Das Verfahren konvergiert sehr schnell.

Die relevanten Signallaufzeiten für Okkultationsmessungen wurden für die CHAMP-Okkultationen beispielhaft für den 7. April 2001 analysiert. Dazu wurden 188 Okkultationsmessungen ausgewertet. Alle Okkultationen wurden mit einer Redundanz von ca. 3 Bodenstationen prozessiert, somit standen insgesamt 571 Datensätze für die Statistik zur Verfügung. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Die Signallaufzeiten von der Bodenstation zum Okkultations- und Referenzsatelliten haben ähnliche Mittelwerte (ca. 73 ms), was einer mittleren Entfernung zwischen GPS-Satellit und Bodenstation von 21.900 km entspricht. Durch den unterschiedlichen Abstand zu den GPS-Satelliten streuen die Laufzeiten um den Mittelwert mit ca. 3-4 ms, was einer Entfernung von ca. 900-1.200 km entspricht. Die Laufzeit vom Okkultationsatelliten zu CHAMP beträgt im Mittel 93,338 ms, was einer mittleren Entfernung von ca. 28.000 km entspricht. Dieser Abstand ist, bedingt durch die Okkultationsgeometrie, für jede Okkultation nahezu gleich (Standardabweichung ca. 160 km). Der mittlere Abstand zwischen CHAMP und dem Referenzsatelliten ist ca. 3.500 km größer als der Abstand der GPS-Satelliten zur Bodenstation. Dabei wird eine ähnliche Standardabweichung der mittleren Abstände bzw. Signallaufzeiten beobachtet.

Satellitenverbindung	Mittlere Signallaufzeit [ms]	Standardabweichung [%]
Okk-GPS/Bodenstation	73,084	4,59
Ref-GPS/Bodenstation	73,530	4,72
Okk-GPS/LEO	93,338	0,56
Ref-GPS/LEO	84,303	5,07

**Tab. 3.1:** Signallaufzeiten der GPS-Signale für die an der Okkultation beteiligten Satellitenverbindungen. Analyse für 188 CHAMP-Okkultationen vom 07. April 2001.

Während der Signallaufzeit von 93 ms zwischen okkultierten GPS-Satelliten und CHAMP bewegt sich der GPS-Satellit um ca. 280 m. Die Korrektur der Laufzeiteffekte spielt demzufolge bei der Auswertung von GPS-Radiookkultationsmessungen eine wichtige Rolle.

### 3.2.8 Relativistische Effekte

Bei Anwendung der Doppeldifferenzenmethode (3.31) wurde gezeigt, dass die relativistischen Beiträge eliminiert werden können. Bei der Anwendung von Einfachdifferenzenmethoden (3.21 und Kap. 6.9) sind diese Effekte zu korrigieren. Die Satellitenuhren (Oszillatoren) werden durch die allgemeine (Gravitation) und spezielle Relativitätstheorie (Geschwindigkeit) beeinflusst.

Der dominante Term ist konstant und für alle GPS-Satelliten ähnlich, da sie sich in derselben Orbithöhe befinden. Die GPS-Satellitenuhr würde im Orbit um ca. 40  $\mu$ s schneller gehen. Dieser Anteil wird durch einen negativen Offset in der Oszillatorfrequenz (10,23 MHz) beim Start der Satelliten von -0,00455 Hz korrigiert. Der Resteffekt, verursacht durch die Exzentrizität der Bahn (variierende Orbithöhe) wird als „periodischer“ Effekt bezeichnet. Er kann einen Betrag von ca. 70 ns (21 m) [Seeber, 1989] und eine maximale Drift von 0,01 ns/s (3 mm/s) erreichen und ist somit signifikant (Kap. 3.2.3). Er wird wie folgt beschrieben und kann direkt mit den Bahndaten der GPS-Satelliten (Position und Geschwindigkeit) in den Beobachtungsgleichungen (z.B. 3.31) korrigiert werden [Springer, 1999]

$$\delta_r^i = -\frac{2\vec{r}^i \dot{\vec{r}}^i}{c^2}. \quad (3.35)$$

Hier sind  $\vec{r}^i$  und  $\dot{\vec{r}}^i$  die geozentrische Position bzw. Geschwindigkeit des Satelliten und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.

### 3.2.9 Lage der Antennenphasenzentren

Für die Prozessierung der GPS-Okkultationsdaten werden die präzisen Satellitenbahndaten benötigt (Kap. 5.3). Diese Bahnen sind (per definitionem) auf den Massenmittelpunkt des jeweiligen Satelliten bezogen. Für die gemessenen Trägerphasen sind jedoch die Positionen der Phasenzentren der GPS-Sendeantenne und der GPS-Okkultationsantenne an Bord des CHAMP-Satelliten relevant. Die Satellitenmessungen werden entsprechend korrigiert.

### GPS-Satelliten

Für die GPS-Satelliten erfolgt diese Korrektur in einem satellitenfesten Bezugssystem. Da sich die Satelliten zur optimalen Bestrahlung der Solarzellen ständig nach der Sonne ausrichten, wird dieses Bezugssystem wie folgt definiert (Abb. 3.8):

- $\vec{e}_z$  Einheitsvektor vom Massenmittelpunkt des Satelliten zum Geozentrum
- $\vec{e}_y$  normalisierter Einheitsvektor des Kreuzproduktes von  $\vec{e}_z$  mit dem Vektor Satellit – Sonne
- $\vec{e}_x$  Einheitsvektor orthogonal zu  $\vec{e}_z$  und  $\vec{e}_y$ , so dass ein rechtsdrehendes System entsteht.

Für Block-I-Satelliten ergibt sich eine Abweichung  $\vec{r}_{pc}$  von [Feltens, 1991; Landau, 1988]:

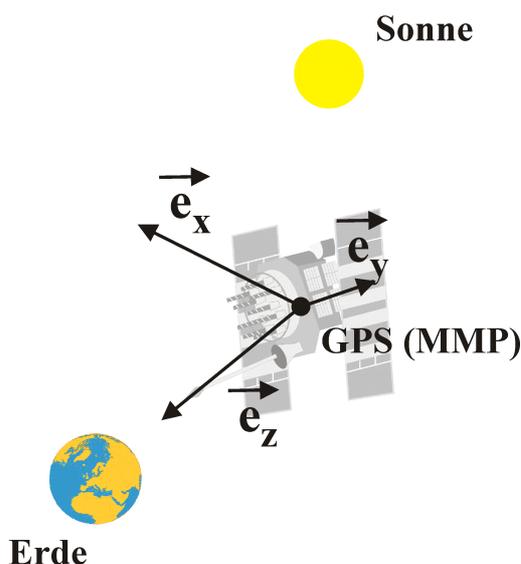
$$\vec{r}_{pc} = 0,2100 \vec{e}_x + 0,8540 \vec{e}_z \quad [\text{m}]. \quad (3.36)$$

Die analoge Abweichung für Block-II/IIa-Satelliten beträgt

$$\vec{r}_{pc} = 0,2794 \vec{e}_x + 1,0229 \vec{e}_z \quad [\text{m}]. \quad (3.37)$$

Die Information der z-Komponente der Block-II-Satelliten ist nicht genau [Zhu et al., 2001]. Daher werden von den verschiedenen GPS-Analysezentren unterschiedliche Werte für z verwendet. Das GFZ Potsdam verwendet 1,0229 m. Für Block-IIR Satelliten wurde dieser Wert in jüngster Zeit vom GPS Operational Control Segment signifikant verändert, so wurde z.B. z für PRN 14 von 0,86710 m auf 1,61366 m geändert. Auch hierfür benutzen die GPS-Analysezentren verschiedene z-Werte. Das GFZ Potsdam verwendet [Zhu et al., 2001]:

$$\vec{r}_{pc} = 0,2794 \vec{e}_x + 0,0000 \vec{e}_z \quad [\text{m}]. \quad (3.38)$$

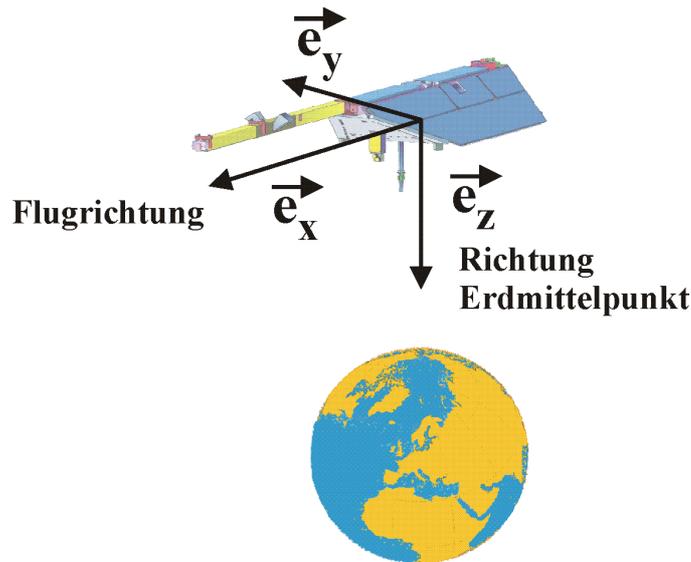


**Abb. 3.8:** Satellitenfestes Bezugssystem der GPS-Satelliten zur Korrektur der Abweichung der Lage des Phasenzentrums der Sendeantenne vom Massenmittelpunkt (MMP).

### CHAMP-Satellit

Die Korrektur der Lage des Phasenzentrums der CHAMP-Radiookkultationsantenne erfolgt in einem satellitenfesten Bezugssystem, das wie in (Abb. 3.9) definiert ist:

- $\vec{e}_z$  Einheitsvektor vom Massenmittelpunkt des Satelliten zum Geozentrum;
- $\vec{e}_x$  Einheitsvektor in Flugrichtung des Satelliten;
- $\vec{e}_y$  Einheitsvektor orthogonal zu  $\vec{e}_z$  und  $\vec{e}_x$ , so dass ein rechtsdrehendes System entsteht.



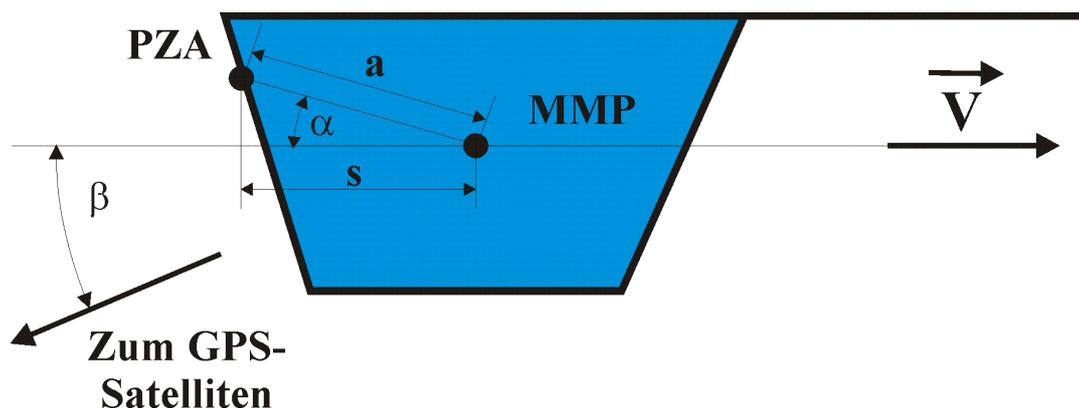
**Abb. 3.9:** Satellitenfestes Bezugssystem des CHAMP-Satelliten zur Korrektur der Abweichung der Lage des Phasenzentrums der GPS-Okkultationsantenne vom Massenmittelpunkt.

Die Lage des Phasenzentrums der GPS-Okkultationsantenne relativ zum Massenmittelpunkt des Satelliten ist gegeben durch [Lühr et al., 2001]:

$$\vec{r}_{pc} = -1,6431 \vec{e}_x - 0,0646 \vec{e}_z \text{ [m]}. \quad (3.39)$$

### Einfluss der Fluglageänderung auf CHAMP-Okkultationsmessungen

Die entscheidende Größe für die Ableitung des atmosphärischen Brechungswinkels ist die zeitliche Änderung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung zwischen GPS-Okkultations- und CHAMP-Satellit während der Okkultation (Kap. 3.3.1). Diese wird aus der Dopplerverschiebung der GPS-Signale (abgeleitet aus den präzisen Phasenmessungen) nach Korrektur der Relativgeschwindigkeit der Satelliten mit der präzisen Bahninformation ermittelt. Die bereitgestellte Bahninformation ist auf die jeweiligen Massenmittelpunkte der Satelliten bezogen (Kap. 5.3). Änderungen der Fluglage des CHAMP-Satelliten können jedoch ebenfalls einen Beitrag zur Änderung der Relativgeschwindigkeit verursachen, wenn die Lage des Phasenzentrums der Okkultationsantenne nicht mit dem Massenmittelpunkt identisch ist (Abb. 3.10).



**Abb. 3.10:** Zur Verfälschung der abgeleiteten Phasenwegverlängerung durch Lageänderungen des CHAMP-Satelliten (PZA .. Phasenzentrum der Okkultationsantenne, MMP .. Massenmittelpunkt).

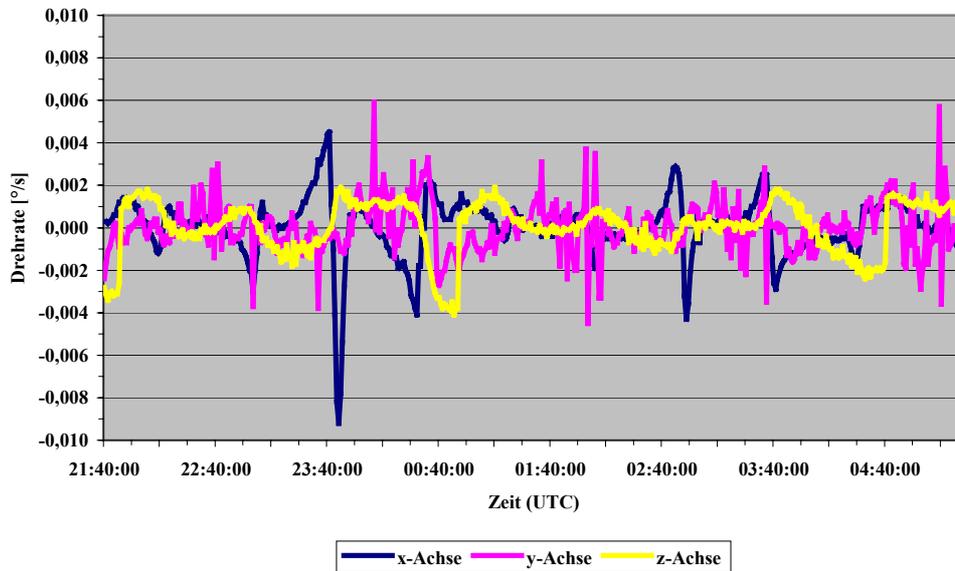
Die absolute Entfernung  $a$  zwischen Phasenzentrum der Antenne (PZA) und Massenmittelpunkt des Satelliten (MMP) kann aus (3.39) berechnet werden. Es ergibt sich eine Entfernung von 1,6444 m. Weiterhin ergeben sich für die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  (ebenfalls aus den Konstruktionszeichnungen des CHAMP-Satelliten abgeleitet) Werte von ca. 3 bzw. 22°. Die Projektion von  $a$  auf die geradlinige Verbindung zum GPS-Satelliten ist somit  $\cos(25^\circ) \times 1,6444$  m, also 1,4903 m.

Ändert sich die Fluglage des Satelliten, entspricht das einer Änderung der Länge der Projektion von  $a$  auf die geradlinige Entfernung zum GPS-Satelliten. Erfolgt die Lageänderung entsprechend schnell, kommt es zu einer zusätzlichen Relativbewegung (zusätzlich zur Bewegung des Massenmittelpunktes der Antenne) des Phasenzentrums der Antenne zum GPS-Satelliten. Tab. 3.2 gibt einen Überblick über den Zusammenhang von Drehrate und resultierender Relativbewegung des Phasenzentrums der CHAMP-Okkultationsantenne zum GPS-Satelliten.

Drehrate (°/s)	Relativbewegung (mm/s)
1	11,3
0,1	1,2
0,01	0,1

**Tab. 3.2:** Zusammenhang zwischen Drehrate von CHAMP um die  $y$ -Achse des Satelliten-Koordinatensystems und daraus resultierender Relativbewegung des Phasenzentrums der GPS-Okkultationsantenne zum GPS-Okkultationsatelliten.

In Kap. 3.2.3 wurde gezeigt, dass für die zeitliche Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung Genauigkeitsanforderungen von 1-2 mm/s erfüllt sein müssen, um in 30 km Höhe einen Temperaturfehler von <1 K zu erreichen. Daraus ergibt sich für CHAMP die Anforderung, die Drehraten <0,1°/s zu halten, um einen Fehlereinfluss durch Eigenbewegung des Satelliten auf die Messungen auszuschließen. Abb. 3.11 zeigt die realen Drehraten des CHAMP-Satelliten am 18. Januar 2001.



**Abb. 3.11:** Änderungen der Fluglage des CHAMP-Satelliten um die drei Achsen des satellitenfesten Bezugssystems am 18./19.01.2001 (Nominalsituation).

Die realen Drehraten um die y-Achse sind im Nominalbetrieb im Mittel kleiner als 0,002°/s, es treten Werte von bis zu 0,006°/s auf. Damit ist die aufgestellte Genauigkeitsanforderung (Drehraten <0,1/s) deutlich erfüllt. Die real auftretenden Drehraten verursachen Relativbewegungen zwischen Phasenzentrum und dem okkultierenden GPS-Satelliten von weniger als 0,1 mm/s (Tab. 3.2). Es wird bemerkt, dass auch die Drehung um die z-Achse des Satelliten relevant ist und in ähnlicher Weise wie die Drehung um die y-Achse behandelt werden kann. Die Drehrate um die z-Achse liegt allerdings ebenfalls deutlich unter 0,01°/s (Abb. 3.11).

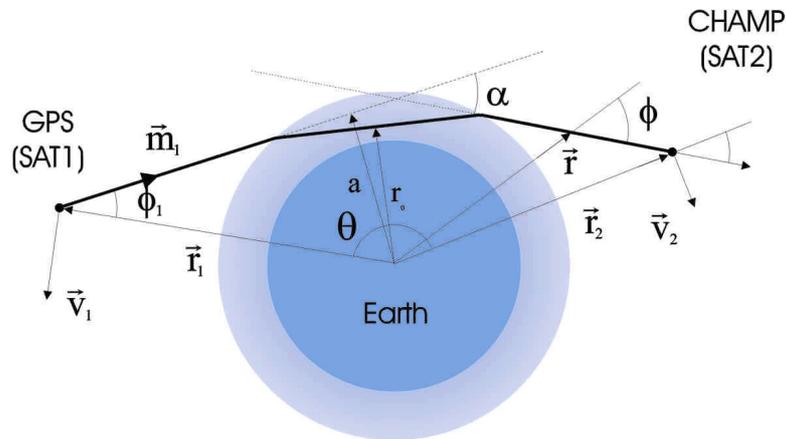
## 3.3 Ableitung atmosphärischer Parameter

### 3.3.1. Ableitung des Brechungswinkels

Die Grundlage für die Ableitung des Brechungswinkels  $\alpha$  ist die Anwendung der Gleichung für die Dopplerverschiebung [Gorbunov et al., 1996a]. Diese ist gegeben durch:

$$f_d = f_c \left( \frac{c - \vec{v}_2 \vec{m}_2 n_2}{c - \vec{v}_1 \vec{m}_1 n_1} - 1 \right). \quad (3.40)$$

In (3.40) sind  $\vec{v}_1$  bzw.  $\vec{v}_2$  die Geschwindigkeitsvektoren des okkultierten GPS und des CHAMP Satelliten,  $\vec{m}_1$  und  $\vec{m}_2$  sind die Einheitsvektoren in Richtung der Wellenvektoren des ausgesandten bzw. empfangenen Signals und  $n_1$  und  $n_2$  sind die Refraktivitäten an den jeweiligen Satellitenpositionen (Abb. 3.12).

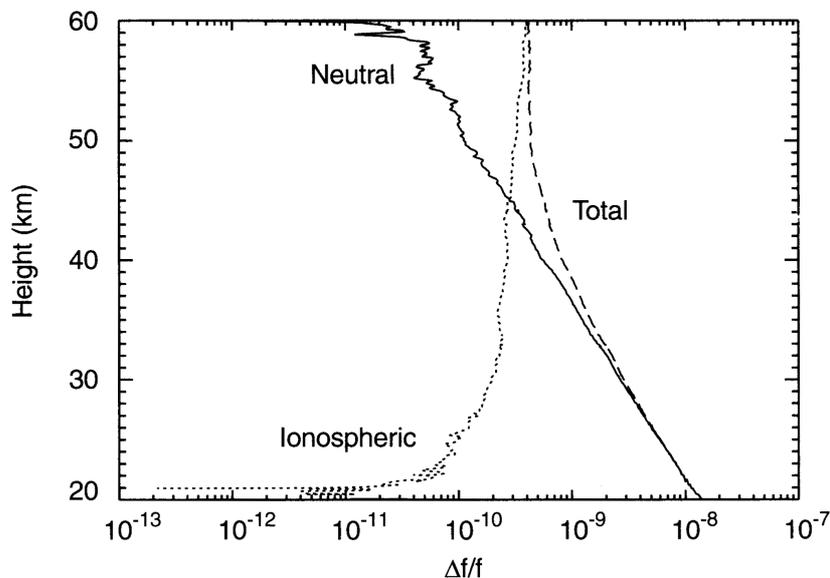


**Abb. 3.12:** Ableitung des Brechungswinkels  $\alpha$  (aus [Wickert et al., 2001a]).

Die Dopplerverschiebung  $f_d$  steht mit der gemessenen Phase in folgendem Zusammenhang:

$$f_d = -\frac{f_c}{c} \frac{dL}{dt}, \quad (3.41)$$

mit der Trägerfrequenz  $f_c$  und der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$ .  $L$  kann wie folgt separiert werden:



**Abb. 3.13:** Dopplerverschiebung (ohne Vakuum-Dopplerverschiebung) als Funktion der Höhe für eine GPS/MET-Okkultation (Okk. 31, Tag 298, 1995). Die durchgezogene Linie repräsentiert die Dopplerverschiebung, verursacht durch die neutrale Atmosphäre. Die gepunktete Linie zeigt die Dopplerverschiebung durch die Ionosphäre, die gestrichelte Linie stellt die gesamte atmosphärische Dopplerverschiebung dar (aus [Hocke, 1997]).

$$L = L_0 + dA_{LO} . \quad (3.42)$$

Somit kann die Dopplerverschiebung  $f_d$  ebenfalls in zwei Terme aufgespalten werden:

$$f_d = f_{d0} + f_{dA} . \quad (3.43)$$

Die Dopplerverschiebung besteht also aus zwei Termen. Der erste Term entspricht der Frequenzverschiebung ohne Atmosphäreneinfluss. Er wird durch die Relativbewegung beider Satelliten während der Okkultation verursacht und kann aus der Orbitinformation (Position und Geschwindigkeit) berechnet werden. Der zweite Term entspricht der Zeitableitung der kalibrierten atmosphärisch induzierten Laufzeitverlängerung des Okkultationslinks. Dieser Term setzt sich wiederum aus einem ionosphärisch verursachten und einem Beitrag durch die neutrale Atmosphäre zusammen (Abb. 3.13).

Für den Brechungswinkel gilt (Abb. 3.12) :

$$\alpha = \phi_1 + \phi_2 + \theta - \pi . \quad (3.44)$$

In (3.44) sind die Winkel  $\phi_1$  und  $\phi_2$  die einzigen Unbekannten nach der Berechnung der Skalarprodukte und dem Einsetzen der gemessenen Dopplerverschiebung in (3.40) [vgl. *Kursinski et al.*, 1997]. Eine weitere Gleichung wird benötigt, um  $\phi_1$  und  $\phi_2$  zu berechnen und somit  $\alpha$ . Unter Annahme lokaler sphärischer Symmetrie des Refraktionsindex,  $n = n(r)$ , gilt das Snelliussche Gesetz:

$$r_1 n(r_1) \sin \phi_1 = r_2 n(r_2) \sin \phi_2 = a . \quad (3.45)$$

Die Gleichungen (3.40) und (3.45) bilden ein nichtlineares Gleichungssystem und können analytisch nicht gelöst werden. Zur Lösung wird ein einfaches iteratives Verfahren eingesetzt, das durch *Gorbunov et al.* [1996a] eingeführt wurde. Gleichung (3.45) liefert gleichzeitig den Impaktparameter  $a$  (Abb. 3.12).

Weitere, zum Teil alternative Beschreibungen der Ableitung des Brechungswinkels finden sich z.B. bei *Melbourne et al.* [1994], *Steiner* [1998] oder *Vorob'ev und Krasil'nikova* [1994]. Abschließend wird nochmals betont, dass die zeitliche Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung und nicht die Phasenwegverlängerung selbst der Schlüsselparameter für die Ableitung des Brechungswinkels ist.

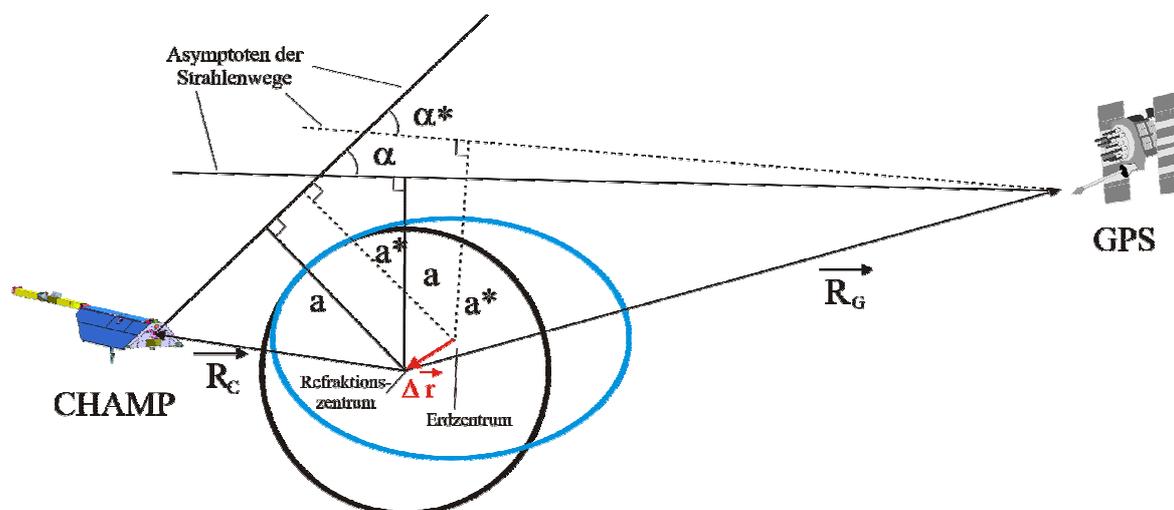
### 3.3.2 Ellipsoidkorrektur

Wird der Brechungswinkel  $\alpha$  und der zugehörige Impaktparameter  $a$  unter Annahme der Gültigkeit der geometrischen Optik abgeleitet, ist die Annahme einer symmetrischen Refraktivitätsverteilung erforderlich. Diese Voraussetzung ist auch für die Anwendung der Abel inversion zur Ableitung der Refraktivitätsverteilung erforderlich.

Durch die Ellipsoidform der Erde ist das Erdzentrum als Zentrum der symmetrischen Refraktivitätsverteilung nicht geeignet. Wird dieser Effekt nicht korrigiert, kann er zu erheblichen Temperaturfehlern von bis zu 6 K am Erdboden führen [*Syndergaard*, 1998].

Wird angenommen, dass keine horizontalen Gradienten auftreten, erfolgt die Ausbreitung der Welle nur in einer Ebene, die den Strahl enthält. Zur Korrektur wird dann an die Schnittfläche zwischen dieser Ebene und dem Erdellipsoid eine Kugel mit dem

Krümmungsradius der Schnittfläche angepasst (Abb. 3.14). Der Radius dieser Kugel ist der lokale Krümmungsradius, ihr Mittelpunkt das lokale Refraktivitätszentrum.



**Abb. 3.14:** Skizze zum Verständnis der Ellipsoidkorrektur. Die Grafik zeigt eine Schnittfläche des Erdellipsoides in meridionaler Richtung. Der Mittelpunkt der an das Ellipsoid angepassten Kugel ist das lokale Krümmungszentrum der als kugelsymmetrisch angenommen Refraktivitätsverteilung (nach [Syndergaard, 1998]).

Werden die Ortsvektoren von CHAMP und dem okkultierenden GPS-Satelliten auf dieses lokale Krümmungszentrum transformiert, können Brechungswinkel und Impaktparameter wie im kugelsymmetrischen Fall abgeleitet werden (Gln. 3.40, 3.44 und 3.45). Eine detaillierte Beschreibung der Ellipsoidkorrektur gibt Syndergaard [1998]. Weiterhin gibt Rodgers [2000] eine einfach zu handhabende Formel für die Ableitung des lokalen Krümmungsradius in einem Punkt mit der geografischen Breite  $\phi$  in eine Richtung  $\alpha$  gegenüber der Meridionalebene an:

$$R_{LC} = (R_{NS}^{-1} \cos^2 \alpha + R_{EW}^{-1} \sin^2 \alpha)^{-1} \quad (3.46)$$

mit den Krümmungsradien in Nord-Süd  $R_{NS}$  und Ost-West Richtung  $R_{EW}$ :

$$R_{NS} = R_q^2 R_p^2 (R_q^2 \cos^2 \phi + R_p^2 \sin^2 \phi)^{\frac{3}{2}} \quad (3.47)$$

$$R_{EW} = R_q^2 (R_q^2 \cos^2 \phi + R_p^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.48)$$

$R_q$  und  $R_p$  sind hierbei die Erdradien am Äquator bzw. an den Polen, für das WGS-84 Referenzellipsoid gilt  $R_q = 6378,137$  km und  $R_p = 6356,752$  km.

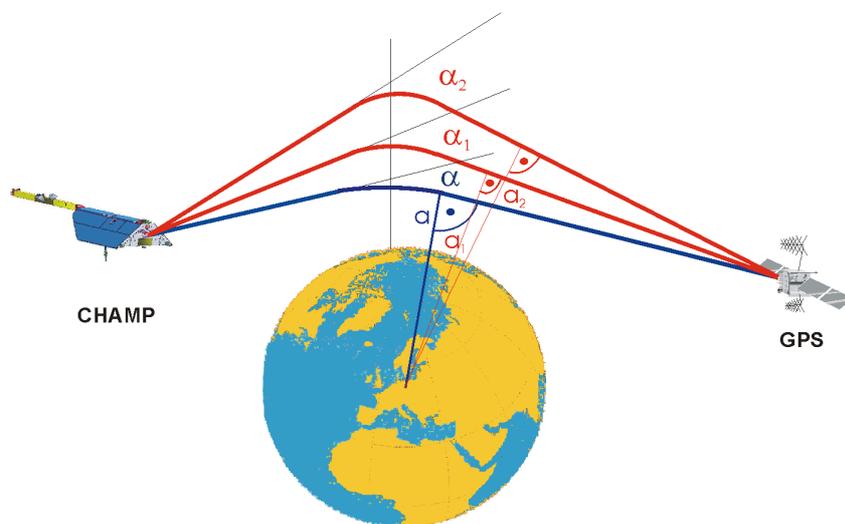
### 3.3.3 Ionosphärenkorrektur

Die von den GPS-Satelliten während der Okkultation ausgesandten Signale passieren, bevor und nachdem sie die neutrale Atmosphäre tangential durchqueren, die dispersive Ionosphäre. Diese kann als eine Art Linse aufgefasst werden, die der neutralen Atmosphäre

überlagert ist und eine zusätzliche Brechung der Strahlenwege des  $L1$ - und  $L2$ -Signales verursacht.

Im Höhenbereich von ca. 40-50 km erreicht der ionosphärische Einfluß auf die Brechung des Strahlenweges die gleiche Größenordnung, die durch die Brechung in der neutralen Atmosphäre verursacht wird (siehe auch vertikale Verteilung der Dopplerverschiebung Abb. 3.13). Diese zusätzliche Brechung muss bei der Vertikalsondierung der neutralen Atmosphäre korrigiert werden.

Das GPS-System stellt Signale auf zwei verschiedenen Trägerfrequenzen zur Verfügung und bietet durch geeignete Kombination beider Signale eine Möglichkeit zur Korrektur des Ionosphäreneinflusses. In erster Ordnung (3.2) ist der ionosphärisch bedingte Brechungsindex proportional zum inversen Quadrat der Trägerfrequenz. Eine einfache Linearkombination der  $L1$ - und  $L2$ - Signale ermöglicht damit eine nahezu komplette



**Abb. 3.15:** Separierung der Strahlenwege der  $L1$ - und  $L2$ -Signale (rot) durch die dispersive Ionosphäre. Mit blau ist der fiktive Strahlenweg ohne Ionosphäreneinfluss gekennzeichnet.

Eliminierung des ionosphärischen Beitrages. Zwei Methoden werden erläutert, die ohne zusätzliche Informationen (modellunabhängig) über die Ionosphäre angewandt werden können. Mit einer Raytracing-Simulationsstudie wird die Leistungsfähigkeit beider Verfahren für verschiedene ionosphärische Bedingungen untersucht.

### Linearkombination der Phasenwege

Bei der Auswertung von GPS-Messungen wird für viele Anwendungen in Navigation und Geodäsie die Linearkombination der parallel zum Zeitpunkt  $t$  aufgezeichneten Phasen (optischen Weglängen) beider Trägerfrequenzen angewendet [z.B. Seeber, 1989]:

$$L_c(t) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1(t) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2(t). \quad (3.49)$$

$L_1(t)$  und  $L_2(t)$  sind die in (3.18) eingeführten optischen Weglängen der Signale. Der dispersive Charakter der Ionosphäre führt zu einer Aufspaltung der Strahlenwege, der bei Messungen von GPS-Bodenstationen mit hohen Elevationen der GPS-Satelliten sehr klein ist [Jakowski et al., 1994]. Die Autoren berechneten mit Raytracinguntersuchungen eine

maximale Strahlenwegaufspaltung des  $L1$ - und  $L2$ -Strahlenweges von ca. 7 m bei einem Elevationswinkel  $\varepsilon$  zum GPS-Satelliten von  $25^\circ$ . Dabei wurde eine sphärisch symmetrische Ionosphäre mit einem vertikalen TEC-Wert (Total Electron Content) von  $40 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$  angenommen. Bei Limbsondierungen jedoch, also tangentialem Durchstreifen der Ionosphäre z.B. in einer Höhe von 100 km über der Erdoberfläche, kann die Strahlenwegaufspaltung je nach ionosphärischen Bedingungen eine Größenordnung von bis zu 500 m erreichen. Dieser Dispersionseffekt führt zum dominanten Fehler bei der Anwendung von (3.49) [Hardy et al., 1994]. Ein zusätzlicher Fehler entsteht durch die Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung im ionosphärischen Beitrag zum Brechungsindex (3.2). Die Größenordnung dieser Fehler wird in Melbourne et al. [1994] diskutiert.

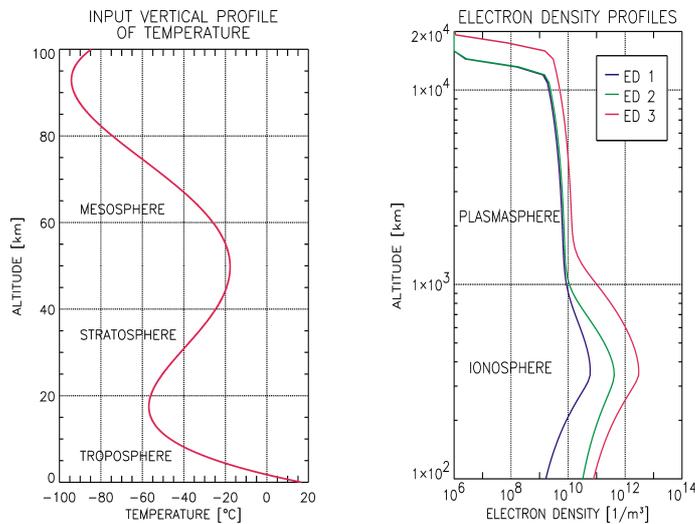
### Linearkombination der Brechungswinkel

Von Vorob'ev und Krasil'nikova [1994] und Ladreiter und Kirchengast [1996] wurde eine Korrekturmethode vorgeschlagen und beschrieben, die speziell für die Okkultationsgeometrie abgeleitet wurde. Sie verwendet die Linearkombination der für beide GPS-Signale separat abgeleiteten Brechungswinkel bei einem gemeinsamen Impaktparameter  $a$ :

$$\alpha(a) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_1(a) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_2(a). \quad (3.50)$$

Diese Brechungswinkelkorrektur vermeidet den Großteil des Dispersionseffektes, da die Linearkombination beider Brechungswinkel bei einem gemeinsamen Impaktparameter erfolgt. Allerdings ist sie im Gegensatz zur Linearkombination der Phasenwege an die Voraussetzung der sphärischen Symmetrie des ionosphärischen Brechungsindex gebunden [Syndergaard, 1999], eine Voraussetzung, die allerdings nur schwach eingeht. Die Brechungswinkelkorrektur wurde von verschiedenen Gruppen zur Auswertung des GPS/MET-Experiments benutzt [z.B. Wickert et al., 2001a; Steiner et al., 1999; Kursinski et al., 1997; Rocken et al., 1997].

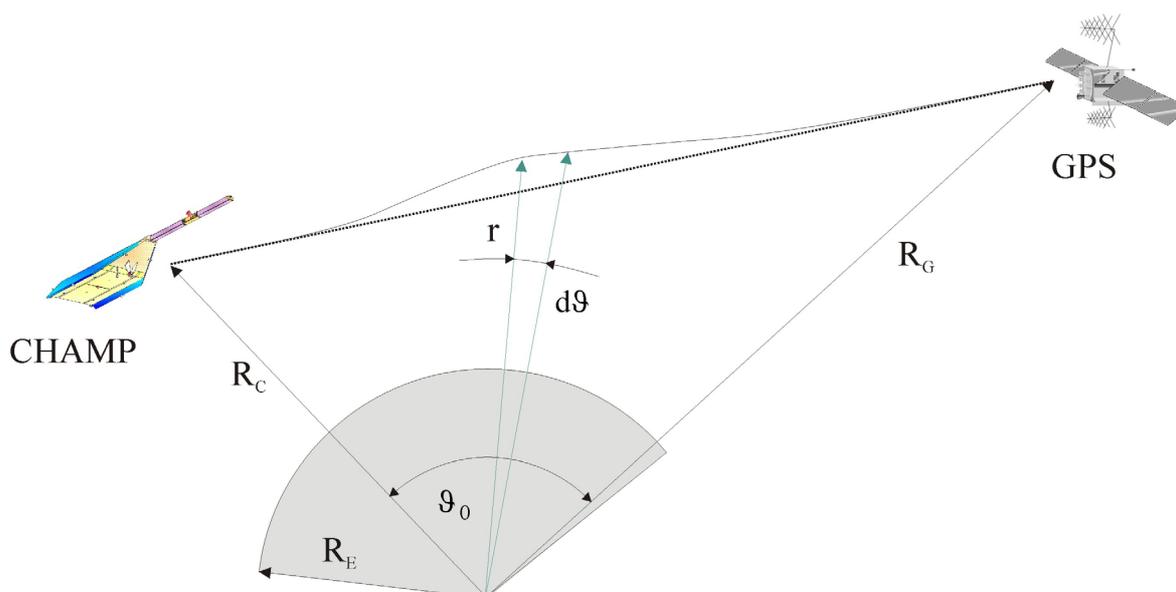
### Vergleich beider Korrekturverfahren



**Abb. 3.16:** Links: Vertikales Temperaturprofil der elektrisch neutralen Atmosphäre und Rechts: Modellionosphären für die 2D-Raytracingsimulation. ED1: geringe Solaraktivität (Nacht), ED2: geringe Solaraktivität (Tag), ED3: hohe Solaraktivität (Tag) (aus [Wickert et al., 1997]).

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit beider Methoden wurde eine 2D-Raytracingstudie bei Verwendung sphärisch symmetrischer Refraktivitätsverteilungen durchgeführt. Dabei wurden Okkultationsmessungen an einer Modellatmosphäre für verschiedene ionosphärische Bedingungen simuliert (Vorwärtssimulation). Die Modellatmosphäre setzt sich aus einem Neutralgasprofil (abgeleitet aus dem Atmosphärenmodell MSISE-90 [Hedin, 1991]) und verschiedenen Modellionosphären zusammen, welche in Abb. 3.16 dargestellt sind.

Das Ergebnis der Vorwärtssimulation waren simulierte Okkultationsmessungen auf beiden Trägerfrequenzen  $L1(t)$  und  $L2(t)$ . Die so erzeugten Messwerte und die Bahninformation der Modellsatelliten (CHAMP und GPS-Okkultationssatellit) wurden benutzt, um mit einem Inversionsprogramm das vertikale Temperaturprofil der elektrisch neutralen Modellatmosphäre wiederherzustellen, wobei die beschriebenen zwei Ionosphärenkorrekturverfahren angewendet wurden. Durch Vergleich des Eingabetemperaturprofils mit dem unter Verwendung des jeweiligen Korrekturverfahrens berechneten Temperaturprofils (Ausgabeprofil) aus den simulierten Messwerten wurde die Leistungsfähigkeit der Korrektur getestet.



**Abb. 3.17:** Schematische Übersicht über die Raytracinggeometrie mit den im Text verwendeten Variablen (aus [Wickert et al., 1997]).

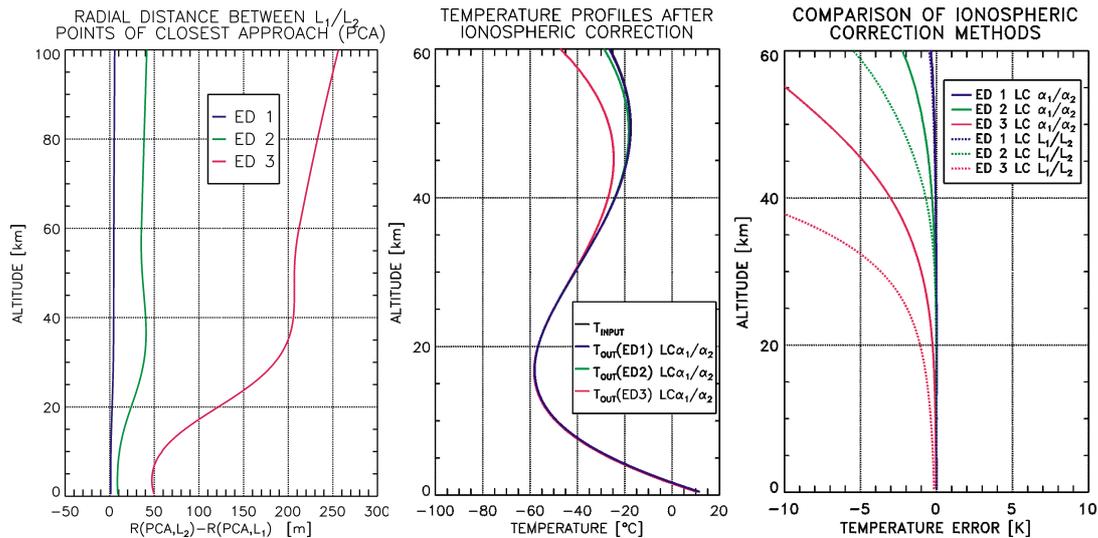
Der Strahlenweg wurde unter Annahme einer sphärisch symmetrischen Refraktivitätsverteilung sowohl in der neutralen Atmosphäre als auch der Ionosphäre berechnet. Aus mathematischer Sicht wurde dabei das nichtlineare Randwertproblem zweiter Ordnung (3.51) numerisch mittels einer Shooting-Methode unter Verwendung eines Runge-Kutta-Verfahrens gelöst. (3.51) wurde aus dem Fermat'schen Prinzip abgeleitet (Anhang A):

$$r'' = r + 2 \frac{(r')^2}{r} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} (r^2 + (r')^2). \quad (3.51)$$

Die Zuordnung der Variablen ist aus Abb. 3.17 ersichtlich. In (3.51) ist  $r' = dr/d\vartheta$ . Die Randwerte sind  $r(0) = 26.378$  km und  $r(\vartheta_0) = 6.878$  km. Die Lösung des Randwertproblems lieferte die Trajektorie  $r(\vartheta)$  des GPS-Signals vom GPS- zum LEO-Satelliten bei Verwendung der jeweiligen Refraktivitätsverteilung  $n(r)$ . Mit dem so berechneten Strahlenweg  $r(\vartheta)$  wurde die optische Weglänge  $L$  mit einer Genauigkeit von  $10^{-4}$  mm berechnet (3.52).

$$L = \int_0^{\vartheta_0} n(r(\vartheta)) \sqrt{r^2(\vartheta) + (r'(\vartheta))^2} d\vartheta \quad (3.52)$$

Aus den modellierten Messungen  $L_1(t)$  und  $L_2(t)$  wurden die atmosphärischen Parameter berechnet (Kap. 3.3). Eine Kontrollrechnung nur unter Verwendung der elektrisch neutralen Atmosphäre ergab eine Übereinstimmung zwischen Ein- und Ausgabe-temperaturprofil von besser als  $10^{-3}$  K bis zu einer Höhe von 60 km. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind in Abb. 3.18 dargestellt. Abb. 3.18 (Links) zeigt die Höhenabhängigkeit des radialen Abstands zwischen den Punkten der dichtesten Näherung der Signalwege beider GPS-Frequenzen an die Erdoberfläche. Die Abweichungen reichen von 40 m am Tag für geringe Solaraktivität in mittleren Breiten bis zu mehr als 200 m bei starker Solaraktivität und bestätigen die Tatsache der nicht zu vernachlässigenden Strahlaufspaltung beider Signalwege (Kap. 3.3.3).



**Abb. 3.18:** Ergebnisse der Raytracingsimulationen. **Links:** Strahlenwegaufspaltung zwischen  $L_1$ - und  $L_2$ -Signalweg; **Mitte:** Eingabetemperaturprofil und Temperaturprofile nach Anwendung der Ionosphärenkorrektur der Brechungswinkel für verschiedene Elektronendichteverteilungen; **Rechts:** Vergleich unterschiedlicher Ionosphärenkorrekturen für verschiedene Elektronendichteverteilungen, Differenz zwischen Ausgabe- und Eingabetemperaturprofil (aus [Wickert et al., 1997]).

Abb. 3.18 (Mitte) zeigt einen Vergleich des Eingabetemperaturprofils mit den ionosphärenkorrigierten Ausgabetemperaturprofilen (Linearkombination der Brechungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ ). Die Abweichungen zum Eingabetemperaturprofil sind in einem Vergleich der Eingabe- mit den Ausgabetemperaturprofilen noch deutlicher dargestellt [Abb. 3.18 (Rechts)]. Für alle drei simulierten ionosphärischen Bedingungen liefert die Linearkombination der Brechungswinkel deutlich bessere Ergebnisse (durchgezogene Linie) als die Linearkombination der Trägerphasen (gestrichelte Linie).

Die Ionosphäre auf der Nachtseite kann bei geringer Solaraktivität mit beiden Methoden nahezu komplett korrigiert werden, auf der Tagseite gelingt mit der Brechungswinkelkorrektur bis in Höhen von 40 km ebenfalls eine Korrektur im Bereich deutlich unter 1 K Abweichung. Für hohe Solaraktivität entsteht allerdings schon in einer Höhe von 40 km ein Restfehler von ca. 3 K, der in einer Höhe von ca. 55 km schon auf 10 K anwächst. Die dargestellten Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung zu Resultaten von Simulationen, die durch *Gorbunov et al.* [1996a] und *Ladreiter und Kirchengast* [1996] durchgeführt wurden. Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die modellunabhängige (d.h. Korrektur ohne zusätzliche, ergänzende Informationen) Ionosphärenkorrektur durch die Linearkombination der Brechungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  für geringe Solaraktivität ausreichend ist, während unter Bedingungen hoher Solaraktivität ein signifikanter Restfehler verbleibt.

### 3.3.4 Statistische Optimierung des Brechungswinkels

Im Höhenbereich oberhalb von 40/50 km haben der abgeleitete Brechungswinkel und sein Messrauschen eine vergleichbare Größenordnung (u.a. [Hocke, 1997; Sokolovskiy und Hunt 1996]). Eine Initialisierung der oberen Randbedingung mit zusätzlichen Brechungs-

winkeldaten („Optimierung“) ist notwendig, um unplausible Messwerte in diesem Höhenbereich zu eliminieren und um die folgenden Prozessierungsschritte, beginnend mit der Abelinversion, zu stabilisieren. Die mit dieser Optimierung verbundene Einführung von Fehlern in die abgeleiteten Vertikalprofile wird ausführlich durch *Steiner* [1998] diskutiert.

Hier wird eine statistische Optimierungsmethode verwendet, die durch *Hocke* [1997] beschrieben und von *Sokolovskiy und Hunt* [1996] eingeführt wurde. In beiden Arbeiten wird das Atmosphärenmodell MSISE-90 [*Hedin*, 1991] benutzt. Die Umsetzung der Optimierung erfolgt mit der Anwendung einer Wichtungsfunktion, mit der Mess- und Modellwerte miteinander verknüpft werden.

Zuerst wird das Rauschen  $\sigma_{\text{rausch}}$  des gemessenen Brechungswinkels  $\alpha$  durch die lineare Abweichung vom Modellbrechungswinkel  $\alpha_m$  abgeschätzt:

$$\sigma_{\text{rausch}} = \alpha - \alpha_m. \quad (3.53)$$

Die klimatologisch bedingte Variation des Brechungswinkels in der Mesosphäre/Stratopause wird mit 20% angenommen (ausgewählt durch *Sokolovskiy und Hunt* [1996]):

$$\sigma_{\text{signal}} = 20\% \alpha_m. \quad (3.54)$$

Der Wichtungsfaktor  $C$  berechnet sich nach:

$$C = \frac{1}{1 + \left| \frac{\sigma_{\text{rausch}}}{\sigma_{\text{signal}}} \right|}. \quad (3.55)$$

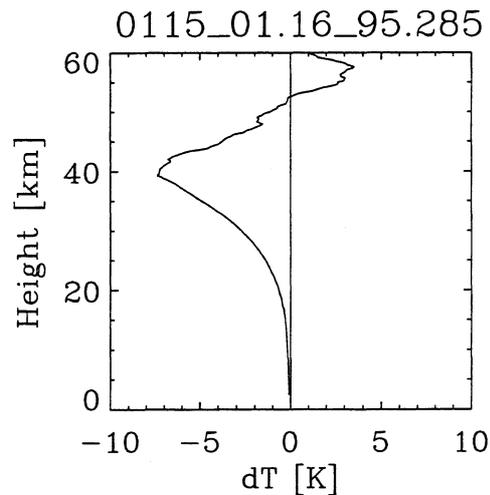
Der statistisch optimierte Brechungswinkel  $\alpha_{\text{opt}}$  ergibt sich wie folgt:

$$\alpha_{\text{opt}} = \alpha_m + C \sigma_{\text{rausch}}. \quad (3.56)$$

Bei geringen Höhen ( $C \rightarrow 1$ ) ist der optimierte Brechungswinkel mit dem gemessenen identisch ( $\alpha_{\text{opt}} \rightarrow \alpha$ ), zu größeren Höhen hin ( $C \rightarrow 0$ ) geht der optimierte Brechungswinkel in den Modellbrechungswinkel über ( $\alpha_{\text{opt}} \rightarrow \alpha_m$ ).

In der ersten Version der Prozessierungssoftware wird die Korrektur bei Höhen oberhalb von 45 km angewendet. Das verwendete MSISE-90-Brechungswinkelprofil wird bei einer Höhe von 130 km initialisiert. Den Einfluss unterschiedlicher Initialisierungshöhen für das Modell-Brechungswinkelprofil auf das abgeleitete Temperaturprofil beschreibt *Steiner* [1998].

Der Einfluss der Abweichung des Hintergrundmodells für die statistische Optimierung vom tatsächlichen atmosphärischen Zustand, also des Fehlers des Modells, auf die abgeleiteten atmosphärischen Parameter wurde detailliert von *Steiner* [1998] untersucht. Abb. 3.19 zeigt als Beispiel den Temperaturfehler einer GPS/MET-Sondierung, der durch einen Fehler im Hintergrundmodell von 5% verursacht wird. Es ergibt sich ein Bias in der Temperatur, der bei 30 km Höhe 3 K und bei 40 km ca. 8 K beträgt.



**Abb. 3.19:** Beispiel für den Einfluss eines systematischen Fehlers von 5%??im verwendeten Hintergrundmodell (MSISE-90) für die statistische Optimierung des Brechungswinkels. Der systematische Fehler führt zu einem Bias in den abgeleiteten atmosphärischen Größen. Hier ist der Temperaturfehler einer GPS/MET-Messung dargestellt (aus [Steiner, 1998]).

Einen weiteren, neueren Zugang zur Optimierung des Brechungswinkels geben *Rieder und Kirchengast* [2001]. Die Autoren kombinieren a priori Atmosphäreninformation (Atmosphärenmodell CIRA86aQ\_UoG [Kirchengast et al., 1999]) und gemessenen Brechungswinkel in „statistisch optimaler“ Weise, um den wahrscheinlichen atmosphärischen Zustand zu ermitteln. Einen ähnlichen Zugang verwendet auch *Healy* [2001]. Dieses Verfahren beruht auf den gleichen Prinzipien, wie das Assimilationsverfahren zur simultanen Ableitung von Wasserdampf- und Temperaturprofilen in der unteren Troposphäre, welches in Kap. 3.3.6 erläutert wird.

### 3.3.5 Abel-Transformation und Ableitung der Refraktivität

Unter Annahme sphärischer Symmetrie für die Refraktivitätsverteilung der Atmosphäre besteht eine charakteristische Beziehung zwischen dem Brechungswinkel und der radialen Verteilung des Refraktionsindex, die aus dem Bouger'schen Gesetz [z.B. *Born und Wolf*, 1993] abgeleitet werden kann (siehe [Fjeldbo et al., 1971]):

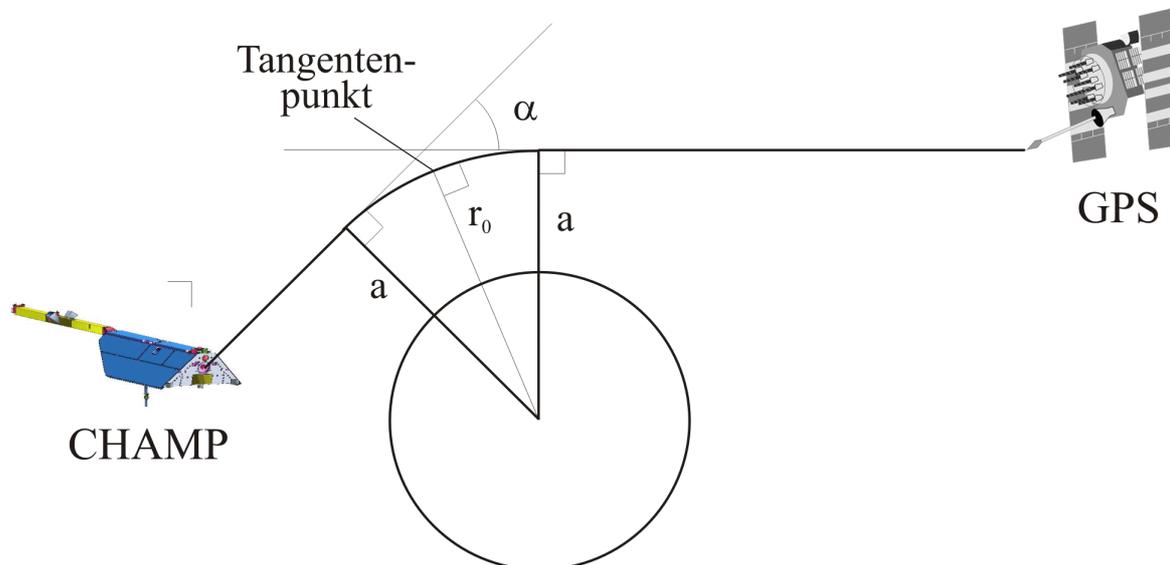
$$\alpha(a) = -2a \int_{r_0}^{\infty} \frac{d \ln n / dr}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} dr. \quad (3.57)$$

Hierbei ist  $a$  der in Kap. 3.3.1 eingeführte Impaktparameter. Der Radius  $r_0$  ist die Entfernung des Strahles am Tangentialpunkt zum Krümmungszentrum (Abb. 3.20). Er ist mit dem Impaktparameter wie folgt verknüpft:

$$r_0 = \frac{a}{n(r_0)}. \quad (3.58)$$

(3.57) ist die Abel-Transformation, die Formulierung eines sogenannten Vorwärtsproblems: Der Zustand der Atmosphäre, die Refraktivitätsverteilung  $n(r)$ , ist bekannt;

berechnet wird der Einfluss dieses konkreten Zustandes auf die beeinflusste Größe (Beobachtung), hier der Brechungswinkel des GPS-Signales. Bei der Auswertung der GPS-Okkultationsdaten ist das Messsignal (die beeinflusste Größe) bekannt. Das Ziel ist die Bestimmung des Atmosphärenzustandes, also der Refraktivitätsverteilung  $n(r)$ . Folglich muss das zu (3.57) inverse Problem gelöst werden, es wird oft auch als "inverses Problem der Refraktivität" bezeichnet.



**Abb. 3.20:** Ableitung des Brechungswinkels  $\alpha$  unter Annahme sphärischer Symmetrie.

Die Lösung des inversen Problems zu (3.57) ist die inverse Abel-Transformation [z.B. Phinney und Anderson, 1968; Fjeldbo et al., 1971]:

$$n(r_0) = \exp \left( \frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(x)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx \right). \quad (3.59)$$

Das Integral (3.59) kann numerisch durch partielle Integration gelöst werden, womit die Polstelle bei  $x=a$  vermieden werden kann. Es ergibt sich [Fjeldbo et al., 1971]:

$$n(r_0) = \exp \left( \frac{1}{\pi} \int_a^\infty \ln \left\{ \frac{a(\alpha)}{a_1} + \sqrt{\left( \frac{a(\alpha)}{a_1} \right)^2 - 1} \right\} d\alpha \right). \quad (3.60)$$

Hierbei gilt für  $r_0$ :

$$r_0 = \frac{a_1}{n(r_0)}. \quad (3.61)$$

Die Gleichungen (3.60) und (3.61) können benutzt werden, um den Refraktionsindex  $n$  in Abhängigkeit vom radialen Abstand vom Krümmungszentrum  $r_0$  zu berechnen.

Die diskrete Repräsentation der inversen Abel-Transformation ist die Matrix-Inversion [Steiner et al., 1998]. Beide Verfahren liefern bei der Ableitung der Refraktivitätsprofile identische Ergebnisse. Die Matrixinversion hat jedoch Vorteile bei der Einführung von „statistisch optimalen“ Inversionsverfahren (Einführung in Kap. 3.3.6, z.B. [Rodgers, 1976]). Die diskrete Näherung für die Abel-Transformation (3.58) ist gegeben durch:

$$\frac{\alpha_i}{2a_i} \cong \sum_{k=1}^i \nabla \tilde{n}_k \frac{\Delta x_k}{\sqrt{(x_k^2 - a_i^2)}}. \quad (3.62)$$

$\alpha_i(a_i)$  ist der Brechungswinkel des Strahles mit dem Impaktparameter  $a_i$ .  $\Delta x_k$  ist die Schichtdicke einer der  $k$  Schichten, in die die Atmosphäre zur Diskretisierung des Problems aufgeteilt wird.  $\nabla \tilde{n}_k$  ist der Gradient des Refraktionsindex in der jeweiligen Schicht, er wird innerhalb der Schicht als konstant angenommen. Gleichung (3.62) kann in der Matrix-Formulierung geschrieben werden:

$$\overline{\left(\frac{\alpha}{2a}\right)} = \mathbf{A} \overline{(\nabla \tilde{n})}. \quad (3.63)$$

Der Vektor  $\overline{\left(\frac{\alpha}{2a}\right)}$  enthält die bekannten Messwerte (Brechungswinkel). Der gesuchte Vektor  $\overline{(\nabla \tilde{n})}$  charakterisiert den Atmosphärenzustand. Die Matrix  $\mathbf{A}$  repräsentiert den (Vorwärts) Abel-Transformationsoperator. In ihm ist die gesamte Geometrie des Problems enthalten. Durch Umstellen nach  $\overline{(\nabla \tilde{n})}$ , dem gesuchten Vektor, ergibt sich die Matrixgleichung zu dessen Bestimmung:

$$\overline{(\nabla \tilde{n})} = \mathbf{A}^{-g} \overline{\left(\frac{\alpha}{2a}\right)}. \quad (3.64)$$

Hierbei ist  $\mathbf{A}^{-g}$  die generalisierte inverse Matrix zu  $\mathbf{A}$ . Die Lösung von (3.64) wird detailliert von *Steiner* [1999] beschrieben.

### 3.3.6 Berechnung der atmosphärischen Parameter

Der letzte Prozessierungsschritt ist erreicht. Aus der abgeleiteten vertikalen Refraktivitätsverteilung werden vertikale Profile atmosphärischer Parameter, wie Temperatur und spezifische Feuchte berechnet. Hierbei besteht die prinzipielle Schwierigkeit, daß es ohne Verwendung zusätzlicher Information nicht möglich ist, eine Separation von trockenem und feuchtem Anteil der Atmosphäre an der Gesamtrefraktivität (Kap. 3.1.1) durchzuführen. Aus diesem Grund wird hier die Berechnung für die feuchte und trockene Atmosphäre unterschieden.

### Trockene Atmosphäre

Der Feuchteterm der Atmosphäre (zweiter Term in (3.2)) kann in den kälteren Regionen der Troposphäre und Stratosphäre vernachlässigt werden. Bei Temperaturen unterhalb 250 K beträgt der Temperaturfehler, der durch bis zu 50% Abweichung des Wasserdampfes von der Klimatologie verursacht wird, weniger als 1 K [Kursinski *et al.*, 1996]. Für höhere Breiten, beginnend in den subpolaren Regionen, kann diese Näherung bis zum Erdboden angewendet werden. Die Atmosphäre kann dann als trockene Atmosphäre betrachtet werden. Die Refraktivitätsgleichung (3.2) reduziert sich zur Gleichung für trockene Luft (3.6). Mit der Zustandsgleichung des idealen Gases, umgestellt nach dem Luftdruck  $p(h)$ :

$$p(h) = \frac{\rho(h) T_D(h) R}{M} \quad (3.65)$$

mit der Luftdichte  $\rho(h)$ , der Trockentemperatur  $T_D(h)$ , der universalen Gaskonstanten  $R$  ( $8.3145 \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$ ) und der mittleren molaren Luftmasse  $M$  ( $28,964 \text{ kg/kmol}$  bei  $h < 80 \text{ km}$ ) ergibt sich nach Einsetzen in (3.6):

$$\rho(h) = 4,489 \cdot 10^{-3} \times N(h). \quad (3.66)$$

Somit ist die Luftdichte  $\rho(h)$  (hier in  $\text{kg/m}^3$ ) direkt proportional zur Refraktivität  $N(h)$  und kann direkt berechnet werden.

Bei bekannter vertikaler Verteilung der Luftdichte  $\rho(h)$  kann die vertikale Luftdruckverteilung unter Annahme hydrostatischen Gleichgewichts:

$$dp(h) = -g(h) \rho(h) dh \quad (3.67)$$

durch Integration des Produkts aus höhenabhängiger Luftdichte  $\rho(h)$  und Gravitationsbeschleunigung  $g(h)$  über die Höhe ermittelt werden:

$$p(h) = \int_h^{\infty} g(h') \rho(h') dh'. \quad (3.68)$$

Die nochmalige Anwendung der Zustandsgleichung des idealen Gases führt zum vertikalen Profil der Trockentemperatur mit:

$$T_D(h) = 77,6 \frac{p(h)}{N(h)}. \quad (3.69)$$

Somit können Temperatur-, Dichte- und Druckprofil direkt aus dem vertikalen Refraktivitätsprofil abgeleitet werden.

### Feuchte Atmosphäre

In Kap. 3.1.1 wurde gezeigt, dass trockener und feuchter Anteil gleichermaßen zur Gesamtrefraktivität beitragen. Steht man vor der Aufgabe, die Refraktivität in trockenem und feuchtem Anteil zu separieren, kann dies nur durch die Hinzunahme zusätzlicher Information gelöst werden. In der Praxis verwendet man externe Temperaturinformationen aus meteorologischen Analysen (z.B. ECMWF, NCEP), um in der unteren Troposphäre eine Separation von trockenem und feuchtem Anteil der Refraktivität durchzuführen. Hier

wird ein iteratives Verfahren von *Gorbunov und Sokolovskiy* [1993] zur Berechnung der spezifischen Feuchte vorgestellt:

1. Annahme einer trockenen Atmosphäre:

$$q(h) = 0 \quad (3.70)$$

2. Berechnung des Profils der virtuellen Temperatur:

$$T_V(h) = T(h) [1 + 0,608 q(h)] \quad (3.71)$$

3. Ableitung des Druckprofils:

$$p(h) = p(h^*) \exp \left[ R^{-1} \int_h^{h^*} g(h') T_V^{-1}(h') dh' \right] \quad (3.72)$$

4. Berechnung des Profils der spezifischen Feuchte  $q(h)$ :

$$p_w(h) = \frac{T(h)^2}{c_2} \left[ n(z) - 1 - c_1 \frac{p(h)}{T(h)} \right] \quad (3.73)$$

$$q(h) = \frac{0,622 p_w(h)}{[p(h) - 0,378 p_w(h)]}. \quad (3.74)$$

Mit dem berechneten Profil der spezifischen Feuchte  $q(h)$  wird wieder bei Schritt 2 begonnen; das Verfahren konvergiert sehr schnell.

Einen weiteren Zugang zur Lösung der Unbestimmtheit zwischen Feucht- und Trockenanteil an der Refraktivität bieten 1D-Variationsverfahren. Dabei wird der wahrscheinlichste atmosphärische Zustand durch eine Kombination der Okkultationsmessungen mit atmosphärischer „Hintergrund“information (zusammen mit der zugehörigen Fehlerinformation) in statistisch optimaler Weise gewonnen [*Healy und Eyre*, 2000; *Palmer et al.*, 2000]. Die „Hintergrund“information wird dabei aus meteorologischen Analysen oder Wettervorhersagen gewonnen. Bei dieser Methode werden Feuchte- und Temperaturprofile in einem Schritt abgeleitet.

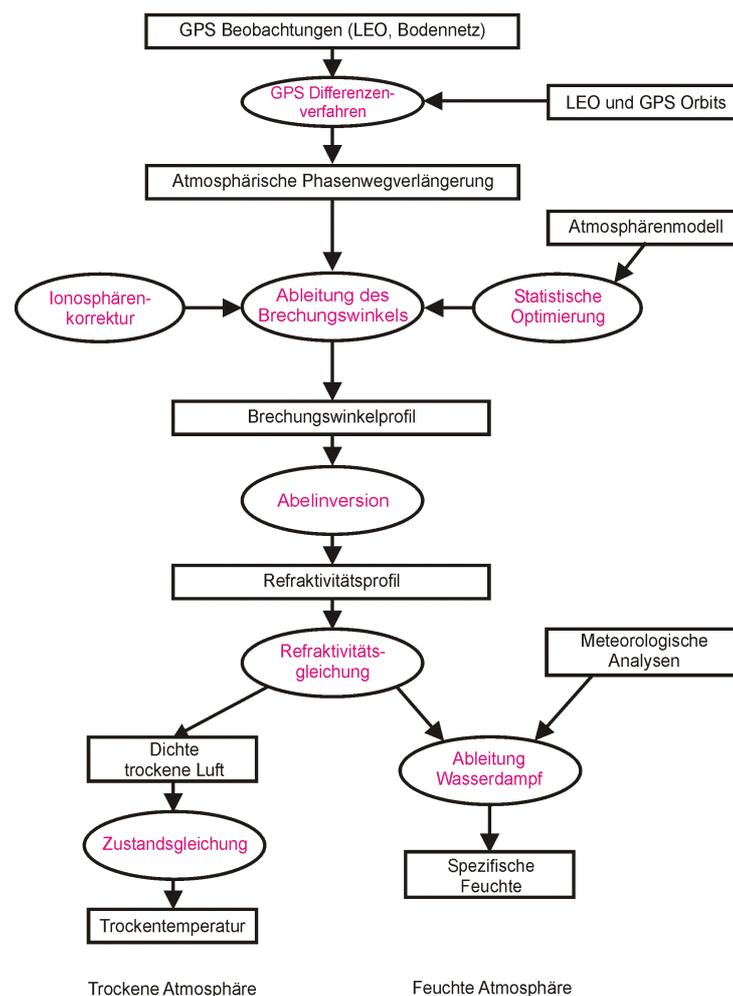
Die mathematische Aufgabe besteht in der Minimierung der sog. Kostenfunktion  $J(x)$  (also der Lösung der Gleichung  $\nabla_x J(x) = 0$ ). Die Kostenfunktion gibt einen Zusammenhang über die mittlere Abweichung der Messungen zu einem angenommenen atmosphärischen Zustand und ist gegeben durch:

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + \frac{1}{2} (y^o - H(x))^T (E + F)^{-1} (y^o - H(x)) \quad (3.75)$$

Hier ist  $B$  die Fehlerkovarianzmatrix der atmosphärischen Analyse- oder Vorhersageinformation des angenommenen atmosphärischen Zustands.  $H(x)$  ist das „Vorwärts“-modell, das die Hintergrundinformation (Analyse bzw. Vorhersageatmosphäre) in eine „Modell“-messung überführt.  $E$  und  $F$  sind die Fehlerkovarianzen der Messungen und des Vorwärtsmodells. Mit  $x$  ist der zu berechnende wahrscheinliche Atmosphärenzustand bezeichnet,  $x^b$  kennzeichnet den Atmosphärenzustand, der aus der Analyse bzw. der Vorhersage abgeleitet wird und  $y^o$  die Messungen bzw. Beobachtungen.

*Healy und Eyre* [2000] und *Palmer et al.* [2000] beschreiben detailliert die praktische Realisierung eines eindimensionalen Variationsverfahren. Beide Autoren benutzten zur Minimierung von  $J(x)$  in (3.75) ein iteratives Levenberg-Marquardt Verfahren [*Press et al.*, 1992] zur Berechnung des wahrscheinlichen atmosphärischen Zustandes  $x$  (vertikales Temperatur- und Feuchteprofil sowie Bodenluftdruck). Für  $y^0$  wurden aus Okkultationsmessungen abgeleitete Refraktivitätsprofile [*Healy und Eyre*, 2000] oder Brechungswinkelprofile [*Palmer et al.*, 2000] verwendet.

Abschließend gibt Abb. 3.21 einen Gesamtüberblick über die Ableitung atmosphärischer Parameter aus GPS-Radiookkultationsmessungen.



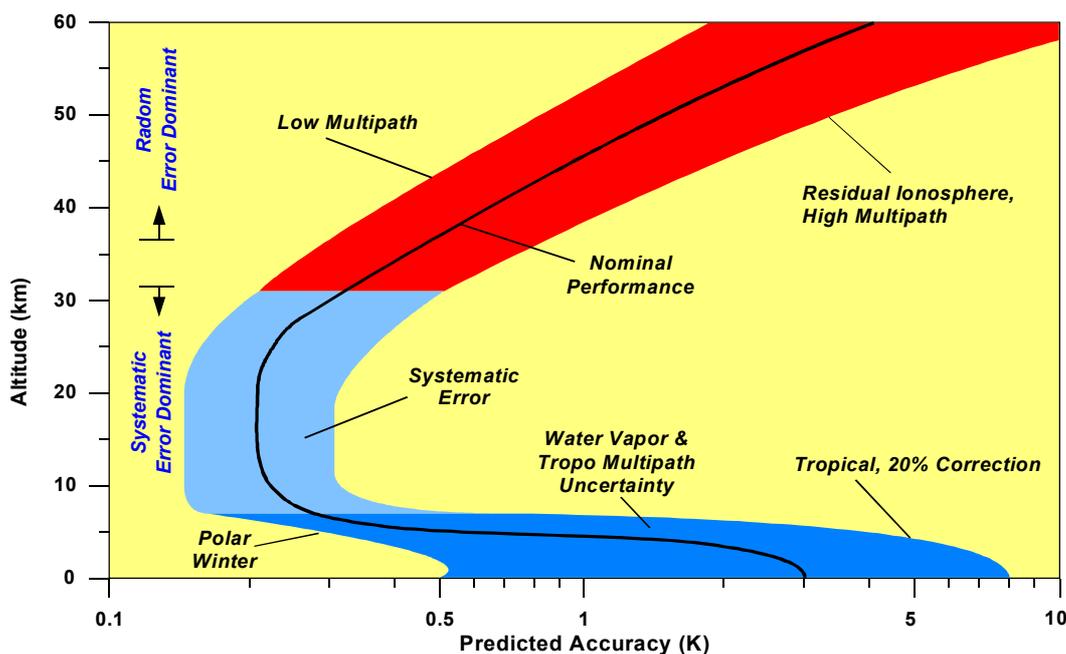
**Abb. 3.21:** Gesamtübersicht über die Prozessierungsschritte zur Ableitung atmosphärischer Parameter aus GPS-Radiookkultationsmessungen.

### 3.3.7 Genauigkeit der abgeleiteten Temperaturen

Einen Überblick über das Genauigkeitspotential von Temperaturmessungen mit der GPS-Radiokkultationstechnik gibt Abb. 3.22.

Grundsätzlich wird die Atmosphäre dabei in drei Höhenbereiche eingeteilt. Für diese Bereiche existieren unterschiedlichen Messgenauigkeiten und verschiedene dominierende Fehlerquellen. In der Troposphäre kommt es durch die Anwesenheit des Wasserdampfes bei der Ableitung unter der Annahme von trockener Atmosphäre (abgesehen von den Polargebieten) zu einem Fehler in der Ableitung der Temperatur, auch Mehrwegeeffekte (Kap. 3.3.8) führen zu Messfehlern. In der oberen Stratosphäre sind die Leistungsfähigkeit des GPS-Empfängers [Signal/Rauschverhältnis (SNR)] und unkorrigierte ionosphärische Effekte die Hauptfehlerquellen. Das höchste Genauigkeitspotential besitzen GPS-Radiokkultationsmessungen im Bereich der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre, die erwartete Genauigkeit liegt hier bei etwa 0,2 K.

Eine detaillierte Fehleranalyse der GPS-Radiokkultationstechnik ist im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Es wird auf verschiedene, detaillierte und umfangreiche Darstellungen zur Fehlercharakterisierung in der Literatur verwiesen (u.a. [Steiner *et al.*, 1999; Syndergaard, 1999; Kursinski *et al.*, 1997; Melbourne *et al.*, 1994]).



**Abb. 3.22:** Genauigkeitspotential von Temperaturprofilen, abgeleitet aus GPS-Radiokkultationsmessungen (aus [Melbourne *et al.*, 1994]).

### 3.3.8 Datenprozessierung in der unteren Troposphäre

Die Erfahrungen aus der Datenprozessierung des GPS/MET-Experimentes zeigen, dass die Interpretation der Radiookkultationsdaten vor allem in der unteren Troposphäre, dem Höhenbereich von größtem Interesse für die numerische Wettervorhersage, mit Problemen verbunden ist. So zeigten statistische Vergleiche von GPS/MET-Daten mit Radiosonden oder auch meteorologischen Analysen eine gute Übereinstimmung in allen Höhenbereichen mit Ausnahme der unteren Troposphäre [Rocken *et al.*, 2000]. Die GPS/MET-Daten besitzen in diesem Höhenbereich gegenüber den Radiosonden und Analysedaten einen negativen Refraktivitätsbias, der von der Breitenlage der Okkultationen abhängt und in den Tropen deutlich größer als in den Polargebieten ist (siehe auch Kap. 6.4).

Die auftretenden Probleme können in zwei Kategorien eingeteilt werden [Gorbunov, 2001]:

- Probleme in den Auswertalgorithmen: In der unteren Troposphäre treten, bedingt durch die sehr komplexe Wasserdampfverteilung, starke Variationen im Brechungsindex auf, die Mehrwegeeffekte in der Strahlenwegausbreitung verursachen. In diesem Fall erreichen mehrere Strahlen auf jeweils unterschiedlichen Wegen den Empfänger. Mit der Anwendung der Gesetze der geometrischen Optik in dieser Region (die von der Ausbreitung nur eines einzigen Strahles ausgeht) auf die Auswertung der Phasendaten entstehen Mehrdeutigkeiten in der Abhängigkeit des Brechungswinkels vom Impaktparameter [Gorbunov *et al.*, 1996b]. Die Anwendung von Auswertemethoden, die den Wellencharakter der GPS-Signale berücksichtigen, ist erforderlich [Gorbunov *et al.*, 2000; Hocke *et al.*, 1999; Gorbunov und Gurvich, 1998; Mortensen *et al.*, 1999; Karayel und Hinson, 1997; Pavelyev *et al.*, 1996]. Allerdings hat die Anwendung dieser Methoden auf die Datenprozessierung der GPS/MET-Daten den o.g. Refraktivitätsbias nicht reduzieren können. Dieser Bias wird auf technische Probleme bei der GPS-Signalverfolgung durch den GPS-Empfänger zurückgeführt [Sokolovskiy, 2001b].
- Technische Probleme: Der bei GPS/MET verwendete GPS-Empfänger stellte die Phase und Amplitude des empfangenen Signals als Ausgabe eines Phasenregelkreises bereit (Phase Locked Loop, PLL). Diese Technik wird verwendet, wenn sich die Frequenz des empfangenen Signals ändert, wie es bei GPS-Signalen durch die Dopplerverschiebung der Fall ist (bewegter Sender und Empfänger). Sie ist optimal für die Verfolgung von Signalen, die im Frequenzspektrum über eine Hauptkomponente verfügen. Die Struktur und Dynamik der Radiookkultations-signale, die sich durch die untere Troposphäre ausbreiten, ist jedoch komplexer. Es können Phasenbeschleunigungen auftreten, die höher sind, als es für eine stabile Arbeitsweise des PLL erforderlich ist. Weiterhin sind in den Okkultationssignalen mehrere Frequenzkomponenten enthalten, verursacht durch Mehrwegeeffekte (u.a. [Beyerle und Hocke, 2001]). Daher ist nicht geklärt, ob die PLL-Technik für die Signalverfolgung von GPS-Radiookkultationssignalen geeignet ist [Sokolovskiy, 2001a,b]. Bei zukünftigen Satellitenmissionen (vorgesehen auch schon im weiteren Verlauf der CHAMP-Mission) wird deshalb eine alternative Signalverfolgungs-

technik getestet und eingesetzt werden, die sog. Open Loop(OL)-Technik. Sie wurde bereits bei der Sondierung planetarer Atmosphären eingesetzt [Lindal *et al.*, 1983, 1987]. Im OL-Modus wird das gesamte, komplexe Rohsignal mit allen Frequenzkomponenten aufgezeichnet. Als Ergebnis von vergleichenden Simulationsstudien mit Anwendung der PLL und der OL-Signalverfolgung in der unteren Troposphäre vermutet Sokolovskiy [2001a], dass die Anwendung der Signalverfolgung mit PLL die Hauptfehlerquelle für den negativen Refraktivitätsbias der GPS/MET-Messungen ist. Er schätzt die Signalverfolgung mit dem OL-Verfahren bei Radiookkultationsmessungen in der unteren Troposphäre als erfolversprechender ein.

### 3.3.9 Horizontale und vertikale Auflösung der Messungen

Charakteristisch für GPS-Radiookkultationsmessungen sind eine relativ hohe vertikale ( $\Delta h$ ) und geringere horizontale ( $\Delta L$ ) räumliche Auflösung. Beide sind miteinander über die Relation

$$\Delta L = 2\sqrt{2R\Delta h} \quad (3.76)$$

miteinander verknüpft. Dabei ist  $\Delta L$  die Länge der Kreissehne, die durch die Tangente am inneren zweier konzentrischer Kreisbögen entsteht, deren Radii um den Betrag  $\Delta h$  voneinander abweichen.  $R$  ist der Radius des inneren Kreises, also der Atmosphärenradius am Tangentenpunkt des Strahlenweg.

Bei Anwendung der geometrischen Optik (Kap. 3.1.2) ist die vertikale Auflösung durch den Durchmesser der ersten Fresnelzone  $d_F$  begrenzt. Dieser berechnet sich für die Okkultationsgeometrie bei unsignifikanter atmosphärischer Beugung (Stratosphäre) nach:

$$d_F = 2\sqrt{\lambda D} \quad (3.77)$$

mit der Wellenlänge  $\lambda$  des GPS-Signals und dem Abstand  $D$  des GPS-Empfängers auf CHAMP vom Tangentenpunkt. Mit  $\lambda=19$  cm und  $D=2.600$  km (Orbithöhe 500 km) ergibt sich ein Durchmesser der ersten Fresnelzone von 1,4 km. Mit (3.76) resultiert eine horizontale Auflösung  $\Delta L$  von ca. 270 km. Bedingt durch das exponentielle Ansteigen der Refraktivität zur Erdoberfläche (Troposphäre) hin, wird  $d_F$  kleiner und erreicht in der Nähe der Erdoberfläche einen Wert von ca. 0,5 km [Kursinski *et al.*, 1997]. Das entspricht (3.76) einer horizontalen Auflösung von 80 km.

Durch die Anwendung von Auswertemethoden, die Diffraktionseffekte berücksichtigen (Kap. 3.3.8), kann die vertikale Auflösung gesteigert werden [Gorbunov und Gurvich, 1998]. Mortensen *et al.* [1999] erreichten mit der Anwendung der Backward-Propagation Methode 100 m vertikale Auflösung. Mit radioholografischen Auswerteverfahren können 20-40 m erreicht werden [z.B. Igarashi *et al.*, 2000]; angesichts der in der realen Atmosphäre immer vorhandenen horizontalen Variabilität, die die praktisch erreichbare Auflösung auf etwa 100 m begrenzt, ein eher theoretischer Wert.

## 4 CHAMP-MISSION

Die CHAMP-Mission entstand 1994 aus einem Projektvorschlag des GFZ Potsdam [Reigber *et al.*, 1995] im Rahmen einer Initiative der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) zur Förderung der Raumfahrtindustrie in den neuen Bundesländern Deutschlands. Zusammen mit dem DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und einem Konsortium von Industriefirmen wurde ein Leitprojekt für die ostdeutsche Weltraumindustrie entwickelt und realisiert.

Neben der wissenschaftlichen Betreuung der Mission leitet das GFZ Potsdam auch die Durchführung des gesamten Projektes. Der zeitliche Ablauf der Mission und die Realisierungsphasen (A bis E) sind in Tab. 4.1 dargestellt.

Projektabschnitt (Zeitintervall)	Aufgabe/Inhalt
Phase A (Oktober 1994 – März 1995)	Durchführbarkeitsstudie, vorläufiges Design der Mission
Phase B (November 1995 – Oktober 1996)	endgültiges Design, technische Spezifikationen
Phase C/D (Januar 1997 – Oktober 2000)	Implementierung der Mission, Start des Satelliten, Testphase im Orbit
Phase E (November 2000 – 2005/2006)	Wissenschaftliche Nutzung und Auswertung

*Tab. 4.1: Realisierungsphasen der CHAMP-Satellitenmission.*

### 4.1 Wissenschaftliche Ziele

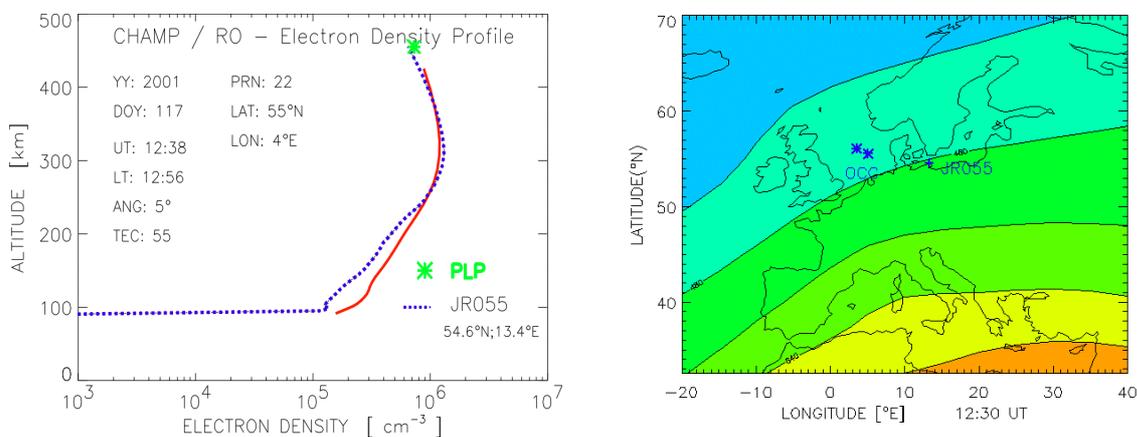
CHAMP ist eine geowissenschaftliche Kleinsatellitenmission mit einer multiplen, sich ergänzenden Nutzlast, die wesentliche Beiträge zur Erforschung der Struktur und Dynamik des Systems Erde liefert [Reigber *et al.*, 1998a]. Die Mission wird wichtige Ergebnisse für die Lösung folgender komplexer Aufgabenstellungen liefern:

- Ableitung der räumlichen Struktur des Erdschwerefeldes und seiner zeitlichen Variabilität durch Analyse der Orbitstörungen von CHAMP (u.a. [Biancale *et al.*, 2000; Reigber, 1989]) mit Anwendungen in der Geophysik, Geodäsie und Ozeanografie. Im fortgeschrittenen Verlauf der Mission ist unterstützend dazu eine Machbarkeitsuntersuchung für GPS-basierte Altimetrie/Scatterometrie geplant (z.B. [Garrison und Katzberg, 2000; Komjathy *et al.*, 1999]);
- Bestimmung des Erdmagnetfeldes vor allem mit Anwendungen in der Geophysik [Lühr und Haack, 2000];
- Zusätzlich werden global verteilte Limb Sondierungen der Atmosphäre/Ionosphäre mittels GPS-Radiookkultationstechnik durchgeführt, auf die im nächsten Kapitel genauer eingegangen wird.

## 4.2 Atmosphärensondierung mit CHAMP

Im Rahmen des CHAMP-Okkultationsexperiments werden täglich ca. 230 Vertikalprofile atmosphärischer Parameter im Höhenbereich von 0 bis 50 km abgeleitet [Wickert *et al.*, 2001b; 2002b]. Durch die einzigartige Kombination von globaler Abdeckung, hoher vertikaler Auflösung, Langzeitstabilität und Bewölkungsunabhängigkeit verfügen diese Messungen über ein hohes Potential zur Verbesserung der Wettervorhersage und für Klimastudien [Kursinski *et al.*, 1997]. Bereits für das GPS/MET-Experiment (Kap. 2.3) konnte gezeigt werden, dass GPS-Okkultationsdaten die Genauigkeit von globalen und regionalen Analysen und der Wettervorhersage signifikant verbessern können [Kuo *et al.*, 2000]. Die hohe Messgenauigkeit (Kap. 3.3.7) und vertikale Auflösung (Kap. 3.3.9) in der Tropopausenregion gestatten die detaillierte Untersuchung vertikaler Temperaturgradienten, die Informationen über die Änderung des globalen Strahlungshaushalts in den nächsten Dekaden und somit über Klimaänderungen liefern können [Steiner *et al.*, 2001].

Parallel zum GPS-Okkultationsexperiment in der neutralen Atmosphäre werden Okkultationsmessungen zur Sondierung der Ionosphäre durchgeführt, bei dem u.a. Vertikalprofile der Elektronendichte von ca. 80 km Höhe über dem Erdboden bis zur Orbithöhe des CHAMP-Satelliten abgeleitet werden (Abb. 4.1). Das Experiment, das Bestandteil des HGF-Strategiefondsprojekts GASP [Reigber, 1998c] ist, begann im April 2001. Hauptziele sind: Globales Monitoring der Ionosphäre mit Anwendungen zur Erfassung des Weltraumwetters (engl. „Space Weather“), Test und Validierung von globalen Ionosphärenmodellen sowie die Entwicklung von Techniken zur Datenassimilation in Ionosphärenmodelle [Heise *et al.*, 2002; Jakowski *et al.*, 2002].



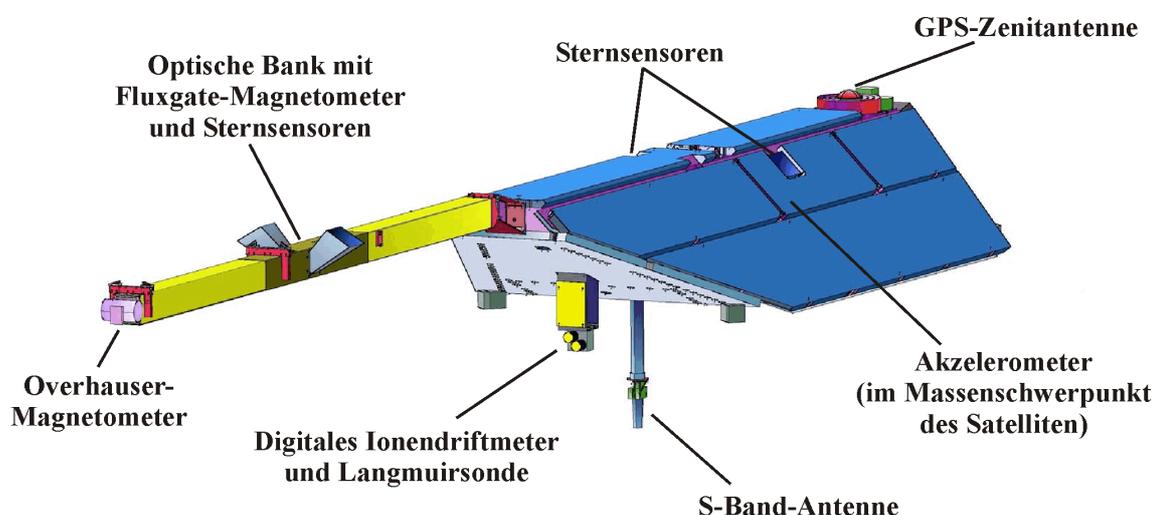
**Abb. 4.1: Links:** Aus CHAMP-Radiookkultationsmessungen vom 27. April 2001 abgeleitetes vertikales Profil der Elektronendichte (rot) in der Nähe der Ionosondenstation Juliusruh (54,6°Nord; 13,4°Ost), deren Profildaten zum Vergleich eingezeichnet sind. **Rechts:** Der aus dem abgeleiteten Profil durch vertikale Integration bestimmbare Elektroneninhalt (TEC) ist mit  $55 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  etwas größer als der aus bodengestützten GPS-Messungen berechnete TEC ( $48 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ) (aus [Jakowski *et al.*, 2002]).

## 4.3 Satellit und wissenschaftliche Instrumente

Detaillierte Beschreibungen des CHAMP-Satelliten und der wissenschaftlichen Geräte an Bord finden sich bei *Reigber* [2001a,b]. Hier erfolgt nur eine Kurzeinführung und die Charakterisierung der für das Radiookkultationsexperiment relevanten Geräte.

### 4.3.1 CHAMP-Satellit

Der Satellitenkörper ist 4,3 m lang, 0,75 m hoch und hat einen trapezförmigen Querschnitt. Die Unterseite des Trapezes ist 1,6 m breit, die Oberseite 0,3 m. Die Gesamtmasse beträgt 525 kg. In Flugrichtung am Körper des Satelliten befestigt ist der knapp 4 m lange und ca. 20 kg schwere Ausleger („Boom“), der die Instrumentierung für die Magnetfeldstudien trägt. Abb. 4.2 zeigt die Vorderansicht des Satelliten.



*Abb. 4.2: Vorderansicht des CHAMP-Satelliten mit Bezeichnung der Messinstrumente.*

### 4.3.2 Wissenschaftliche Instrumente

An Bord des Satelliten befinden sich folgende wissenschaftliche Geräte (siehe auch Abb. 4.2): Elektrostatisches STAR-Akzelerometer (Space Triaxial Accelerometer for Research applications), GPS-Empfänger TRSR-2, Laserreflektor, Fluxgate- und Overhauser-Magnetometer, Sternsensoren und ein digitales Ionendriftmeter mit einer Langmuirsonde. Alle Geräte werden detailliert durch *Reigber* [2001a,b] beschrieben.

#### GPS-Empfänger TRSR-2

Der TRSR-2 („BlackJack“) ist das Nachfolgemodell des TRSR-1, der z.B. bei den Satellitenmissionen GPS/MET (Kap. 2.3), SUNSAT [*Mostert und Koekemoer*, 1997] oder Ørsted [z.B. *Escudero et al.*, 2001] eingesetzt wurde. Das „BlackJack“-Nachfolgemodell TRSR-3 wird bereits bei der argentinisch-US-amerikanischen Mission SAC-C [*SAC-C*, 2001] eingesetzt und ermöglicht zusätzlich auch die Aufzeichnung von sogenannten "aufgehenden" oder Vorwärtsokkultationen.

Der GPS-Empfänger besitzt in der CHAMP-Mission eine zentrale Rolle, die weit über den Empfang von GPS-Okkultationssignalen hinausgeht. Zusammen mit dem STAR-Akzele-

rometer und dem Laserreflektor ermöglicht er eine hochpräzise Orbitbestimmung des Satelliten. Weiterhin stellt er eine „Echtzeit“-Navigationsinformation und eine präzise Zeitinformation zur Verfügung. Der Empfänger wird auch (nach entsprechender Softwareaktualisierung) das im weiteren Verlauf der Mission geplante GPS-Altimeterexperiment ermöglichen.

Der Empfänger arbeitet in drei verschiedenen Modi, dem Tracking-, dem Okkultations- und dem Altimetermodus. Der Tracking-Modus ist permanent aktiviert, über die zenitgerichtete Shokering-Antenne werden GPS-Signale (Messfrequenz 0,1 Hz) zur Positionsbestimmung empfangen. Dafür stehen 12 Messkanäle (jeweils 2 Trägerfrequenzen) zur Verfügung, womit maximal 12 Satelliten empfangen werden können. Für den Okkultationsmodus können maximal 4 Kanäle genutzt werden. Er wird durch ein Steuerprogramm innerhalb des Empfängers aktiviert, wenn GPS-Satelliten in Okkultation stehen (Messfrequenz: 1 oder 50 Hz). Parallel zum okkultierten wird jeweils ein zweiter GPS-Satellit (Referenzsatellit) zu Kalibrierungszwecken empfangen (Kap. 3.2.2). In einer erweiterten Softwareversion wird TRSR-2 auch mehrere Okkultationen gleichzeitig aufzeichnen können. Die für die Okkultationsmessungen genutzten Messkanäle werden ebenfalls für das zukünftige Altimeterexperiment genutzt, wobei die von Meeres- oder Eisoberflächen reflektierten GPS-Signale durch die nadirgerichtete High-Gain-Antenne empfangen werden.

Tab. 4.2 enthält einen Überblick über ausgewählte technische Daten des GPS-Empfängers.

Eigenschaft	Parameter
Genauigkeit der Navigationslösung an Bord	< 60 m
Leistungsbedarf	10 W
Gewicht	3,5 kg
Genauigkeit der Zeitkalibrierung	< 1 $\mu$ s relativ zur GPS-Zeit
Arbeitstemperatur	-20 bis 50 °C
Genauigkeit L1 Trägerphase (Okkultation)	0,005 cm (1s)
Genauigkeit L2 Trägerphase (Okkultation)	0,03 cm (1s)

*Tab. 4.2: Ausgewählte technische Daten des GPS-Empfängers TRSR-2.*

### Langmuirsonde

Parallel zum Ionendriftmeter wird eine planare Langmuirsonde (eng. Planar Langmuir Probe, PLP) betrieben. Dieses Gerät stellt zusätzliche Daten zur Interpretation der Messungen des Ionendriftmeters bereit: das elektrische Potential des Satelliten sowie Dichte und Temperatur des den Satelliten umgebenden Elektronengases. Diese „in-situ“ bestimmte Elektronendichte ist für das GPS-Okkultationsexperiment sowohl in der neutralen als auch elektrisch geladenen Atmosphäre eine wichtige Größe. Einerseits ist der Brechungsindex der Atmosphäre am Ort des Satelliten direkt in einer der beiden Formeln zur Ableitung des Brechungswinkels (2.46) enthalten. Andererseits liefert die Kenntnis der Elektronendichte an der momentanen Position von CHAMP eine wichtige Informationen für die obere Randbedingung bei der Berechnung von vertikalen Elektronendichteprofilen

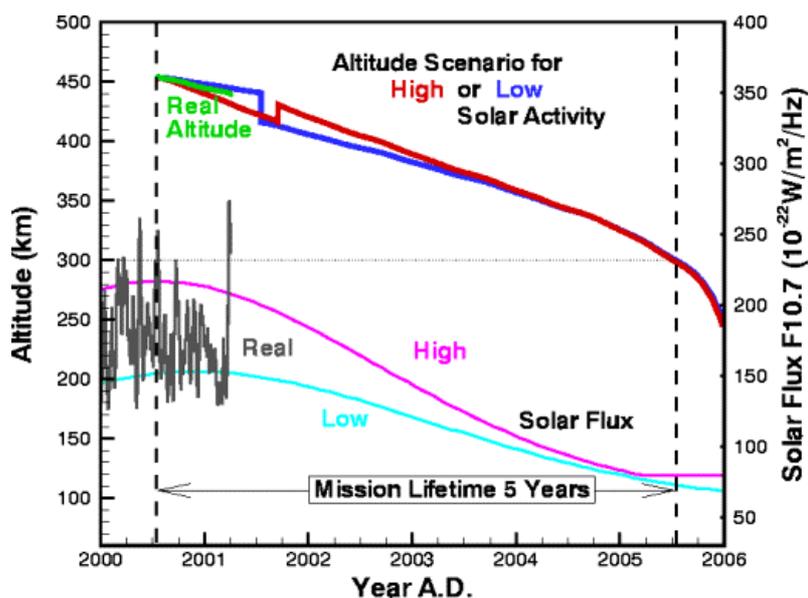
in der Ionosphäre (Kap. 4.2). Die Genauigkeit der „in-situ“-Elektronendichtebestimmung mit der Langmuirsonde wird mit besser als 5% angegeben [Lühr, 2001].

## 4.4 CHAMP-Missionsbetrieb

### 4.4.1 Orbit und Missionsdauer

Der CHAMP-Satellit wurde am 15. Juli 2000, 12:00 UTC mit einer COSMOS-3B-Träger- rakete von einem russischen Militärgelände (COSMODROM) bei Plesetz, ca. 800 km nördlich von Moskau, gestartet. Die Orbithöhe, berechnet aus dem ersten Zustandsvektor, betrug 454 km bei einer Inklination von  $87,3^\circ$  und einem nahezu kreisförmigen Orbit ( $e=0,004$ ).

Der Reibungswiderstand der Atmosphäre (drag) bewirkt eine Absenkung des Orbits im Laufe der Mission. Die Intensität dieser Absenkung hängt von der Stärke des aktuellen Zyklus der Solaraktivität ab und kann im Solaren Maximum (2001) im Bereich von 50 bis 200 m/Tag variieren und nicht exakt vorausberechnet werden. Um gegen Ende der Mission



**Abb. 4.3:** Voraussichtliche (blau bzw. rot) und reale (grün) Orbithöhe (Stand April 2001) des CHAMP-Satelliten während der geplanten 5-jährigen Missionsdauer [Reigber, 2001b].

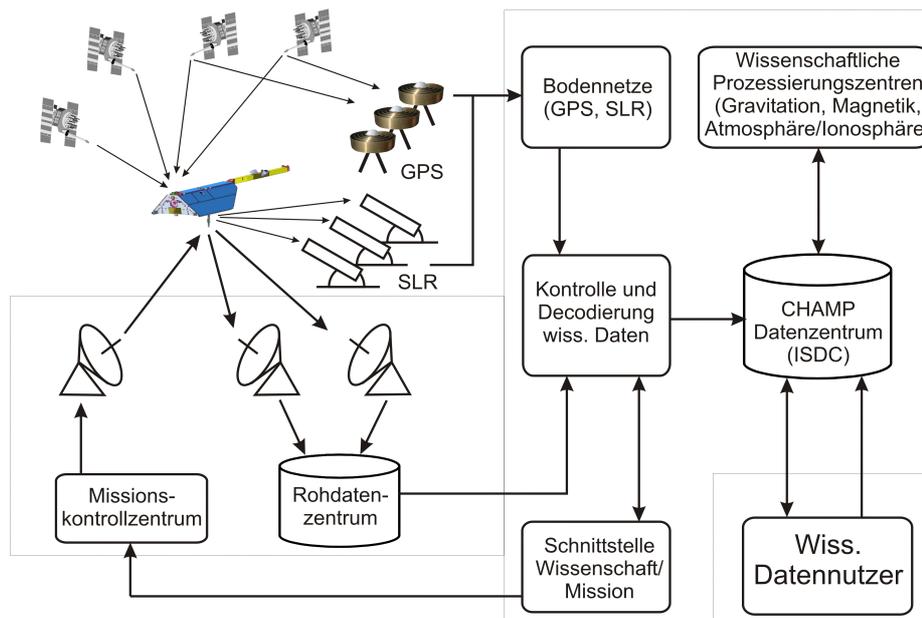
mindestens einige Monate Schwerfeldbeobachtungen und magnetische Messungen in einer Bahnhöhe von 300 km zu garantieren, ist zwei bzw. vier Jahre nach dem Missionsbeginn eine Bahnkorrektur mit Hilfe der Kaltgasdüsen vorgesehen (Abb. 4.3). Bei einem Maximum der solaren Aktivität geringerer Amplitude war geplant, die Bahn nach etwa einem Jahr um ca. 10 km abzusenken, bei größerer Amplitude wäre die Bahn nach etwa vier Jahren um den gleichen Betrag angehoben worden. Abb. 4.3 zeigt die reale Orbitabsenkung per April 2001 im Vergleich zu den für extrem starkes bzw. schwaches

Maximum solarer Aktivität vorausberechneten Szenarien. Nach dem bisherigen Missionsverlauf besteht keine Notwendigkeit für die Durchführung eines Orbitmanövers.

#### 4.4.2 Bodensegment und Datenflüsse

Im Routinebetrieb werden an Bord des Satelliten täglich 115 MByte wissenschaftliche Daten erzeugt. Zusammen mit 25 MByte Housekeepingdaten (Überwachung und Kontrolle der Satellitenfunktion) ergibt sich eine Datenmenge von 140 MByte pro Tag, die an die Bodenantenne übertragen werden muss. Bei einer Übertragungsrate von 1 Mbit/s und einer durchschnittlichen Kontaktzeit zur Bodenstation Neustrelitz (DLR) von 28 min (450 km Orbithöhe) bzw. 20 min (300 km Orbithöhe) können bei den 3 bis 5 Überflügen pro Tag (Kap. 5.1) 210 bzw. 150 MByte empfangen werden.

Das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum (GSOC, German Space Operation and Control Centre) in Oberpfaffenhofen mit seiner Bodenstation Weilheim kontrolliert und kommandiert die Mission. Über das GSOC können Steuerkommandos oder Softwareaktualisierungen mit einer Datenrate von 32 kbit/s an den Satelliten übertragen werden. Weilheim dient gleichzeitig als Ersatzempfangsstation für den Datenempfang von CHAMP.

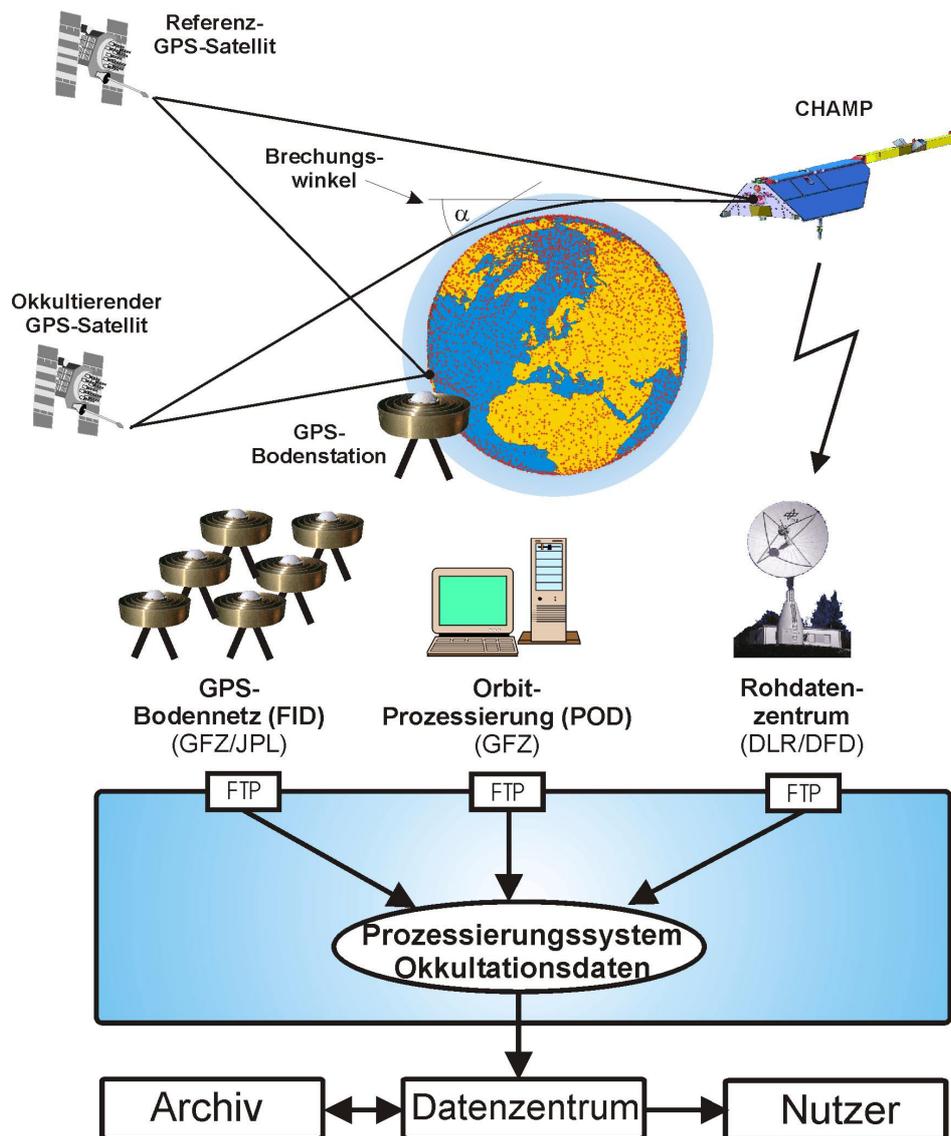


**Abb. 4.4:** Bodensegment der CHAMP-Mission und entsprechende Datenflüsse.

Zusätzlich zu den Satellitendaten (über das Rohdatenzentrum) werden auch die Daten des globalen SLR (Satellite Laser Ranging)- und GPS-Bodennetzes nach Qualitätskontrolle und Decodierung in das CHAMP-Datenzentrum (ISDC, Information System and Data Center) übertragen (Abb. 4.4). Das ISDC stellt alle Eingabedaten für die wissenschaftlichen Prozessierungszentren [Gravitation, Magnetik, Atmosphäre (Neutralsgas/Ionosphäre)] bereit und übernimmt die Archivierung und Verwaltung der Datenprodukte. Über das ISDC erfolgt auch der Zugriff externer wissenschaftlicher Nutzer auf die CHAMP-Daten und Datenprodukte.

# 5 CHAMP-OKKULTATIONSEXPERIMENT

In diesem Kapitel werden die Komponenten des CHAMP-Okkultationsexperiments beschrieben. Im Mittelpunkt steht dabei das Prozessierungssystem für GPS-Okkultationsdaten der neutralen Atmosphäre. Mit diesem System allein kann jedoch keine komplette Analyse der Okkultationsdaten erfolgen. Vielmehr ist das Funktionieren einer komplexen Infrastruktur erforderlich. Neben dem CHAMP-Satelliten mit GPS-Empfänger (Weltraumsegment), der bereits in Kap. 4.3 beschrieben wurde, ist das Zusammenwirken einer umfangreichen Bodeninfrastruktur erforderlich. Diese besteht aus der Satellitenempfangsstation mit dem Rohdatenzentrum (RDC), das von dem DLR in Neustrelitz



**Abb. 5.1:** Übersicht über die Infrastruktur zur Prozessierung der CHAMP-Okkultationsdaten. Die Bestandteile sind: CHAMP-Satellit mit GPS-Empfänger, Satellitenempfangsstation mit Rohdatenzentrum (RDC), Orbitprozessierung (POD), GPS-Bodennetz (FID), Prozessierungssystem für Radiookkultationsdaten und Datenzentrum mit Archivsystem (ISDC).

betrieben wird, dem globalen operationellen GPS-Bodennetz („High Rate & Low Latency Network“, gemeinsam betrieben von JPL und GFZ), dem Zentrum zur Berechnung der präzisen Satellitenorbits (POD, Precise Orbit Determination) und dem eigentlichen Prozessierungssystem für Okkultationsdaten sowie dem Datenzentrum zur Archivierung und Verteilung der Messdaten und der Datenprodukte, dem CHAMP-ISDC (Information System and Data Center), alle betrieben vom GFZ.

## 5.1 Satellitendatenempfang und Rohdatenzentrum

Das Rohdatenzentrum der CHAMP-Mission befindet sich an der Satellitenempfangsstation des DFD des DLR in Neustrelitz (53°19 Nord, 13°04 Ost). Die Station wird auch für den Betrieb anderer Satellitenmissionen genutzt (u.a. LANDSAT-7, ERS-2, ENVISAT, IRS-1C, IRS-1D, IRS-P3).

Teilsystem	Aufgabe
Empfangssystem	Empfang der Satellitendaten (Telemetriedaten und Daten der wissenschaftliche Instrumente), Dekommutierung, Kontrolle der Empfangsqualität, Rohdatenformatierung
Vorprozessierungssystem	Separierung verschiedener Datentypen und Formatierung der separierten Rohdatenströme, Qualitätskontrolle mit Erzeugung von regelmäßigen Qualitätsberichten
Katalog und Archiv	Langzeitrohdatenarchivierung, Datenmanagement mit Katalogsystem
„Rollendes“ Rohdatenarchiv	Bereitstellung der Satellitendaten für externe Nutzer

*Tab. 5.1: Teilsysteme des CHAMP-Rohdaten zentrums.*

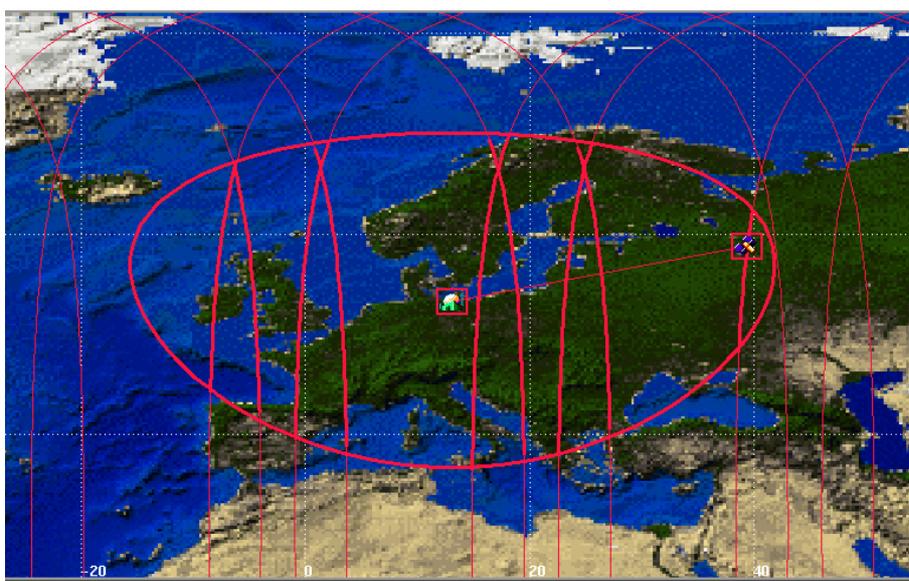
Das Rohdatenzentrum besteht aus vier Teilsystemen (Empfangs- und Vorprozessierungssystem, Katalog/Archiv und „Rollendes“ Rohdatenarchiv), die in Tab. 5.1 mit ihren wesentlichen Aufgaben charakterisiert sind.

Die Satellitendaten können mit zwei 7,3 m Antennen (Abb. 5.2) oder mit einer 4 m Antenne empfangen werden. Die Datenübertragung erfolgt im S-Band (2.200–2.400 MHz) bei einer maximalen Empfangsrate von 170 MBps. Der Empfangsbereich für den CHAMP-Satelliten ist in Abb. 5.3 dargestellt.



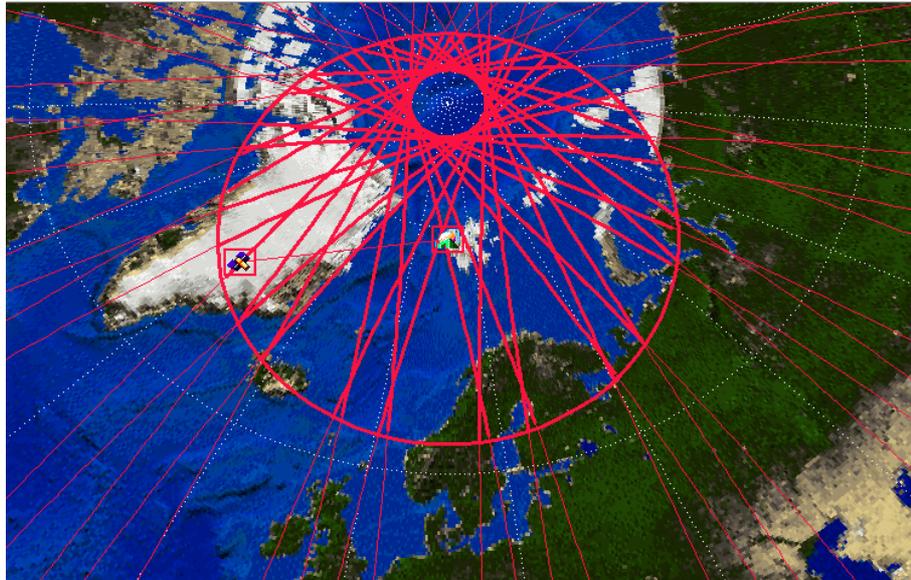
**Abb. 5.2:** 7,3 m-Empfangsantenne der Satellitenempfangsstation Neustrelitz.

Für die in Kap. 5.4.4 diskutierten operationellen Aspekte der Prozessierung ist der zeitliche Rhythmus des Zugriffs auf die Okkultationsdaten des CHAMP-Satelliten von entscheidender Bedeutung. Diese Daten werden entsprechend dem Auftreten der durchschnittlich ca. 1 min dauernden Okkultationsereignisse relativ regelmäßig periodisch aufgezeichnet, können jedoch nur während der Kontaktzeiten zur Satellitenempfangsstation an den Boden übertragen werden. Die geografische Lage der Empfangsstation, vor allem deren geografische Breitenlage, bestimmt dabei die zeitliche Verteilung und die Länge der Bodenkontakte.



**Abb. 5.3:** Empfangsbereich der Satellitenempfangsstation Neustrelitz mit den Bodenprojektionen der CHAMP-Überflüge für den 24./25.08.2000.

Dieser Zusammenhang wurde mit einer Simulationsstudie unter Benutzung der kommerziellen STK-Software (Satellite Tool Kit) detaillierter untersucht. Dazu wurden für einen Zeitraum von zwei Tagen (24./25.08.2000) die Bodenkontakte zwischen CHAMP und zwei relevanten Empfangsstationen analysiert. Neben dem Standardszenario für die Station Neustrelitz wurden die Bodenkontakte für eine Antenne in polaren Breiten (Koldewey, Spitzbergen; 78,92°Nord, 11,87°Ost) analysiert. Diese zweite Empfangsantenne wurde im Januar 2001 installiert und befindet sich derzeit in der Inbetriebnahmephase (engl. „commissioning“).



**Abb. 5.4:** Empfangsbereich der Empfangsantenne auf Spitzbergen (Koldewey,  $78,92^{\circ}\text{N}$ ,  $11,87^{\circ}\text{O}$ ) mit den Bodenprojektionen der CHAMP-Überflüge während des 24./25. August 2000.

Die Bahn des CHAMP-Satelliten wurde mit den vom GFZ berechneten TwoLine-Elementen vom 24.08.2000 berechnet. Die minimale Elevation des Satelliten für den Datenempfang an beiden Bodenstation wurde richtungsunabhängig mit  $5^{\circ}$  angenommen (für Koldewey variiert die reale minimale Elevation von  $3$  bis  $10^{\circ}$  [Offermann, 2001]). Die Ergebnisse der Kontaktanalyse sind in Tab. 5.2 zusammengefasst. Die Projektionen der Satellitenbahnen auf die Erdoberfläche während der Bodenkontakte sind in Abb. 5.3 (Neustrelitz) und 5.4 (Ny Alesund) dargestellt.

Für die Bodenstation in mittleren Breiten (Neustrelitz) ergibt sich ein maximaler Abstand von ca. 10:30 h zwischen zwei Kontakten. In diesem Zeitraum können Okkultationsmessungen, die am Anfang des Intervalls aufgezeichnet wurden, nicht prozessiert werden,

<b>Bodenstation</b>	<b>Neustrelitz</b>	<b>Koldewey</b>
Kontakte zu CHAMP (2 Tage)	9	31
Zeitlicher Abstand zwischen den Kontakten: [hh:mm:ss]		
Minimum	01:25:51	01:25:09
Maximum	10:28:36	01:27:48
Mittelwert	04:35:24	01:26:23
Länge des Kontaktes [mm:ss]		
Minimum	03:45	06:48
Maximum	08:45	08:40
Mittelwert	07:07	07:22
Gesamtdauer der Kontakte pro Tag [hh:mm:ss]	00:32:03	01:54:14

**Tab. 5.2:** Analyse der CHAMP-Bodenkontakte für den 24./25.08.2000, nominale Situation mit Bodenstation Neustrelitz, ( $53,1^{\circ}\text{N}$ ;  $13,1^{\circ}\text{O}$ ) und simuliertes Szenario mit der polnahen Station Koldewey, Spitzbergen ( $78,92^{\circ}\text{N}$ ;  $11,87^{\circ}\text{O}$ ), minimale Elevation  $5^{\circ}$ .

da sie nicht an den Boden übertragen werden können. Allein dadurch ergibt sich eine erhebliche Verzögerung für die Verfügbarkeit der atmosphärischen Information, die den Anforderungen für operationelle Anwendungen wie der Wettervorhersage (Kap. 1.5.3) nicht genügt. Die Situation ändert sich, wenn eine Empfangsantenne in polaren Breiten (hier Koldewey) genutzt wird. Der maximale Abstand zwischen zwei Bodenkontakten verringert sich auf ca. 85 min. Die Gesamtdauer der Kontakte vervierfacht sich (von 30 min pro Tag auf 2 h), also auch die maximal mögliche übertragbare Datenmenge. Die Nutzung einer Bodenstation in polaren Breiten ist damit eine notwendige Voraussetzung für eine operationelle Datenbereitstellung.

In Kap. 5.4.4 erfolgt eine genauere Betrachtung operationeller Aspekte unter Einbeziehung der anderen Komponenten der Prozessierungsinfrastruktur (Abb. 5.1).

## 5.2 GPS-Bodennetz für CHAMP

Schon vor dem Satellitenstart wurde gemeinsam von JPL und GFZ ein global verteiltes "HiRate & Low Latency" GPS-Bodennetz aufgebaut [Galas et al., 2001; Reigber et al., 1998b]. Dieses Netz stellt GPS-Messungen (Datenrate 1 Hz) mit einer maximalen Zeitverzögerung von 25 min zur Verfügung. Die Daten werden für die Orbitberechnung der GPS-Satelliten und CHAMP und auch für die Okkultationsprozessierung benötigt (Kap. 3.2.2).

Das Bodennetz besteht derzeit aus 28 Stationen (Abb. 5.5), 10 Stationen davon werden vom GFZ betrieben. Eine detaillierte Aufstellung dieser Stationen und ihrer Koordinaten ist in Anhang B enthalten. Bei der Festlegung der Anzahl der benötigten Stationen und der Standortwahl wurden die Anforderungen durch das Radiookkultationsexperiment berücksichtigt [Galas et al., 2001; Wickert et al., 2001a]. Die globale Verteilung der Stationen spielt hierbei eine bedeutende Rolle. Die Anwendung der Doppeldifferenzenmethode (Kap. 3.2.2) zur Okkultationsprozessierung erfordert eine geeignete Geometrie. Sowohl Okkultations- als auch Referenzsatellit müssen während der Okkultation parallel vom

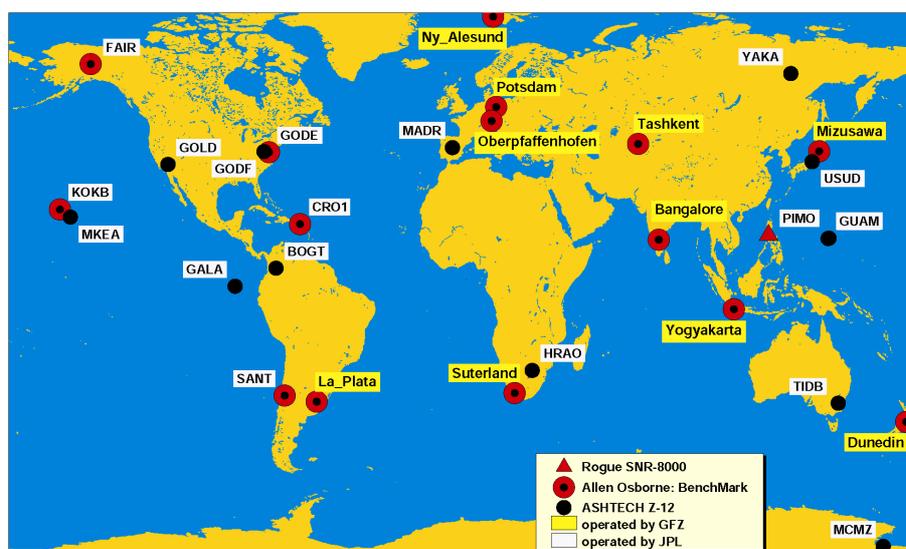
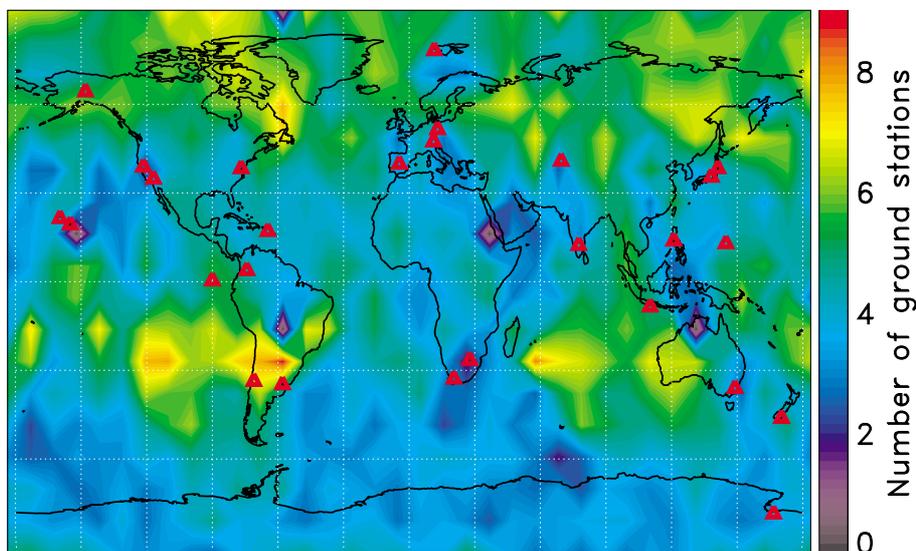


Abb. 5.5: "HiRate & Low Latency" GPS-Bodennetz von JPL und GFZ (Stand Juni 2000, 28 Stationen, aus [Galas et al., 2001]).

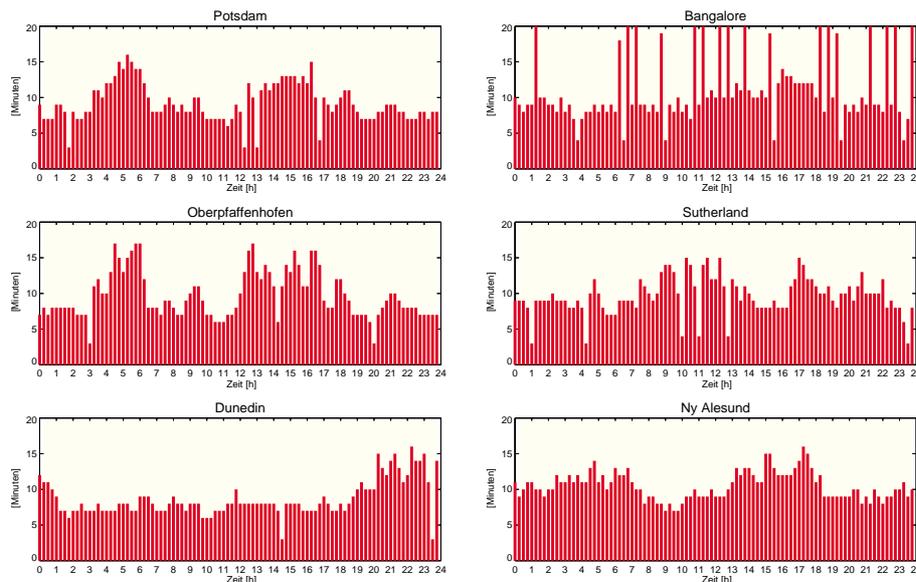
CHAMP-Satelliten und auch von der entsprechenden Bodenstation beobachtet werden können. Dies führt zu einem Zusammenhang zwischen der geografischen Lage der Bodenstation und den möglichen Positionen der Okkultationsereignisse.

Dieser Zusammenhang wurde für die Standortwahl der GPS-Empfänger des Bodennetzes im Rahmen mehrerer Studien untersucht (u.a. [Galas *et al.*, 2001; Wickert *et al.*, 2001a]). Dabei wurde das bevorstehende CHAMP-Okkultationsexperiment unter Berücksichtigung der Doppeldifferenzgeometrie mit realen Satellitenorbits, also realistischer Geometrie, simuliert. Diese Studien wurden mit der ROST-Software durchgeführt (Radio Occultation Simulation and Tracking Tool, Kap. 5.4.1).

Als Beispiel werden Ergebnisse einer Studie vorgestellt, die einen Zeitraum von 15 Tagen umfasst [Wickert *et al.*, 2001a]. Für jedes Okkultationsereignis wurde die Anzahl der Bodenstationen ermittelt, deren Daten zur Prozessierung der jeweiligen Okkultation verwendet werden können (minimale Elevation  $20^\circ$ ). Dann wurde die durchschnittliche Anzahl dieser Bodenstationen für alle Okkultationen innerhalb eines Rasters von  $10 \times 10^\circ$  ermittelt und eine globale Konturkarte erstellt (Abb. 5.6). Die Konturkarte ordnet jedem Punkt auf der Erdoberfläche eine durchschnittliche Anzahl von GPS-Bodenstationen zu, deren Messungen zur Prozessierung einer Okkultation verwendet werden können, für die genau an diesem Punkt ein atmosphärisches Vertikalprofil berechnet werden kann. Für die in Abb. 5.5 dargestellte Bodenstationskonfiguration ergibt sich Abb. 5.6. Die minimale Redundanz von Bodenstationen beträgt demnach 2 Bodenstationen, im Mittel stehen ca. 4 und im Maximum bis zu 8 Bodenstationen zur Verfügung.



**Abb. 5.6:** Erreichbare Redundanz von GPS-Bodenstationen zur Prozessierung von CHAMP-Okkultationen. Die Positionen der Bodenstationen sind mit roten Dreiecken markiert (aus [Wickert *et al.* 2001a]).



**Abb. 5.7:** Zeitliche Verzögerung der Verfügbarkeit von 15 min-Datenfiles am GFZ-Netzwerkzentrum ausgewählter GFZ-Bodenstationen "HiRate & Low Latency" JPL&GFZ-Bodennetzwerkes am 06.08.2000 (nach [Galas et al., 2001]).

Für die operationelle Bereitstellung von Atmosphärendaten müssen die Bodenmessungen den Prozessierungszentren (Orbit und Atmosphäre) mit einer möglichst minimalen Zeitverzögerung zur Verfügung gestellt werden. Dazu werden die Daten in Files von 15 min Länge mit einer durchschnittlichen, durch die Datenübertragung bedingten, zeitlichen Verzögerung von ca. 10 min bereitgestellt. In Abb. 5.7 ist die Verzögerung für alle 15 min Files einer Auswahl von 6 GFZ-Bodenstationen für den 6. August 2000 dargestellt (Potsdam, Oberpfaffenhofen, Dunedin, Bangalore, Sutherland, Ny Alesund). Für jede der 6 in Abb. 5.7 ausgewählten Stationen kann der Zugriff auf die gemessenen Daten innerhalb von durchschnittlich 10 min nach der letzten Messung des jeweiligen 15 min überdeckenden Datenfiles erfolgen. Es ergibt sich eine minimale zeitliche Verzögerung von 10 min für die letzte Messung des Intervalls und eine maximale von 25 min für die erste Messung im jeweiligen Datenfile.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass das aufgebaute GPS-Bodennetz der Anforderung an die Sicherung einer globalen Bedeckung von Okkultationsereignissen mit hoher Redundanz gerecht wird (ca. 4 Bodenstationen, siehe auch Kap. 6.8). Weiterhin sichert das Netz durch die geringe zeitliche Verzögerung zwischen Messung und Datenbereitstellung eine hohe Operationalität.

## 5.3 Bereitstellung der Satellitenbahnen

In Kap. 3.2 und 3.3 wurde beschrieben, dass die Bahndaten (Position und Geschwindigkeit) der an der Okkultation beteiligten Satelliten eine wesentliche Information für die Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung und auch des atmosphärischen Brechungswinkels sind. In Kap. 3.3 wurde gezeigt, dass bei der Ableitung des Brechungswinkels mit der zeitlichen Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung gearbeitet wird. Demnach kommt der genauen Bestimmung der Bahngeschwindigkeiten der an der Okkultation beteiligten Satelliten eine wichtige Rolle zu. Nach *Kursinski et al.* [1997] resultiert aus einem Bahngeschwindigkeitsfehler von 0,05 mm/s ein höhenabhängiger Temperaturfehler mit einem Maximum von 0,3 K in 57 km Höhe. Der Temperaturfehler nimmt zu geringeren Höhen hin schnell ab. Der Einfluss von fehlerhafter Satellitenbahngeschwindigkeit im Bereich von  $\sim 0,05$  mm/s auf die Genauigkeit der abgeleiteten Temperaturprofile kann demzufolge vernachlässigt werden.

Die Berechnung der präzisen Bahndaten der GPS-Satelliten und von CHAMP erfolgen in einem separaten Prozessierungssystem, das ebenfalls vom GFZ Potsdam aufgebaut wurde und seit Missionsbeginn im Projektbereich „Entwicklung und Betrieb von Satellitenmissionen“ betrieben wird.

### 5.3.1 GPS-Satellitenbahnen

Die GPS-Satellitenbahnen werden im Rahmen des CHAMP-Experiments operationell über das ISDC als Datenprodukt im sp3-Format (Standardformat für die Bereitstellung von GPS-Orbits, Formatbeschreibung unter: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/sp3.txt>) zur Verfügung gestellt (Datenprodukt CH-OG-3-RSO+GPS). Die GPS-Orbitfiles enthalten die Vektoren für Positionen und Geschwindigkeiten und die GPS-Uhrenfehler aller GPS-Satelliten mit 5 min zeitlicher Auflösung im erdfesten Bezugssystem (für einen kompletten Tag). Die Orbits werden mit der GFZ-Software EPOS-OC berechnet. Die absoluten Orbitgenauigkeiten betragen für jede Koordinatenachse 10 cm [*König et al.*, 2001c]. Mit der Formel für die Bahngeschwindigkeit  $v_B$  eines Satelliten beim Umlauf um die Erde:

$$v_B = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (5.1)$$

mit dem Radius  $r$  der kreisförmig angenommenen Umlaufbahn und  $GM=398.600,5 \text{ km}^3\text{s}^{-2}$  kann ein Geschwindigkeitsfehler  $\Delta v_B$  durch die Einführung eines Fehlers  $\Delta r$  abgeschätzt werden. Bei Verwendung von  $\Delta r \approx 17 \text{ cm}$  ( $\sqrt{3 \times (10^2 \text{ cm}^2)}$ ) ergibt sich ein Geschwindigkeitsfehler  $\Delta v_B$  von  $\cong 0,01 \text{ mm/s}$ .

### 5.3.2 CHAMP-Satellitenbahn

Der Orbit des CHAMP-Satelliten wird über das ISDC als Datenprodukt im CHORB-Format (CHAMP Orbit Format [*König et al.*, 2001b]) zur Verfügung gestellt (Datenprodukt CH-OG-3-RSO+CHA). Der CHAMP-Orbit (Vektoren für Position und Geschwindigkeit in 30 s Auflösung) für den jeweiligen Tag wird in zwei Files zu Verfügung gestellt. Ein File überdeckt den Zeitraum von 22:00 UTC des vorangegangenen

bis 12:00 UTC des entsprechenden Tages, der zweite File enthält die Daten von 10:00 bis 24:00 UTC. Der CHAMP-Orbit wird ebenso, wie die GPS-Orbits mit der GFZ-Software EPOS-OC berechnet [König *et al.*, 2001a; Neumayer *et al.*, 2000]. Die absoluten Orbitgenauigkeiten betragen für jede Koordinatenachse 8 cm [König *et al.*, 2001c]. In analoger Weise zu 5.3.1 wurde ein resultierender Geschwindigkeitsfehler  $\Delta v_B$  von  $\cong 0,07$  mm/s abgeschätzt.

## 5.4 Prozessierungssystem für Okkultationsdaten

Den Kern des Prozessierungssystems für die GPS-Okkultationsdaten bildet ein Softwaresystem, das aus einer wissenschaftlichen und einer operationellen Komponente besteht. Das gesamte System ist auf einer UNIX-Workstation installiert.

Das wissenschaftliche Programmpaket ist die praktische Umsetzung der Algorithmen zur Ableitung atmosphärischen Parameter aus GPS-Okkultationsmessungen (Kap. 3). Die entsprechende Software ist modular strukturiert, wobei jeder Bestandteil spezifische Aufgaben bei der Datenprozessierung übernimmt. Diese Struktur macht die Integration in steuerbare automatische Prozessierungssysteme möglich.

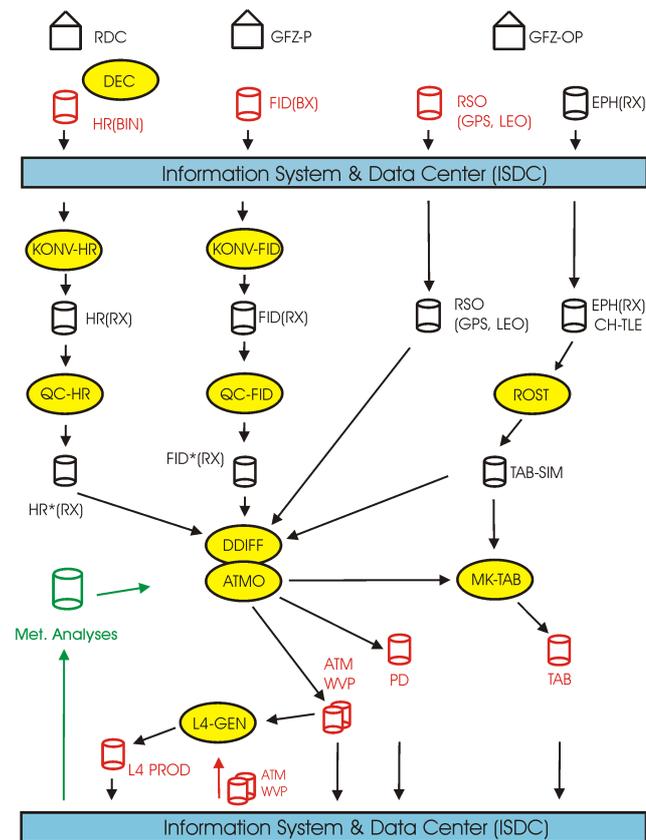
Ein derartiges, steuerbares automatisch arbeitendes Softwaresystem wurde speziell für die CHAMP-Okkultationsdatenprozessierung entwickelt [Wehrenpfennig *et al.*, 2001; Schmidt *et al.*, 2000]. Diese Software sorgt für die Datenbereitstellung, den kontrollierbaren Datenfluss durch die wissenschaftlichen Module und übernimmt die Bereitstellung der erzeugten Datenprodukte für das ISDC.

Beide Softwareteilsysteme zusammen bilden das Prozessierungssystem für GPS-Okkultationsdaten, das auch als Atmosphären-Prozessor (AP) bezeichnet wird. Das System ist auf eine zukünftige operationelle Nutzung ausgerichtet.

### 5.4.1 Umsetzung der Algorithmen in Softwaremodule

Abb. 5.8 gibt einen Überblick über die Struktur des wissenschaftlichen Programmpaketes. Schematisch dargestellt sind die Softwaremodule, ihre Ein- und Ausgabedaten und ihr Zusammenwirken. Die Hauptmodule sind DEC (Dekodiermodul), QC-HR (Qualitätskontrolle Satellitendaten), QC-FID (Qualitätskontrolle Bodenstationen), MK-TAB (Tabelle der Okkultationsmessungen), ROST (Simulationstool), DDIFF (Doppeldifferenzenmodul), ATMO (Inversionsprogramm), METEO (Interpolation meteorologischer Analysen bzw. Voraussagen) und WVP, das Modul zur Wasserdampfableitung. Die Softwaremodule sind auf die Erzeugung wissenschaftlicher Datenprodukte in verschiedenen Prozessierungsstufen ausgerichtet. Weiterhin werden zusätzliche Informationen (Metadaten) zu den jeweiligen Datenprodukten bereitgestellt, die zu einer komfortablen und standardgerechten Archivierung im ISDC beitragen [Ritschel, 2001]. Das ISDC bildet die zentrale Schnittstelle für Ein- und Ausgabedaten.

Jedes einzelne Modul kann automatisch konfiguriert und gestartet werden. Integriert sind Routinen, die auf Störungen im Prozessierungsablauf reagieren und Meldungen über den Zustand und Ablauf der Prozessierung generieren (Reportsystem zur Dokumentation des Prozessierungsablaufs, Fehlermeldungen verschiedener Priorität). Sollten im weiteren Missionsverlauf neue Datenprodukte definiert werden, kann das System beliebig mit



**Abb. 5.8:** Struktur des modularen wissenschaftlichen Softwarepaketes zur Erzeugung von Vertikalprofilen atmosphärischer Parameter mit erforderlichen Eingabedaten und erzeugten Datenprodukten.

entsprechenden Softwaremodulen zu ihrer Erzeugung erweitert werden. Dies ist in Abb. 5.8 durch sogenannte Level 4-Module angedeutet (L4-GEN, Generierung höherwertiger Datenprodukte, z.B. Berechnung klimatologischer Mittelwerte, Validierung der Datenprodukte mit Messergebnissen anderer Fernerkundungsverfahren oder Meteorologischen Analysen).

Hier werden die Softwaremodule der Okkultationsprozessierung näher charakterisiert. Ein- und Ausgabedaten werden benannt, die Aufgabe des jeweiligen Moduls wird beschrieben.

### Dekodierungs- und Formatierungsmodule DEC und KONV

<b>Eingabedaten</b>	Rohdatenstrom des GPS-Empfängers (Binärformat)
<b>Ausgabedaten</b>	50 Hz RINEX-Files (stündlich) GPS-Phasenmessungen ( $L1$ , $L2$ ) und zugehörige $SNR1$ , $SNR2$

**Tab. 5.3:** Charakterisierung des Softwaremoduls zur Dekodierung der GPS-Okkultationsdaten DEC.

Um eine effektive, die Datenströme minimierende Informationsübertragung zu erreichen, werden die GPS-Daten des Satelliten und des Bodennetzes in einem binären Datenformat an das Datenzentrum übertragen. Innerhalb des Prozessierungssystem werden die Daten

jedoch in einem Standardformat für GPS-Daten (RINEX, Receiver INdependent Data EXchange Format) verarbeitet, was die Verwendung standardisierter Schnittstellen für den Datenimport in die Module möglich macht. Somit wird auch die Verarbeitung der Daten anderer Satellitenmissionen (Kap. 2.3/2.4) möglich, bei denen durch den Einsatz unterschiedlicher GPS-Empfänger normalerweise verschiedene interne Datenformate verwendet werden. Die Konvertierung (Decodierung) übernimmt das Decodierungsmodul DEC, es ist in den Datenfluss des Rohdatenzentrums integriert.

Das Modul DEC extrahiert die GPS-Okkultationsdaten ( $L1$ ,  $L2$ ,  $SNR1$ ,  $SNR2$ , Datenrate 50 Hz) aus dem binären Datenstrom (Rohdaten) des GPS-Empfängers und stellt sie in einem Standarddatenformat bereit (RINEX, stundenweise). Der binäre Datenstrom überdeckt einen Zeitraum von bis zu 12 Stunden entsprechend der Länge zwischen den Kontakten des Satelliten zur Empfangsstation am Boden (Kap. 5.1).

Neben den Okkultationsdaten für die neutrale Atmosphäre sind noch weitere GPS-Datentypen im Rohdatenstrom enthalten: GPS-Daten zur Orbitbestimmung von CHAMP (0,1 Hz;  $L1$ ,  $L2$ ,  $P1$ ,  $P2$  Signale von der Zenitantenne), Bahninformationen der GPS-Satelliten („Broadcast“-Ephemeriden), „On-Board“-Navigationslösung (Position und Geschwindigkeit) für CHAMP, und 1 Hz Okkultationsdaten zur Ionosphärensondierung ( $L1$ ,  $L2$ ,  $P1$ ,  $P2$ ;  $SNR1$ ,  $SNR2$ ).

<b>Eingabedaten</b>	GPS-Okkultationsdaten von CHAMP (RINEX-Format, Dump)
<b>Ausgabedaten</b>	GPS-Okkultationsdaten (RINEX-Format, 1 h)

**Tab. 5.4:** Charakterisierung des Softwaremoduls zur Umformatierung der GPS-Okkultationsdaten KONV-HR.

Die GPS-Okkultationsdaten werden als Dateien im RINEX-Format (Zeitraum eines Datendumps überdeckend) bereitgestellt. Das Modul KONV-HR wandelt diese Dateien in RINEX-Stundenfiles mit einer zeitlichen Überlappung von 2 min um.

<b>Eingabedaten</b>	GPS-Daten des Bodennetzes (BINEX-Format, 15 min)
<b>Ausgabedaten</b>	GPS-Daten des Bodennetzes (RINEX-Format, 1 h)

**Tab. 5.5:** Charakterisierung des Softwaremoduls zur Umformatierung der GPS-Bodendaten KONV-FID.

Die GPS-Bodendaten werden als jeweils 15 min überdeckende Dateien in einem standardisierten binären Datenformat (BINEX, BINary receiver independent data EXchange format [Galas und Köhler, 2001]) bereitgestellt. Für die Verarbeitung im Prozessierungssystem werden die Dateien mit dem Modul KONV-FID, analog zu den Satellitendaten in Stundendateien (RINEX) mit entsprechender Überlappung zusammengefasst. Im weiteren Verlauf der Mission werden je nach Status und Notwendigkeit 15 min-Files verarbeitet, um eine höhere Operationalität zu erreichen.

### Qualitätskontrolle der GPS-Satelliten- und Bodendaten QC-HR und QC-FID

Vor der Verarbeitung im Prozessierungssystem werden die GPS-Daten einer Qualitätskontrolle unterworfen. Hierbei werden auch Informationen über die Daten (u.a. Zeitfenster der Okkultationen, Anzahl der Messungen für jeden Satelliten, AS-Status) in einem Reportfile abgelegt (\*.log-Datei), der bei der Weiterverarbeitung im Modul DDIFF verwendet wird. Die Qualitätskontrolle der Satelliten- und Bodendaten ist ähnlich, wird aber durch zwei verschiedene Module (QC-HR, QC-FID) durchgeführt. Je nach Datenqualität können verschiedene Prozeduren zur Datenverarbeitung, z.B. Korrektur von Phasensprüngen (Cycle-Slip-Korrektur; siehe auch Kap. 3.1.4) oder auch die Korrektur von Daten“ausreißen“ in die Qualitätskontrolle integriert werden. In Ergebnis der Kontrolle entstehen modifizierte (qualitätskontrollierte) GPS-Datenfiles (HR\*, FID\*).

<b>Eingabedaten</b>	Daten des GPS-Satellitenempfängers (RINEX-Format, 1 h)
<b>Ausgabedaten</b>	Gegebenenfalls modifizierte Daten des GPS-Satellitenempfängers (RINEX-Format, 1 h) Statusinformation über den Datenfile (*.log Datei)

*Tab. 5.6: Charakterisierung des Softwaremoduls zur Qualitätskontrolle der GPS-Okkultationsdaten QC-HR.*

<b>Eingabedaten</b>	Daten des GPS-Bodenempfängers (RINEX-Format, 1 h)
<b>Ausgabedaten</b>	Daten des GPS-Bodenempfängers (RINEX-Format, 1 h) Statusinformation über den Datenfile (*.log Datei)

*Tab. 5.7: Charakterisierung des Softwaremoduls zur Qualitätskontrolle der GPS-Bodendaten QC-FID.*

### Generierung Okkultationstabelle MK-TAB

Das Modul MK-TAB erstellt aus den RINEX-Datenfiles (50 Hz, 1 h überdeckend) des GPS-Satellitenempfängers eine Tabelle, in der alle durchgeführten Okkultationsmessungen mit ihren charakteristischen Angaben (Zeitfenster, Okkultations- und Referenzsatellitennummer) enthalten sind. Diese Tabelle wird stündlich erneuert. Die Auswahl der geeigneten Bodenstationen für die Doppeldifferenzenbildung basiert auf der Auswertung einer mit dem Modul ROST durchgeführten Simulation der Okkultationsmessungen des jeweiligen Tages.

<b>Eingabedaten</b>	HR-Daten (50 Hz) des GPS-Satellitenempfängers eines Tages (RINEX-Format, 1 h), Okkultationstabelle aus Simulation
<b>Ausgabedaten</b>	Tabelle der tatsächlich aufgezeichneten Okkultationsdaten (Zeitfenster der Okkultationen, beteiligte Satelliten) für einen Tag

*Tab. 5.8: Charakterisierung des Softwaremoduls MK-TAB zur Erzeugung von Okkultationstabellen aus den RINEX-Datenfiles der GPS-Satellitenmessungen.*

### Modulare Okkultationssimulation ROST

Das Simulationswerkzeug für Radiookkultationsmissionen, ROST, wird mit einer speziellen Aufgabe auch im Prozessor eingesetzt. Die von ROST erzeugten Okkultationstabellen werden zusammen mit den HR-Daten im Modul MK-TAB benutzt, um die für die Doppeldifferenzenbildung benötigten Okkultationstabellen zu erstellen.

<b>Eingabedaten</b>	Orbitdaten CHAMP (TwoLine-Repräsentation), Orbitdaten GPS (Broadcast-Ephemeriden)
<b>Ausgabedaten</b>	Tabelle mit vorhergesagten Okkultationen (Zeitfenster der Okkultationen, beteiligte Satelliten und Bodenstationen, zugeordnete Lage der Vertikalprofile, Elevationswinkel des GPS-Okkultations- und Referenzsatelliten für die betreffende Bodenstation); Datenprodukt CH-TAB
<b>Parameterfiles</b>	Positionen der GPS Bodenstationen mit den zugehörigen Bewegungsvektoren

**Tab. 5.9:** Charakterisierung des Simulationstools ROST zur Simulation von Okkultationsexperimenten und zur Erzeugung von Okkultationsvorhersagen.

Die Möglichkeiten des Simulationswerkzeuges gehen weit über die Erfüllung dieser speziellen Aufgabe hinaus. ROST kann auch außerhalb des Prozessierungssystems separat zur Simulation und Planung von Okkultationsexperimenten eingesetzt werden. Einige der Haupteigenschaften und Fragestellungen bzw. Aufgaben, die mit dieser Software bearbeitet werden können, sind:

- Simulation von Okkultationsexperimenten (auch Mehrsatellitenmissionen) für Neutralgas/Ionosphäre; Vorhersage von Okkultationsereignissen;
- Planung von Bodennetzkonfigurationen für Doppeldifferenzprozessierung;
- Analyse von Bodenkontakten zur Planung der Datenübertragung bzw. zur Auslastung des Datenspeichers an Bord der Satelliten;
- Nutzung verschiedener Orbitformate für GPS- und LEO-Satelliten;
- steuerbar über eine Konfigurationsdatei (z.B. Antennenparameter, Bodenstationsparameter, Okkultationsparameter).

### GPS-Doppeldifferenzenmodul DDIFF

Die Extraktion der atmosphärischen Phasenwegverlängerung ist die Aufgabe des Moduls DDIFF. Das Grundprinzip ist die Umsetzung der Doppeldifferenzenmethode, die in Kap. 3.2.2 eingeführt wurde. DDIFF ist ein komplexes, geodätisches Programm, das speziell für die Auswertung von Radiookkultationsmessungen entwickelt wurde. Es erfüllt im wesentlichen die folgenden Aufgaben:

- Synchronisieren der GPS-Boden- mit den Satellitendaten;
- Orbitinterpolation und Doppeldifferenzenbildung;
- Erzeugung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung des Okkultationslinks mit den damit verbundenen Modellierungen bzw. Kalibrierungen (Kap. 3.2.2).

Das Programm kann auch zur Analyse von GPS-Bodenmessungen [Wickert *et al.*, 2001a] eingesetzt werden. Hierbei können z.B. Differenzen von GPS-Satellitenuhrenfehlern berechnet und Aussagen zur Qualität der Bodenmessungen gemacht werden (u.a. Rauschverhalten des Empfängers, Verhalten der Empfängeruhrenfehler).

<b>Eingabedaten</b>	Daten des GPS-Satellitenempfängers (RINEX-Format, 1 h) Daten der GPS-Bodenstationen (RINEX-Format, 1 h) Statusinformationen (*.log Dateien) der GPS-Messdatenfiles Präzise Orbitdaten von CHAMP bzw. anderen LEO-Satelliten (Position und Geschwindigkeit) Präzise Orbitdaten der GPS-Satelliten (Position und Geschwindigkeit) Okkultationstabelle (mit MK-TAB generiert)
<b>Ausgabedaten</b>	Atmosphärische Phasenwegverlängerung während einer Okkultation (50 Hz) mit zugehöriger Orbitinformation von CHAMP und des okkultierten GPS-Satelliten, Datenprodukt CH-AI-2-PD
<b>Parameterfiles</b>	Exakte Positionen der GPS-Bodenstationen

**Tab. 5.10:** Charakterisierung des Softwaremoduls DDIFF zur Erzeugung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung.

### Modul zur Berechnung atmosphärischer Parameter ATMO

Das Inversionsmodul ATMO leitet atmosphärische Profile (Refraktivität, Dichte, Druck, Temperatur) aus den atmosphärischen Phasenwegverlängerungen des Okkultationslinks und den zugehörigen Orbitinformationen der beteiligten Satelliten (Position und Geschwindigkeit) ab. Das Programm verwendet die in Kap. 3.3 ausführlich dargestellten Algorithmen.

<b>Eingabedaten</b>	Atmosphärische Phasenwegverlängerung im Verlaufe einer Okkultation (50 Hz) mit zugehöriger Orbitinformation des CHAMP und okkultierenden GPS-Satelliten (CH-AI-2-PD)
<b>Ausgabedaten</b>	Vertikalprofile der atmosphärischen Parameter (Näherung für trockene Atmosphäre) Datenprodukt CH-ATM

**Tab. 5.11:** Charakterisierung des Softwaremoduls ATMO (Ableitung vertikaler atmosphärischer Parameter).

### Modul zur Interpolation meteorologischer Analysen METEO

Das Softwaremodul METEO generiert für jedes erzeugte Atmosphärenprofil eine Datei, die ein zugehöriges Vertikalprofil (Temperatur, Luftdruck) einer meteorologischen Analyse enthält. Die Daten werden dabei linear auf den Ort und den Zeitpunkt der entsprechenden Okkultation interpoliert, wobei auf den erdnächsten Punkt des Profils interpoliert wird. Es werden verschiedene Analysen verwendet (ECMWF, GME(DWD),

NCEP). Im weiteren Verlauf der Mission ist eine Erweiterung auf meteorologische Vorhersagen vorgesehen.

<b>Eingabedaten</b>	Datei mit den Vertikalprofilen atmosphärischer Parameter, Meteorologische Analysen bzw. Vorhersagen (ECMWF, NCEP, DWD)
<b>Ausgabedaten</b>	In Raum und Zeit auf den Okkultationsort interpolierte Vertikalprofile atmosphärischer Parameter aus den entsprechenden meteorologischen Analysen (Dateien iMET_ECMWF, iMET_GME, iMET_NCEP)

**Tab. 5.12:** Charakterisierung des Softwaremoduls METEO (Interpolation meteorologischer Analysen).

### Modul zur Berechnung von Wasserdampfprofilen WVP

Das Modul WVP berechnet aus den Refraktivitätsprofilen und den durch das Modul METEO aus den Meteorologischen Analysen erzeugten Vertikalprofilen (Temperatur, Luftdruck) die vertikale Verteilung der spezifischen Feuchte unter Verwendung des in Kap. 3.3.6 dargestellten Algorithmus.

<b>Eingabedaten</b>	Vertikalprofile der atmosphärischen Parameter (Näherung für trockene Atmosphäre), CH-ATM Vertikalprofile (Temperatur, Luftdruck) aus Meteorologischer Analyse bzw. Vorhersage für das entsprechende Profil, z.B. iMET-ECMWF
<b>Ausgabedaten</b>	Vertikalprofil der spezifischen Feuchte, Datenprodukt CH-WVP

**Tab. 5.13:** Charakterisierung des Softwaremoduls WVP zur Ableitung von Wasserdampfprofilen.

### Softwaretechnische Realisierung der Module

Sämtliche Softwaremodule wurden in der Programmiersprache FORTRAN unter UNIX geschrieben, dabei wurden die Standardcompiler F77 (SUN) und F90 (SUN) verwendet. Die wissenschaftlichen Algorithmen wurden unter Verwendung folgender Literatur zur Entwicklung numerischer Methoden entwickelt: *Blobel und Lohrmann* [1998], *Brockwell und Davis* [1998] und *Press et al.* [1992].

#### 5.4.2 Operationelles Prozessierungssystem

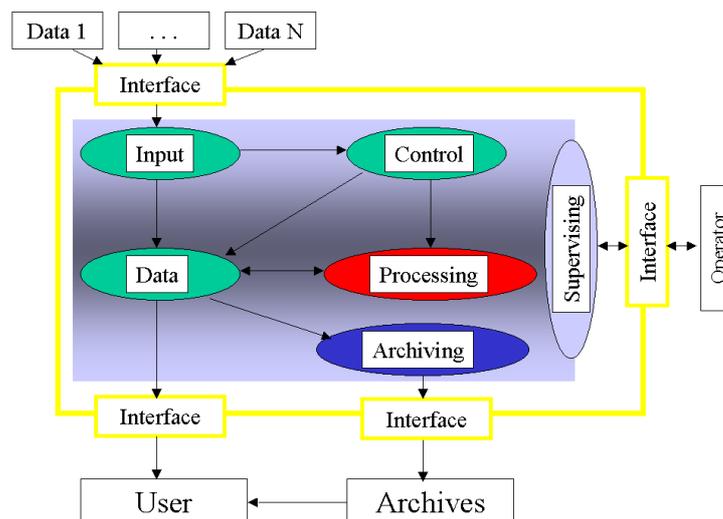
Die im vorigen Kapitel (5.4.1) beschriebenen Softwaremodule können verwendet werden, um Vertikalprofile atmosphärischer Parameter aus folgenden Eingabedaten abzuleiten: GPS-Okkultationsdaten (gemessen von CHAMP oder anderen LEO-Satelliten), GPS-Bodendaten eines globalen GPS-Bodennetzes und präzise Bahndaten von CHAMP und den GPS-Satelliten. Die Prozessierung kann im Kommandozeilenmodus unter dem

Betriebssystem UNIX, mit Stapelverarbeitungsbefehlen (Scripte) gesteuert, durchgeführt werden.

Für komplexere und automatische Prozessierungsabläufe ist jedoch die Einbindung der beschriebenen Module in ein automatisches Prozessierungssystem notwendig. Wesentliche Aufgaben eines solchen Systems sind die Bereitstellung der Eingabedaten für die wissenschaftlichen Module, die optimale Koordinierung ihrer Arbeitsweise sowie die Überführung der Datenprodukte und der zugehörigen Metadateninformationen (ergänzende Informationen) in das Datenzentrum und die dazugehörigen Archivsysteme.

Im Verlauf der Realisierungsphase der CHAMP-Mission wurde ein derartiges Prozessierungssystem entwickelt [Wehrenpfennig et al., 2001; Schmidt et al., 2000]. Es ist vielseitig einsetzbar und kann auch zur Erfüllung andersartiger operationeller Aufgaben eingesetzt werden (z.B. operationelle Prozessierung der CHAMP-Okkultationsdaten in der Ionosphäre und von GPS-Bodendaten zur Charakterisierung des Weltraumwetters [Wehrenpfennig et al., 2001]). Aus softwaretechnischer Sicht erfüllt das entwickelte operationelle System folgende Anforderungen:

- Modulare Struktur der integrierten wissenschaftlichen Module (Anwendungen);
- Konfigurierbarkeit aller Komponenten und Schnittstellen;
- Erweiterbarkeit für Mehrsatellitenmissionen;
- Wiederverwendbarkeit von Komponenten;
- Möglichkeit zur Anpassung an verschiedene Zielsysteme (Betriebssysteme, Hardware);
- Integration von Eingangsdaten verschiedener Quellen und Formate;
- Parallelisierbarkeit zur effektiven Bearbeitung großer Datenmengen;
- Arbeit im automatischen und „offline“ (Kommandozeilen) Modus.



**Abb. 5.9:** Struktur und Komponenten des operationellen Prozessierungssystems für CHAMP-Okkultationsdaten (nach [Wehrenpfennig et al., 2001]).

Für die Eignung als operationelles System ergeben sich zusätzliche Anforderungen:

- Automatische und kontrollierbare Arbeit, einschließlich automatischer Bereitstellung der Eingabedaten aus dem Archivsystem und der Datenprodukte für das Archiv;
- Einhaltung von Zeitlimits (Echtzeitprozessierung);
- Robustheit, Ausfallsicherheit;
- Komfortable Bedienbarkeit (z.B. Schnittstellen);
- Konfigurierbarkeit der Schnittstellen zu Datenquellen und Datensinken.

Abb. 5.9 gibt einen Überblick über die verschiedenen Hauptkomponenten und die Arbeitsweise des entwickelten Prozessorsystems. Das Eingabesystem (Input) empfängt die verschiedenen Eingabedaten, die auch von unterschiedlichen Datenquellen angezogen werden können. Sie werden in das Datenmanagementsystem (Data) weitergeleitet, welches die Datenbereitstellung und den Datenempfang vom Prozessierungsteilsystem übernimmt und gleichzeitig die Schnittstelle zu einem internen Archivsystem (Archiving) darstellt, welches wiederum die Datenprodukte und ihre Metadaten in das ISDC überführt.

Das Kontrollsystem (Control) koordiniert die Arbeit aller Untersysteme und kann über eine grafische Benutzeroberfläche (Supervising tool, Abb. 5.10) vom Bediener (Operator) kontrolliert und konfiguriert werden.

Die Prozessierung erfolgt datengesteuert, d.h. in der automatischen Betriebsart wird die Arbeit der wissenschaftlichen Module gestartet, wenn alle benötigten Eingabedaten zur Verfügung stehen. Die Überwachung des Vorhandenseins der notwendigen Eingabedaten ist Aufgabe des Kontrollsystems in Zusammenarbeit mit dem Datenmanagementsystem.

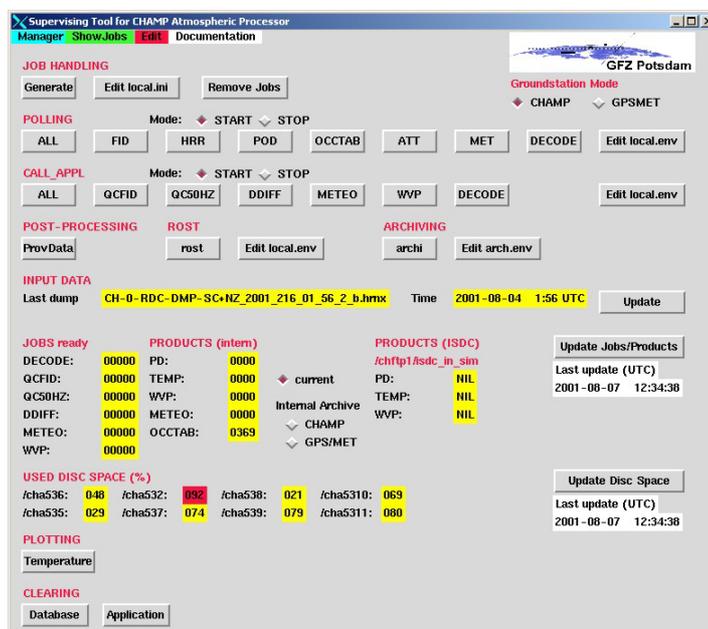


Abb. 5.10: Grafische Benutzeroberfläche des automatischen Prozessierungssystems (aus [Schmidt et al., 2000]).

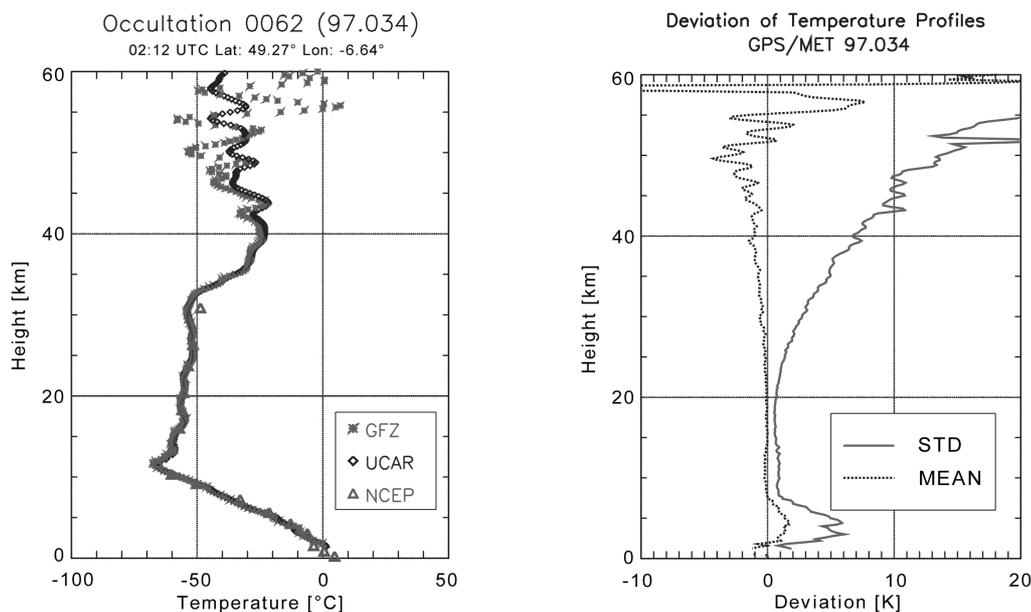
Die Einbindung der wissenschaftlichen Module in das automatische Prozessierungssystem erfolgt durch die Verwendung von Bibliotheksrufern, die eine einheitliche Schnittstelle zum Prozessierungssystem bereitstellen. Diese Rufe werden in jedes der verschiedenen wissenschaftlichen Module integriert (siehe Tab. 5.3 bis 5.13). Die Bibliothek gewährleistet somit einen standardisierten Zugriff aller Module auf die jeweiligen Eingabedaten (z.B. für das Modul ATMO die atmosphärischen Phasenwegverlängerung CH-AI-2-PD für jedes Okkultationsereignis, siehe Tab. 5.11). Weiterhin werden Konfigurationsdaten mit Steuerparametern für die Ausführung der wissenschaftlichen Module eingelesen (z.B. für ATMO Parameter für die statistische Optimierung, Kap. 3.3.4 oder Flags, mit denen entsprechende Auswerteverfahren in der unteren Troposphäre festgelegt werden können, Kap. 3.3.8). Die Prozessierungsergebnisse werden dann an das steuernde System zur weiteren Verarbeitung bzw. Archivierung übergeben (z.B. atmosphärische Vertikalprofile, CH-AI-3-ATM für das Modul METEO zur Ableitung von Feuchteprofilen, siehe Tab. 5.12 oder zur Archivierung an das ISDC). Durch weitere Bibliotheksaufrufe werden die Generierung von Metadaten sowie das Erstellen von Reports (z.B. Status- oder Fehlermeldungen) standardisiert.

#### 5.4.3 Praxistest des Systems mit GPS/MET-Daten

Das Prozessierungssystem konnte mit Daten des GPS/MET-Experiments (Kap. 2.3) vom 3. Februar 1997 getestet werden (Prime-Time 4, siehe Tab. 6.3). Durch UCAR wurde ein kompletter Datensatz von GPS-Okkultations- und Bodendaten sowie von berechneten atmosphärischen Phasenwegverlängerungen und Temperaturprofilen (UCAR-Analysedaten) zur Verfügung gestellt. Der Orbit des GPS/MET-Satelliten wurde vom GFZ berechnet [Kang *et al.*, 1997]. Die Bahnen der GPS-Satelliten wurden vom IGS-Analysezentrum am GFZ Potsdam zur Verfügung gestellt [Gendt *et al.*, 1999]. Die Auswertesoftware wurde mit umfangreichen Testläufen getestet und dabei schrittweise verbessert.

Die Ergebnisse des Praxistests wurden mit den UCAR-Analyseresultaten verglichen. Da beide Analysezentren gleiche Auswerteprozessoren verwenden, wurden identische oder zumindest ähnliche Ergebnisse erwartet. Sowohl UCAR als auch GFZ benutzen zur Ableitung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung eine Doppeldifferenzenmethode sowie die Näherung der geometrischen Optik für die Strahlausbreitung zwischen Sender und Empfänger, um eine Abel-Inversionstechnik anwenden zu können. Hierbei wird bemerkt, dass UCAR für die GPS-Datenprozessierung sowohl zur Generierung der Satellitenorbits als auch zur Kalibrierung der atmosphärischen Phasenwegverlängerung das kommerzielle Softwarepaket MicroCosm® verwendet [Schreiner *et al.*, 1998; Rocken *et al.*, 1997].

### Vergleich von Temperaturprofilen des GFZ und UCAR



**Abb. 5.11:** Vergleich von GPS/MET-Profilen berechnet mit GFZ/UCAR-Prozessierungssoftware mit NCEP-Reanalyse. **Links:** Okkultation Nr. 62, 3. Feb. 1997; **Rechts:** Statistischer Vergleich von 81 GPS/MET-Profilen vom 3. Feb. 1997 (aus [Wickert et al., 2001a]).

In Abb. 5.11 ist ein Ergebnis des Testlaufes der ersten Version der Prozessierungssoftware dargestellt. Die beiden Grafiken zeigen einen Vergleich von GFZ-Trockentemperaturprofilen mit den UCAR-Resultaten. Es werden Prozessierungsergebnisse für ein einzelnes Profil verglichen. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung über den gesamten Höhenbereich von der Nähe der Erdoberfläche bis in ca. 50 km Höhe. Vergleichend zu den GPS/MET-Trockentemperaturprofilen ist ein Temperaturprofil dargestellt, das aus der meteorologischen Reanalyse von NCEP [Kalnay et al., 1996] durch Interpolation auf Ort und Zeitpunkt der Okkultation abgeleitet wurde. Beide Okkultationsprofile zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zu den Analysedaten.

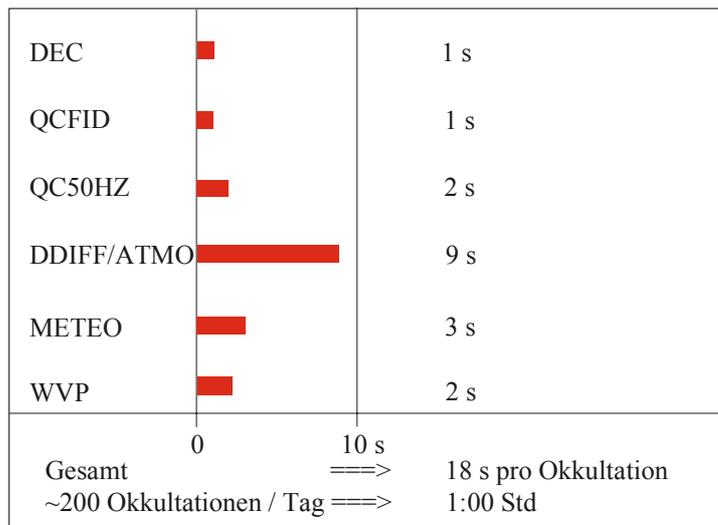
Abb. 5.11 zeigt weiterhin einen statistischen Vergleich (mittlere und Standardabweichung,  $T_{\text{GFZ}} - T_{\text{UCAR}}$ ) von 81 Trockentemperaturprofilen (3. Februar 1997). Die Daten wurden für diesen Vergleich nicht speziell ausgewählt, alle Profile wurden verwendet, die bei der automatischen Prozessierung generiert wurden. Die Standardabweichung im Höhenintervall von 8 bis ca. 30 km ist kleiner als 1 K. Im Gegensatz zur UCAR-Datenanalyse [Rocken et al., 1997] ist in der ersten Version der GFZ-Inversionssoftware keine Methode zur Korrektur von Mehrwegeeffekten (Kap. 3.3.8) implementiert. Dies verursacht die Abweichungen von bis zu 2 K in der unteren Troposphäre. Die Temperaturunterschiede von bis zu 10 K im Höhenbereich über 40 km werden durch unterschiedliche Optimierungsprozeduren für den veranschaulichten Brechungswinkel über 40 km Höhe (Kap. 3.3.4) verursacht. UCAR verwendet das Verfahren von Sokolovskiy und Hunt [1996]. Die GFZ-Software benutzt das von Hocke [1997] eingeführte Verfahren. Das Ergebnis der Inversion in der oberen Atmosphäre hängt signifikant von den Wahl der Optimierungsmethode und

ihrer Parameter ab und kann die recht großen Abweichungen in diesem Höhenbereich erklären (Kap. 3.3.4).

### Test des Prozessierungssystems

Das bisher beschriebene Prozessierungssystem wurde vor dem CHAMP-Satellitenstart unter realistischen Bedingungen getestet. Dazu wurde eine vollautomatische Prozessierung von GPS/MET-Daten (Kap. 2.3) durchgeführt. Als Datenquellen dienten Rechner des lokalen GFZ-Computernetzes, auf denen die zur Prozessierung benötigten GPS- und Orbitdaten zur Verfügung gestellt wurden. Der Zugriff auf diese Datenquellen erfolgte dann mittels FTP (File Transfer Protocol) um einen Zugriff auf externe Datenquellen zu simulieren. Im Unterschied zu diesem Test werden die Eingabedaten der realen CHAMP-Prozessierung automatisch vom ISDC bereitgestellt.

Nach der Prozessierung wurden die Datenprodukte (Temperaturprofile und atmosphärische Phasenwegverlängerungen) der Testprozessierung, einschließlich der zugehörigen Metadateninformationen, in das ISDC überführt. Von dort erfolgte eine Bereitstellung für externe Datennutzer. Somit wurde die bevorstehende Prozessierung der CHAMP-Daten in realistischer Weise simuliert, auch die Schnittstellen zu den Datenquellen und zum Archivsystem wurden mit der beschriebenen Prozedur getestet.



**Abb. 5.12:** Rechenzeiten der wissenschaftlichen Module beim Testen des Prozessierungssystem mit GPS/MET-Daten auf einer SPARC ULTRA 60 mit 2×450 MHz Prozessoren (aus [Schmidt et al., 2000]).

Das zu testende System wurde auf einer SUN-Ultra 60 (2×450 MHz-Prozessoren) installiert. Die durchschnittlichen Rechenzeiten der einzelnen Programmmodule sind in Abb. 5.12 dargestellt. Den Hauptanteil (50%) an der Prozessierungszeit hat die Kombination von Doppeldifferenzenmodul (DDIFF) mit dem Inversionsprogramm (ATMO). Für die 81 Profile vom 3. Februar 1997 ergab sich eine Gesamtrechenzeit von ca. einer halben Stunde.

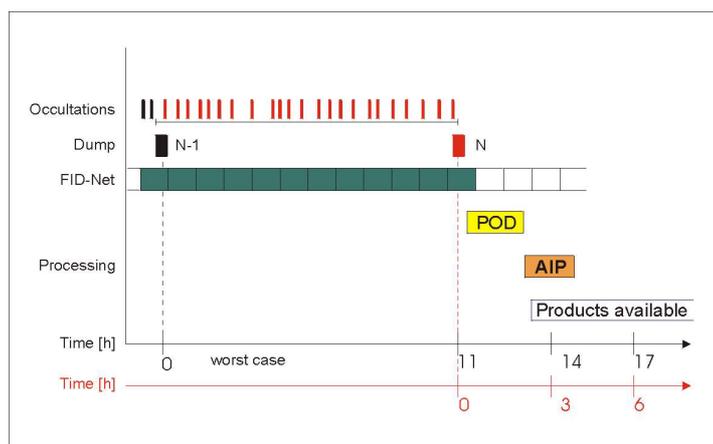
Auf die Profilanzahl für CHAMP extrapoliert ergibt sich für 200 Profile eine Prozessierungszeit von ca. einer Stunde. Durch die Verwendung einer größeren Anzahl von GPS-Bodenstationen (ca. vierfache Anzahl) erhöht sich die Rechenzeit für die CHAMP-Daten (Berücksichtigung aller Bodenstationen) auf ca. 4-5 Stunden für die Profile (ca. 230) eines Tages.

#### 5.4.4 Operationelle Gesichtspunkte

Der Zeitablauf für ein mögliches Szenario zur operationellen Bereitstellung von atmosphärischen Vertikalprofilen ist in Abb. 5.13 dargestellt.

Die Okkultationen sind nahezu gleichmäßig im Zeitverlauf verteilt, jedoch ist der Zugriff auf die Satellitendaten erst nach der Übertragung an die Satellitenempfangsstation (Dump) möglich. Für eine Station in mittleren Breiten (Neustrelitz) entstehen Datenlücken zwischen Dump  $N$  und  $N-1$  von bis zu 12 h (siehe Kap. 5.1). Es wird weiterhin angenommen, dass die Berechnung der präzisen Satellitenorbits (POD) weniger als 2 h in Anspruch nimmt und diese mit dem Eintreffen der Satellitendaten starten kann. Die Bodendaten (FID-Net) stehen mit einer zeitlichen Verzögerung von 10 bis 25 min zur Verfügung (Kap. 5.2).

Die Okkultationsprozessierung (AP, Atmospheric Profiling) kann erst dann starten, wenn alle Eingabedaten komplett sind. Für das dargestellte Szenario heißt das, dass die präzise Orbitberechnung abgeschlossen sein muss. Der Startzeitpunkt für AP ist also ca. 2 h nach dem Dump  $N$ ; dann sind die GPS-Okkultations-, die GPS-Boden- und die Satellitenbahndaten verfügbar. Wird die AP-Prozessierungszeit vernachlässigt, was nach einer Optimierung des Prozessierungssystems realistisch ist, kann ein erstes Vertikalprofil ca. 2 h nach dem Dump  $N$  zur Verfügung gestellt werden. Im günstigsten Fall steht also ein kurz vor diesem Dump gemessenes Vertikalprofil nach diesen ca. 2 h ausgewertet zur Verfügung und kann für Wettervorhersagedienste bereitgestellt werden. Im ungünstigsten Fall ist diese Information erst nach einem Zeitraum von ca. 14 h verfügbar, für Okkultationen, die kurz nach dem Dump  $N-1$  aufgezeichnet wurden.



**Abb. 5.13:** Operationelle Gesichtspunkte der CHAMP-Okkultationsdatenprozessierung (aus [Wickert et al., 2001a]).

Diese Zeitspanne kann durch den Einsatz einer polaren Satellitenempfangsstation deutlich verringert werden (Kap. 5.1). Es wird weiterhin klar (Abb. 5.13), dass die schnelle

Verfügbarkeit der präzisen Satellitenbahndaten (Orbitberechnung bzw. -vorhersagen) für eine operationelle Prozessierung entscheidend ist.

## 5.5 Datenprodukte

Bei der Definition der Datenprodukte wurde die Struktur des GPS/MET-Experiments übernommen (Kap. 2.3). Tab. 5.14 gibt eine Übersicht über die CHAMP-Datenprodukte. In der Aufstellung sind die für die Okkultationsprozessierung verwendeten Orbitdaten (CH-OG-3-RSO) für CHAMP und die GPS-Satelliten nicht enthalten, da sie zu den Datenprodukte der Orbit/Schwerefeldprozessierung gehören.

Die Verteilung bzw. der Zugriff auf die Datenprodukte erfolgt über das Informationssystem und Datenzentrum (ISDC) des GFZ Potsdam [Ritschel, 2001].

Prozessierungsstufe/ Produktbezeichnung	Kurzbeschreibung der Daten und Produktbezeichnung
Stufe 1 (Level 1)	50 Hz Okkultationsdaten (L1, L2, SNR <sub>1</sub> , SNR <sub>2</sub> ) von CHAMP (CH-AI-1-HR), 1 Hz Daten (P1, P2, L1, L2) des GPS-Bodennetzes(CH-AI-1-FID)
Stufe 2 (Level 2)	Atmosphärische Phasenwegverlängerung des Okkultationslinks für jede Okkultation (CH-AI-2-PD) mit zugehörigen Satellitenbahndaten, Okkultationstabellen (CH-AI-2-TAB)
Stufe 3 (Level 3)	Vertikalprofile atmosphärischer Parameter (CH-AI-3-ATM, 0-60 km), Wasserdampfprofile (CH-AI-3-WVP, 0-20 km)

**Tab. 5.14:** Übersicht über die Datenprodukte des CHAMP-Okkultationsexperiments in den verschiedenen Prozessierungsstufen (Stand Juli 2001).

# 6 ERSTE ERGEBNISSE DES CHAMP-OKKULTATIONSEXPERIMENTES

Am 11. Februar 2001 konnten die ersten Okkultationsmessungen an Bord des CHAMP-Satelliten durchgeführt werden. Die Verzögerung dieser Messungen gegenüber dem Satellitenstart (15. Juli 2000) entstand durch verschiedene Korrekturen und Weiterentwicklungen der GPS-Empfängersoftware an Bord des Satelliten, wozu die Testphase des Satelliten im Orbit genutzt wurde.

Die in Kap. 5 beschriebene Infrastruktur des CHAMP-Okkultationsexperiments erwies sich als funktionstüchtig. Innerhalb von 24 Stunden nach den Messungen konnten Vertikalprofile atmosphärischer Parameter aus den CHAMP-Okkultationsdaten abgeleitet werden.

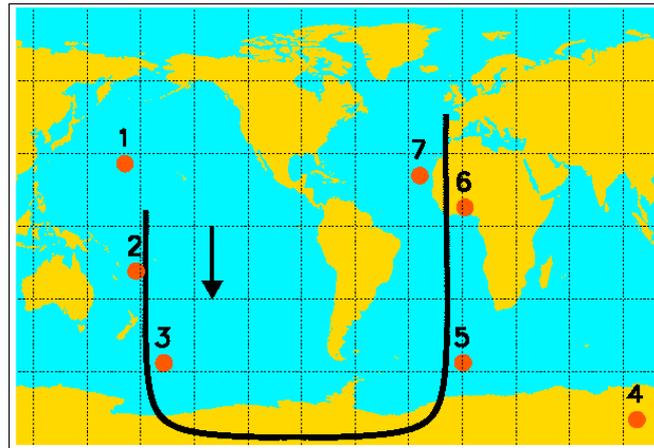
In diesem Kapitel werden verschiedene erste Ergebnisse des CHAMP-Radiookkultations-experiments dargestellt. U.a. geben statistische Vergleichsstudien mit meteorologischen Analysen vom ECMWF Aufschluss über die Qualität der abgeleiteten atmosphärischen Parameter. Erstmals wird eine Einfachdifferenzenmethode erfolgreich zur Prozessierung von GPS-Radiookkultationsdaten angewendet.

## 6.1 Erste Okkultationsmessungen von CHAMP

Die ersten Okkultationsmessungen von CHAMP wurden am 11. Februar 2001 zwischen 19:04 und 20:04 UTC vom GPS-Empfänger an Bord des Satelliten aufgezeichnet. In diesem Zeitintervall fanden 7 Okkultationsereignisse statt, die in Tab. 6.1 charakterisiert sind. Dargestellt sind die PRN der an der Doppeldifferenzenbildung beteiligten GPS-Satelliten sowie die Nummern der beteiligten GPS-Bodenstation (Anhang B), Start- und Endzeiten der Okkultationen sowie die geografischen Koordinaten der abgeleiteten Temperaturprofile.

Okk-Nr.	Osat	Rsat	Startzeit [UTC]	Endzeit [UTC]	Breite [°]	Länge [°]	GPS-Bodenstationen
1	21	2	19:04:29	19:05:27	20,04	171,32	18, 62
2	9	5	19:16:36	19:17:21	-23,02	177,42	12, 22, 25, 27, 28, 51
3	26	5	19:26:43	19:27:34	-61,36	-164,26	12, 22, 25, 27, 31
4	30	6	19:33:41	19:34:33	-79,61	70,53	30, 64
5	6	10	19:43:50	19:44:42	-52,37	-0,4	30, 35, 64
6	22	1	20:00:13	20:00:51	12,39	1,8	23, 41, 70
7	27	1	20:03:09	20:04:12	26,01	-24,29	11, 29, 38, 41

**Tab. 6.1:** Okkultationstabelle der ersten CHAMP-Okkultationen (Zuordnung der Bodenstationsnummern: siehe Anhang B; Osat: GPS-Okkultationsatellit, Rsat: GPS-Referenzsatellit).

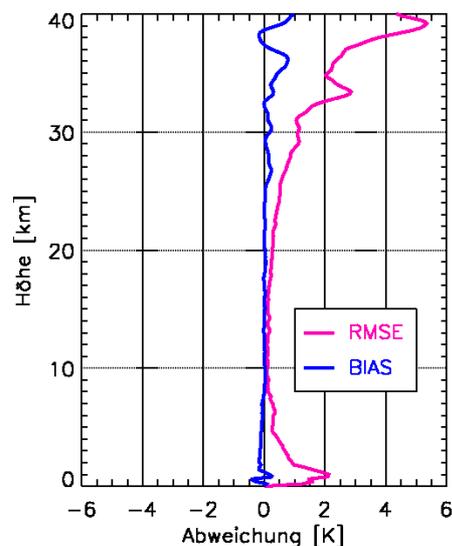


**Abb. 6.1:** Geografische Lage der ersten CHAMP-Okkultationsmessungen und Subsatellitenspur von CHAMP für den 11. Februar 2001, 19:04-20:04 UTC.

Die geografische Lage der ersten Okkultationen ist aus Abb. 6.1 ersichtlich. Zusätzlich ist die Subsatellitenspur und die Flugrichtung von CHAMP während des Messzeitraumes eingezeichnet.

Die ersten Okkultationsmessungen (Phasen) wurden auf  $L1$  mit einer Frequenz von 50 Hz durchgeführt. Da die Phasen der zweiten Frequenz ( $L2$ ) nur mit einer Datenrate von 1 Hz zur Verfügung standen, wurden die  $L2$ -Messungen durch lineare Interpolation zwischen den 1 Hz-Stützstellen in eine höhere Datenrate (50 Hz) transformiert. Die Prozessierung erfolgte dann entsprechend der Beschreibung in Kap. 3.2 und 3.3.

Dieses Verfahren wurde mit unterschiedlichen Datenraten für  $L1$  und  $L2$  mit GPS/MET-Daten getestet. Abb. 6.2 zeigt einen statistischen Vergleich von 81 GPS/MET-Trockentemperaturprofilen vom 3. Februar 1997. Die Profile wurden unter Verwendung unterschiedlicher Datenraten auf  $L2$  (1 und 50 Hz) abgeleitet. Die resultierenden Datensätze wurden statistisch miteinander verglichen. Abb. 6.2 zeigt die Höhenabhängigkeit der mittleren Abweichung (BIAS) und Standardabweichung der mittleren Abweichung (RMSE) beider



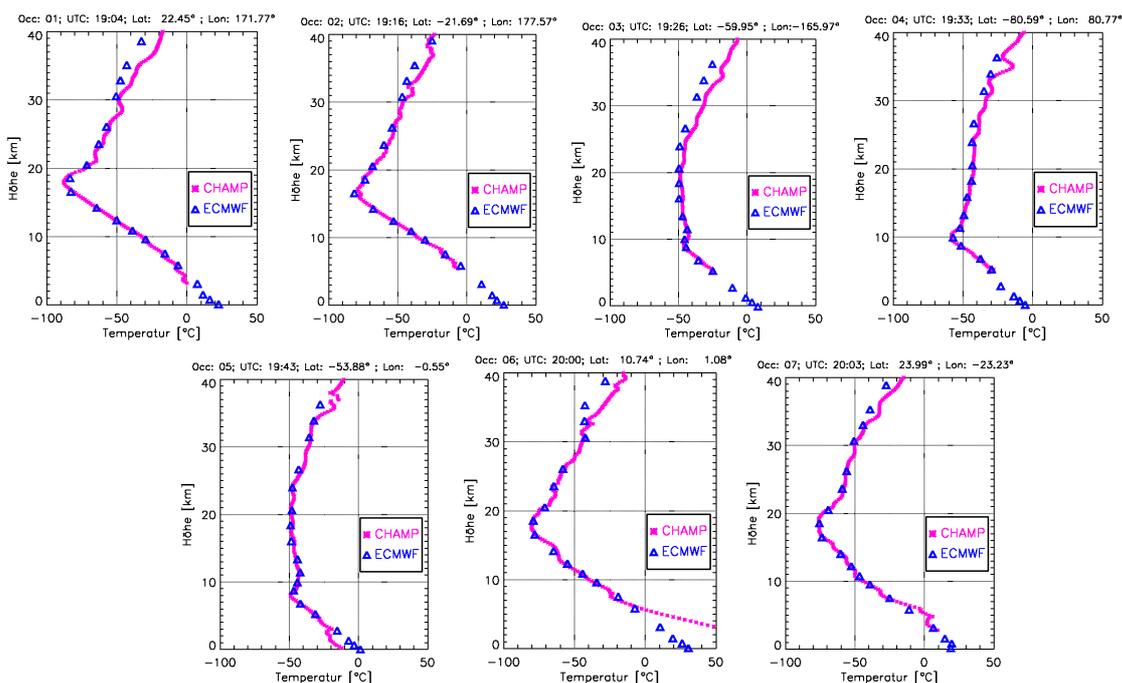
**Abb. 6.2:** Vertikalprofil der mittleren Abweichung (BIAS) und Standardabweichung der mittleren Abweichung (RMSE) von zwei Datensätzen vertikaler Trockentemperaturprofile (Datenrate  $L2$ : 1 bzw. 50 Hz); 81 GPS/MET-Okkultationen vom 4. Februar 1997.

Datensätze mit einer Höhenauflösung von 0,2 km von der Erdoberfläche bis in eine Höhe von 40 km. Bis 40 km ist nahezu keine mittlere Abweichung festzustellen, ab Höhen von >25 km ergeben sich minimale Abweichungen von bis zu 1 K. Die Standardabweichung bleibt im Höhenbereich von ca. 2 bis 31 km <1 K, bei 40 km Höhe erreicht sie ca. 5 K.

Der Einfluss der Verringerung der Datenrate von  $L2$  auf die Qualität der berechneten Vertikalprofile wurde bereits von *Steiner* [1998] für eine einzelne GPS/MET-Okkultation untersucht. Die Datenanalyse begann allerdings erst bei der atmosphärischen Phasenwegverlängerung. Für die Berechnung der Phasenwegverlängerung wurden Phasenmessungen ( $L1$  und  $L2$ ) mit 50 Hz-Frequenz verwendet. Mit 1 Hz-Messungen auf  $L2$  wurde bis 30 km Höhe eine Abweichung von <1 K im Vergleich zur Verwendung von 50 Hz Messungen beobachtet.

Basierend auf diesem Ergebnis und den Resultaten der Vergleichsprozessierung (Abb. 6.2) wurde für die Analyse der ersten Vertikalprofile das beschriebene Interpolationsverfahren angewendet. Im weiteren Verlauf des Experiments stand auch für  $L2$  eine Datenrate von 50 Hz zur Verfügung.

Alle 7 Okkultationen (Tab. 6.1) wurden prozessiert. Ein Vergleich mit korrespondierenden Profilen, abgeleitet aus ECMWF-Analysen (Kap. 6.4.1) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der CHAMP-Messungen mit den Analysen (Abb. 6.3).



**Abb. 6.3:** Die ersten aus CHAMP-Messungen abgeleiteten Trockentemperaturprofile, verglichen mit korrespondierenden ECMWF-Analysen (11.02.2001, Okkultationen Nr. 1-7, siehe auch Tab. 6.1).

Im Zeitraum von Februar bis Juli 2001 wurden während 9 Messperioden insgesamt 15.820 Okkultationen aufgezeichnet. Aus ca. 80% (12.403) der Okkultationen konnten Vertikalprofile abgeleitet werden (prozessiert, Tab. 6.2). In den ersten 6 Monaten des CHAMP-Experiments konnte damit bereits eine größere Datenbasis an prozessierten Okkultationsdaten erzeugt werden, als im gesamten zweijährigen Verlauf des GPS/MET-Experiments (Kap. 6.2).

<b>Nr.</b>	<b>Tag/Periode</b>	<b>Okkultationen (aufgezeichnet)</b>	<b>Okkultationen (prozessiert)</b>
1	11. Februar	7	7
2	16. Februar	112	104
3	23. Februar	17	16
4	5.-9. März	1.068	901
5	29. März – 3. April	1.177	830
6	6./7. April	324	275
7	16.-21. April	1.220	721
8	14. Mai – 10. Juni	5.849	4.881
9	18. Juni – 14. Juli	6.046	4.668
	<i>Gesamt</i>	15.820	12.403

**Tab. 6.2:** Messperioden der ersten Etappe des CHAMP-Radiookkultationsexperiments (Februar bis Juli 2001). Für jede Messperiode ist die Anzahl der gemessenen und prozessierten Okkultationen aufgeführt (aus [Wickert et al., 2002b]).

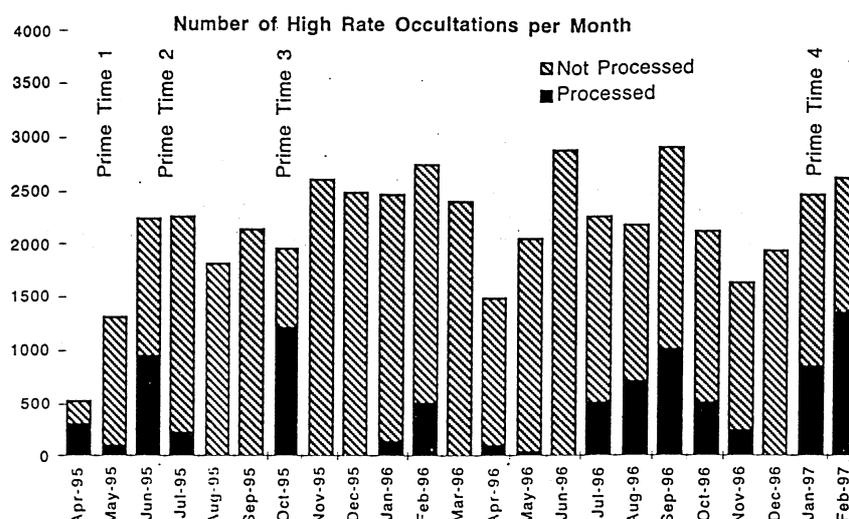
## 6.2 Vergleich der Datenqualität mit GPS/MET

Eine der wesentlichen Defizite des GPS/MET-Experiments (Kap. 2.3) war die Beschränkung der Datenanalyse im wesentlichen auf die Prime-Times (Tab. 6.3), Perioden mit deaktiviertem AS-Modus des GPS-Systems (Kap. 2.2.1). Bei aktiviertem AS-Modus war die Signalqualität von  $L_2$  deutlich verschlechtert, was höhere Anforderungen an die Datenauswertung stellte (spezielle Filtertechniken [Rocken *et al.*, 1997]). Im Verlauf des GPS/MET-Experiments wurden daher von den zwischen April 1995 und Februar 1997 gemessenen 50.200 Okkultationen nur ca. 9.050 (~20%) ausgewertet (abgeschätzt aus Abb. 6.4).

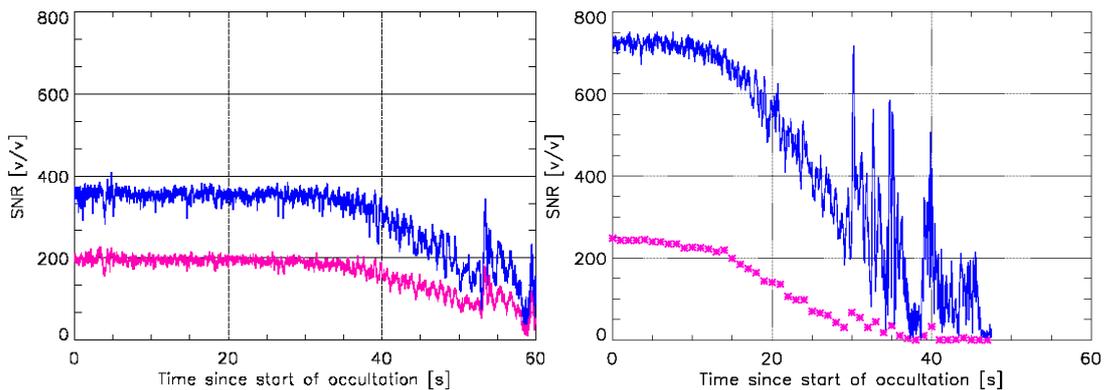
Prime-Time Nr.	Startzeit	Endzeit
1	19.04.1995, 21:00:00	10.05.1995, 20:00:00
2	19.06.1995, 00:00:00	11.07.1995, 00:00:01
3	10.10.1995, 00:00:00	01.11.1995, 00:00:00
4	02.02.1997, 00:00:00	23.02.1997, 23:59:59

**Tab. 6.3:** Bevorzugte Auswerteperioden „Prime-Times“ des GPS/MET Experiments (Anti-Spoofing Modus des GPS Systems deaktiviert).

Für CHAMP wurde im Vorfeld der Mission eine deutlich höhere Datenqualität erwartet [Yunck *et al.*, 2000]. Mit der neuen Generation des GPS-Empfängers („BlackJack“, TRSR-2) vom JPL steht eine gegenüber dem bei GPS/MET verwendeten TRSR-1 verbesserte Empfängerversion zur Verfügung. Bei dessen Entwicklung gingen die bei GPS/MET gemachten Erfahrungen ein. Weiterhin besitzt CHAMP eine gegenüber GPS/MET deutlich verbesserte Antennenkonfiguration mit einer leistungsfähigeren Okkultationsantenne (+5dB im Vergleich zu GPS/MET; [Wickert *et al.*, 2001b; 2002b]; direkt in die Sondierungsrichtung nahe der Erdoberfläche weisend).



**Abb. 6.4:** Anzahl der GPS/MET-Okkultationen von April 1995 bis Februar 1997. Die schwarze Farbe kennzeichnet den Anteil der prozessierten Daten, die sich auf die „Prime-Times“ (Tab. 6.3) konzentrieren (aus [Rocken *et al.*, 1997]).



**Abb. 6.5:** SNR [L1: blau; L2: rot]. **Links:** während einer charakteristischen GPS/MET-Okkultation (Nr. 672) vom 3. Februar 1997 (Anti-Spoofing deaktiviert); **Rechts:** während der CHAMP-Okkultation Nr. 2 am 11. Februar 2001 (Anti-Spoofing aktiviert).

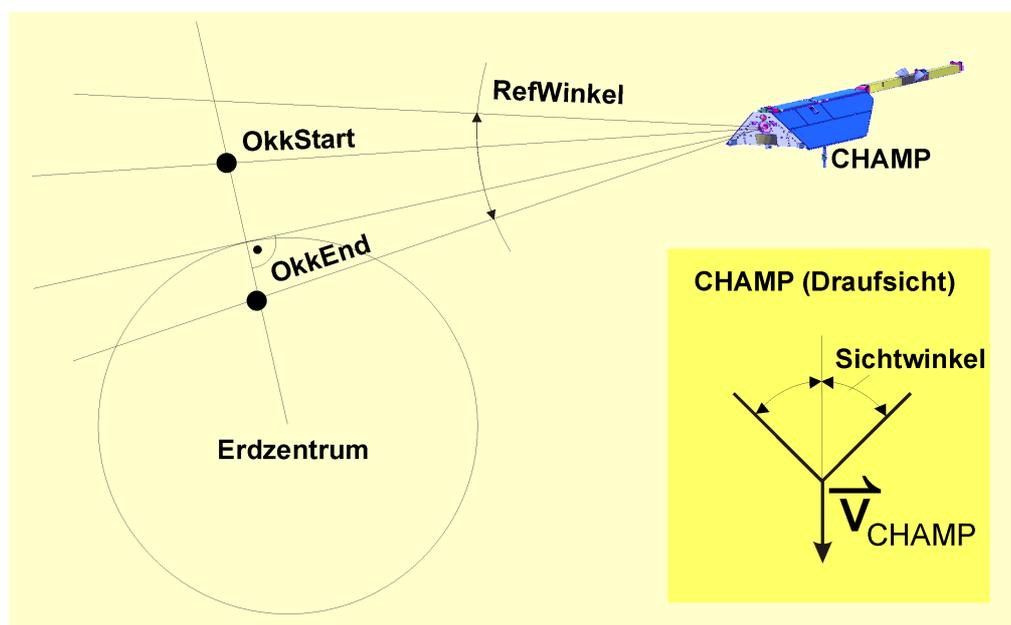
Schon die ersten Okkultationsmessungen von CHAMP ließen erkennen, dass die Signalqualität der Phasenmessungen die Qualität der GPS/MET-Messungen deutlich übertrifft. Abb. 6.5 zeigt einen Vergleich des Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR) einer GPS/MET-Okkultationsmessung vom 3. Februar 1997 (Prime-Time 4, AS deaktiviert) und der CHAMP-Okkultation Nr. 2 vom 11. Februar 2001 (AS aktiviert). Das Signal/Rausch-Verhältnis der Phasenmessungen des CHAMP-Empfängers bei aktiviertem AS ist demnach ca. doppelt so hoch (L1) bzw. 1,2 mal größer (L2) als für den GPS/MET-Empfänger bei deaktiviertem AS. Die Signalstärke bei aktiviertem AS ist demnach sogar größer als während der Prime-Times (Tab. 6.3) von GPS/MET (AS deaktiviert).

## 6.3 Anzahl und globale Bedeckung der Messungen

Einer der entscheidenden Vorteile der GPS-Radiookkultationstechnik ist die globale Abdeckung. Okkultationsmessungen liefern atmosphärische Daten über unzugänglichen Regionen, wie den Ozeanen oder Polargebieten. In diesem Unterkapitel wird die mit CHAMP erreichbare tatsächliche Anzahl der Messungen und die daraus resultierende globale Abdeckung untersucht.

### 6.3.1 Okkultationen pro Tag

Die Okkultationsmessungen werden von einem Programm im GPS-Empfänger gesteuert. Dazu können vom Boden aus verschiedene Steuerparameter eingestellt werden. Eine Übersicht über diese Parameter gibt Abb. 6.6.



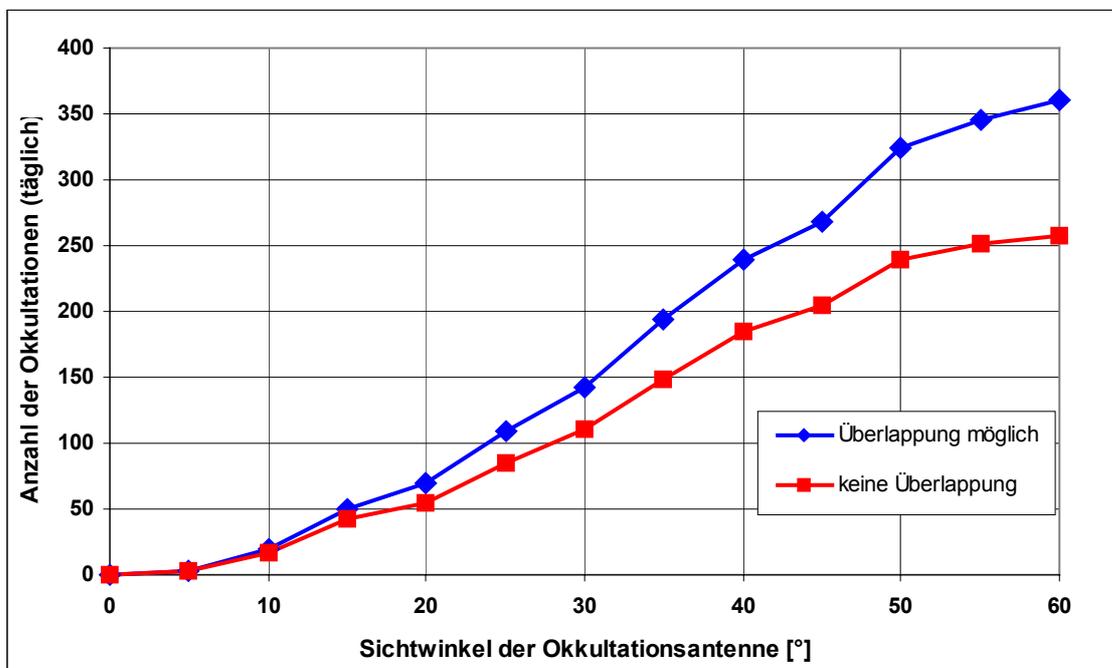
**Abb. 6.6:** Parameter des Steuerprogramms für die GPS-Okkultationsmessungen an Bord von CHAMP (Okkultationsparameter): Maximaler Winkel zum GPS-Referenzsatelliten (RefWinkel); Obergrenze für Okkultationen (OkkStart); Untergrenze für Okkultationen (OkkEnd) und Sichtwinkel.

OkkStart und OkkEnd bestimmen den vertikalen Bereich der Atmosphäre, der sondiert werden soll. Mit RefWinkel wird der maximale Winkel zum GPS-Referenzsatelliten eingestellt. Der wesentliche Parameter für die mögliche Anzahl der Okkultationen pro Tag ist der Sichtwinkel der Okkultationsantenne.

Der Einfluss des Sichtwinkels auf die Anzahl der möglichen Okkultationen pro Tag wurde anhand einer Simulationsstudie mit dem ROST-Simulationstool (siehe Kap. 5.4.1) untersucht, das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 6.7 dargestellt.

Die Maximalanzahl der möglichen Okkultationen bei einem Sichtwinkel von  $60^\circ$  beträgt ca. 350. Dabei wird von den Möglichkeiten einer zukünftigen GPS-Empfängersoftware ausgegangen, die das Aufzeichnen parallel stattfindender Okkultationen erlaubt. Mit der

jetzigen Version, die nur das Empfangen jeweils nur eines GPS-Okkultations- und Referenzsatelliten erlaubt, reduziert sich diese Anzahl um ca. 30% auf 250 Okkultationen. In der Praxis wird mit einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  gearbeitet, innerhalb dieses Winkels weist die Okkultationsantenne die höchste Verstärkung (Gain) auf. Es ergeben sich ca. 205-210 Okkultationen pro Tag. Für die Simulation wurde eine GPS-Satellitenkonstellation, bestehend aus 27 GPS-Satelliten benutzt. Die CHAMP-Bahn wurde aus TwoLine-Elementen berechnet.



**Abb. 6.7:** Anzahl der möglichen Okkultationen für CHAMP in Abhängigkeit vom Sichtwinkel der Okkultationsantenne (Simulationsstudie). Die rote Line repräsentiert die Anzahl der Okkultationen ohne Überlappung (keine gleichzeitige Messung mehrerer Okkultationen, jetzige Konfiguration). Die blaue Kurve gilt für eine zukünftige Softwareversion des GPS-Empfängers TRSR-2, die eine Aufzeichnung mehrerer, gleichzeitig stattfindender, Okkultationen erlaubt.

Die Anzahl der durchschnittlich pro Tag aufgezeichneten Okkultationen ist für 5 Meßperioden der ersten Phase des CHAMP-Radiookkultationsexperiments in Tab. 6.4 dargestellt. Zur Ermittlung der durchschnittlichen Anzahl wurden nur Tage berücksichtigt, für die eine komplette Datenbedeckung vorhanden war. Der Sichtwinkel war einheitlich auf  $45^\circ$  gesetzt, die Signale von 29 GPS-Satelliten standen zur Verfügung. Die Anzahl der täglich aufgezeichneten Okkultationen schwankt zwischen 217 und 247 Okkultationen pro Tag, was auf Änderungen im Okkultationssteuerprogramm der GPS-Empfängersoftware zurückgeführt wird [Meehan, 2001]. Für den weiteren Verlauf des Experiments ist eine Vergrößerung des Sichtwinkels geplant, wodurch eine Vergrößerung der tägliche Anzahlen erreicht werden kann. Aus Abb. 6.7 wird abgeschätzt, dass die tägliche Anzahl der Okkultationen bei Vergrößerung des Sichtwinkels von  $45^\circ$  auf  $60^\circ$  um ca. 50 Okkultationen (keine Überlappung von Okkultationen möglich) gesteigert werden kann. Bei einer Erweiterung der GPS-Empfängersoftware zur Ermöglichung des Verfolgens zeitlich

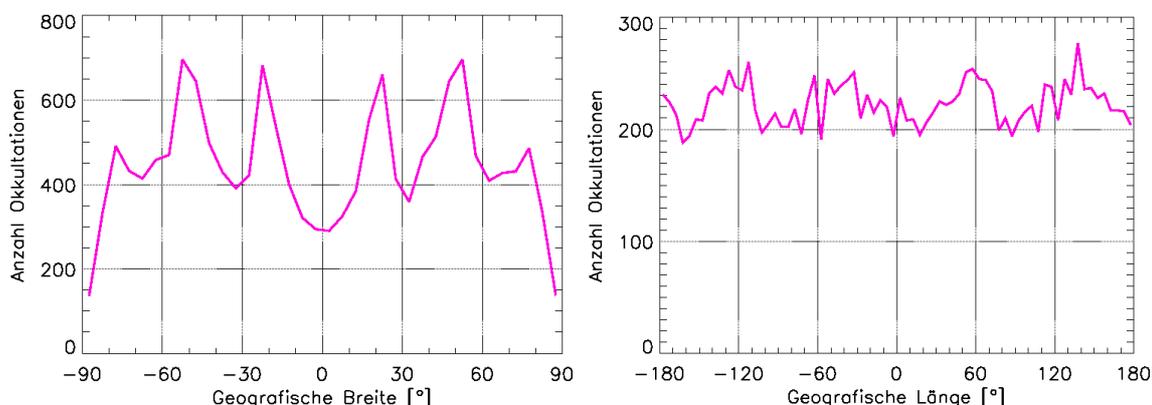
paralleler Okkultationen ist die Aufzeichnung von mehr als 350 Okkultationen pro Tag möglich (Abb. 6.7).

<i>Periode</i>	<i>Okkultationen (aufgezeichnet)</i>	<i>Durchschnitt pro Tag</i>
5. - 9. März	1.068	247
29. März - 3. April	1.177	238
16. - 21. April	1.220	217
14. Mai - 10. Juni	5.849	217
18. Juni - 14. Juli	6.046	223

**Tab. 6.4:** Anzahl der durchschnittlich pro Tag aufgezeichneten CHAMP-Okkultationen. Ausgewählt wurden 5 Messperioden der ersten Phase des CHAMP Radiookkultations-experiments (Februar-Juli 2001). Aufgeführt ist die Anzahl der während der Messperiode aufgezeichneten Okkultationen und die durchschnittliche Anzahl pro Tag (berechnet nur für Tage mit kompletter Datenabdeckung, aus [Wickert et al., 2002b]).

### 6.3.2 Globale Verteilung

Die globale Verteilung der Okkultationen wurde mit allen 16.043 CHAMP-Okkultationen untersucht, die zwischen dem 11. Februar und dem 18. August 2001 gemessen wurden.



**Abb. 6.8:** Geografische Verteilung von CHAMP-Okkultationen (16.043 Okkultationen zwischen dem 11.02. und 18.08.2001). **Links:** Verteilung entsprechend der geografischen Breite; **Rechts:** entsprechend der geografischen Länge (nach [Wickert et al., 2002b]).

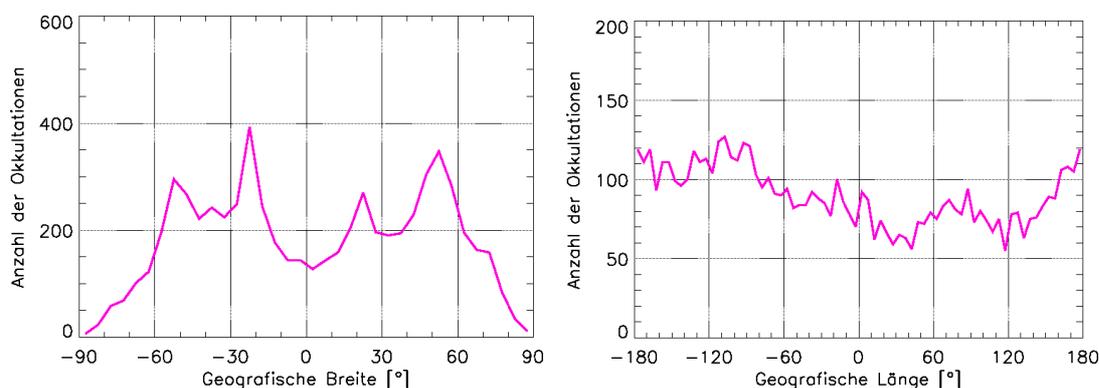
Die Erdoberfläche wurde in ein Raster mit einer Auflösung jeweils von  $5^\circ$  in der geografischen Breite und Länge aufgeteilt. Dann wurde die Anzahl der Okkultationen im jeweiligen Rasterbereich ermittelt (Endkoordinaten der Okkultation in der Rasterfläche). Die entstehende globale Verteilung der Okkultationen ist bezüglich des Äquators symmetrisch, jedoch nicht gleichförmig (Abb. 6.8). In der Abhängigkeit von der geografischen Breite treten Unterschiede zwischen den  $5^\circ$ -Bereichen von bis zu 300% auf. Die niedrigste Abdeckung wird an den Polen (150 Ereignisse) und am Äquator erreicht (300). Die Maxima ergeben sich mit ca. 700 Ereignissen in mittleren Breiten bei  $50\text{-}55^\circ$  Nord bzw.  $50\text{ bis }55^\circ$  Süd. Weiterhin werden periodische Strukturen beobachtet, die lokale Maxima im Abstand von ca.  $30^\circ$  in der geografischen Breite aufweisen. Die breiten-

abhängige Verteilung der Okkultationen pro Flächeneinheit wird durch *Wickert et al.* [2002b] diskutiert, demnach ergibt sich in den Polargebieten die höchste Anzahl von Okkultationen pro Flächeneinheit (ca. 7 mal höher als in der Äquatorregion).

Die Verteilung der Okkultationen in Abhängigkeit von der geografischen Länge (Abb. 6.8) ist dagegen deutlich gleichförmiger. Es treten jedoch auch periodische Strukturen in der Längenabhängigkeit mit Perioden von 60-70° auf. Das Maximum der Verteilung wird bei 135-140° Ost mit 280 Okkultationen erreicht. Die wenigsten Okkultationen wurden zwischen 160 und 165° West registriert.

### Globale Verteilung und Anzahl der GPS/MET-Okkultationsmessungen

Bei der Analyse der Lage der GPS/MET-Okkultationen ergeben sich im Vergleich zu CHAMP signifikante Unterschiede. Für einen repräsentativen Vergleich wurden 6.465 Okkultationen analysiert. Diese wurden innerhalb dreier verschiedener Messperioden aufgezeichnet (Tab. 6.5). Während dieser Perioden standen 25 GPS-Satelliten für Okkultationsmessungen zur Verfügung. Die Bahn von GPS/MET besaß eine Inklination von 70° und eine Orbithöhe von ca. 740 km (Kap. 2.3).



**Abb. 6.9:** Geografische Verteilung von GPS/MET-Okkultationen (6.464 Okkultationen, gemessen in den Zeiträumen 19.06.-11.07.1995, 16.03.-06.04.1996, 02.-17.02.1997). **Links:** Verteilung entsprechend der geografischen Breite; **Rechts:** entsprechend der geografischen Länge.

Sowohl in der Abhängigkeit der geografischen Verteilung von der Länge und Breite werden ähnliche Strukturen beobachtet, wie bei CHAMP. Allerdings ist die Verteilung nach der geografischen Breite nicht mehr zum Äquator symmetrisch. Sowohl Haupt- und Nebenmaximum der Verteilung (bei 50° und 25° Nord bzw. Süd) haben auf der Nordhalbkugel kleinere Werte (350 bzw. 270 Okkultationen). Auch das Nebenminimum bei 35° Nord liegt tiefer (ca. 200 Okkultationen) als auf der Südhalbkugel. Bei hohen Breiten jedoch (>60° Nord, <-60° Süd) werden auf der Südhalbkugel weniger Okkultationen gemessen. So werden bei 60° Nord nur noch 250 Okkultationen registriert, bei 60° Süd sind es nur noch 150. Auch die Verteilung in der geografischen Länge ist ungleichförmig. Östliche Längen weisen z.T. nur die Hälfte der Okkultationen (60) auf als westliche Längen (100-120). Auch hier werden Strukturen mit einer Periode von ca. 60-70° beobachtet.

Die ungleichförmige Verteilung der Okkultationen beim GPS/MET-Experiment ergibt sich durch die begrenzte Anzahl der GPS-Bodenstationen (6), die für die Doppeldifferenzbildung (Kap. 3.2) verwendet wurden. An Bord des Satelliten wurden nur Okkultationen aufgezeichnet, die mit einer der 6 zur Verfügung stehenden Bodenstationen ausgewertet werden konnten. Für CHAMP wurde dieses Kriterium nicht angewendet. Die große Anzahl der zur Verfügung stehenden Bodenstationen ermöglicht hier eine komplette Abdeckung der Erde mit Okkultationen mit guter Redundanz (siehe Kap. 5.2 und 6.8).

Periode	Sichtwinkel	Okkultationen	komplette Tage	Okk. pro Tag	Profile (UCAR)	Profile [%]
19.06.-11.07.1995	25	2241	7	108	76	71,0
16.03.-06.04.1996	45	1647	7	124	42	33,6
02.02.-23.02.1997	60	2576	7	211	154	72,8

**Tab. 6.5:** Analyse der geografischen Verteilung von GPS/MET-Okkultationen und täglich durchgeführten Messungen während dreier Messperioden von GPS/MET. Für die Analyse der geografischen Verteilung (Abb. 6.9) wurden alle gemessenen Okkultationen verwendet, die Analyse der täglich gemessenen Okkultationen erfolgt nur für die Tage, die komplett mit Daten abgedeckt sind.

Die Analyse der täglich durchgeführten Messungen wird nach den verschiedenen Messperioden unterteilt, da die Okkultationsparameter unterschiedlich gesetzt waren [GPS/MET, 2001]. Es wurden nur Tage mit kompletter Datenabdeckung ausgewertet. Danach standen für jede Periode 7 Tage zur Verfügung. Für einen Sichtwinkel von 25° ergaben sich durchschnittlich 108 Okkultationen täglich. Mit der Vergrößerung des Sichtwinkels auf 45° bzw. 60° konnte diese Anzahl auf 124 bzw. 211 gesteigert werden. Im Vergleich zu CHAMP (Tab. 6.3) ergibt sich bei einem verwendeten Sichtwinkel von 45° nahezu nur die Hälfte der Okkultationen täglich. Die Ursache ist die kleinere Anzahl der zur Verfügung stehenden GPS-Satelliten (25 anstatt 29) und die deutlich höhere Anzahl der zur Verfügung stehenden GPS-Bodenstationen für die Auswertung mit der Doppeldifferenzenmethode bei CHAMP.

Aus Tab. 6.5 wird weiterhin deutlich, dass von UCAR für die beiden „Prime Times“ (Tab. 6.3, Periode 1995 und 1997) ca. 70% der gemessenen Okkultationen auch ausgewertet und atmosphärische Vertikalprofile bereitgestellt wurden. Für die ausgewählte Periode im Jahr 1996 (aktiviertes AS) betrug dieser Anteil nur noch ca. 30%. Auch hier erreicht CHAMP eine deutlich höhere Ausbeute (siehe Tab. 6.2).

## 6.4 Statistischer Vergleich mit ECMWF-Analysen

Die Unabhängigkeit der Qualität der CHAMP-Messungen vom Aktivierungsstatus des Antispoofing des GPS-Systems [Wickert *et al.*, 2001b;c;d] lässt für den fünfjährigen Missionszeitraum (A/S aktiviert) einen umfangreichen Datensatz für die Weiterentwicklung der Radiookkultationstechnik und für Atmosphärenforschung und Wettervorhersage erwarten. Im weiteren Verlauf der Mission wird es zu einer Vielzahl von umfangreichen Validierungsstudien mit meteorologischen Analysen und Daten verschiedener globaler Fernerkundungssysteme (siehe Kap. 1) kommen. Hier wird eine erste Validierungsstudie eines größeren Datensatzes von vertikalen Profilen der Trockentemperatur mit Temperaturen durchgeführt, die aus meteorologischen Analysen (ECMWF, European Centre for Medium Range Weather Forecasts) abgeleitet werden. Zuerst werden die ECMWF-Analysen charakterisiert, dann werden Ergebnisse der Validierungsstudie dargestellt.

### 6.4.1 ECMWF-Daten

Das ECMWF stellt operationell globale Datensätze atmosphärischer Parameter auf einem räumlichen und zeitlichen Gitter zur Verfügung. Diese Werte wurden mit dem ECMWF Datenassimilationssystem unter Einbeziehung verschiedener atmosphärischer Daten (Kap. 1) zusammen mit einem globalen Wettervorhersagemodell erstellt [ECMWF, 2001]. Die Analysen werden für die vier synoptischen Haupttermine bereitgestellt: 00, 06, 12 und 18 Uhr.

Für die durchgeführten Vergleiche wurden ECMWF-Daten des Modells T511L60 verwendet. T511 bezeichnet den Grad und die Ordnung der Wellenzahl, bei der die Entwicklung der atmosphärischen Parameter nach Kugelflächenfunktionen abgebrochen wird. Eine größere Zahl für das Abschneiden bedeutet eine höhere horizontale Auflösung. L60 bezeichnet die vertikale Koordinate mit 60 Höhenstufen.

Es wurden ECMWF-Daten auf ein Gitter mit  $2,5 \times 2,5$  Grad Auflösung in geografischer Länge und Breite auf den 21 Standarddruckflächen des ECMWF (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2, 1 hPa) interpoliert. Das entspricht einem Höhenbereich von der Erdoberfläche bis ca. 50 km.

Für den statistischen Vergleich wurden die Trockentemperaturprofile der CHAMP-Messungen in einem vertikal regelmäßigen Gitter von 0,2 km Auflösung von 5 bis 25 km Höhe bereitgestellt. Die entsprechenden Vertikalprofile der Feuchttemperaturen aus den ECMWF-Analysen wurden durch lineare Interpolation zwischen den zeitlich und räumlich nächsten Gitterpunkten ermittelt. Dabei wurden vor der Interpolation in der Vertikalen auf das Vergleichsraster die geopotentiellen Höhen der Analysen mit der Schwerefeldinformation aus dem MSISE-90-Atmosphärenmodell in geometrische Höhen umgewandelt, um auf das Höhenraster der CHAMP-Temperaturprofile interpolieren zu können.

Auf jedem Höhenniveau des Vergleichsrasters wurde für die jeweils korrespondierenden Vertikalprofile die Differenz ( $T_{\text{trocken(CHAMP)}} - T_{\text{ECMWF}}$ ) gebildet. Die mittlere Differenz  $\bar{x}$  und die Standardabweichung  $\sigma_x$  der mittleren Differenzen wurde für den gesamten

Datensatz der  $N$  korrespondierenden Profile für die jeweiligen Höhen unter Verwendung von:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (6.1)$$

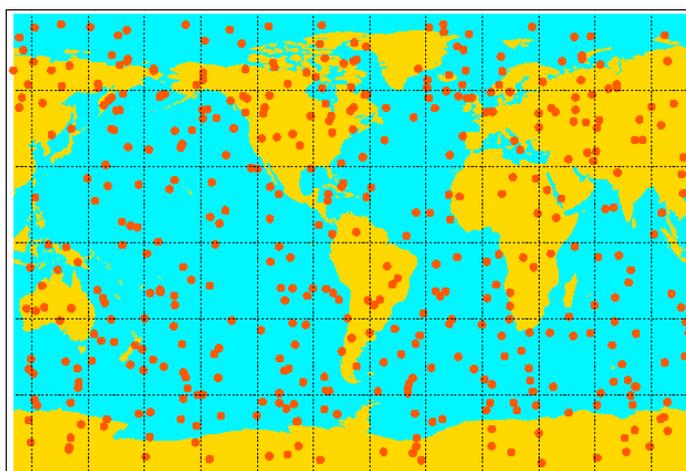
und:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

ermittelt.

#### 6.4.2 Statistischer Vergleich von Trockentemperaturprofilen

Für den Vergleich wurde ein Satz von 438 Trockentemperaturprofilen, gemessen in der Periode vom 19. – 21. April 2001 (Abb. 6.3), mit korrespondierenden Temperaturprofilen der ECMWF-Analysen im Höhenintervall zwischen 5 und 25 km verglichen. Die Okkultationen wurden entsprechend ihrer geografischen Breitenlage in drei Teildatensätze unterteilt: hohe Breiten auf der Nordhalbkugel ( $>30^\circ$ Nord), niedrige Breiten ( $<30^\circ$ Nord und  $>30^\circ$ Süd) und hohe Breiten auf der Südhalbkugel ( $<30^\circ$ Süd).

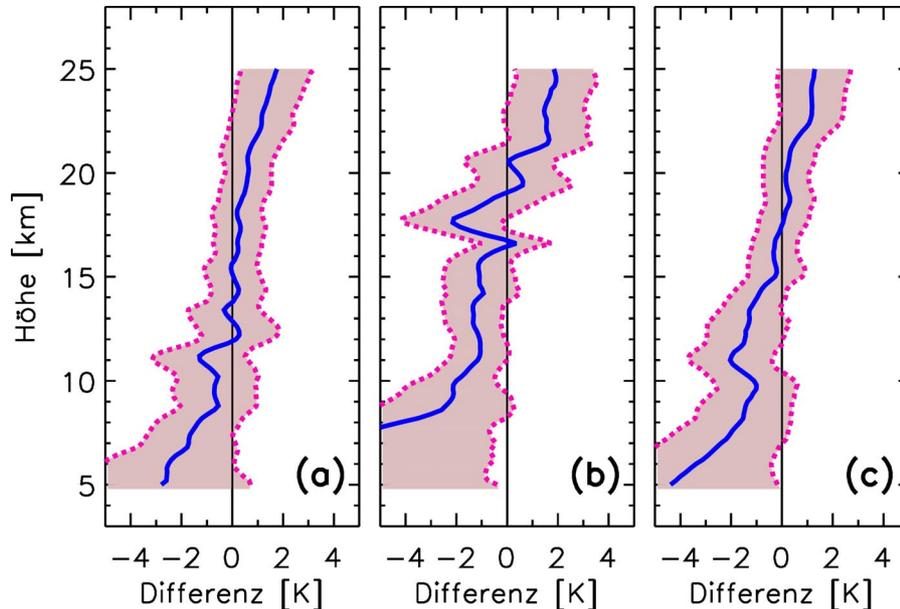


**Abb. 6.10:** Geografische Lage der für den statistischen Vergleich benutzten Profile.

Die mittlere Abweichung ( $T_{\text{trocken(CHAMP)}} - T_{\text{ECMWF}}$ ) und ihre Standardabweichung mit 0.2 km vertikaler Auflösung ist in Abb. 6.11 dargestellt. In jedem Teildatensatz sind die CHAMP-Messungen in der Tropopausenregion (zwischen 16 und 19 km bei niederen Breiten, ca. 11 km in den anderen Regionen) systematisch kälter als die Analysen. Dieser „Warm-Bias“ der Analysen kann mit der höheren vertikalen Auflösung der Radiookkultationsmessungen im Vergleich zu den Analysen erklärt werden, die nur auf den Standarddruckflächen verfügbar sind. Dies wurde bereits bei der Validierung von GPS/MET-Messungen beobachtet [Rocken *et al.*, 1997].

Über der Tropopausenregion ist die Übereinstimmung zwischen den CHAMP-Messungen und den ECMWF-Analysen besser als 1 K mit einer Standardabweichung von 1,5 K oder weniger. Auf der Nordhalbkugel ist die mittlere Abweichung im Höhenbereich zwischen

12 und 20 km kleiner als 0.5 K. Unterhalb der Tropopausenregion führt die Anwesenheit von Wasserdampf zu einem negativen Bias der CHAMP-Trockentemperaturprofile relativ zu den ECMWF-Temperaturen. Dieser Bias ist, wie erwartet, aufgrund der großen absoluten Feuchte in der Tropenregion am größten.

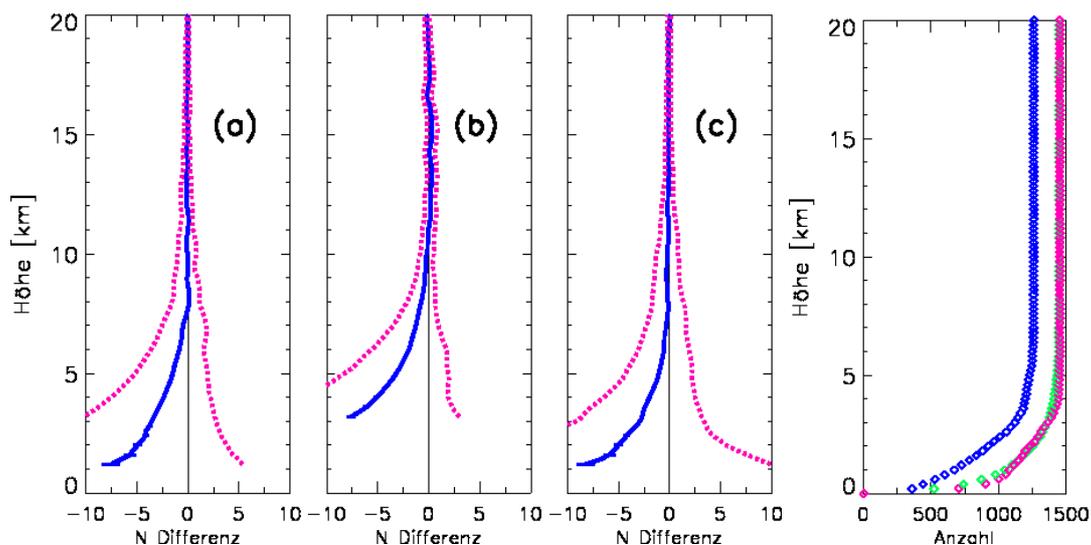


**Abb. 6.11:** Statistischer Vergleich von Trockentemperaturprofilen, abgeleitet aus CHAMP-Messungen mit 6-stündigen ECMWF-Analysen zwischen dem 19. und 21. April 2001. Die Abweichungen (CHAMP-ECMWF) sind dargestellt für (a) 166 Profile, gemessen auf der Nordhalbkugel ( $>30^{\circ}\text{N}$ ); (b) 118 Profile, gemessen bei niedriger Breite ( $30^{\circ}\text{N}$  bis  $30^{\circ}\text{S}$ ) und (c) 154 Profile, gemessen auf der Südhalbkugel ( $<30^{\circ}\text{S}$ ) (aus [Wickert et al., 2001a]).

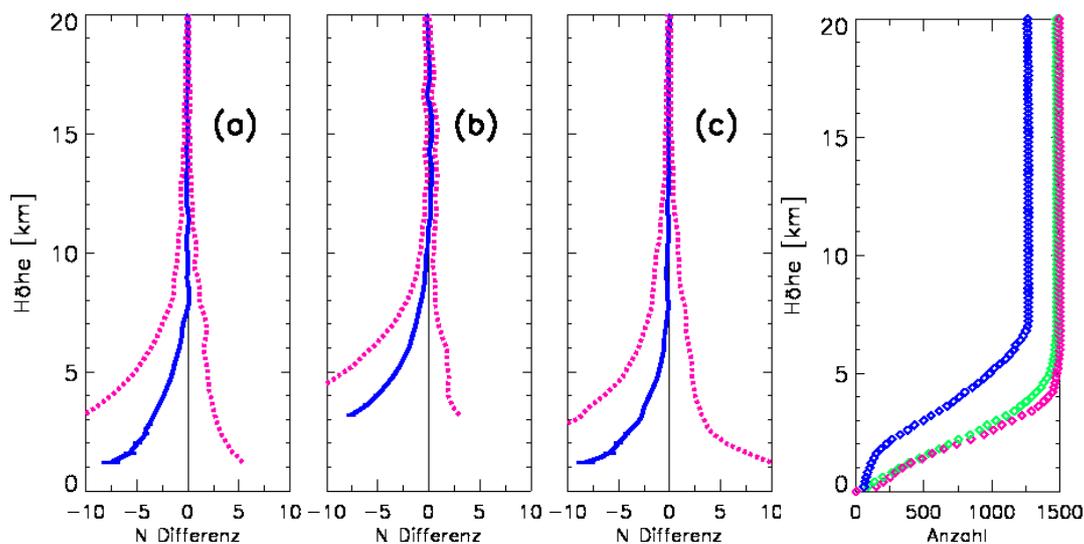
Oberhalb von 20 km sind die CHAMP-Profile signifikant wärmer (bis zu 2 K in 25 km Höhe). Dieser Bias ist auf die verwendete Methode zur statistischen Optimierung des Brechungswinkels mit dem Atmosphärenmodell MSISE-90 zurückzuführen (siehe Kap. 3.3.4). Das Modell weist für die verglichenen Profile in diesem Höhenbereich im Vergleich zu den ECMWF-Analysen ebenfalls einen „Warm-Bias“ auf.

#### 6.4.3 Statistischer Vergleich von Refraktivitäten

In Abb. 6.12 wird die mittlere Abweichung der Refraktivitäten, abgeleitet aus 4.174 CHAMP-Messungen und ECMWF-Analysen im Zeitraum zwischen dem 14. Mai und 10. Juni 2001 dargestellt. Die Profile wurden in drei unterschiedliche Breitenbereiche eingeteilt ( $>30^{\circ}\text{Nord}$ ,  $30^{\circ}\text{Nord}$  bis  $30^{\circ}\text{Süd}$ ,  $<30^{\circ}\text{Süd}$ ). Für alle Breitenbereich ergibt sich ein negativer Bias der CHAMP-Messungen relativ zu den meteorologischen Analysen. Der Bias erreicht für hohe Breiten auf der Nordhalbkugel einen Wert von 7,5 in 1 km Höhe, auf der Südhalbkugel wird für die gleiche Höhe ein Wert von ca. 8,5 beobachtet. Für äquatoriale Breiten wird schon in 3 km Höhe ein Bias von 7,5 beobachtet. Da der Standardfehler dieser mittleren Abweichung sehr klein ist (Quotient aus Standardabweichung und  $\sqrt{4.174}$ ) ist dieser Bias hochsignifikant. Von Sokolovskiy [2001a,b] wird die Ursache dieses Bias, der auch bei der Analyse von GPS/MET-Daten festgestellt wurde, auf das Signalverfolgungsverfahren des GPS-



**Abb. 6.12:** Statistischer Vergleich von CHAMP-Refraktivitätsprofilen mit meteorologischen Analysen vom ECMWF (4.174 Okkultationen 14.05.-10.06. 2001). Dargestellt sind die mittlere Abweichung (Bias, durchgezogene Linie) und die Standardabweichung von der mittleren Abweichung (RMSE, gestrichelt). Vergleich für Profile (a) auf der Nordhalbkugel ( $>30^{\circ}\text{N}$ ); (b) bei niedrigen Breiten ( $30^{\circ}\text{N}$  bis  $30^{\circ}\text{S}$ ) und (c) auf der Südhalbkugel ( $<30^{\circ}\text{S}$ ). **Rechts:** Höhenabhängige Anzahl der Datenpunkte; Grün: ( $>30^{\circ}\text{N}$ ), Blau: ( $30^{\circ}\text{N}$  bis  $30^{\circ}\text{S}$ ), Rot: ( $<30^{\circ}\text{S}$ ).



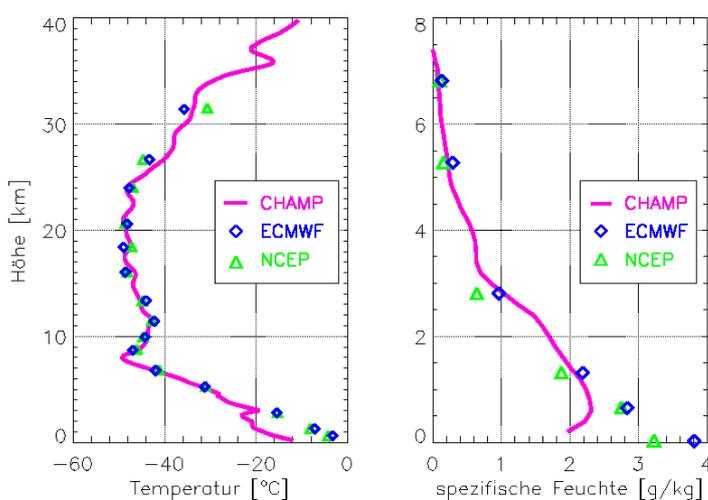
**Abb. 6.13:** Statistischer Vergleich von CHAMP-Refraktivitätsprofilen mit meteorologischen Analysen vom ECMWF (4.174 Okkultationen 14.05.-10.06. 2001). Dargestellt sind die mittlere Abweichung (Bias, durchgezogene Linie) und die Standardabweichung von der mittleren Abweichung (RMSE, gestrichelt). Vergleich für Profile (a) auf der Nordhalbkugel ( $>30^{\circ}\text{N}$ ); (b) bei niedrigen Breiten ( $30^{\circ}\text{N}$  bis  $30^{\circ}\text{S}$ ) und (c) auf der Südhalbkugel ( $<30^{\circ}\text{S}$ ). **Rechts:** Höhenabhängige Anzahl der Datenpunkte; Grün: ( $>30^{\circ}\text{N}$ ), Blau: ( $30^{\circ}\text{N}$  bis  $30^{\circ}\text{S}$ ), Rot: ( $<30^{\circ}\text{S}$ ). Alle mit dem Flywheeling-Flag gekennzeichneten Daten wurden nicht ausgewertet (siehe auch Kap. 6.6).

Empfängers in der unteren Troposphäre zurückgeführt. Er wurde auch bei der Analyse der GPS/MET-Daten festgestellt. *Rocken et al.* [1997] beobachteten dabei einen signifikanten Refraktivitätsbias nur in einem Teil der Profile. Im weiteren Verlauf des CHAMP-Experiments wird dieser Bias detaillierter untersucht werden. Dabei muß auch geklärt werden, ob die Datenanalyse der Okkultationsdaten in der unteren Troposphäre diesen Bias beeinflusst (z.B. Anwendung wellenoptischer Verfahren, siehe Kap. 3.3.8 oder auch die unvollständige Eliminierung von Phasensprüngen in den Messdaten, siehe Kap. 3.1.4 oder auch [*Hajj et al.*, 2002]).

Hier kann nur ein Teilaspekt dieser Problematik behandelt werden. Zur Berechnung der Refraktivitätsprofile (Abb. 6.12) wurden die am Ende der Okkultation mit dem Flywheeling-Flag (siehe Kap. 6.6) gekennzeichneten Daten nicht verwendet. Allerdings kann es auch vor dem Okkultationsende zu einer zeitweisen Aktivierung von Flywheeling kommen. In einem zweiten Prozessierungsdurchgang wurden daher alle Okkultationsdaten, die nach dem ersten Auftreten von Flywheeling aufgezeichnet wurden, von der Prozessierung ausgenommen. In Abb. 6.13 sind die resultierenden Refraktivitätsprofile mit ECMWF-Analysen (siehe Kap. 6.4) verglichen. Der Vergleich liefert nahezu identische Ergebnisse wie in Abb. 6.12 dargestellt. Allerdings ist die Anzahl der Profile, die den unteren Bereich der Troposphäre erreichen, deutlich geringer. Der Refraktivitätsbias bleibt nahezu unverändert und kann somit nicht allein auf die Aktivierung des Flywheeling-Modes zurückgeführt werden.

## 6.5 Globales Wasserdampfmonitoring mit CHAMP

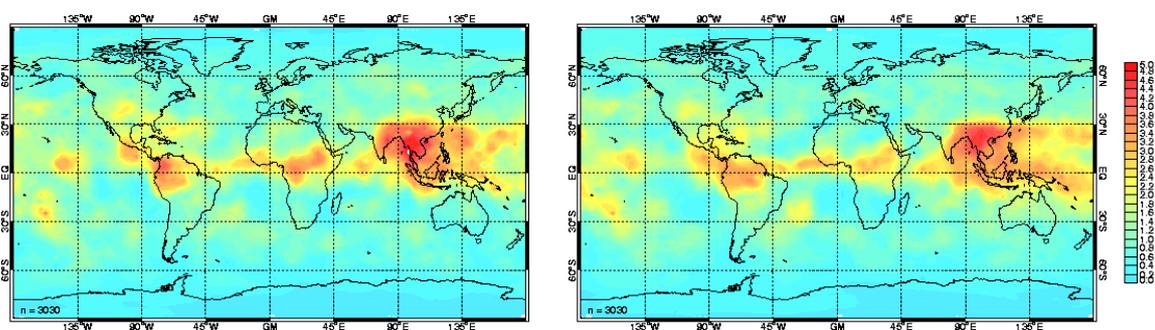
Zu jedem Vertikalprofil atmosphärischen Parameter (abgeleitet unter Annahme trockener Luft) wird unter Verwendung von Temperaturinformation aus meteorologischen Analysen ein Vertikalprofil der spezifischen Feuchte (CH-AI-3-WVP, Kap. 5.5) bereitgestellt. Der verwendete Algorithmus (Kap. 3.3.6) ist jedoch gegenüber Temperaturfehlern der



**Abb. 6.14:** Vertikalprofile der Trockentemperatur (links) und der spezifischen Feuchte (rechts), abgeleitet aus einer CHAMP-Okkultationsmessung im Vergleich mit meteorologischen Analysen von ECMWF und NCEP (Okkultation Nr. 5; 11.02.2001; 0,5°W, 53,2°S; 19:43 UTC, aus [*Wickert et al.*, 2001b]).

meteorologischen Analysen sehr empfindlich, was zu beträchtlichen Fehlern in den abgeleiteten Feuchteprofilen führen kann. Dabei treten vor allem in mittleren und hohen Breiten relative Fehler von mehr als 50% auf, verursacht allein durch die Verwendung von Temperaturinformation unterschiedlicher Analysen (z.B. ECMWF oder NCEP) [Marquardt *et al.*, 2001]. In der Mehrzahl der Fälle liefert diese Methode bei der Analyse der CHAMP-Daten allerdings gute Resultate. Für zukünftige Versionen der CHAMP-Prozessierungssoftware ist die Verwendung von 1D-Variationsverfahren vorgesehen (z.B. [Healy und Eyre, 2000], siehe auch Kap. 3.3.6). Mit diesen Verfahren kann der Fehler in der Ableitung des Temperatur- und Feuchteprofils in statistisch optimaler Weise verringert werden.

Ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Analysen ist in Abb. 6.14 dargestellt. Das Trockentemperaturprofil erreicht die Erdoberfläche und weist im Bereich über 5 km Höhe eine gute Übereinstimmung mit beiden meteorologischen Analysen (ECMWF und NCEP) auf. In einer Höhe von 8 km wird die Tropopause von den Daten klar aufgelöst. Unterhalb von 5 km führt die signifikante Anwesenheit von Wasserdampf zu einer Abweichung zwischen Messung und Analysen, die Trockentemperatur wird signifikant kälter als die „feuchte“ Analysentemperatur. Diese Abweichung zwischen Analyse- und CHAMP-Trockentemperatur ist zugleich ein Maß für die Menge des in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdampfes. Das zugehörige, mit ECMWF-Daten abgeleitete Wasserdampfprofil (Abb. 6.14) weist oberhalb der maritimen Grenzschicht (ca. 1,5 km) ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Analysedaten auf.



**Abb. 6.15:** Mittlere globale Verteilung der spezifischen Feuchte (500 hPa) zwischen dem 14.05. und 10.06.2001; **Links:** abgeleitet aus 3.030 CHAMP-Okkultationsmessungen; **Rechts:** aus korrespondierenden ECMWF-Feuchteprofilen (aus [Marquardt, 2002]).

Aus einer genügend großen Anzahl von CHAMP-Messungen können globale Verteilungen des atmosphärischen Wasserdampfes abgeleitet werden. Abb. 6.15 zeigt dafür als Beispiel die mittlere globale Verteilung der spezifischen Feuchte auf der Standarddruckfläche 500 hPa (ca. 5 km Höhe) im Zeitraum vom 14. Mai bis 10. Juni 2001. Für die Darstellung wurden insgesamt 3.030 CHAMP-Okkultationsmessungen verwendet. Zum Vergleich ist die entsprechende globale Verteilung aus ECMWF-Analysedaten dargestellt. Hierfür wurden Feuchteprofile verwendet, die in Zeit und Ort mit den CHAMP-Messungen korrespondieren.

Abb. 6.15 zeigt, dass die tropische Wasserdampfverteilung, speziell die Gesamtstruktur der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) durch die Okkultationsmessungen gut wiedergegeben wird. Die tropischen Konvergenzzentren über Südamerika, Afrika und Indonesien

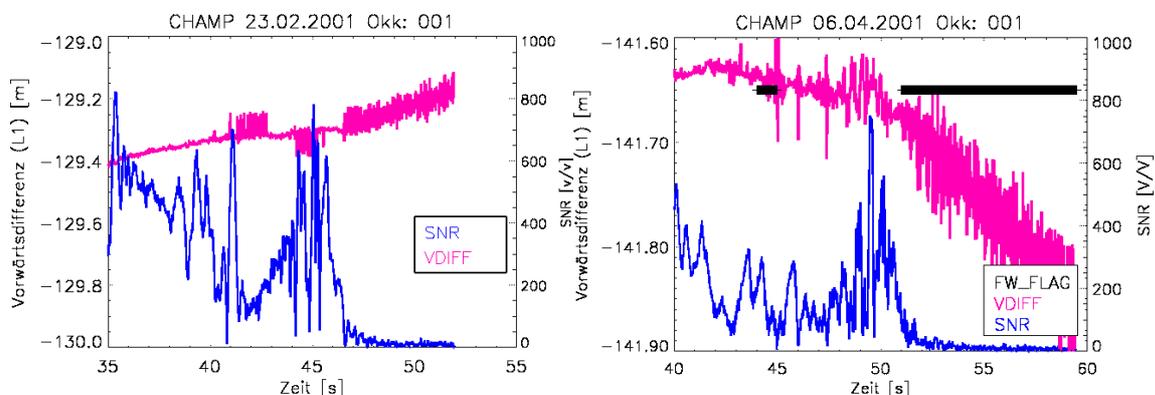
werden gut erfasst. Auch kleinskalige Strukturen, verursacht durch synoptische Transportprozesse, werden gut aufgelöst wiedergegeben.

Die Abweichungen in den feuchten Gebieten der ITCZ (CHAMP-Daten sind ca. 1 bis 1,5 g/kg feuchter als die Analyse) und den Absinkzonen (CHAMP-Daten trockener um 1 bis 1,5 g/kg) können mit bekannten Fehlerstrukturen der meteorologischen Analysen erklärt werden, was bereits bei der Auswertung der GPS/MET-Daten festgestellt wurde [Marquardt *et al.*, 2001]. Bei der Ableitung der spezifischen Feuchte treten in recht hoher Prozentzahl unphysikalische Wasserdampfwerte auf. Die 3.030 Messungen zur Berechnung der globalen Wasserdampfkarte (Abb. 6.15) sind nur 67% der gesamten, in diesem Zeitraum analysierten 4.514 Messungen. In 10% der Fälle (453) traten negative Wasserdampfwerte auf, 13% der Wasserdampfwerte (594) wiesen Übersättigung von 120% über Wasser auf. Weiterhin erreichten 2% der Profile (70) nicht das 500 hPa Druckniveau, 8% der Messungen erfüllten das Qualitätskriterium nicht (Abweichungen der abgeleiteten Temperaturen von  $>15$  K im Höhenbereich bis 30 km). Nahezu alle Profile mit auftretender Übersättigung befinden sich dabei in hohen Breiten ( $>60^\circ$ Nord oder  $>60^\circ$ Süd). Die Mehrzahl der Profile mit negativen Wasserdampfwerten wurde auf der Südhemisphäre beobachtet.

Neben der Anfälligkeit der verwendeten Methode zur Wasserdampfableitung gegenüber fehlerhaften Analysetemperaturen [Marquardt *et al.*, 2001] können auch nichtkorrigierte Mehrwegeeffekte bei der Ableitung der Refraktivität sowie technische Probleme bei der GPS-Signalverfolgung in der unteren Troposphäre (Kap. 3.3.8 und 6.6) die Ursache für das Auftreten nichtphysikalischer Feuchtwerte sein.

## 6.6 Untere Grenze der Vertikalprofile

Von großer Bedeutung für die Meteorologie ist die Datenbereitstellung in der unteren Troposphäre, da sich hier der Großteil des Wettergeschehens abspielt. Nur ein geringer Prozentsatz der GPS/MET-Okkultationen erreichte den ersten Kilometer über der Erdoberfläche. Während der Prime-Time 3 (Oktober 1995, Tab. 6.3) erreichten nur ca. 10% der Vertikalprofile die Erdoberfläche [Rocken *et al.*, 2000]. Während der Prime-Time 2 (Juni/Juli 1995, Tab. 6.3) war dieser Anteil jedoch deutlich größer (45%). Dieser Unterschied wird auf die Verwendung verschiedener Empfängersoftwarevarianten zur



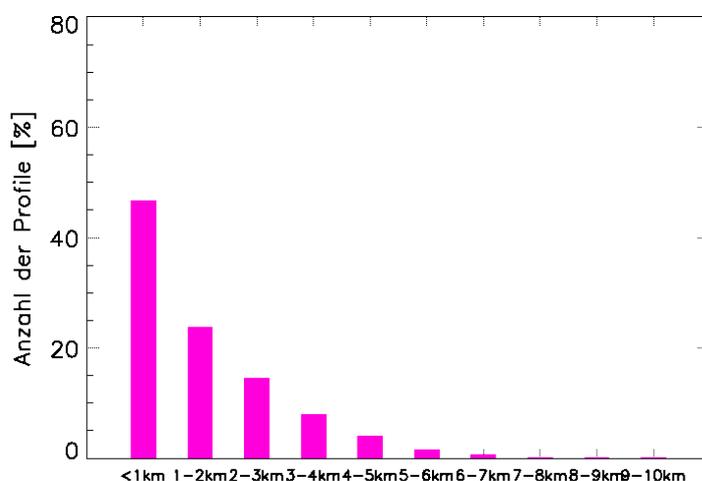
**Abb. 6.16:** Verhalten des L1-Okkultationssignals [Vorwärtsdifferenz (VDIFF) und SNR] in der unteren Troposphäre. **Links:** Okkultation Nr. 1, 23.02.2001; **Rechts:** Okkultation Nr. 1, 06.04.2001. Die Perioden mit aktiviertem Flywheeling sind mit einem Flag (FW\_Flag: schwarz) gekennzeichnet.

Signalverfolgung in der unter Troposphäre zurückgeführt. *Kursinski* [2000] bezeichnet diese Modifikation als Flywheeling-Technik. Dieses Verfahren versetzt den Empfänger in die Lage, kurzzeitige Signalverluste zu überbrücken, welche durch starke vertikale Refraktivitätsgradienten in der unteren Troposphäre verursacht werden. Wird das Flywheeling entsprechend lange aktiviert, erreicht das Signal die Erdoberfläche. Die Aktivierung des Flywheeling-Verfahrens wird von der Größe der SNR des *LI*-Signals gesteuert. Erreicht diese eine minimale Grenze (z.B. hier 20 V/V), wird der Mechanismus aktiviert.

In Abb. 6.16 (links) wird Flywheeling bei ca. 41 s für eine Dauer von 2 s aktiviert (SNR von *LI* fällt unter 20), bei 44 und 47 s kommt es zu wiederholtem Einschalten. Aus der Analyse der Vorwärtsdifferenz des *LI*-Signals wird ersichtlich, dass während des Flywheelings Phasensprünge in der Dimension einer halben Wellenlänge (ca. 10 cm) auftreten, es kommt zu einer Signalveränderung, die mit der Arbeitsweise des GPS-Empfängers zusammenhängt und nicht durch die Atmosphäre verursacht wird.

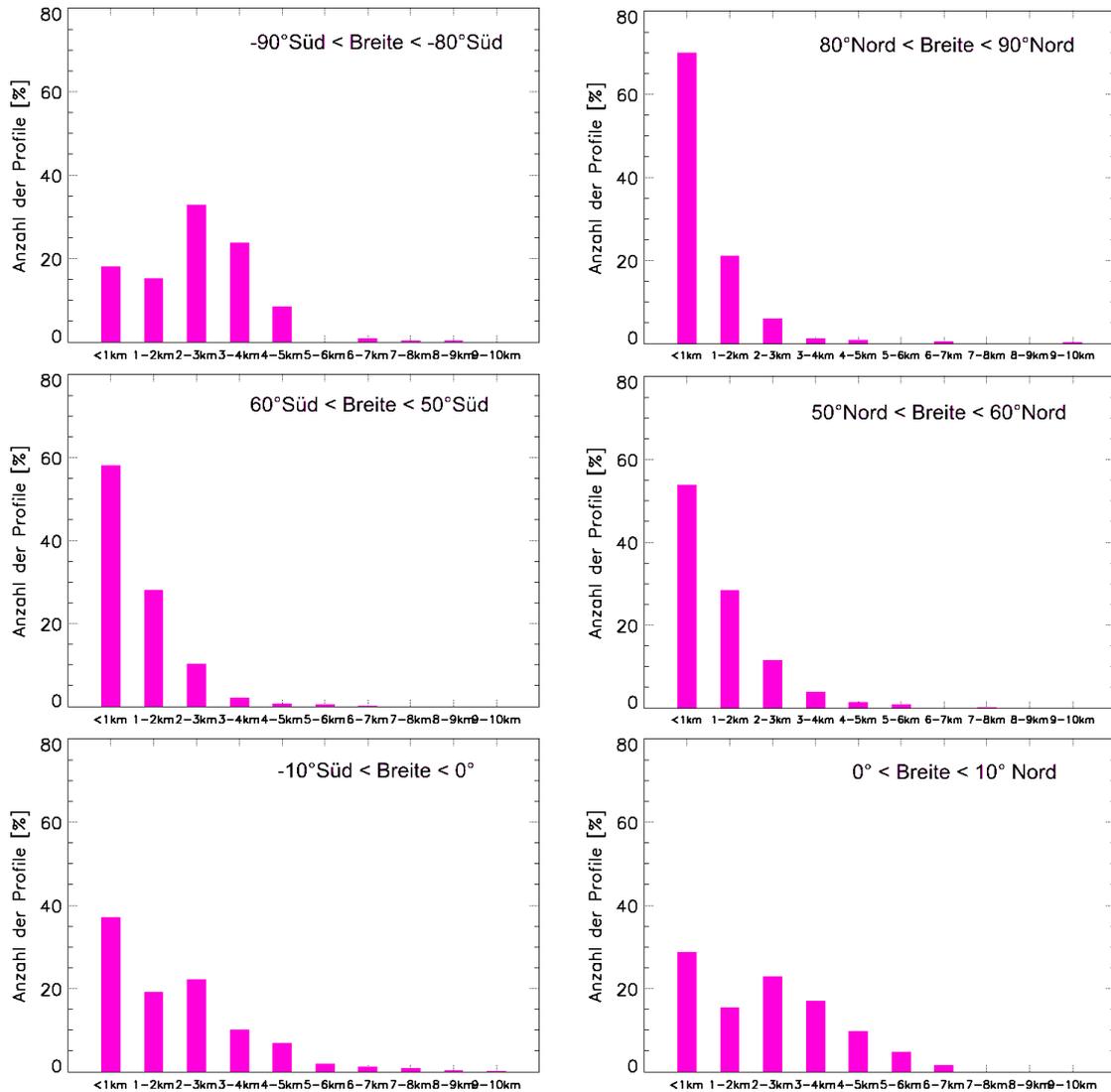
Für die Prozessierung der Okkultationsdaten ist es sinnvoll, diese Perioden zu kennzeichnen. In einer verbesserten Empfängersoftware, mit der u.a. die Okkultation Nr. 1 am 6. April 2001 aufgezeichnet wurde [Abb. 6.16 (rechts)], wurde eine solche Kennzeichnung eingeführt (Flywheeling-Flag, FW-Flag). Bei 45 s wird Flywheeling kurzzeitig aktiviert, allerdings nicht für die jeweils volle bzw. 2 vollen Sekunden fortgesetzt, sondern nach 60 ms bereits wieder beendet [*Meehan*, 2001]. Bei Sekunde 52 kommt es zu einer weiteren Aktivierung, die bis zum Signalverlust bestehen bleibt. Auch hier erkennt man Signalveränderungen (Phasensprünge), die mit der Arbeitsweise des Empfängers in Zusammenhang stehen können. Bei der ersten Version der CHAMP-Prozessierungssoftware wurde die letzte Periode der Okkultation, die im Flywheeling-Modus aufgezeichnet wurde, von der Prozessierung ausgenommen, um eine unkontrollierte Veränderung der Messdaten durch den GPS-Empfänger zu vermeiden.

Durch das Abschneiden der letzten Messdaten der Okkultation wurde die minimal erreichbare Höhe verändert. Für die von Februar bis Juli gemessenen und prozessierten CHAMP-Okkultationen erreichten ca. 50% der Vertikalprofile den ersten Kilometer über dem Erdellipsoid (Abb. 6.17); nahezu 75% erreichten die beiden ersten Kilometer.



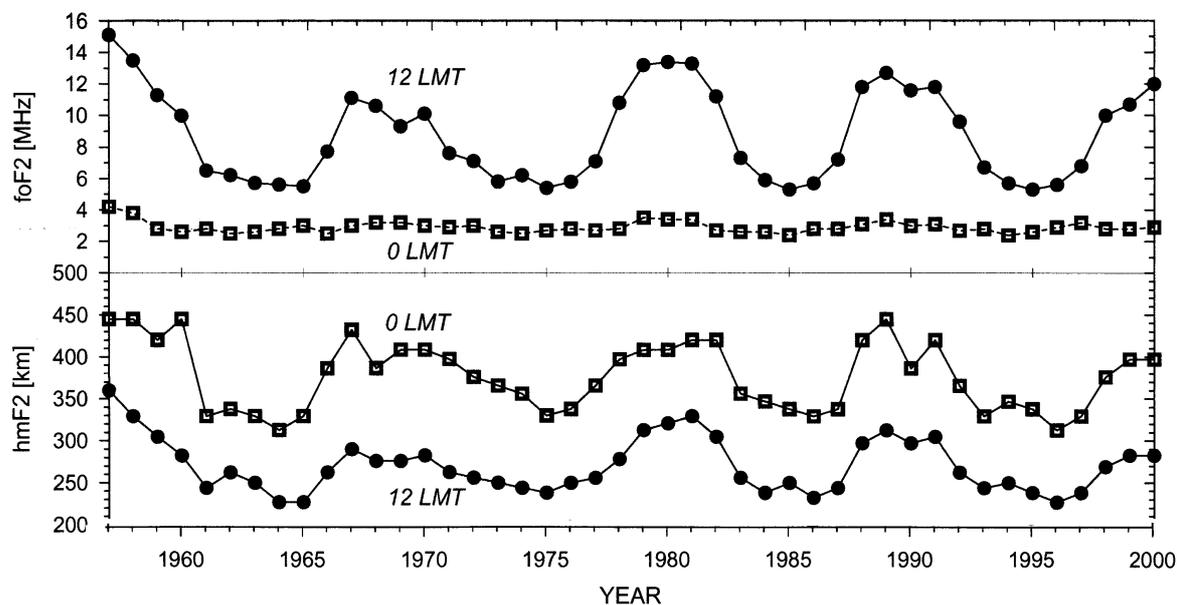
**Abb. 6.17:** Erreichte Minimalhöhen über dem Erdellipsoid der CHAMP-Vertikalprofile (ca. 11.500) vom Februar–Juli 2001.

Die Eindringtiefe in die Atmosphäre ist von der geografischen Breite abhängig und bezüglich des Äquators symmetrisch (Abb. 6.18). Die Symmetrie wird in polaren Breiten (Abb. 6.18a und 6.18b) verletzt, da die Antarktisregion eine deutlich größere mittlere Höhe über dem Erdellipsoid (2-3 km) im Vergleich zur Nordpolarregion aufweist. In der Nordpolarregion erreichen 70% der Okkultationen den ersten Kilometer über der Erdoberfläche, 90% der Profile erreichen die letzten zwei Kilometer.



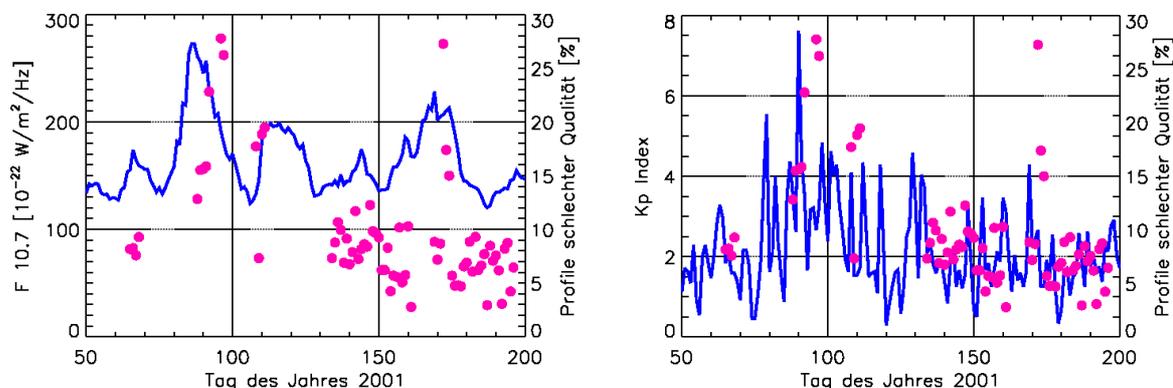
**Abb. 6.18:** Erreichte Minimalhöhen über dem Erdellipsoid der CHAMP-Vertikalprofile (Februar-Juli 2001) für verschiedene geografischen Breitenbereiche.

## 6.7 Ionosphäreneinfluss



**Abb. 6.19:** Langzeitvariation charakteristischer ionosphärischer Parameter, abgeleitet aus Beobachtungen der Ionosondenstation Juliusruh ( $54,6^{\circ}\text{N}$ ,  $13,4^{\circ}\text{O}$ ).  $foF2$  – Grenzfrequenz der F2-Schicht (Maß für die Elektronendichte im Maximum der F2-Schicht, siehe auch Kap. 1.1);  $hmF2$  – Höhe des Elektronendichtemaximums der F2-Schicht (erweitert nach [Bremer, 2001]).

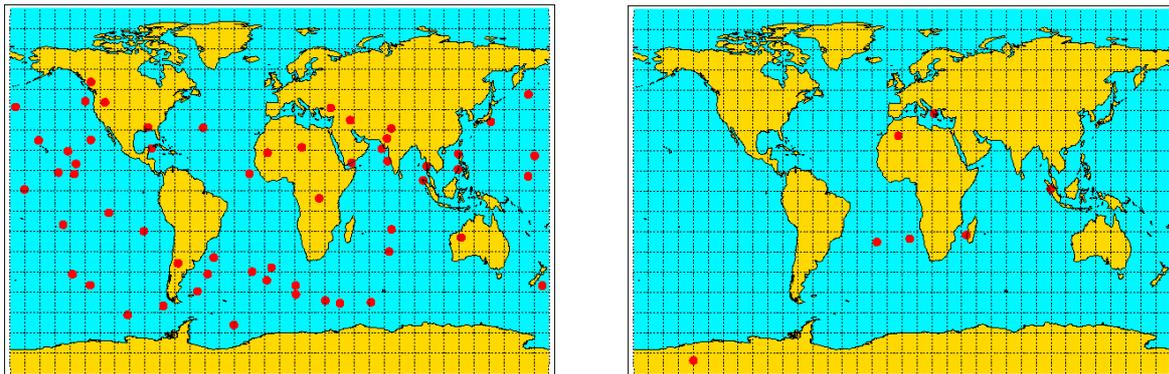
Der Start von CHAMP (15. Juli 2000) erfolgte in zeitlicher Nähe des Maximums der solaren Aktivität (Solarmaximum). In Perioden starker Solaraktivität erreichen die solare Radiostrahlung und die ionisierende EUV und Röntgenstrahlung ein Vielfaches der bei ruhiger Sonne beobachteten Strahlungsintensität. Der Zustand der Ionosphäre wird durch die Intensität der einfallenden Strahlung wesentlich beeinflusst (Kap. 1.1) und damit auch die Okkultationsmessungen (Kap. 3.3.3). Abb. 6.19 zeigt die zeitliche Variation charakteristischer ionosphärischer Parameter ab dem Jahr 1957; eine 11-jährige Periodizität in Folge der wechselnden Solaraktivität wird deutlich. Die GPS/MET-Mission (Start 3. April 1995, Messungen bis Februar 1997) wurde bei geringer Solaraktivität durchgeführt. In



**Abb. 6.20:** Anteil (in %) der CHAMP-Profile schlechter Qualität (rote Punkte) für die erste Phase des CHAMP-Okkultationsexperiments, verglichen **Links:** mit dem solaren Strahlungsfluss (10.7cm) und **Rechts:** dem geomagnetischen Kp-Index.

Kap. 3.3.3 wurde gezeigt, dass die Ionosphärenkorrektur mit der Linearkombination der Brechungswinkel der  $L1$ - und  $L2$ -Signale für die GPS/MET-Messungen auch auf der Tagseite ausreichend ist.

2D-Raytracingrechnungen (Kap. 3.3.3) bei Verwendung einer Solarmaximum-Modellionosphäre (Tagseite) zeigen, dass die Anwendung dieses Korrekturverfahrens schon in einer Höhe von 30 km zu einem Temperaturfehler in der Dimension von 1-2 K führt. Für CHAMP-Messungen, die im Solarmaximum durchgeführt werden, kann also ein Ionosphäreinfluß erwartet werden, der mit der Linearkombination der Brechungswinkel nicht mit hoher Genauigkeit korrigiert werden kann.



**Abb. 6.21:** Geografische Position von CHAMP-Vertikalprofilen schlechter Qualität für den 06. und 07. April 2001. **Links:** Gemessen während des lokalen Tages (Sonnenelevation am Ort des Profils  $> 0^\circ$ ). **Rechts:** lokaler Nacht, Sonnenelevation  $< 0^\circ$ .

Für die erste Phase des CHAMP-Okkultationsexperiments wurde der Anteil der Profile analysiert, die die interne Qualitätskontrolle (Abweichungen der abgeleiteten Temperaturen von  $>15$  K im Höhenbereich bis 30 km) nicht bestanden (Abb. 6.20). Im Mittel ergeben sich 5-10% der Profile, die das Qualitätskriterium nicht erfüllen. An einigen Tagen ist dieser Anteil jedoch signifikant höher und kann ca. 30% erreichen, z.B. Tag 96 (6. April, 27,7%), 97 (7. April 26,2%) oder 172 (21. Juni, 27,3%).

Für den 6. und 7. April wurde untersucht, ob der signifikant höhere Anteil von Profilen schlechter Qualität auf einen unkorrigierten Ionosphäreinfluß zurückgeführt werden kann. Dazu wurden die insgesamt 255 Profile nach auf der Tagseite (121, Abb. 6.21) und Nachtseite (134, Abb. 6.21) gemessenen unterteilt. Auf der Tagseite waren 57 Profile (47,1% der gemessenen) schlechter Qualität, auf der Nachtseite dagegen nur 7 Profile (5,2%). Auf der Tagseite, mit deutlich höheren ionosphärischen Elektronendichten, erfüllt nahezu jedes zweite Profile das Qualitätskriterium nicht. Aufgrund des ca. zehnmal höheren Anteils Profile schlechter Qualität auf der Tagseite, wird als Ursache für diese Störungen ein nicht korrigierter Einfluß der Ionosphäre auf die CHAMP-Messungen an diesen beiden Tagen angenommen.

Aus Abb. 6.20 ist ersichtlich, dass Anfang April (Tag 90) ein überdurchschnittlich hoher solarer Strahlungsfluss ( $F_{10.7}$ ), also hohe Elektronendichten in der Ionosphäre auf der Tagseite, beobachtet wurde (bis zu ca.  $300 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ ). Diese hohe Elektronendichten waren mit einem geomagnetischen Aktivitätsindex  $K_p$  von bis zu 8 (geomagnetischer Sturm) gekoppelt, also hohen Schwankungen des Erdmagnetfeldes, die zu einer gestörten

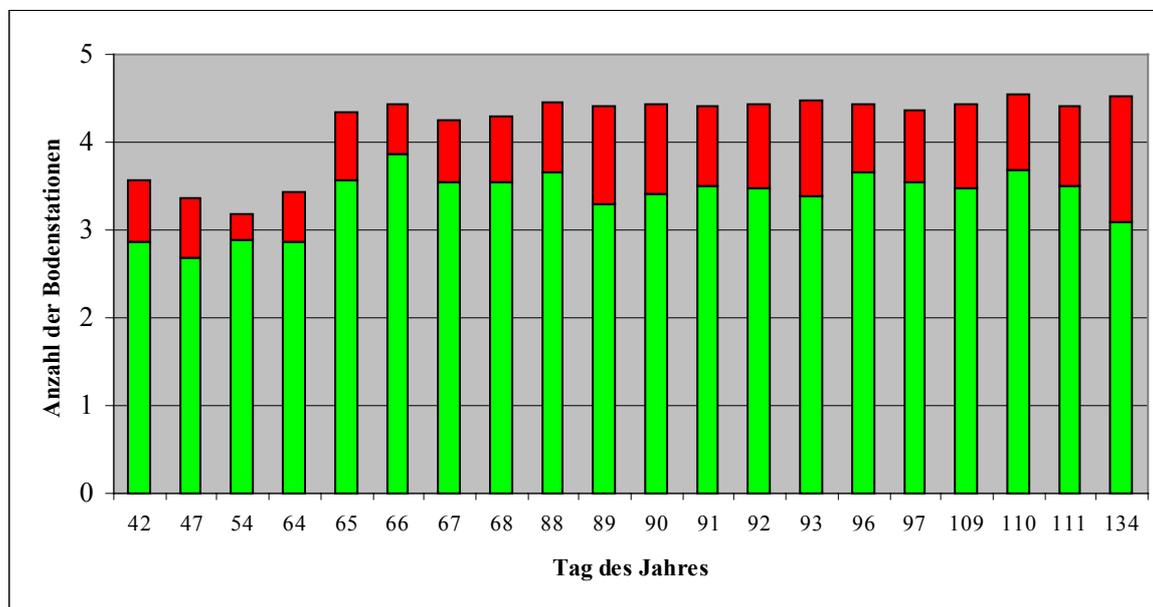
Ionosphäre führen. Zwei weitere Perioden mit einem relativ großen Anteil ( $\geq 20\%$ ) qualitativ schlechter Profile werden um den 20. April (Tag 110) und den 21. Juni (Tag 172) herum beobachtet. Für diese Perioden wird ebenfalls die Kopplung eines hohen solaren Strahlungsflusses (ca.  $200 \times 10^{-22} \text{W/m}^2/\text{Hz}$ ) mit hohem Kp (4) beobachtet.

Die „gestörten“ Profile (Abb. 6.21) befinden sich hauptsächlich in Äquatornähe, wo am frühen Nachmittag die höchsten Elektronendichten auftreten, bis hin zu mittleren Breiten, einschließlich des Bereiches der äquatorialen Anomalie, in dem ebenfalls maximale Elektronendichten in der Ionosphäre auftreten [Schaer, 1999]. Weitere Ursachen für den Ionosphäreinfluß können Plasma-Instabilitäten sein, die in der äquatorialen F-Schicht vor allem bei niedrigen Elektronendichten auf der Nachtseite auftreten können (Equatorial Spread F). In höheren Breiten treten ebenfalls Plasma-Instabilitäten auf, die sich signifikant auf die Radiowellenausbreitung auswirken können [z.B. Hocke, 2001].

Im Rahmen dieser Arbeit wird noch keine Methode zu einer umfassenden und systematischen Ionosphärenkorrektur vorgestellt. Dazu ist eine umfangreiche Forschungstätigkeit notwendig.

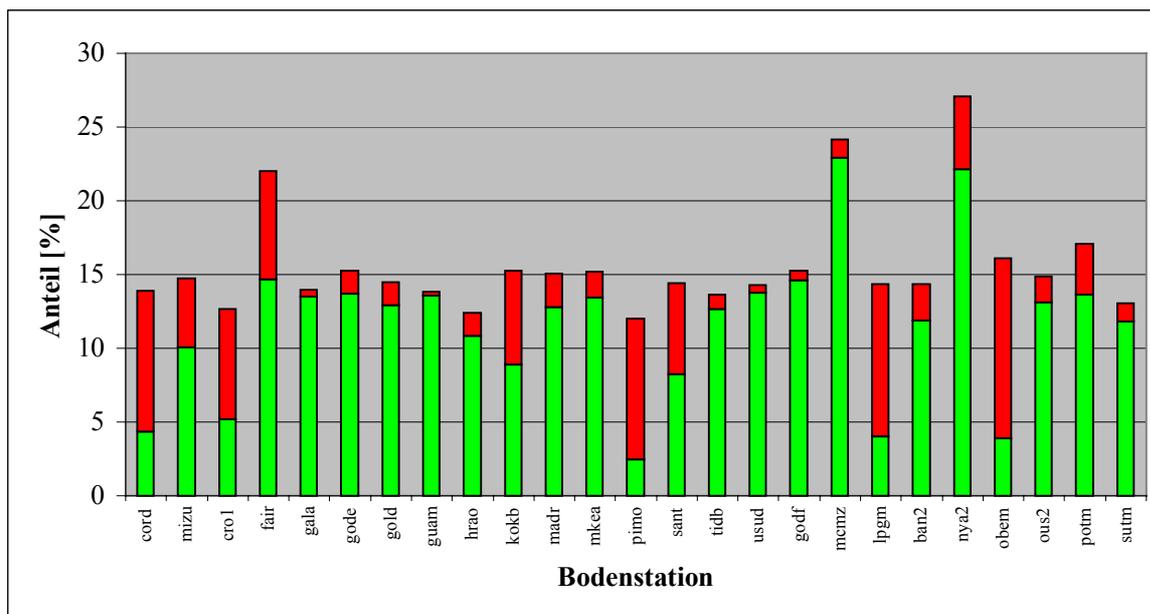
## 6.8 Redundanz der GPS-Bodendaten

Bereits im Vorfeld des CHAMP-Radiookkultationsexperiments konnte mit Simulationsrechnungen unter Verwendung der ROST-Software (Kap. 5.2) gezeigt werden, dass das gemeinsam von JPL und GFZ aufgebaute und betriebene HiRate & Low Latency GPS-Bodennetzwerk [Galas et al., 2001] eine globale Bedeckung der Okkultationsereignisse bei Anwendung der Doppeldifferenzenmethode garantiert (Kap. 5.2). Dabei wurde festgestellt,



**Abb. 6.22:** Durchschnittliche Anzahl der Bodenstationen für die Doppeldifferenzprozessierung pro Okkultation. Dargestellt sind die ersten 20 Tage des Jahres 2001 mit Okkultationsmessungen von CHAMP. Die Gesamthöhe der Säule repräsentiert die maximal erreichbare Redundanz (mit ROST berechnet), die Höhe der grünen Säule die tatsächlich mit realen Daten erreichte Redundanz.

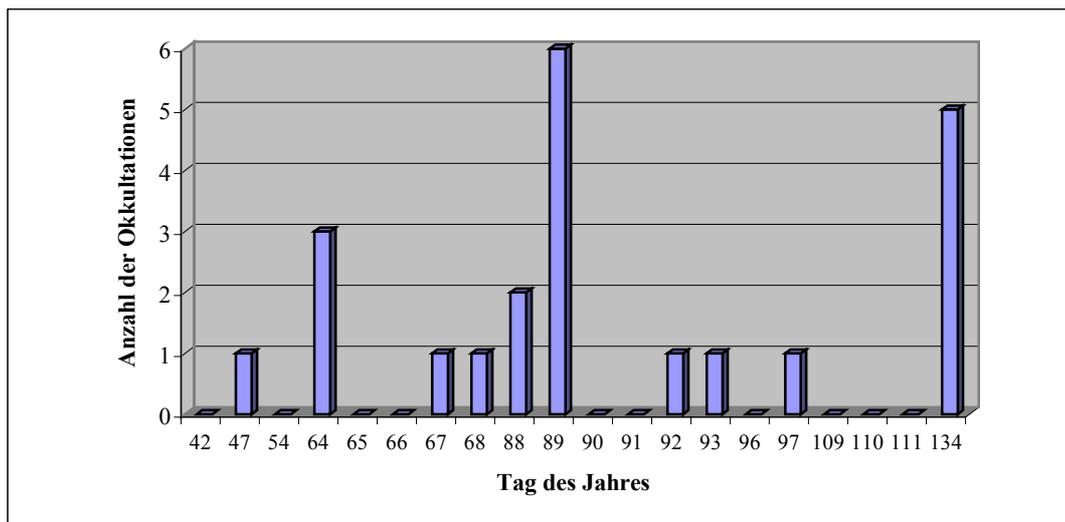
dass durchschnittlich ca. 4 Bodenstation für die Prozessierung jeder Okkultation benutzt werden können [Wickert *et al.*, 2001a]. Abb. 6.22 zeigt die tatsächlich erreichten Redundanzen während der ersten 20 Tage des CHAMP-Okkultationsexperiments, die eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorausgesagten Werten (Kap. 5.2) zeigen. Bis zum Tag 65 wurde ein minimaler Elevationswinkel der GPS-Satelliten von  $20^\circ$  verwendet. Es ergibt sich eine erreichbare (mit ROST berechnete) Redundanz von ca. 3,5 Bodenstationen pro Okkultation. In der Realität sind ca. 80% dieser Daten auch tatsächlich operationell verfügbar. Ab dem Tag 65 wurde der minimale Elevationswinkel auf  $15^\circ$  gesetzt. Dadurch erhöhte sich die erreichbare Redundanz auf ca. 4,5 Bodenstationen, von denen tatsächlich ca. 80% verfügbar waren.



**Abb. 6.23:** Prozentualer Anteil der Okkultationen, die mit den Daten der betreffenden Bodenstation prozessiert wurden, an der Gesamtanzahl der Okkultationen für die ersten zwanzig Tage des CHAMP-Okkultationsexperiments. Die Gesamthöhe der Säulen zeigt den erreichbaren Anteil, die Höhe der grünen Säule repräsentiert den tatsächlichen Anteil.

In Abb. 6.23 ist das Verhältnis von möglicher und tatsächlicher Verwendung der Daten der einzelnen Bodenstationen für die Prozessierung der Okkultationen dargestellt. Durchschnittlich können mit den Daten einer einzigen Bodenstation ca. 10-15% der Okkultationen prozessiert werden. Dieser Anteil ist breitenabhängig und deutlich höher (bis über 25%) bei Stationen in hohen Breiten. Allein mit den beiden Stationen nya2 (Ny Ålesund) und mcmz (Mc Murdo) können 50% der gesamten Okkultationen mit der Doppeldifferenzmethode ausgewertet werden. Beide Stationen haben eine hohe Verfügbarkeit von ca. 90% (Ny Ålesund) und nahezu 100% (Mc Murdo).

Abb. 6.24 zeigt die Anzahl der wegen nicht vorhandener Bodendaten unprozessierten Okkultationen. Durchschnittlich wurden ca. 200 Okkultationen gemessen. In der Mehrzahl der Tage waren für jede Okkultation auch entsprechende GPS-Bodendaten für die Doppeldifferenzenprozessierung vorhanden. Es gibt allerdings auch Tage, bei denen bis zu 6 Okkultationen (ca. 3% Gesamtanteil) nicht prozessiert werden können.



**Abb. 6.24:** Anzahl unprozessierter Okkultationen (aufgrund nicht verfügbarer GPS-Bodendaten) für die ersten 20 Tage des CHAMP-Okkultationsexperiments.

Im folgenden Kapitel wird eine alternative Prozessierungsmethode für GPS-Okkultationsmessungen eingeführt. Diese benötigt als Eingabedaten keine GPS-Bodendaten mehr, womit ein sehr komplexer Teil der beschriebenen Standardprozessierung, der mit der Verwendung der GPS-Bodendaten verbunden ist, entfällt.

## 6.9 GPS-Prozessierung mit Einfachdifferenzen

Der Hauptgrund für die Einführung der Doppeldifferenzenmethode zur Prozessierung der GPS/MET-Daten und zur Entwicklung des CHAMP-Prozessierungssystems war die Korrektur der periodischen und nicht vorhersagbaren Schwankungen der GPS-Satellitenuhren (Kap. 3.2.5). Diese Schwankungen (Selective Availability, SA) wurden bewußt vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium veranlasst, um die Navigationsgenauigkeit des GPS-Systems für zivile bzw. feindliche militärische Nutzer einzuschränken (siehe u.a. [Graas und Braasch, 1996]).

Am 2. Mai 2000, um 04:05 UTC wurde SA von der US-amerikanischen Regierung deaktiviert. Bereits vor dem Start von CHAMP wurden die Konsequenzen dieser Abschaltung auf die Okkultationsprozessierung untersucht [Wickert *et al.*, 2001a; Zumberge und Gendt, 2001]. Endgültige Klarheit über die genauen Auswirkungen auf die Datenanalyse und Produktqualität konnte allerdings erst die Auswertung von Okkultationsmessungen schaffen, die nach der Abschaltung von SA von CHAMP durchgeführt wurden.

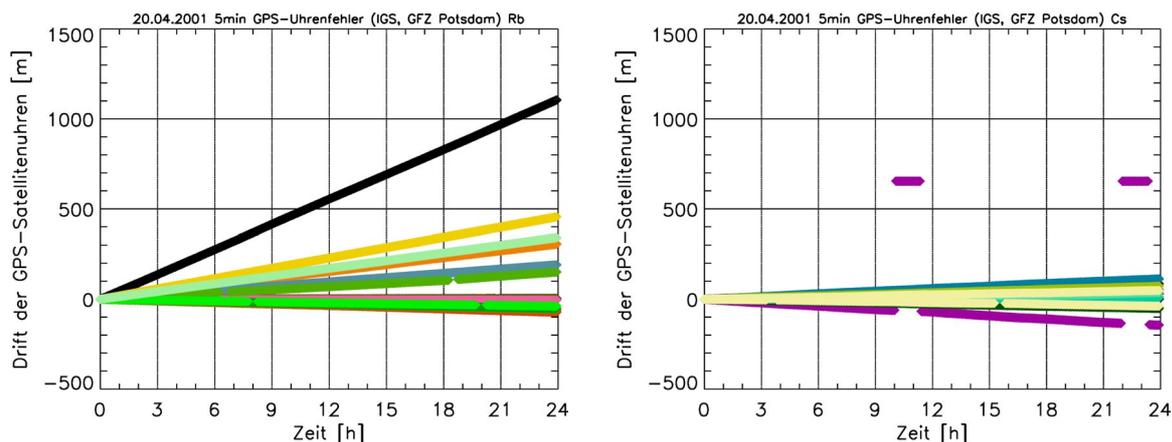
Ein wesentliches Ergebnis dieser Messungen ist, dass die Datenprozessierung mit einer Einfachdifferenzenmethode nahezu identische Ergebnisse im Vergleich zur bisher standardmäßigen Doppeldifferenzenmethode zur Prozessierung der GPS-Daten liefert [Wickert *et al.*, 2002a]. Dabei kann völlig auf die direkte Nutzung der Daten des globalen Bodennetzes (Kap. 5.2) verzichtet werden. Es wird jedoch bemerkt, dass dieses Bodennetz weiterhin für eine operationelle Orbithbereitstellung (Kap. 5.3) benötigt wird und dass es, wenn auch minimale, Unterschiede zwischen Profilen gibt, die mit der Einfach- bzw. mit

der Doppeldifferenzenmethode prozessiert wurden, die weiter untersucht werden müssen [Wickert *et al.*, 2002a].

### 6.9.1 GPS-Uhrenstabilität ohne Selective Availability

In Kap. 3.2.5 wurde bereits die Uhrenstabilität bei aktiviertem Selective Availability charakterisiert. Hier wird auf die Stabilität der Uhren nach der Abschaltung von SA fokussiert. Dazu wird das Verhalten der 5-min Uhrenlösungen untersucht, die als Datenprodukt innerhalb der CHAMP-Orbitprozessierung erzeugt werden und neben den GPS-Bodendaten schon Eingabedaten für die CHAMP-Okkultationsprozessierung sind. 5 min-Uhrenlösungen sind auch über den Internationalen GPS Service (IGS) im Rahmen der präzisen GPS-Orbitberechnung und -bereitstellung frei erhältlich [Neilan *et al.*, 2000].

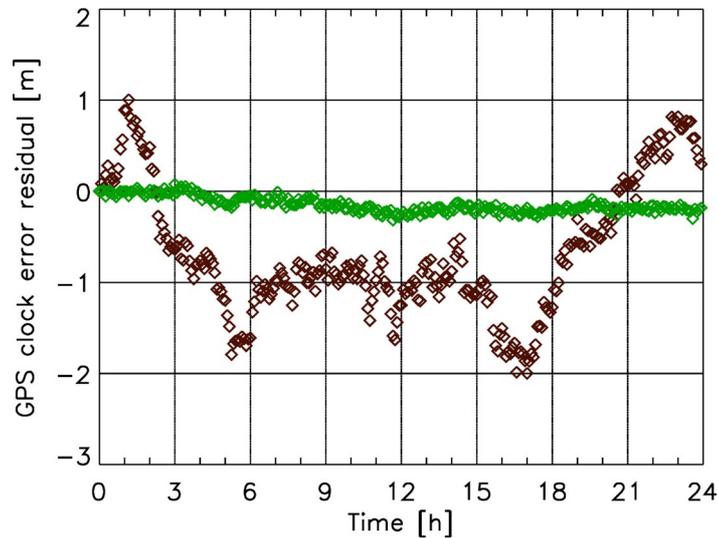
Der dominierende Anteil an der zeitlichen Änderung des Uhrenfehlers ist ein leicht zu modellierender linearer Trend. Dabei zeigen sich Unterschiede zwischen GPS-Uhren mit Rubidium (Rb)- und Zäsium (Cs)-Frequenznormal. Die Rubidium-Uhren haben eine schlechtere Langzeitstabilität (Abb. 6.25). So erreichte der maximale lineare Trend einer Rb-Uhr am 20.04.2001 ca. 1.105 m pro Tag (PRN 8), die Cs-Uhren weisen deutlich geringere Werte auf, maximal wurden am 20.04.2001 144 m pro Tag erreicht (PRN 2).



**Abb. 6.25:** Verhalten der 5 min GPS-Uhrenfehler am 20.04.2001 (IGS-Lösungen GFZ-Potsdam). **Links:** für Satelliten mit Rb-Frequenznormal; **Rechts:** Cs-Frequenznormal. Die Sprünge bei PRN 2 bei 10 und 22 Uhr werden durch nicht aufgelöste Phasensprünge in der Lösung der GPS-Uhrenparameter verursacht.

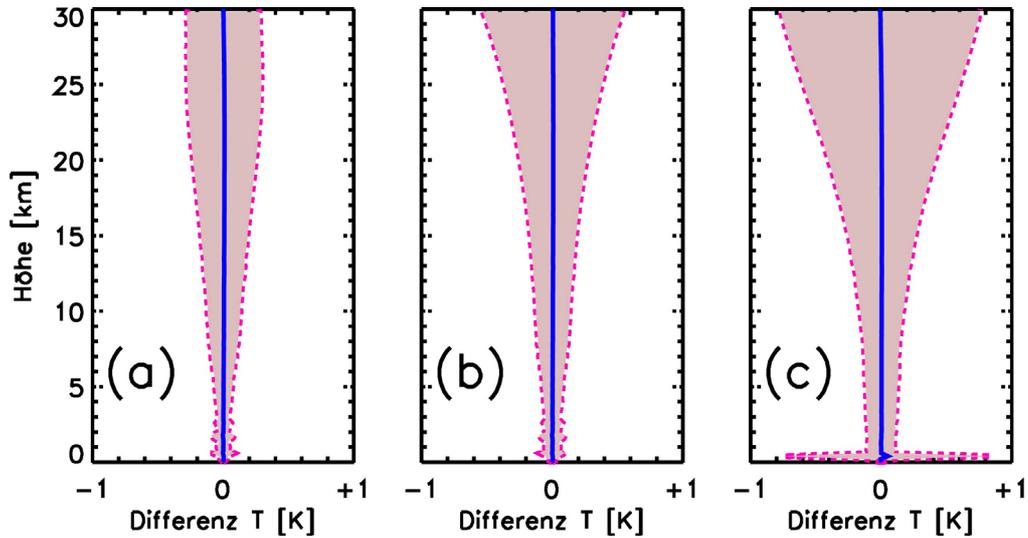
In Abb. 6.26 wird das vom linearen Trend abweichende Verhalten für eine charakteristische Rb (PRN 20)- und Cs-Uhr (PRN 3) dargestellt. Die Rb-Uhr weist hier ein stabileres Kurzzeitverhalten als die Cs-Uhr auf, die Abweichungen vom linearen Verhalten sind nur gering. In den Cs-Residuen werden Effekte mit unterschiedlichen Perioden in der Dimension von Stunden beobachtet. Weiterhin weisen die Cs-Punkte eine höhere Punkt-zu-Punkt-Streuung auf, was ebenfalls auf das Auftreten von kürzerperiodischen Effekten hindeutet.

Aufgrund dieser Analyse wurde das GPS-Uhrenverhalten für die Korrektur in der Einfachdifferenzenstudie stückweise mit einer einfachen linearen Regression [Press *et al.*, 1992] über ein Zeitfenster von 25 min modelliert. Die betreffende Okkultation wurde in die Mitte dieses Zeitfensters plaziert. Mit den so modellierten GPS-Uhren wurde die Methode der Einfachdifferenzen angewendet (Kap. 6.9.3).



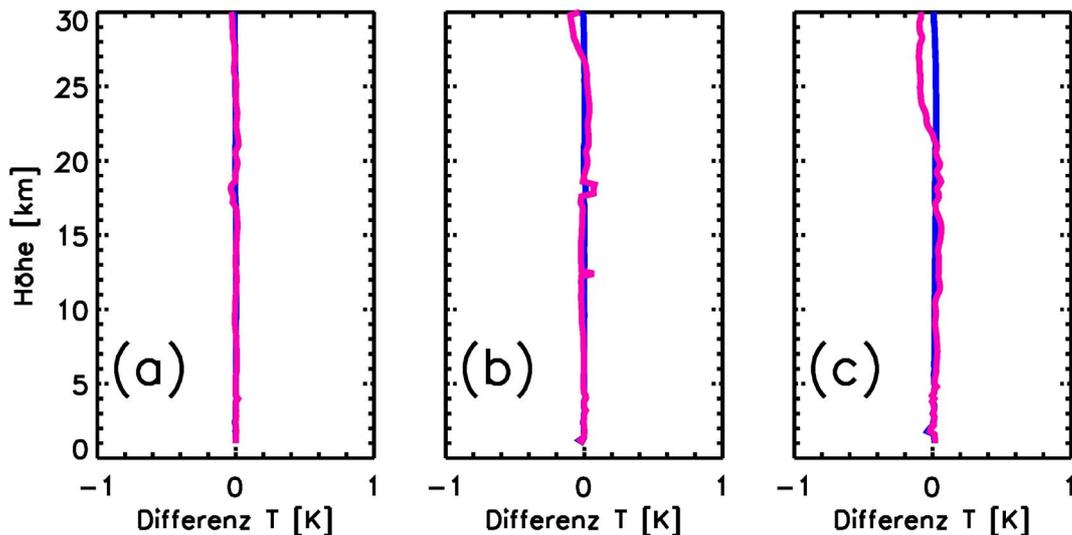
**Abb. 6.26:** Residuen von GPS-Uhrenfehlern als Funktion der Zeit für GPS-PRN 3 (braun) mit Cs-Frequenzstandard und GPS-PRN 20 (grün) mit Rb-Frequenzstandard am 20.04.2001, abgeleitet aus 5-min GPS-Uhrenlösungen (aus [Wickert *et al.*, 2002a]).

### 6.9.2 Reduzierung der Datenrate des Bodennetzes



**Abb. 6.27:** Statistischer Vergleich (mittlere Abweichung: blau, Standardabweichung: rot) von 1.400 Temperaturprofilen, abgeleitet mit reduzierter Datenrate der GPS-Bodendaten von 5 s (a), 10 s (b) und 30 s (c) mit einem Referenzdatensatz (1 s Datenrate; Auswertung von 436 Okkultationen, 19.-21. April 2001 mit 3-4 GPS-Bodenstationen pro Ereignis).

Eine weitere Untersuchung widmet sich dem Einfluss der Reduzierung der Datenrate der GPS-Bodenstationen auf die Genauigkeit der atmosphärischen Profile. Die GPS-Bodendaten bilden den größten Anteil an den Eingabedaten für die Okkultationsprozessierung. Bei dem in Kap. 5.2 beschriebenen, globalen „HiRate&Low Latency“-Bodennetz müssen pro Tag 1 Gbyte GPS-Bodendaten (BINEX-Format, [Galas und Köhler, 2001]) im Prozessor verarbeitet werden. Eine Reduzierung der derzeit



**Abb. 6.28:** Differenz der mittleren (blau) und Standardabweichung (rot) des 5 s (a), 10 s (b) und 30 s Datensatzes (c) von 1.400 Temperaturprofilen zu korrespondierenden ECMWF-Profilen in Relation zur Abweichung der 1 s Referenzdaten von ECMWF (436 Okkultationen, 19.-21. April 2001 mit 3-4 GPS-Bodenstationen pro Ereignis).

verwendeten Datenrate von 1 s auf 30 s (Standard-Messrate des IGS-Bodennetzes) bei weiterer Verwendung der Doppeldifferenzenmethode bedeutet eine drastische Reduzierung der Eingabedatenmenge und auch eine Entlastung der Kommunikationsverbindungen, vor allem für operationelle Zielstellungen eine deutliche Verbesserung.

Für den Vergleich wurden 436 Okkultationen (19.-21.04.2001) verwendet. Die Okkultationen wurden mit einer Redundanz von 3-4 Bodenstationen prozessiert. Somit standen 1.400 Vertikalprofile für den Vergleich zur Verfügung. Als Referenzdatensatz wurden Profile verwendet, die mit der Doppeldifferenzenmethode unter Verwendung von 1 s GPS-Bodendaten prozessiert wurden. Die Okkultationen wurde dreimal prozessiert, wobei nur jeder 5., 10. bzw. 30. Messwert der Bodenstationen verwendet wurde. Die abgeleiteten Temperaturprofile wurden unter Verwendung von (6.1) und (6.2) statistisch mit dem Referenzdatensatz verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.27 dargestellt. Zusätzlich wurden die mittlere und die Standardabweichung aller Datensätze (1 s, 5 s, 10 s und 30 s) im Vergleich zu ECMWF bestimmt. Abb. 6.28 zeigt die Differenz der mittleren und Standardabweichung zu ECMWF der 5 s, 10 s und 30 s Profile relativ zu denen der 1 s Profile.

Aus Abb. 6.28 wird deutlich, dass selbst bei Verwendung einer Datenrate von 30 s Temperaturprofile erzeugt werden, die im statistischen Vergleich zu ECMWF nahezu identisches Verhalten aufweisen wie der 1 s Referenzdatensatz (Abweichungen in mittlerer und Standardabweichung bis 30 km Höhe  $< 0,1$  K). Auch die drei Einzelvergleiche (Abb. 6.27) weisen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den jeweils verglichenen Datensätzen auf. Die mittlere Abweichung ist bei allen drei Vergleichen bis in eine Höhe von 30 km nahezu null. Selbst bei der Verwendung der 30 s Datenrate ist die Standardabweichung zu den 1 s Referenzprofilen über den gesamten Höhenbereich kleiner als 1 K.

Die Studie zeigt, dass selbst eine deutliche Reduzierung der Datenrate des verwendeten GPS-Bodennetzes von 1 s auf 30 s nur zu geringen Abweichungen in den abgeleiteten Temperaturen führt. Es werden Temperaturprofile generiert, die sich im Vergleich zu ECMWF statistisch nahezu identisch verhalten, wie die Profile, die mit der Standardrate von 1 s erzeugt wurden.

Die Abweichungen zwischen den Datensätzen können nicht nur auf die eventuell unvollkommene Interpolation des GPS-Uhrenfehlers zurückgeführt werden. Die Bodendaten können auch Fehlerquellen enthalten, wie unkorrigierte Atmosphären- oder Ionosphäreinflüsse oder auch Mehrwegeeffekte, hinzu kommt eine Vergrößerung des Messrauschens. Eine Interpolation über eine unterschiedliche Anzahl von Stützstellen muss dann jeweils leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern, wobei nicht eindeutig ist, welche Lösung die bessere ist. Die Unterschiede müssen näher untersucht werden.

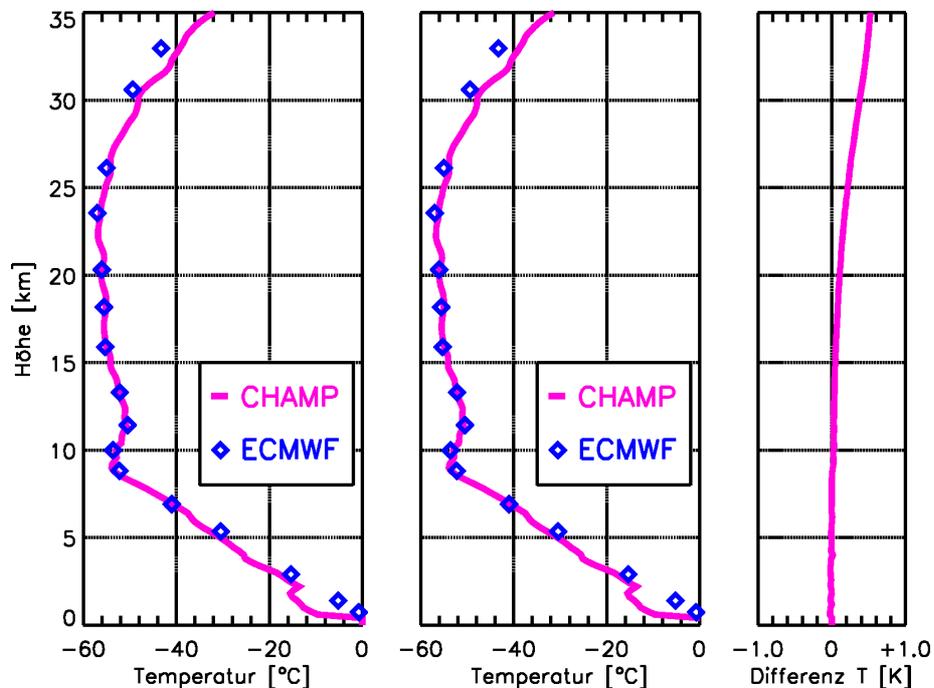
An Stelle einer derartigen Untersuchung, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausführt, wird im folgenden eine alternative Prozessierungsmethode vorgeschlagen, die auf der Bildung von Einfachdifferenzen der GPS-Satellitenmessungen beruht (siehe Kap.3.2.1). Dabei werden keine Bodendaten mehr direkt für die Prozessierung verwendet.

### 6.9.3 Anwendung der Einfachdifferenzenmethode

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Einfachdifferenzenmethode werden Temperaturprofile und atmosphärische Phasenwegverlängerungen miteinander verglichen, die jeweils mit Einfach- oder Doppeldifferenzenmethode (Verwendung von 1 s Datenrate der GPS-Bodenmessungen) generiert wurden. Dazu wurde ein Satz von 436 CHAMP-Okkultationen mit Daten jeweils nur einer GPS-Bodenstation prozessiert, die im Zeitraum vom 19.-21. April 2001 gemessen wurden.

Die Datenanalyse für beide Prozessierungsmethoden ist in Kap. 3.2 detailliert beschrieben. Für die Bildung der Einfachdifferenzen wurde (3.21) angewandt, wodurch der Fehler der CHAMP-Satellitenuhr elimiert wurde, die Fehler der GPS-Satellitenuhren  $c\delta^1$  und  $c\delta^2$  wurden aus 5 min GPS-Uhrenlösungen abgeleitet (Kap. 6.9.1).

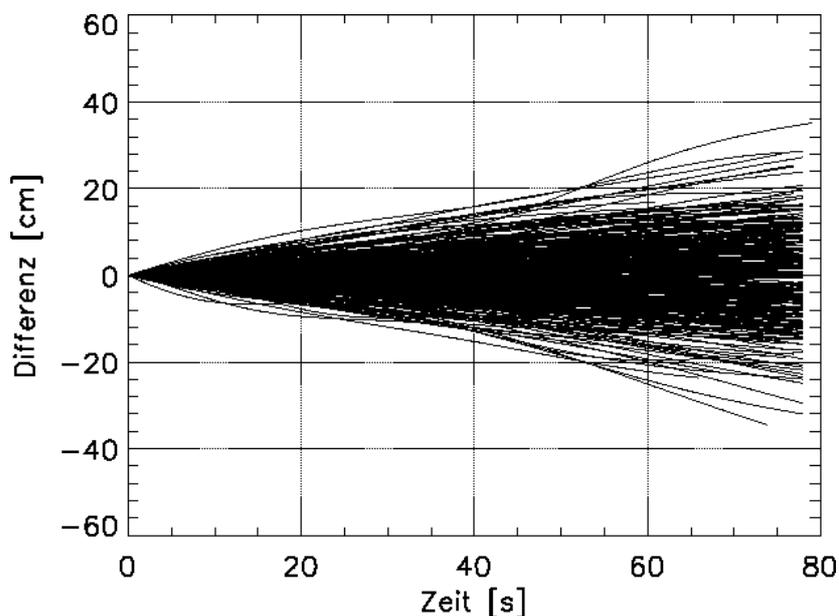
Abb. 6.29 zeigt einen Vergleich für ein einzelnes Profil (Okkultation Nr. 6 am 20. April 2001). Bis 20 km Höhe sind Doppel- und Einfachdifferenzenprofil nicht zu unterscheiden, die Abweichung bei 35 km beträgt 0,5 K.



**Abb. 6.29:** Vergleich von CHAMP-Trockentemperaturprofilen mit ECMWF (20. April 2001; Okkultation Nr. 6; 00:33 UTC, 58,8°Nord, 4,3°Ost). Prozessierung mit **Links:** Doppeldifferenzen; **Mitte:** Einfachdifferenzen. **Rechts:** Differenz beider Profile (nach [Wickert et al., 2002b]).

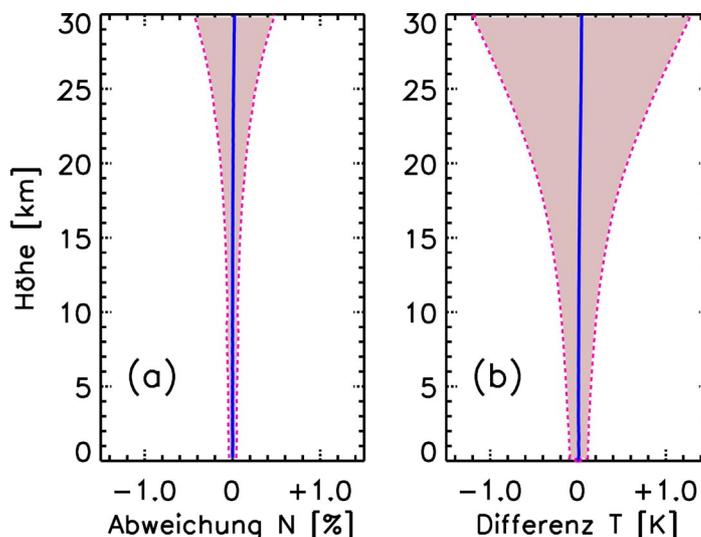
### Vergleich der atmosphärische Phasenwegverlängerungen

In Abb. 6.30 ist die Abweichung der einzelnen atmosphärischen Phasenwegverlängerungen als Funktion der Okkultationszeit dargestellt. Für  $\sim 90\%$  der Okkultationen beträgt der lineare Trend der Abweichung zwischen  $-2$  und  $2$  mm/s. Ein Abweichung im Trend von  $2$  mm/s vom tatsächlichen Wert verursacht eine Temperaturabweichung von ca.  $1$  K bei  $30$  km Höhe (Kap. 3.2.3 oder [Wickert et al., 2001a]). Zu den Abweichungen können GPS-Uhrenfehler beitragen, die nicht durch die Interpolation von  $5$  min-Uhrenlösungen aufgelöst werden, andererseits können zur Abweichung auch unkorrigierte Fehler (Atmosphäre, Ionosphäre, Mehrwegeeffekte, Signalrauschen) beitragen, die durch die zusätzlichen Satellitenverbindungen eingeführt werden (Kap. 3.2.2).



**Abb. 6.30:** Differenz zwischen den atmosphärischen Phasenwegverlängerungen, abgeleitet mit der Einfach und Doppeldifferenzenmethode für die 421 CHAMP-Okkultationen des Vergleichsdatensatzes (20.04.2001, aus [Wickert et al., 2002a]).

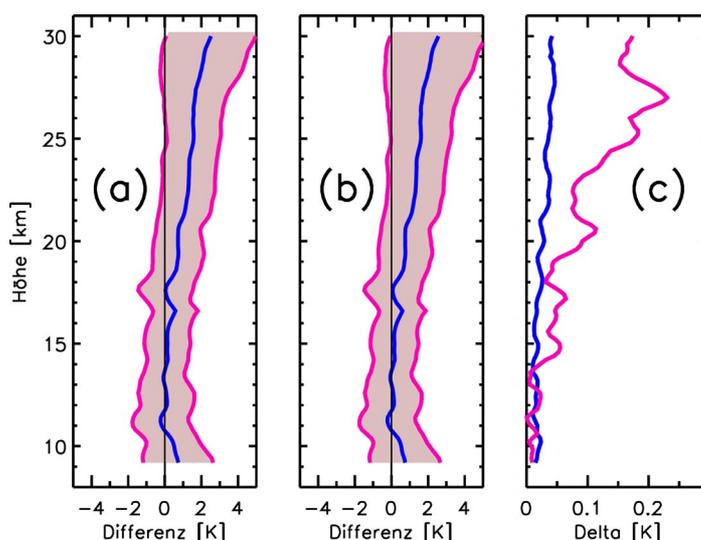
### Vergleich von Refraktivitäten und Temperaturen



**Abb. 6.31:** Statistischer Vergleich zwischen 436 CHAMP-Trockentemperaturprofilen (19.-21.04.2001), abgeleitet mit der Bildung von Doppeldifferenzen und Einfachdifferenzen (a) Refraktivität  $N$  (b) Trockentemperatur  $T$  (aus [Wickert et al., 2002a]).

Der statistische Vergleich der Refraktivitäten und Trockentemperaturen ist in Abb. 6.31 dargestellt. Eine mittlere Abweichung der Refraktivitäten ist nicht wahrnehmbar, die Standardabweichung ist  $<0,2\%$  bis 20 km Höhe und erreicht  $\sim 0,4\%$  bei 30 km. Auch eine mittlere Abweichung der Trockentemperaturen ist über den gesamten Höhenbereich nicht wahrnehmbar. Die Standardabweichung ist  $<0,6$  K bis 20 km Höhe und erreicht 1,2 K bei 30 km.

### Vergleich der Temperaturprofile mit ECMWF-Analysen



**Abb. 6.32:** Statistischer Vergleich (mittlere Abweichung: blau; Standardabweichung: rot) zwischen Trockentemperaturprofilen, abgeleitet aus CHAMP-Messungen und ECMWF-Analysen. (a) Doppeldifferenzenprozessierung; (b) Einfachdifferenzprozessierung. (c) Abweichung der Ergebnisse (a) und (b); (aus [Wickert et al., 2002a]).

Bei der Anwendung der Doppel- und Einfachdifferenzenmethode existieren unterschiedliche Fehlerquellen (eventuell ungenaue Interpolation der GPS-Uhrenparameter bei der Einfachdifferenzenbildung einerseits, nichtkorrigierte Restfehler in den Satellitenverbindungen bei der Doppeldifferenzenbildung andererseits) kann nur ein Vergleich mit einer unabhängigen Datenquelle Gewissheit über die Gleichwertigkeit der Prozessierungsverfahren bringen. Beide Datensätze wurden unabhängig voneinander mit korrespondierenden ECMWF-Analysen (siehe Kap. 6.4.1) verglichen. Abb. 6.32 zeigt die Ergebnisse dieser Vergleiche.

Der statistische Vergleich der Trockentemperaturen, prozessiert mit Doppel- und Einfachdifferenzentechnik mit GPS-Uhrenkorrektur, mit den ECMWF-Temperaturprofilen liefert statistisch nahezu identische Ergebnisse. Die Unterschiede in den mittleren und Standardabweichungen (Abb. 6.32a und 6.32b) sind nicht sichtbar und deshalb in Abb. 6.32c in höherer Auflösung dargestellt. Die Differenz der mittleren Abweichungen ist im Höhenbereich unter 30 km kleiner als 0,15 K. Die Differenz der Standardabweichungen ist über den gesamten Höhenbereich kleiner als 0,25 K. Unterhalb von 20 km sind mittlere und Standardabweichung kleiner als 0,1 K. Sowohl die mittleren, als auch die Standardabweichungen der Einfachdifferenzenprofile sind geringfügig größer als die entsprechenden Abweichungen der Doppeldifferenzenprofile.

Die Resultate der Vergleichsstudie zeigen, dass mit der vorgestellten Einfachdifferenzenmethode unter Benutzung der 5 min GPS-Uhrenparameter im Vergleich zu ECMWF-Analysen statistisch mit Doppeldifferenztemperaturprofilen nahezu identische Profile erzeugt werden können. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die genauen Ursachen zwischen Doppel- und Einfachdifferenzenprofilen zu finden, die in 30 km Höhe ca. 1 K in der Standardabweichung betragen. Diese Unterschiede sind nicht zu vernachlässigen, da das Genauigkeitspotential der GPS-Radiookkultationstechnik unterhalb 40 km wenige Zehntel K beträgt. Unabhängig davon zeigen die Ergebnisse, dass eine zukünftige Korrektur der GPS-Uhrenparameter ohne direkte Nutzung von GPS-Bodendaten erfolgen kann, was zur enormen Vereinfachung von Prozessierungssystemen führen würde. Weiterhin werden Fehlereinflüsse (z.B. ionosphärische und troposphärische Restfehler, Mehrwegeeffekte, Messrauschen) reduziert, die durch die Einbeziehung der GPS-Bodenbeobachtungen bei der Doppeldifferenzenbildung entstehen.



# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde die Realisierung des GPS-Radiookkultationsexperiments im Rahmen der deutschen Kleinsatellitenmission CHAMP beschrieben. Erste Ergebnisse des Experiments werden vorgestellt. Im Vordergrund steht die praktische Umsetzung eines neuartigen Prozessierungssystems für GPS-Radiookkultationsdaten. Wesentliche Teile dieses Systems wurden vom Autor dieser Arbeit entwickelt. Es dient zur operationellen Verarbeitung von Daten eines innovativen Fernerkundungsverfahrens für die Sondierung der Erdatmosphäre und ist in der Lage, global verteilte Vertikalprofile atmosphärischer Parameter mit hoher vertikaler Auflösung (~1 km) im Höhenbereich von der Erdoberfläche bis zu ca. 50 km zu generieren. Das System wurde nach operationellen Erfordernissen für eine zukünftige Datenbereitstellung im Rahmen globaler Wettervorhersagen entwickelt.

## **Fernerkundung der Erdatmosphäre**

Die gegenwärtig für die Datenassimilation der globalen Wettervorhersage genutzten Fernerkundungsverfahren wurden charakterisiert, Anforderungen für die zeitliche Verfügbarkeit von Atmosphärendaten für die numerische Wettervorhersage wurden abgeleitet.

## **GNSS-Radiookkultation: Grundlagen und Algorithmen**

Die Ableitung atmosphärischer Parameter aus GNSS-Radiookkultationsmessungen wurde am Beispiel des GPS detailliert beschrieben. Ein Zusammenhang zwischen Genauigkeit der atmosphärischen Phasenwegverlängerung und Temperaturfehler wurde hergestellt. Der Einfluss von Fluglageänderungen von CHAMP auf die abgeleitete atmosphärische Phasenwegverlängerung wurde untersucht, eine kritische Drehrate konnte ermittelt werden. Die Leistungsfähigkeit verschiedener Methoden zur Ionosphärenkorrektur wurde verglichen. Die Linearkombination der Brechungswinkel ist am effektivsten, allerdings bleibt bei Messungen im Maximum der solaren Aktivität auf der Tagseite ein signifikanter Restfehler.

## **CHAMP-Okkultationsexperiment: Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Am Beispiel der CHAMP-Satellitenmission wurde die praktische Realisierung eines GPS-Okkultationsexperiments beschrieben. Die Mission wurde charakterisiert, Satellit und GPS-Empfänger wurden beschrieben. Detaillierter wurde auf die für die Prozessierung der GPS-Okkultationsdaten notwendige Bodeninfrastruktur eingegangen. In Vorbereitung der Mission wurden Simulationsrechnungen zur Planung der Konfiguration des unterstützenden globalen GPS-Bodennetzes für die Okkultationsmessungen durchgeführt. Dazu wurde ein vom Autor entwickeltes Simulationsprogramm für GNSS-Okkultationen verwendet.

Die praktische Umsetzung eines Systems zur Prozessierung von GPS-Okkultationsdaten wurde detailliert beschrieben. Bei der strukturellen Planung und softwaretechnischen Realisierung der wissenschaftlichen Programmmodule wurden vom Autor wesentliche Beiträge geleistet. Das System wurde vor dem Start von CHAMP erfolgreich mit GPS/MET-Daten getestet. Die ersten CHAMP-Okkultationsmessungen vom 11. Februar 2001 konnten mit dem System auf Anhieb erfolgreich prozessiert werden. Die ersten

Messungen und deren Analyse wurde beschrieben. Dabei wurde eine Prozessierungsmethode für die Nutzung einer verringerten Datenrate (1 Hz) auf der  $L_2$ -Meßfrequenz vorgestellt und validiert.

Die Datenqualität bzw. Signalstärke der CHAMP-Messungen wurde bewertet und mit GPS/MET verglichen. Das wesentliche Ergebnis ist, dass die CHAMP-Messungen unabhängig vom Anti-Spoofing-Status des GPS ausgewertet werden können, ein großer Fortschritt in der Anwendung der GPS-Okkultationstechnik.

Ein Überblick über Messperioden sowie aufgezeichnete und prozessierte Okkultationen der ersten Phase des CHAMP-Okkultationsexperiments (Februar-Juli 2001) wurde gegeben. Durchschnittlich konnten 220-230 Okkultationen täglich aufgezeichnet werden. Die globale Verteilung der Okkultationen in der geografischen Breite ist symmetrisch zum Äquator, weist allerdings stark ausgeprägte Maxima bei ca.  $25^\circ$  und  $55^\circ$  Nord und Süd auf. Die Längenabhängigkeit ist gleichförmiger, zeigt jedoch periodische Strukturen mit Perioden von  $60-70^\circ$ .

Erste statistische Vergleiche von CHAMP-Trockentemperaturprofilen mit meteorologischen Analysen (ECMWF) ergaben eine gute Übereinstimmung. Die Tropopausenhöhe wird von den CHAMP-Messungen besser aufgelöst als von den Analysen. Der beobachtete Bias ist kleiner  $\sim 1$  K oberhalb der Tropopause und sogar  $< 0,5$  K im Höhenintervall von 12 bis 20 km bei  $> 30^\circ\text{N}$ . Der statistische Vergleich von Refraktivitäten ergab einen negativen Refraktivitätsbias der CHAMP-Messungen gegenüber den ECMWF-Analysen unterhalb von 8 km. Die verglichenen Profile wurden dabei ohne Anwendung wellenoptischer Auswertemethoden abgeleitet.

Weiterhin wurden aus den CHAMP-Messungen unter Verwendung meteorologischer Analysen Vertikalprofile der spezifischen Feuchte berechnet. Globale Wasserdampfverteilungen wurden erzeugt, die qualitativ Strukturen der globalen Feuchteverteilung gut wiedergeben, wie speziell die Gesamtstruktur der Innertropischen Konvergenzzone oder tropischen Konvergenzzentren über Südamerika, Afrika und Indonesien. In 33% der abgeleiteten Wasserdampfprofile treten jedoch unphysikalische Werte in der spezifischen Feuchte auf, welche auf verschiedene noch zu verbessernde Unzulänglichkeiten des bestehenden Systems bei der Wasserdampfableitung hinweisen.

Die Eindringtiefe der CHAMP-Messungen in die untere Troposphäre wurde analysiert. Die minimal erreichbare Höhe ist von der Art der Datenanalyse abhängig. Für die gewählte Art der Prozessierung erreichte in der ersten Phase des CHAMP-Okkultationsexperiment nahezu jedes zweite Vertikalprofil den ersten Kilometer über der Erdoberfläche. Dieser Wert hängt von der geografischen Breite ab und beträgt ca. 30-35% in äquatorialen, 60% in mittleren und 70% in polaren Breiten. Auch dieses Ergebnis bedeutet einen Fortschritt in der GPS-Okkultationstechnik.

Zu Zeiten geomagnetischer Stürme kann der prozentuale Anteil von Profilen unzureichender Qualität auf der Tagseite nahezu 50% betragen.

Bei vollständiger Verfügbarkeit der GPS-Bodenstationsdaten stehen durchschnittlich Daten von ca. 4,5 Stationen pro Okkultation für die Auswertung der Okkultationsmessungen zur Verfügung. Mit der realen Datenverfügbarkeit wird ein Wert von ca. 3,5 erreicht. Allein mit 2 polaren Bodenstationen (McMurdo und Ny-Alesund) können nahezu

50% der Okkultationen mittels der Doppeldifferenzentechnik prozessiert werden. Bei Anwendung der Doppeldifferenzentechnik zeigt eine Vergleichsstudie für einen Testdatensatz, dass die derzeit verwendete Datenrate der Bodenstationen ohne Qualitätsverlust der atmosphärischen Vertikalprofile von 1 s auf 30 s reduziert werden kann.

Erstmals wurde eine Einfachdifferenzenmethode auf die Prozessierung von GPS-Okkultationsdaten angewendet. Dabei wurden die GPS-Uhrenfehler mit der Interpolation von 5 min-GPS-Uhrenlösungen korrigiert. Ein statistischer Vergleich von Vertikalprofilen, die mit Doppel- und Einfachdifferenzmethode berechnet wurden, mit ECMWF-Analysen ergab statistisch nahezu identische Ergebnisse. Damit konnte erstmals die Prozessierung von GPS-Okkultationsdaten ohne direkte Nutzung von GPS-Bodendaten zur GPS-Uhrenkorrektur durchgeführt werden. Dieses Ergebnis kann zur erheblichen Vereinfachung bestehender Prozessierungssysteme für GPS-Okkultationsdaten führen und besitzt vor allem für operationelle Anwendungen eine große Bedeutung. Durch die Anwendung der vorgestellten Einfachdifferenzenmethode können weiterhin Fehlereinflüsse eliminiert werden, die durch die Verwendung der Bodenmessungen entstehen. Weitere Studien sind jedoch notwendig, um die Unterschiede zwischen Doppel- und Einfachdifferenzenprofilen detailliert zu untersuchen.

### **Ausblick**

Die ersten Okkultationsergebnisse von CHAMP zeigen, dass ein deutlicher Fortschritt in der Okkultationstechnik erreicht wurde. Die hohe Signalqualität ermöglicht eine Datenanalyse unabhängig vom AntiSpoofing-Modus des GPS und gestattet auch die Sondierung der unteren Troposphäre. Die CHAMP-Daten sind somit u.a. von großer Bedeutung für die Vorbereitung und Datennutzung zukünftiger Satellitenmissionen (GRACE, COSMIC, METOP, NPOESS), da sie die Weiterentwicklung der Auswertelgorithmen, vor allem für die untere Troposphäre, erlauben.

Mit CHAMP und seiner Bodeninfrastruktur ergibt sich erstmals die Möglichkeit, in operationeller Weise GPS-Okkultationsdaten für die Wettervorhersage bereitzustellen. Die zeitliche Verfügbarkeit der Eingabedaten für die Okkultationsprozessierung ist dabei von entscheidender Bedeutung. Die schnelle Verfügbarkeit der GPS-Okkultationsdaten von CHAMP wird im weiteren Verlauf des Experiments mit einer Satellitenempfangsstation in polaren Breiten erreicht werden. Mit der vorgestellten Methode der Einfachdifferenzenprozessierung kann eine wesentliche Vereinfachung der Prozessierung für den operationellen Einsatz erreicht werden. Eine Schlüsselrolle kommt der schnellen Bereitstellung genauer Satellitenbahninformationen und GPS-Uhrenlösungen zu. Gelingt dies zeitgleich oder mit nur geringer Verzögerung zum Empfang der Satellitendaten, ist eine Bereitstellung globaler atmosphärischer Information aus GPS-Okkultationsmessungen mit nur 3 h Verzögerung nach der Messung ein realistisches Ziel.

Die ersten Ergebnisse des CHAMP-Radiookkultationsexperimentes deuten darauf hin, dass CHAMP einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der GNSS-Radiookkultations-technik liefern wird. Damit wird ein innovatives Fernerkundungsverfahren zur Sondierung der Erdatmosphäre im globalen Maßstab weiter verbessert, dessen Daten vielfältig in der Atmosphärenforschung, Wettervorhersage und Klimaforschung angewendet werden können.



# LITERATURVERZEICHNIS

- Antikainen, V., und V. Hyvönen,** The accuracy of Vaisala RS-80 radiosonde, *Proc. of 5<sup>th</sup> Symp. of Meteorological Observations and Instrumentation*, Toronto, 134-140, 1983.
- Bassiri, S., und G. A. Hajj,** Higher-order ionospheric effects on the Global Positioning System observables and means of modelling them, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 280-289, 1993.
- Bauer, M.,** *Vermessung und Ortung mit Satelliten*, ISBN 3-87907-309-0, 4. Auflage, 1997.
- Bauer, S. J.,** *Planetenatmosphären*, Kapitel 7 in: Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 7, Erde und Planeten, W. de Gruyter Verlag, Berlin-New York, 1997.
- Benedicto, J., S. E. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, M. Lugert,** *GALILEO: Satellite system design and technology developments*, ESA Publikation, 2000.
- Benjamin, S. G., B. E. Schwartz, und R. E. Cole,** Accuracy of ACARS wind and temperature observations determined by collocation, *Weather and Forecasting*, 14, 1032-1038, 1999.
- Berth, W., W. Keller, und U. Scharnow,** *Wetterkunde*, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1972.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, und R. H. Ware,** GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Met.*, 33, 379-386, 1994.
- Beyerle, G., und K. Hocke,** Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in radio occultation experiments, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1895-1898, 2001.
- Biancale, R., G. Balmino, J.-M. Lemoine, J.-Ch. Marty, B. Moynot, F. Barlier, P. Exertier, O. Laurain, P. Gegout, P. Schwintzer, Ch. Reigber, A. Bode, R. König, F.-H. Massmann, J.-Ch. Raimondo, R. Schmidt, und S. Y. Zhu,** A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3611-3614, 2000.
- Blobel, V., und E. Lohrmann,** *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*, ISBN 3-519-03243-0, B. G. Teubner Stuttgart/Leipzig, 1998.
- Born, M., und E. Wolf,** *Principles of optics*, Pergamon Press, Oxford, UK, 1993.
- Bremer, J.,** Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations, *Adv. Space Res.*, 28(7), 997-1006, 2001.
- Brockwell, P. J., und R. A. Davis,** *Time series: Theory and methods*, ISBN 0-387-97429-6, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1998.
- COSMIC,** [Internet: <http://cosmic.cosmic.ucar.edu/net/>], zitiert 2001.

- Deutscher Wetterdienst (DWD)**, *Quarterly Report of the Operational NWP-Models of the Deutscher Wetterdienst*, Nr. 25, Business Area Research and Development, Offenbach, 2000.
- Deutscher Wetterdienst (DWD)**, *Vorschriften und Betriebsunterlagen des DWD*, Nr. 1 Verzeichnis der Meldestellen des synoptischen Dienstes, Stand 09.01.1996, Offenbach 1996.
- Dzingel, M., und U. Leiterer**, *Untersuchungen über Genauigkeit und Korrekturmöglichkeiten für die Feuchtesondierung mit dem A-Humicap der Sonde RS 80*, Technischer Report, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1995.
- ECMWF**, IFS (Integrated Forecasting System) documentation, [Internet: <http://www.ecmwf.int/research/index.html>], zitiert 2001a.
- ECMWF**, Services/data reception statistics, [Internet: [http://www.ecmwf.int/services/dcover/index\\_map.html](http://www.ecmwf.int/services/dcover/index_map.html)], zitiert 2001b.
- Elliot, W. P., und D. J. Gaffen**, On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 1507-1520, 1991.
- Engler, E., N. Zarraoa, W. Mai, und A. Jungst**, *GLONASS – Russian Global Navigation Satellite System*, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Fernerkundungsstation Neustrelitz, 1997.
- ESA**, [Internet: <http://www.esa.int/export/esaSA/navigation.html>], zitiert 2001.
- Escudero, A., A. C. Schlesier, A. Rius, A. Flores, F. Rubek, G. B. Larsen, S. Syndergaard, und P. Høeg**, Ionospheric tomography using Ørsted GPS measurements – Preliminary results, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 173-176, 2001.
- Eshleman, V. R.**, The radio occultation method for the study of planetary atmospheres, *Planet. Space Sci.*, 21, 1521-1531, 1973.
- EUMETSAT**, [Internet: <http://www.eumetsat.de/>], zitiert 2001.
- Feltens, J.**, Nicht-gravitative Störeinflüsse bei der Modellierung von GPS-Erdumlaufbahnen, *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Nr. 371, München, 1991.
- Fischbach, F. F.**, A satellite method for pressure and temperature below 24 km, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 46/9, 528-532, 1965.
- Fjeldbo, G., A. J. Kliore, und V. R. Eshleman**, The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments, *Astron. J.*, 76, 2, 123-140, 1971.
- Fjeldbo, G., und V. R. Eshleman**, The atmosphere of Mars analysed by integral inversion of the Mariner IV occultation data, *Planet. Space Sci.*, 16, 1035-1059, 1968.
- Fliegel, H. F., T. E. Gallini, und E. R. Swift**, Global Positioning System radiation force model for geodetic applications, *J. Geophys. Res.*, 97B, 559–568, 1992.
- Foelsche, U.**, *Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and spaceborne GNSS sounding data*, Wissenschaftlicher Bericht Nr. 10, Institut für Geophysik, Astronomie und Meteorologie, Universität Graz, 1999.

- Galas, R. und W. Köhler**, A binary exchange format for GPS data, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 645-648, 2001.
- Galas, R., J. Wickert, und W. Burghardt**, High Rate low latency GPS ground tracking network for CHAMP, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 649-652, 2001.
- Garrison, J. L., und S. J. Katzberg**, The application of reflected GPS signals to ocean remote sensing, *Remote Sensing and Environment*, 73, 175-187, 2000.
- Gendt, G., G. Dick, und W. Soehne**, GFZ Analysis Center of IGS - Annual Report 1998, *IGS 1998 Technical Reports*, Editoren K. Gowey, R. Neilan, A. Moore, JPL, Pasadena, CA, 79-87, 1999.
- Gorbunov, M. E.**, *Radioholographic methods for processing radio occultation data in multipath regions*, Scientific report DMI Copenhagen 01-02, Copenhagen, 2001.
- Gorbunov, M. E., A. S. Gurvich, und L. Kornbluh**, Comparative analysis of radioholographic methods of processing radio occultation data, *Radio Sci.*, 35, 1025-1034, 2000.
- Gorbunov, M. E., und A. S. Gurvich**, Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere, *J. Geophys. Res.*, 103, D12, 13819-13826, 1998.
- Gorbunov, M. E., S. V. Sokolovskiy, und L. Bengtsson**, *Space refractive tomography of the atmosphere: Modeling of direct and inverse problems*, Report 210, Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, 1996a.
- Gorbunov, M. E., A. S. Gurvich, und L. Bengtsson**, *Advanced algorithms of inversion of GPS/MET satellite data and their application to reconstruction of temperature and humidity*, Report 211, Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, 1996b.
- Gorbunov, M. E., und S. V. Sokolovskiy**, *Remote sensing of refractivity from space for global observations of atmospheric parameters*, Report 119, Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, 1993.
- Gorbunov, M. E.**, Solution of inverse problems of remote atmospheric refractometry on limb paths, *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics*, 26, 86-91, 1990.
- Gorbunov, M. E.**, Accuracy of the refractometric method in a horizontally nonuniform atmosphere, *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics*, 24, 382-386, 1988.
- GPS/MET**, [Internet: <http://cosmic.cosmic.ucar.edu/gpsmet/>], zitiert 2001.
- Graas, F. v., und M. S. Braasch**, Selective availability, in *Global Positioning System: Theory and applications*, edited by B.W. Parkinson and J.J. Spilker, Progress in Astronautics and Aeronautics, 163, 601-621, AIAA, 1996.
- Gurvich, A. S., und T. G. Krasil'nikova**, Navigation satellites for radio sensing of the Earth's atmosphere, *Sov. J. Remote Sensing*, 7(6), 1124-1131, 1990.
- Gurvich, A. S., V. Kan, L. I. Popov, V. V. Ryumin, S. A. Savchenko, und S. V. Sokolovskiy**, Reconstruction of the atmosphere's temperature profile from motion pictures of the Sun and Moon taken from the "Salyut-6" orbiter, *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics*, 18, 1-4, 1982.

- Hajj, G. A., E. R. Kursinski, L. J. Romans, W. I. Bertiger, und S. S. Leroy**, A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, im Druck, 2002.
- Hantel, M.**, *Klimatologie*, Kapitel 4 in: Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 7, Erde und Planeten, W de Gruyter Verlag, Berlin-New York, 1997.
- Hardy, K. R., G. A. Hajj, und E. R. Kursinski**, Accuracies of atmospheric profiles obtained from GPS occultations, *Int. J. Satell. Commun.*, 12, 463, 1994.
- Hayden, C. M.**, GOES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval Algorithm, *J. Appl. Met.*, 27, 705-733, 1988.
- Healy, S.**, Smoothing radio occultation bending angles above 40 km, *Annales Geophysicae*, 19, 459-468, 2001.
- Healy, S., und J. Eyre**, Retrieving temperature, water vapor and surface pressure information from refractive-index profiles derived by radio occultation: A simulation study, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 126, 1661-1683, 2000.
- Hedin, A. E.**, Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 1159-1172, 1991.
- Heise, S., N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, Ch. Reigber, und H. Lühr**, Sounding of the Topside Ionosphere/Plasmasphere Based on GPS Measurements from CHAMP: Initial Results, *Geophys. Res. Lett.*, eingereicht, 2002.
- Hocke, K.**, Using GPS satellites to study plasma irregularities, *GPS World*, July, 34-36, 2001.
- Hocke, K., A. G. Pavelyev, O. I. Yakovlev, L. Barthes, und N. Jakowski**, Radio occultation data analysis by the radioholographic method, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 61, 1169-1177, 1999.
- Hocke, K.**, Inversion of GPS meteorology data, *Annales Geophysicae*, 15, 443-450, 1997.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, und J. Collins**, *GPS: Theory and Practice*, Springer, ISBN 3-211-82364-6, 1992.
- Igarashi, K., A. Pavelyev, K. Hocke, D. Pavelyev, I. A. Kucherjavenkov, S. Matygov, A. Zakharov, und O. Yakovlev**, Radio holographic principle for observing natural processes in the atmosphere and retrieving meteorological parameters from radio occultation data, *Earth Planets Space*, 52, 893-899, 2000.
- 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.*, im Druck, 2002.
- Jakowski, N., F. Porsch, und G. Mayer**, Ionosphere induced ray path bending effects in precision satellite positioning systems, *Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, 1/94, 6-13, 1994.
- Jeske, H.**, *Meteorological optics and radiometeorology*, in Landolt-Börnstein, Numerical data and functional relationships in science and technology, Group V, Vol. 4, Meteorology,

Subv. b, Physical and Chemical Properties of the Air, edited by G. Fischer, Springer, Berlin, Heidelberg, 187-348, 1988.

**Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, J. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph,** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471, 1996.

**Kang, Z., P. Schwintzer, Ch. Reigber, and S. Y. Zhu,** Precise Orbit Determination for GPS/MET using GPS-SST Data, *Proc. of the 12th Int. Symp. on 'Space Flight Dynamics'*, ESOC, Darmstadt, Germany, 2-6 June 1997, SP-403, August 1997.

**Kaplan, E. D.,** *Understanding GPS: Principles and applications*, ISBN 0-89006-793-7, Artech House, 1996.

**Kertz, W.,** *Einführung in die Geophysik*, B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim 1989.

**Kiddar, S. Q., und T. H. Vonder Haar,** *Satellite Meteorology: An Introduction*, Academic Press, San Diego, USA, 1995.

**Kirchengast, G., J. Hafner, und W. Poetzi,** *The CIRA86aQ\_UoG model: An extension of the CIRA-86 monthly tables including humidity tables and a Fortran 95 global moist air climatology model*, IMG/UoG Tech. Report, Universität Graz, Österreich, 1999.

**Kleusberg, A., und P. J. G. Teunissen** (Editoren), *GPS for Geodesy*, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag, 1996.

**Kliore, A. J., D. L. Cain, G. S. Levy, V. R. Eshleman, G. Fjeldbo, und F. D. Drake,** Occultation experiment: Results of the first direct measurement of the Mars' atmosphere and ionosphere, *Science*, 149, 1243-1248, 1965.

**Komjathy, A., J. L. Garrison, und V. Zavorotny,** GPS: A new tool for ocean science, *GPS World*, 50 – 56, April 1999.

**König, R., S. Y. Zhu, Ch. Reigber, K.-H. Neumayer, H. Meixner, R. Galas, G. Baustert, und P. Schwintzer,** CHAMP rapid orbit determination for GPS atmospheric limb sounding, *Advances in Space Research*, im Druck, 2001a.

**König, R., P. Schwintzer, und Ch. Reigber,** *The CHAMP Orbit Format CHORB, Dokument CH-GFZ-FD-002*, [erhältlich über Internet: <http://op.gfz-potsdam.de/champ>], 2001b.

**König, R., G. Baustert, H. Meixner, G. Michalak, K.-H. Neumayer, Ch. Reigber, V. Schwieger, R. Schmidt, und S. Y. Zhu,** Routine CHAMP precise orbit products, in Vorbereitung, *J. of Geodesy*, 2001c.

**Kuo, Y.-H., S. V. Sokolovskiy, R. A. Anthes, und F. Vandenberghe,** Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 11, 157-186, 2000.

**Kursinski, E. R,** GPS and low Earth orbiting satellite humidity measurements, erweiterter Abstract, *5<sup>th</sup> Int. Symp. on Troposphere Profiling: "Needs and Technology"*, Adelaide, Australien, 4.-8. Dezember, 2000.

- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield, und K. R. Hardy**, Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 102, 23429-23465, 1997.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, W. I. Bertiger, S. S. Leroy, T. K. Meehan, L. J. Romans, J. T. Schofield, D. J. McCleese, W. G. Melbourne, C. L. Thornton, T. P. Yunck, J. R. Eyre, und R. N. Nagatani**, Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the Global Positioning System, *Science*, 271, 1107-1110, 1996.
- Ladreiter, H. P., und G. Kirchengast**, GPS/GLONASS sensing of the neutral atmosphere: Model-independent correction of ionospheric influences, *Radio Sci.*, 31, 877-891, 1996.
- Landau, H.**, *Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Software-Entwicklung und Analyse*, Dissertation, Universität der Bundeswehr, ISSN 0173-1009, Neubiberg, 1988.
- Leick, A.**, *GPS Satellite Surveying*, Wiley, ISBN 0-471-30626-6, 1995.
- Leiterer, U., H. Dier, und T. Naebert**, Improvements in Radiosonde Humidity Profiles Using RS 80/RS 90 Radiosondes of Vaisala, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 70/4, 319-336, 1997.
- Liljequist, G. H., und K. Cihak**, *Allgemeine Meteorologie*, Braunschweig, Vieweg 1994, ISBN 3-528-23555-1.
- Lindal, G. F.**, The atmosphere of Neptune: An analysis of radio occultation data acquired with Voyager 2, *Astron. J.*, 103, 3, 967-982, 1992.
- Lindal, G. F., J. R. Lyons, D. N. Sweetnam, V. R. Eshleman, D. P. Hinson, und G. L. Tyler**, The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2, *J. Geophys. Res.*, 92, 14987-15001, 1987.
- Lindal, G. F., G. E. Wood, H. Hotz, D. N. Sweetnam, V. R. Eshleman, und G. L. Tyler**, The atmosphere of Titan: An analysis of the Voyager 1 radio occultation measurements, *Icarus*, 53, 2, 348-363, 1983.
- Lühr, H.**, persönliche Kommunikation, 2001.
- Lühr, H., L. Grunwaldt, Ch. Förste, P. Schwintzer, und Ch. Reigber**, CHAMP Reference Systems, Transformations and Standards, CHAMP-Dokument CH-GFZ-RS-002, [Internet: [http://op.gfz-potsdam.de/champ/index\\_CHAMP.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html)], 2001.
- Lühr, H., und V. Haak**, Das Magnetfeld der Erde – Ein Schlüssel zum Verständnis der Dynamik im Erdinnern und der elektromagnetischen Prozesse im erdnahen Weltraum, *Physikalische Blätter* 56 (10), 33-38, 2000.
- Lusignan, B., G. Modrell, A. Morrison, J. Pomalaza, und S. G. Ungar**, Sensing the Earth's Atmosphere with Occultation Satellites, *Proc. IEEE*, 57/4, 458-467, 1969.
- Marouf, E. A., G. J. Tyler, und P. A. Rosen**, Profiling Saturn's rings by radio occultation, *Icarus*, 68, 120-166, 1986.
- Marquardt, C.**, persönliche Kommunikation, 2002.

**Marquardt, C., K. Labitzke, Ch. Reigber, T. Schmidt, und J. Wickert,** An assessment of the quality of GPS/MET radio limb soundings during February 1997, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 125-130, 2001.

**Meehan, T. K.**, persönliche Kommunikation, 2001.

**Melbourne, W. G., E. Davis, C. Duncan, G. A. Hajj, K. Hardy, E. Kursinski, T. Meehan, und L. Young,** *The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring*, Publication 94-18, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1994.

**Melbourne, W. G., T. P. Yunck, L. E. Young, B. H. Hager, G. F. Lindal, C. H. Liu, und G. H. Born,** GPS geoscience instrument for EOS and space station, JPL Proposal to NASA AO OSSA-1-88, 81 (GGI Proposal), 1988.

**Menzel, W. P., und J. F. W. Purdom,** Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellites, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 75, 757-781, 1994.

**Mervart, L.,** Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System, *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Zürich, 1995.

**Mortensen, M. D., R. P. Linfield, und E. R. Kursinski,** Vertical resolution approaching 100 m for GPS occultations of the Earth's atmosphere, *Radio Sci.*, 34, 1475-1483, 1999.

**Mostert, S., und J. A. Koekemoer,** The science and engineering payloads and experiments on SUNSAT, *Acta Astronautica*, 41 (4-10), 401-411, 1997.

**Neilan, R. E., A. Moore, T. Springer, J. Kouba, J. Ray, und Ch. Reigber,** International GPS Service 2000: Life without SA, *Proc. of the Institute of Navigation – Navigation 2000*, 438-446, Salt Lake City, Utah, 2000.

**Neumayer, K. H., S. Y. Zhu, Ch. Reigber, R. König, und H. Meixner,** CHAMP orbit recovery, algorithmic approaches and results, *Suppl. to EOS, Transactions, AGU*, 81, 48, F309, Posterbeitrag, [erhältlich über Internet: <http://op.gfz-potsdam.de/champ>], 2000.

**NPOESS,** [Internet: <http://www.ipo.noaa.gov/index2.html>], zitiert 2001.

**Offermann, P.,** persönliche Kommunikation, 2001.

**Owens, J. S.,** Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition, *Applied Optics*, 6, 51-59, 1967.

**Palmer, P. I., J. J. Barnett, J. R. Eyre, und S. B. Healy,** A nonlinear optimal estimation inverse method for radio occultation measurements of temperature, humidity, and surface pressure, *J. Geophys. Res.*, 105, 17513-17526, 2000.

**Papas, C. H.,** *Theory of electromagnetic wave propagation*, McGraw-Hill, New York, 1965.

**Pavelyev, A. G., A. V. Volkov, A. I. Zakharov, S. A. Krutikh, und A. I. Kucheryavenkov,** Bistatic radar as a tool for Earth investigation using small satellites, *Acta Astronautica*, 39, (9-12), 721-730, 1996.

- Phinney, R. A., und D. L. Anderson**, On the radio occultation method for studying planetary atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 73, 1819-1827, 1968.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, und B. P. Flannery**, *Numerical recipes in Fortran 77 The art of scientific computing*, ISBN 0-521-43064 X, Cambridge University Press, 1992.
- Rangaswamy, S.**, Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 483-486, 1976.
- Reigber, Ch.**, *Announcement of Opportunity for CHAMP*, [erhältlich über Internet: <http://op.gfz-potsdam.de/champ>], 2001a.
- Reigber, Ch.**, *The CHAMP mission*, [Internet: [http://op.gfz-potsdam.de/champ/index\\_CHAMP.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html)], zitiert 2001b.
- Reigber, Ch., G. Gendt, und C. Marquardt**, GPS Atmosphärensondierung - ein innovatives Verfahren zur Bestimmung atmosphärischer Parameter, *erweiterte Abstracts der DACH-Meteorologentagung*, Wien, 17.-21.09., 2001c.
- Reigber, Ch., H. Lühr, und P. Schwintzer**, CHAMP mission status and perspectives, *Suppl. to EOS, Transactions, AGU*, 81, 48, F307, 2000a.
- Reigber, Ch., H. Lühr, und P. Schwintzer**, CHAMP – Der nächste große Schritt in der Geopotentialforschung und Atmosphärensondierung, *Zweijahresbericht GFZ Potsdam*, 1996/1997, 29-37, Potsdam, 1998a.
- Reigber, Ch., R. Galas, R. König, N. Jakowski, J. Wickert, und A. Wehrenpfennig**, GFZ and DLR contribution to a GPS ground network to support the CHAMP mission, *Proc. of IAG Section II Symp.*, Munich, October 5-9, 1998, 222-224, Springer ISBN 3-540-67079-3, 1998b.
- Reigber, Ch.**, *GPS Atmosphere Sounding – An innovative approach for the recovery of atmospheric parameters*, HGF Strategy fund proposal, Potsdam, 1998c.
- Reigber, Ch., R. Bock, Ch. Förste, L. Grunwaldt, N. Jakowski, H. Lühr, P. Schwintzer, und C. Tilgner**, *CHAMP Phase B Executive Summary*, Scientific Technical Report STR 96/13, GFZ Potsdam, 1996.
- Reigber, Ch., P. Schwintzer, und A. Kohlase**, *CHAMP - A challenging micro-satellite payload for geophysical research and application, Feasibility study for DARA*, Final report, Potsdam, 1995.
- Reigber, Ch.**, Gravity field recovery from satellite tracking data, in *Theory of satellite geodesy and gravity field determination*, 197-234, Editoren: F. Sanso, R. Rummel, Springer-Verlag, ISBN 3-540-51528-3, Berlin Heidelberg New York, 1989.
- Rieder, M. J., und G. Kirchengast**, Error analysis and characterization of atmospheric profiles retrieved from GNSS occultation data, *J. Geophys. Res.*, 106, D23, 31.755, 2001.
- Ritschel, B.**, Integrated product and information management of the CHAMP satellite project, [Internet: [http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/gigis\\_2001/gigis\\_welcome.html](http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/gigis_2001/gigis_welcome.html)], *Proc. 7<sup>th</sup> EC-GI & GIS Workshop*, Potsdam, 13.-15.06., 2001.

- Rocken, C., Y.-H. Kuo, W. S. Schreiner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, and C. McCormick**, COSMIC System Description, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 11, 21-52, 2000.
- Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Hermann, Y.-H. Kuo, and X. Zou**, Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 29849-29860, 1997.
- Rodgers, C. D.**, *Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice*, World Scientific Publishing Co., 2000.
- Rodgers, C. D.**, Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 14, 609-624, 1976.
- Roedel, W.**, *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*, Berlin, Springer, 1992.
- Roßbach, U., H. Habrich, and N. Zarraoa**, Transformation parameters between PZ-90 and WGS-84, *ION-GPS 97*, Kansas City, Sept. 1997.
- Ruffini, G., E. Cardellach, A. Rius, and J. M. Aparicio**, *Remote sensing of the ocean by bistatic radar observations: a review*, IEEC Report WP1000, Report#ESD-iom019-99, ESA Contract 13461/99/NL/GD Utilization of scatterometry using sources of opportunity, 1999.
- SAC-C**, [Internet: <http://orbis.conae.gov.ar/sac-c/golpe/sld001.htm>], zitiert 2001.
- Saint-Exupéry, A. de**, *Der Kleine Prinz*, Berlin, Volk und Welt, 1986.
- Schaer, S.**, *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*, Inauguraldissertation, Universität Bern, 1999.
- Schmidt T., A. Wehrenpennig, J. Wickert, und Ch. Reigber**, *Das operationelle Prozessierungssystem für die Atmosphärensondierung mit CHAMP*, Geodätische Woche 2000, Potsdam, 11.10.2000, Handouts zu Vortrag, 2000.
- Schreiner, W. S., D. C. Hunt, C. Rocken, and S. Sokolovskiy**, Precise GPS data processing for the GPS/MET radio occultation mission at UCAR, *Proc. of the Institute of Navigation - Navigation 2000*, 103-112, Alexandria, Va., 1998.
- Seeber, G.**, *Satellitengeodäsie: Grundlagen, Methoden u. Anwendungen*, Berlin, New York, de Gruyter, ISBN 3-11-010082-7, 1989.
- Springer, T. A.**, *Modeling and validating orbits and clocks using the Global Positioning System*, Inauguraldissertation, Universität Bern, 1999.
- Smith, E. K., und S. Weintraub**, The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proc. IRE*, 41, 1035-1037, 1953.
- Sokolovskiy, S. V.**, Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit, *Radio Sci.*, 36, 483-498, 2001a.
- Sokolovskiy, S. V.**, Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere, *Radio Sci.*, 36, 441-458, 2001b.
- Sokolovskiy, S. V., und D. Hunt**, Statistical optimization approach for GPS/MET data inversions, *URSI GPS/MET Workshop*, Tucson, Arizona, 1996.

- Sokolovskiy, S. V.**, Solution of the inverse refraction problem by sensing of the atmosphere from space, *Sov. J. of Remote Sensing*, 6(3), 333-338, 1990.
- Steiner, A. K., G. Kirchengast, U. Foelsche, L. Kornblueh, E. Manzini, und L. Bengtsson**, GNSS occultation sounding for climate monitoring, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 113-124, 2001.
- Steiner, A. K., G. Kirchengast, und H. P. Ladreiter**, Inversion, error analysis and validation of GPS/MET data, *Annales Geophysicae*, 17, 122-138, 1999.
- Steiner, A. K.**, *High resolution sounding of key climate variables using the radio occultation technique*, Wissenschaftlicher Bericht Nr. 3, Institut für Geophysik, Astronomie und Meteorologie, Universität Graz, 1998.
- Syndergaard, S.**, On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements, *Radio Sci.*, 35, 865-883, 2000.
- Syndergaard, S.**, *Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique*, DMI Scientific Report 99-6, Copenhagen, 1999.
- Syndergaard, S.**, Modeling the impact of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from limb sounding, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 60, 171-180, 1998.
- Thayer, G. D.**, An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9, 803-807, 1974.
- Trenberth, K. E.**, Atmospheric circulation climate changes, *Climatic Change*, 31, 427-453, 1995.
- Tyler, G. J.**, Radio propagation experiments in the outer solar system with Voyager, *Proc. IEEE*, 75, 10, 1404-1431, 1987.
- Vaisala**, *Users guide ozone sonde OES*, Vaisala Oy, Helsinki, 1991.
- Volkov, A. A., G. M. Grechko, A. S. Gurvich, V. Kan, und S. V. Sokolovskiy**, Recovery of the vertical temperature profile of the atmosphere from refraction measurements made from the "Salyut-7" Station, *Izv. Atmosph. and Ocean. Phys.*, 11, 914-915, 1987.
- Vorob'ev, V. V., und T. G. Krasil'nikova**, Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system, *Phys. of the Atmosphere and Ocean*, 29, 602-609, 1994.
- Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, und K. Trenberth**, GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 19-40, 1996.
- Wehrenpfennig, A., N. Jakowski, und J. Wickert**, A dynamically configurable system for operational processing of space weather data, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 601-604, 2001.

**Wickert, J., G. Beyerle, G. A. Hajj, V. Schwieger, und Ch. Reigber,** GPS radio occultation with CHAMP: Atmospheric profiling utilizing the space-based single difference technique, *Geophys. Res. Lett.*, im Druck, 2002a.

**Wickert, J., T. Schmidt, C. Marquardt, Ch. Reigber, K.-H. Neumayer, G. Beyerle, R. Galas, und L. Grunwaldt,** GPS radio occultation with CHAMP: First results and status of the experiment, *Proc. of IAG Scientific Assembly*, 2.-7. September, Budapest, Springer Series, Vol. 125, im Druck, 2002b.

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

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

**Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, T. Meehan, L. Grunwaldt, und R. Galas,** Initial results from CHAMP radio occultation experiment, *Eos. Trans. AGU*, 82(20), Spring Meet. Suppl., Abstract A31C-08, 2001c.

**Wickert, J., Ch. Reigber, G. Beyerle, R. König, C. Marquardt, T. Schmidt, T. Meehan, L. Grunwaldt, und R. Galas,** GPS radio occultation with CHAMP: Initial results, *Proc. Beacon Satellite Symp.*, 3.-6. Juni, Boston, 2001d.

**Wickert\*, J., N. Jakowski, und S. Schlüter,** Different approaches of ionospheric corrections for GPS based radio occultation measurements onboard CHAMP, EGS XXII General Assembly, Vienna 21-25, April 1997, Session OA 26, *Annales Geophysicae* Supplement II to Vol. 15, Part II, Hydrology, Oceans, Atmosphere & Nonlinear Geophysics, C521, 1997.

**Wu, S.-C., T. Meehan, und L. Young,** *The potential use of GPS signals as ocean altimetry observable*, JPL Publication 97-31, Jet Propulsion Laboratory, USA, 1997.

**Yakovlev, O. I., S. S. Matyugov, und V. N. Gubenko,** Venera-15 and -16 middle atmosphere profiles from radio occultations: Polar and near-polar atmosphere of Venus, *Icarus*, 94, 493-510, 1991.

**Yunck, T. P., C.-H. Liu, und R. Ware,** A history of GPS sounding, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 11, 1-20, 2000.

**Zhu, S. Y, F.-H. Massmann, Y. Q. Yu, und Ch. Reigber,** *The effect of the geocentric gravitational constant on scale/Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions*, Scientific Technical Report STR 01/12, GFZ Potsdam, 2001.

**Zumberge, J., und G. Gendt,** The demise of selective availability and implications for the International GPS Service network, *Phys. Chem. Earth (C)*, 26, 637-644, 2001.

\* Namensänderung April 1998



# ANHANG A

## Herleitung der Gleichungen für 2D-Raytracingsimulationen

Die für die 2D-Raytracingsimulationen in Kap. 3.3.3 verwendete Differentialgleichung (3.51) wird mit Hilfe der Variationsrechnung abgeleitet. Die Lösung der Gleichung ist die Bahnkurve  $r(\varphi)$  des Strahles der elektromagnetischen Welle vom Sendort  $r(\varphi_{Start})$  zum Empfangsort  $r(\varphi_{End})$ , die sich bei der Ausbreitung durch ein Medium (charakterisiert durch die Refraktivitätsverteilung  $n(r, \varphi)$ ) entsprechend den Gesetzen der geometrischen Optik (Kap. 3.1.2) ergibt.

Bei der Variationsrechnung geht es im einfachsten Fall darum, die Extremwerte eines als Integral geschriebenen Funktionals bei Variation der Struktur der im Integranden stehenden, unabhängigen, Funktionen zu ermitteln. Als Funktional wird dabei eine Zahlengröße verstanden, der nach einer bestimmten Vorschrift Funktionen zugeordnet sind.

Bei der Wellenausbreitung nach den Gesetzen der geometrischen Optik bildet das Fermat'sche Prinzip (Kap. 3.1.2) den Ausgangspunkt für die Anwendung der Variationsrechnung. Das gesuchte Funktional ist die optische Weglänge, hier mit  $\Phi$  bezeichnet. Sie ist definiert als das Wegintegral des Brechungsindex  $n(s)$  des Ausbreitungsmediums entlang des Strahlenweges  $s$  (A 1). Gemäß dem Fermat'schen Prinzip erfolgt die tatsächliche Strahlausbreitung entlang einer Trajektorie  $\vec{r}(s)$ , die das Funktional  $\Phi$  einen Minimalwert annehmen lässt. Die Aufgabe besteht darin, genau diese Trajektorie zu ermitteln.

$$\Phi = \int_{s_{Start}}^{s_{End}} n(s) ds \quad (A 1)$$

Zur Lösung wird das Kurvenintegral 1. Art (A 1) mit dem allgemeinen Kurvenparameter  $t$  parametrisiert. Für kartesischen Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  (im 3D-Fall) gilt dann:

$$x = x(t); y = y(t); z = z(t). \quad (A 2)$$

Mit (A 2) kann (A 1) umgeschrieben werden:

$$\Phi = \int_{s_{Start}}^{s_{End}} n ds = \int_{t_{Start}}^{t_{End}} n(x, y, z) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt \quad (A 3)$$

mit:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}; \dot{y} = \frac{dy}{dt}; \dot{z} = \frac{dz}{dt}. \quad (A 4)$$

Bei Reduzierung der 3D-Aufgabe auf ein zweidimensionales Problem können Polarkoordinaten eingeführt werden. Dabei dient der Winkel  $\varphi$  gleichzeitig als Kurvenparameter der gesuchten ebenen Kurve  $r(\varphi)$ :

$$x = r \cos \varphi, \quad (A 5)$$

$$y = r \sin \varphi, \quad (A 6)$$

$$z = 0 \quad . \quad (A 7)$$

Mit den ersten Ableitungen der parametrisierten Koordinaten (A 5)-(A 7) nach dem Kurvenparameter  $\varphi$ :

$$\dot{x} = \frac{d}{d\varphi}(r \cos \varphi) = r' \cos \varphi - r \sin \varphi, \quad (A 8)$$

$$\dot{y} = \frac{d}{d\varphi}(r \sin \varphi) = r' \sin \varphi + r \cos \varphi, \quad (A 9)$$

$$\dot{z} = \frac{d}{d\varphi}(0) = 0 \quad (A 10)$$

ergibt sich die zweidimensionale Formulierung des Problems (A 1) in Polarkoordinaten:

$$\Phi = \int_{\varphi_{Start}}^{\varphi_{End}} n(r, \varphi) \sqrt{r^2(\varphi) + (r'(\varphi))^2} d\varphi \quad (A 11)$$

mit:

$$r' = \frac{dr}{d\varphi}. \quad (A 12)$$

Gesucht ist die ebene Bahnkurve  $r(\varphi)$ , die das Funktional  $\Phi$  (optische Weglänge) in (A 11) zu einem Extremwert macht. Als notwendige Bedingung für einen Extremwert in  $\Phi$  muss die gesuchte Funktion  $r(\varphi)$  die Euler-Lagrangsche Differentialgleichung (A 13) erfüllen:

$$\frac{d}{d\varphi} \frac{\partial L}{\partial r'} = \frac{\partial L}{\partial r}, \quad (A 13)$$

mit:

$$L = n(r, \varphi) \sqrt{r^2(\varphi) + (r'(\varphi))^2}. \quad (A 14)$$

(A 14) wird in (A 13) eingesetzt. Die Berechnung der rechten Seite von (A 13) ergibt:

$$\frac{\partial L}{\partial r} = n(r, \varphi) \frac{r}{\sqrt{r^2 + (r')^2}} + \sqrt{r^2 + (r')^2} \frac{\partial n}{\partial r}. \quad (A 15)$$

Die linke Seite von (A 13) kann geschrieben werden als:

$$\frac{d}{d\varphi} \left\{ \frac{\partial L}{\partial r'} \right\} = \left\{ \frac{\partial n}{\partial \varphi} + \frac{\partial r}{\partial \varphi} r' \right\} \frac{r'}{\sqrt{r^2 + (r')^2}} + n(r, \varphi) \left( \frac{r'' \sqrt{r^2 + (r')^2} - r' \frac{1}{2\sqrt{r^2 + (r')^2}} [2rr' + 2r'r'']}{r^2 + (r')^2} \right). \quad (A 16)$$

Nach Einsetzen von (A 16) und (A 15) in (A 13) ergibt sich:

$$r' \frac{\partial n}{\partial \varphi} - \frac{\partial n}{\partial r} r^2 + n(r, \varphi) \frac{r'' r^2 - 2(r')^2 r - r^3}{r^2 + (r')^2} = 0. \quad (\text{A 17})$$

Die Division durch  $r^2$  und geeignetes Umstellen von (A 17) führt zu einer nichtlinearen Differentialgleichung 2. Ordnung (A 18). Zusammen mit den Randbedingungen für den Start- und Endpunkt des Strahles  $r(\varphi_{Start})$  bzw.  $r(\varphi_{End})$  ermöglicht die Lösung von (A 18) die Bestimmung des Strahlenweges  $r(\varphi)$ .

$$r'' = r + 2 \frac{(r')^2}{r} + \frac{1}{n(r, \varphi)} \left( \frac{\partial n}{\partial r} - \frac{r'}{r^2} \frac{\partial n}{\partial \varphi} \right) (r^2 + (r')^2) \quad (\text{A 18})$$



# ANHANG B

## Stationen des ‚HighRate‘ & ‚LowLatency‘ JPL&GFZ GPS-Bodennetzes (Stand 28.06.2001)

Lfd Nr.	Kurz-name	Stations-nummer.	Stationsname	Länge [°]	Breite [°]	GPS-Empfänger
1	cord	11	Cordoba (JPL)	-64,47	-31,71	SNR-8100
2	mizu	12	Mizusawa (GFZ)	141,20	39,00	Benchmark
3	cro1	17	Christiansted (JPL)	-64,58	17,76	SNR-8100
4	fair	18	Fairbanks (JPL)	-147,50	64,98	SNR-8100
5	gala	19	Galapagos (JPL)	-90,30	-0,74	Ashtech Z-12
6	gode	20	Greenbelt (JPL)	-76,83	39,02	SNR-12
7	gold	21	Goldstone (JPL)	-116,89	35,42	Ashtech Z-12
8	guam	22	Guam (JPL)	144,87	13,59	Ashtech Z-12
9	hrao	23	Hartebeesthoek (JPL)	27,71	-25,89	Ashtech Z-12
10	kokb	25	Kokee Park (JPL)	-159,66	22,13	SNR-8100
11	madr	26	Madrid (JPL)	-4,25	40,42	Ashtech Z-12
12	mkea	27	Mauna Kea (JPL)	-155,46	19,80	Ashtech Z-12
13	pimo	28	Quezon City (JPL)	121,08	14,64	SNR-8000
14	sant	29	Santiago de Chile (JPL)	-70,66	-33,15	SNR-12
15	tidb	30	Tidbinbilla (JPL)	148,98	-35,40	Ashtech Z-12
16	usud	31	Usuda (JPL)	138,36	36,13	SNR-8000
17	godf	34	Goddard (JPL)	-76,83	39,02	Ashtech Z-12
18	mcmz	35	McMurdo (JPL)	166,67	-77,84	Ashtech Z-12
19	lpgm	38	La Plata (GFZ)	-57,93	-34,91	Benchmark
20	kstm	39	Krasnojarsk (GFZ)	92,79	55,99	SNR-8000
21	bogt	40	Bogota (JPL)	-74,08	4,64	Ashtech Z-12
22	riom	41	Rio Grande (GFZ)	-67,75	-53,79	Benchmark
23	ban2	49	Bangalore (GFZ)	77,57	-53,45	Benchmark
24	nya2	62	Ny Alesund (GFZ)	11,87	78,92	Benchmark
25	obem	63	Oberpfaffenhofen (GFZ)	11,30	48,10	Benchmark
26	ous2	64	Dunedin (GFZ)	170,30	-45,50	Benchmark
27	potm	67	Potsdam (GFZ)	13,07	52,38	Benchmark
28	sutm	70	Sutherland (GFZ)	20,81	-32,38	Benchmark



# DANKE

Herrn Prof. Gottfried Kirchengast danke ich herzlich für die spontane Übernahme der Hauptbetreuung dieser Arbeit und die stets motivierende und konstruktive Unterstützung. Herzlichen Dank an Herrn Prof. Christoph Reigber für die Zweitbetreuung; für kritische, konstruktive Hinweise und für die Möglichkeit der Mitarbeit im CHAMP-Projekt des GFZ Potsdam, an dem diese Arbeit entstand.

Meinen engsten Kollegen Dr. Klemens Hocke, Dr. Norbert Jakowski, Dr. Georg Beyerle, Dr. Christian Marquardt, Dr. Torsten Schmidt, Dr. Andreas Wehrenpfennig und Stefan Heise danke ich herzlich für wertvolle Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit.

Vielen Dank an die Orbitgruppe des GFZ Potsdam, vor allem an Dr. Rolf König, Dr. Sheng Yuang Zhu und Dr. Volker Schwieger. Ein Dankeschön an Dr. Roman Galas und Wolfgang Burghardt für die Bereitstellung der GPS-Bodendaten. Dr. Gert Gendt und Bernd Ritschel danke ich für wertvolle Hinweise.

Dem gesamten CHAMP-Team danke ich für die Unterstützung der GPS-Okkultationsmessungen, vor allem Dr. Ludwig Grunwaldt, Prof. Hermann Lühr, Ralf Bock, Wolfgang Köhler, Dr. Peter Schwintzer, Dr. Christoph Förste und Franz-Heinrich Massmann. Allen Mitarbeitern des Projektbereiches 1 des GFZ Potsdam und der GFZ-Bibliothek ein Dankeschön.

Den Kollegen vom JPL Pasadena danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit, vor allem Dr. George Hajj, Tom Meehan, Dr. Tony Mannucci und Dr. Bill Melbourne. Dr. Chris Rocken und Doug Hunt von UCAR Boulder ein Dankeschön für die Möglichkeit zur Nutzung von GPS/MET-Daten zur Vorbereitung der CHAMP-Messungen. Dr. Gert König-Langlo vom AWI Bremerhaven danke ich für die Bereitstellung von Radiosondendaten der Neumayer-Station.

Vielen Dank an Dr. Josef Ramsauer, Heinrich Grillhofer, Dr. Andrea Steiner und Dr. Ulrich Foelsche vor allem für die Unterstützung während meiner Graz-Aufenthalte.

Und nicht zuletzt meinen Eltern und meiner langjährigen Freundin Charlotte ein herzliches Dankeschön. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.