



Summer University – Graz in Space
9.-10. September 2010, Graz



Monitoring des Klimawandels mit Satellitenmethoden GPS Radio-Okkultation

Andrea K. Steiner,
U. Foelsche, B. Scherllin-Pirscher, B.C. Lackner,
F. Ladstädter, und G. Kirchengast



andi.steiner@uni-graz.at

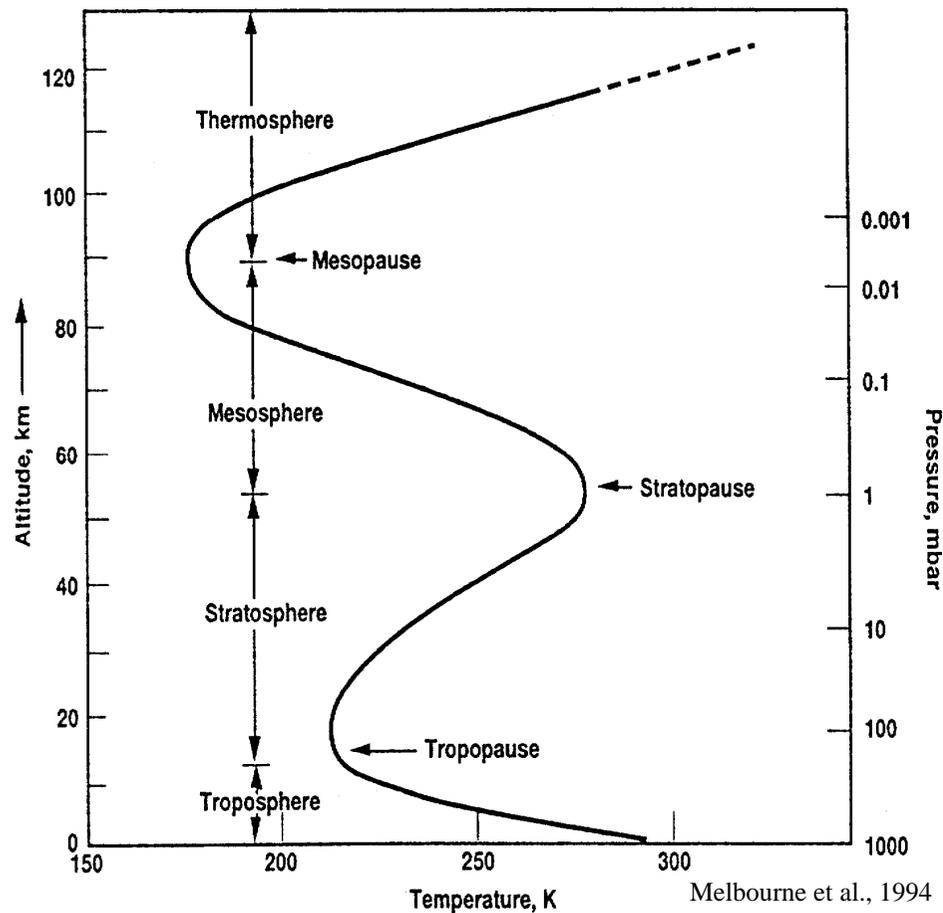


Überblick



- **Aufbau und Klimaänderungen der Atmosphäre**
- **Beobachtungsmethoden**
- **Was ist Okkultation / Radio-Okkultation (RO)?**
- **RO Missionen**
- **Von der Messung zu atmosphärischen Variablen**
- **RO-basierte Klimatologien – Temperaturfelder**
- **Qualität – Vergleich mit Atmosphärendaten**
- **Klimatrendstudien**

Schichtung der Atmosphäre



Troposphäre:

- bis 8km am Pol und 18km in Tropen
- Temperaturabnahme $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (bis -50°C)
- Wolken-, Niederschlagsbildung
- Starke vertikale Durchmischung
- Strahlungsprozesse

Stratosphäre: bis ~50 km, $\sim 0^{\circ}\text{C}$

- Temperaturanstieg mit der Höhe
- O_3 absorbiert kurzwellige UV Sonnenstrahlung bei Wellenlängen $< 0.3 \cdot 10^{-6}\text{m}$
- Ozonschicht, max O_3 -Konz. ~ 25 km

Mesosphäre: bis ~85 km, -90°C

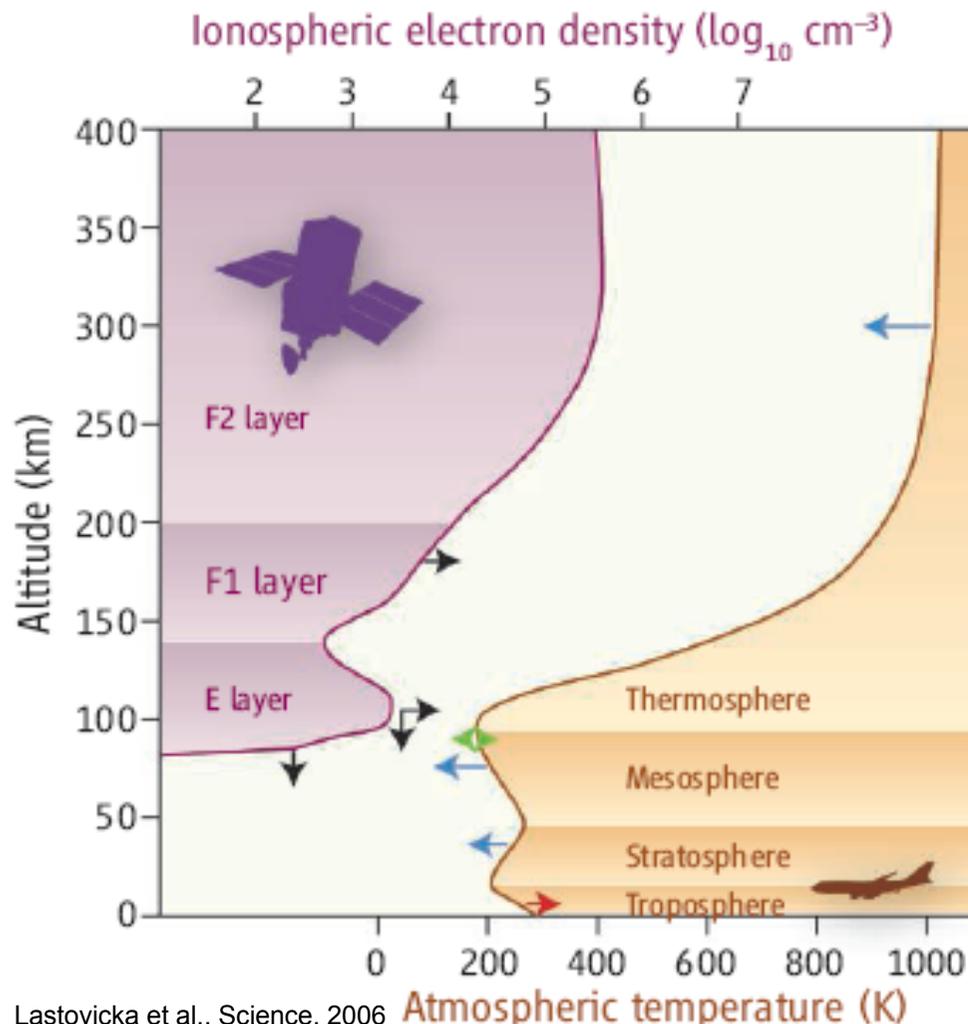
- bis hier gut durchmischte Luft
- konst. stoffliche Zusammensetzung (**Homosphäre**)

Thermosphäre:

- Temperaturanstieg ($\sim 1000\text{K}$), ab 400km konst.
- Absorption kw UVStrahlung – Ionisation
- Geringe Dichte, Diffusion, Gasentmischung
- Große Temperaturschwankungen (100K/Tag)
- keine "fühlbare" Temperatur
- **Ionosphäre**

Obere Atmosphäre

Klimaänderung in der oberen Atmosphäre



Lastovicka et al., Science, 2006

Atmospheric temperature (K)

Erdoberfläche

- Erwärmung

Untere, Mittlere Atmosphäre:

- Erwärmung in der Troposphäre
- Abkühlung in der Stratosphäre

Obere Atmosphäre:

- Abkühlung einige °C/Dekade
- Dichteabnahme in Thermosphäre aufgrund der Abkühlung

Hauptursache: Treibhausgase

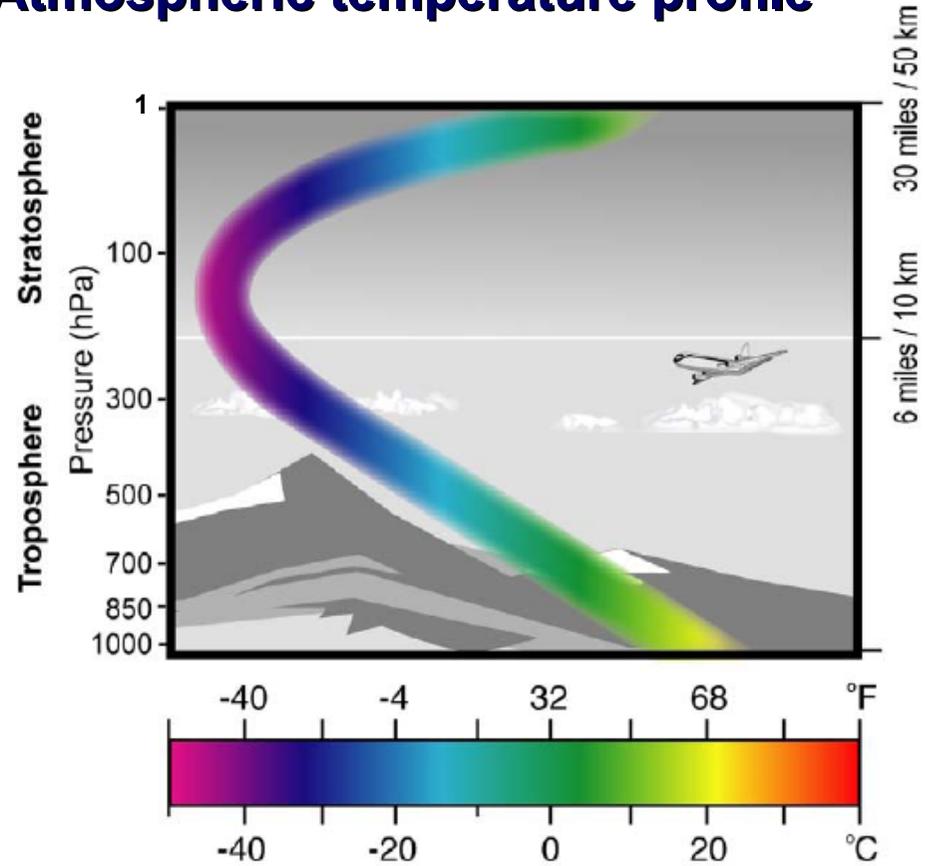
Anstieg der Kohlendioxidkonzentration
Abnahme der Ozonkonzentration
Anstieg von Wasserdampf

Natürliche Ursachen: Solare Aktivität

Troposphäre - Stratosphäre



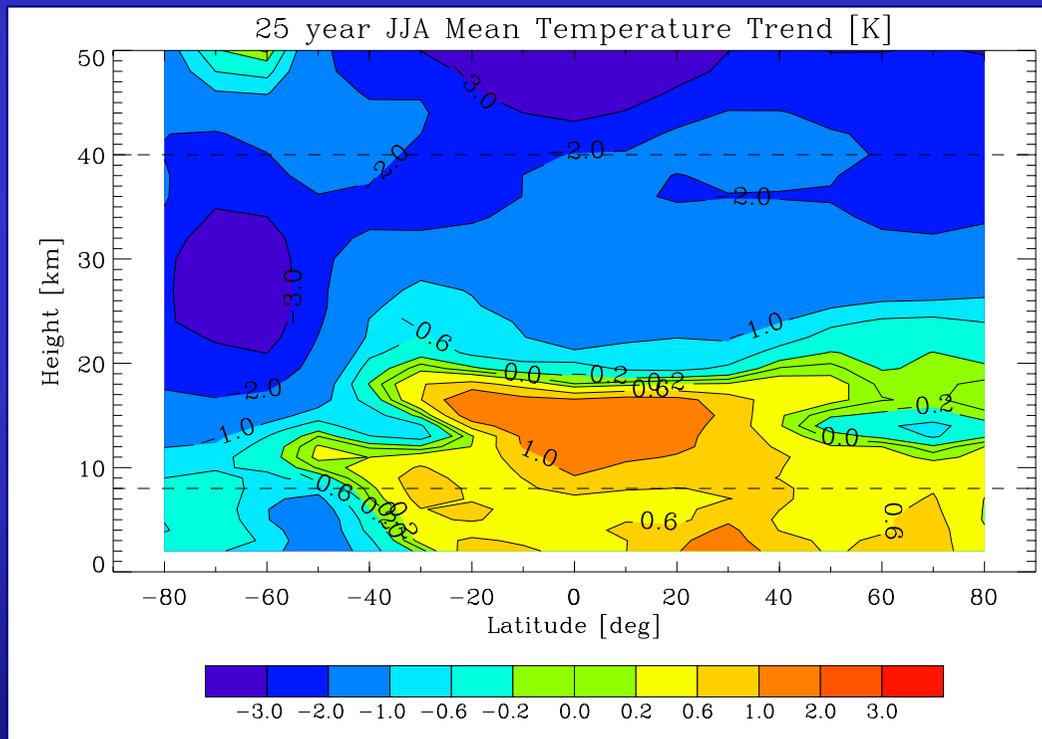
Atmospheric temperature profile



Source: U.S. CCSP Report, 2006

Klimaänderung im Modell

Treibhausgasanstieg >>> Änderungen der Temperatur



Temperatur Trend:

**Untere Stratosphäre:
Abkühlung**

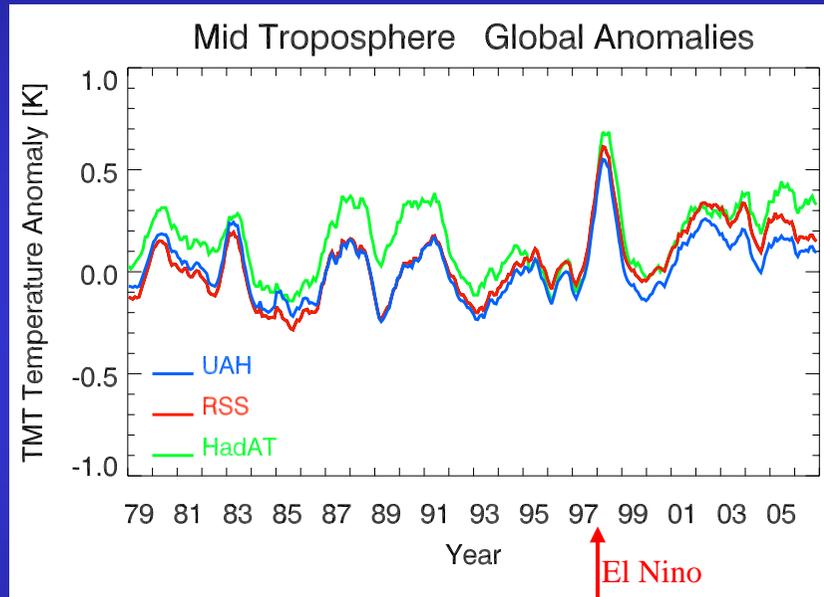
**Obere Troposphäre:
Erwärmung**

Source: U.Foelsche

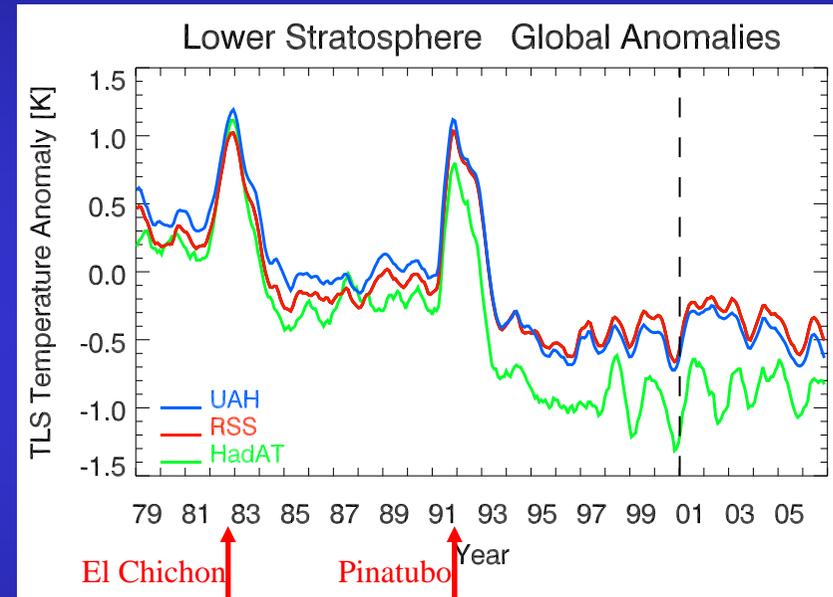
Modellsimulation ECHAM5

Troposphäre - Stratosphäre Temperaturbeobachtungen

Temperaturanomalien in der Troposphäre and Stratosphäre



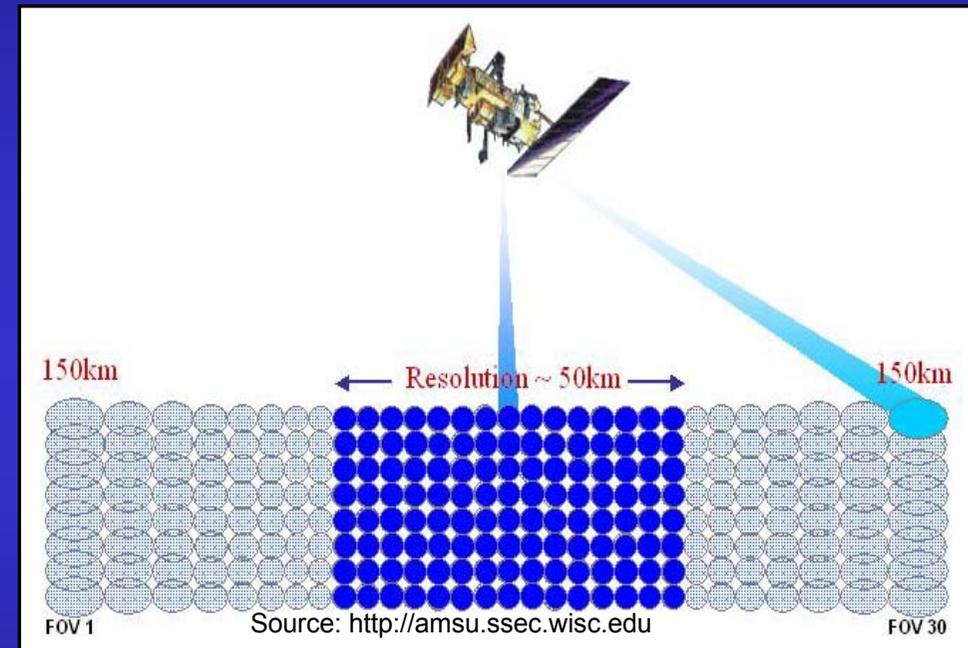
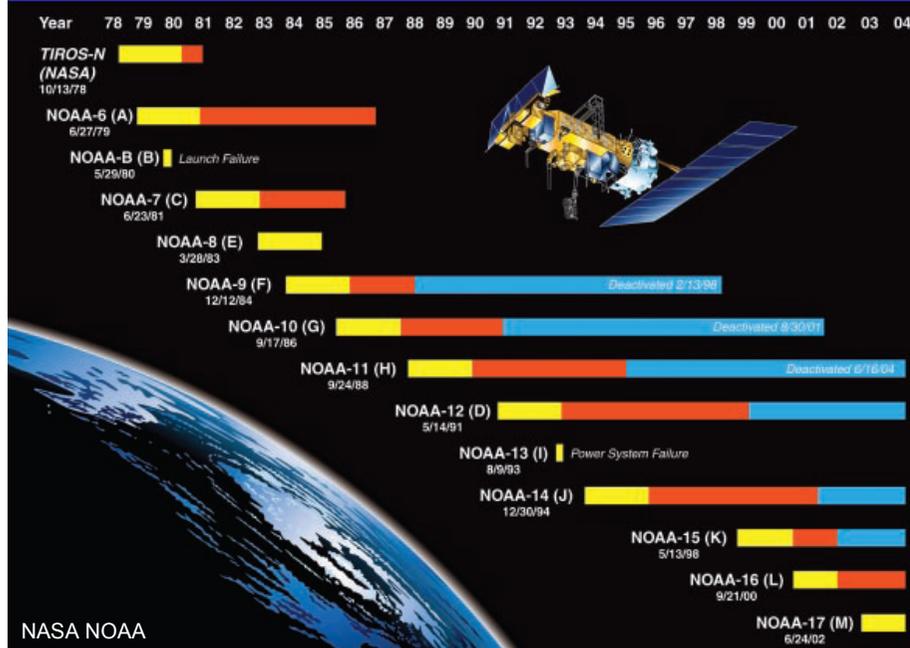
Erwärmung in der Troposphäre
(MSU/AMSU TMT(T2) Kanal)



Abkühlung in der Stratosphäre
(MSU/AMSU TLS(T4) Kanal)

| T2 [K] | Trend 1979-2004 | T4 [K] |
|--------|-----------------|--------|
| 0.1 | Radiosondes | -1.5 |
| 0.15 | UAH | -1.1 |
| 0.3 | RSS | -0.8 |
| 0.45 | UMd | |

(Advanced) Microwave Sounding Unit (AMSU/MSU), U.S. NOAA Wettersatelliten

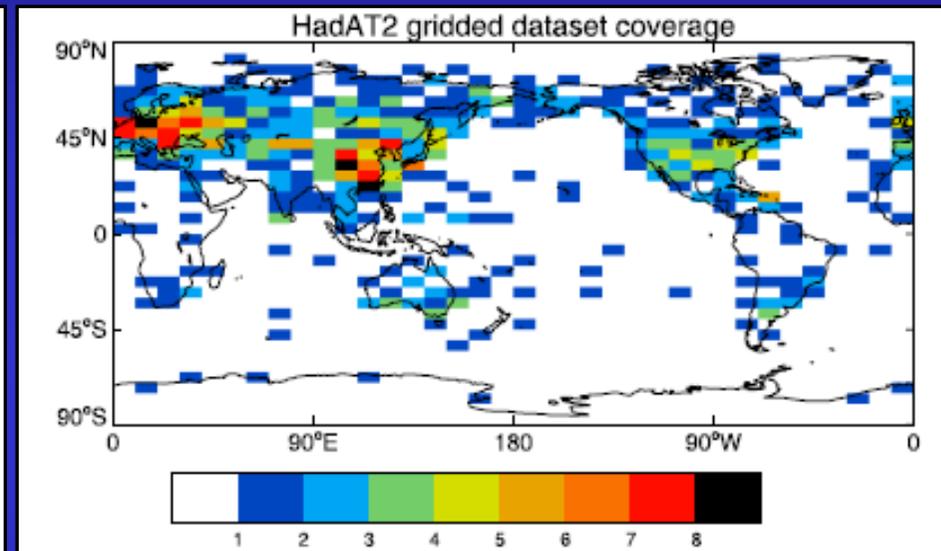
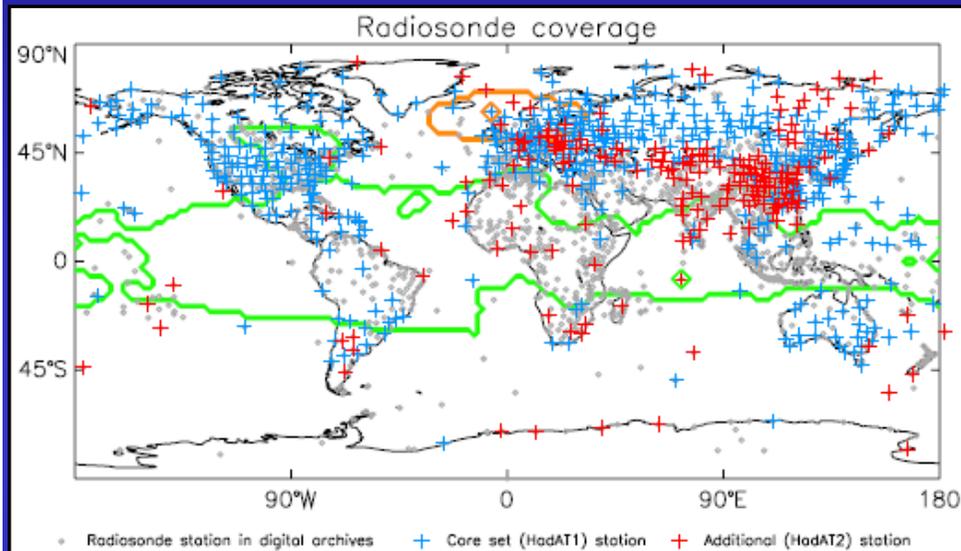


Passiver Mikrowellensensor (seit 1979)

- misst die Erdbstrahlung im Mikrowellenbereich (50–60 GHz Sauerstoff Absorptionslinie)
- liefert Schichttemperaturen in der Troposphäre und Stratosphäre
- zur Wetterbeobachtung
- Klimazeitreihen: Daten von verschiedenen Satelliten müssen kalibriert werden und eine Reihe von Korrekturen für Orbitänderungen, Satellitendrift (Lokalzeitdrift)
- die gleichen Rohdaten liefern unterschiedliche Enddaten bei unterschiedlicher Prozessierung

Radiosondenmessungen

Radiosonden Messungen HadAT (Hadley Center/MetOffice, UK)



- seit 1958
- mehr Stationen auf Kontinenten und auf der Nordhemisphäre
- systematische Fehler (Aufheizung des Sensors bei 'Tag')
- Fehler wegen Stationsänderungen, versch. Instrumententypen
- verschieden Homogenisierungsmethoden
- Diskrepanzen zw. MSU/AMSU und Radiosondenbeobachtungen



Okkultation

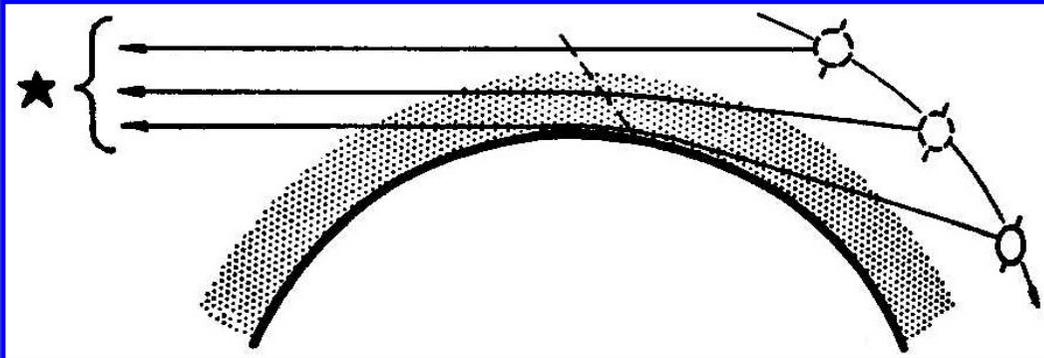


Solar Occultation by the Earth's Atmosphere (courtesy D. Pivato)

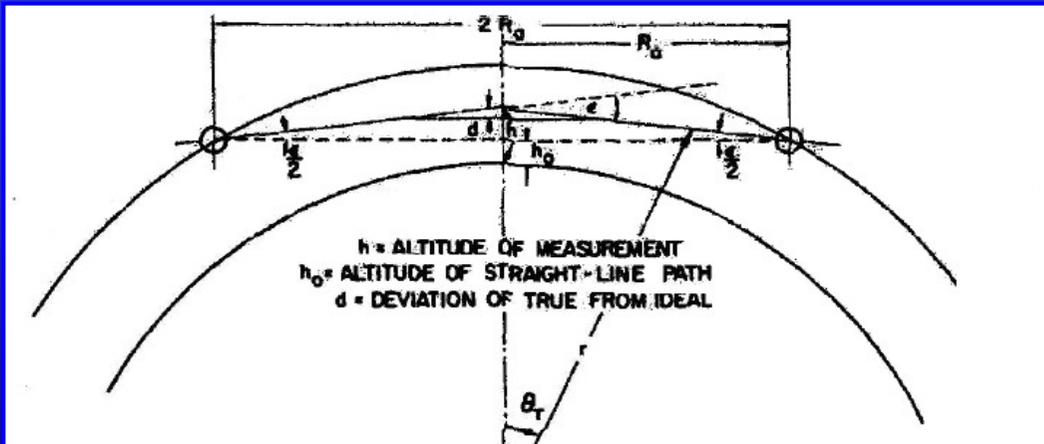


Erd-Okkultation Erste Konzepte

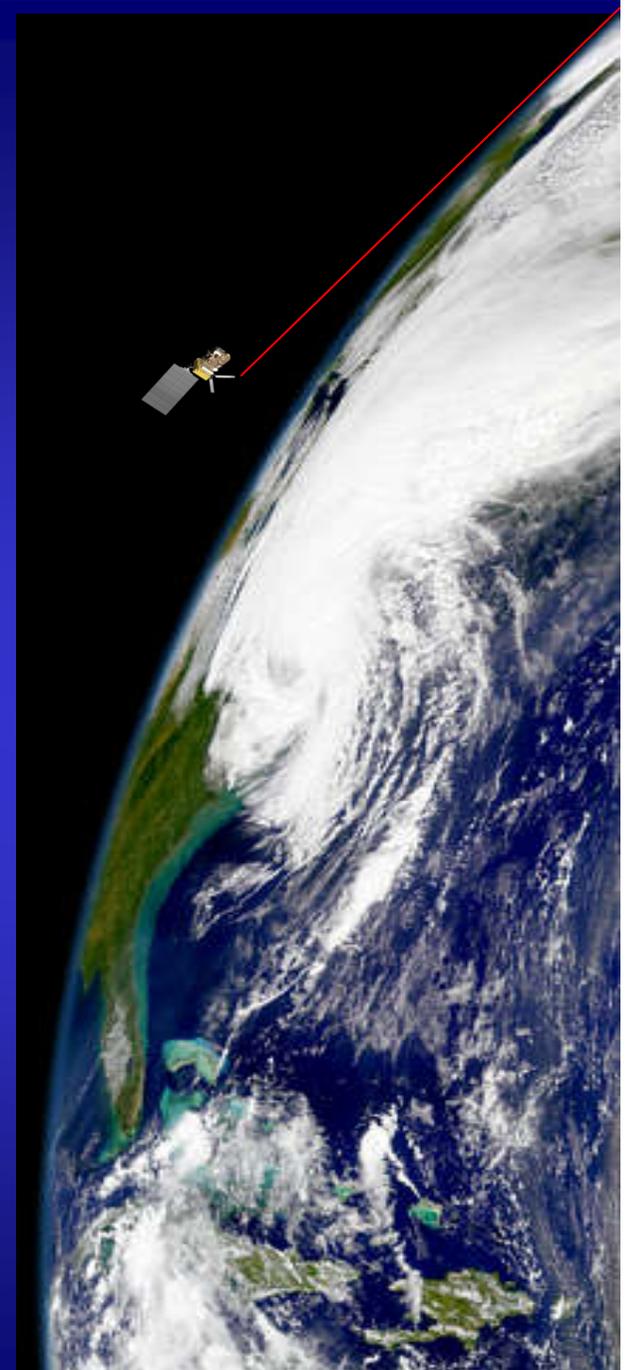
Fishbach, 1965: Stellar occultation from LEO



Lusignan et al., 1969: Radio sounding with tandem LEO's at a fixed separation



Gurvich and Krasil'nikova, 1987: **Navigation satellites for sensing Earth atmosphere**

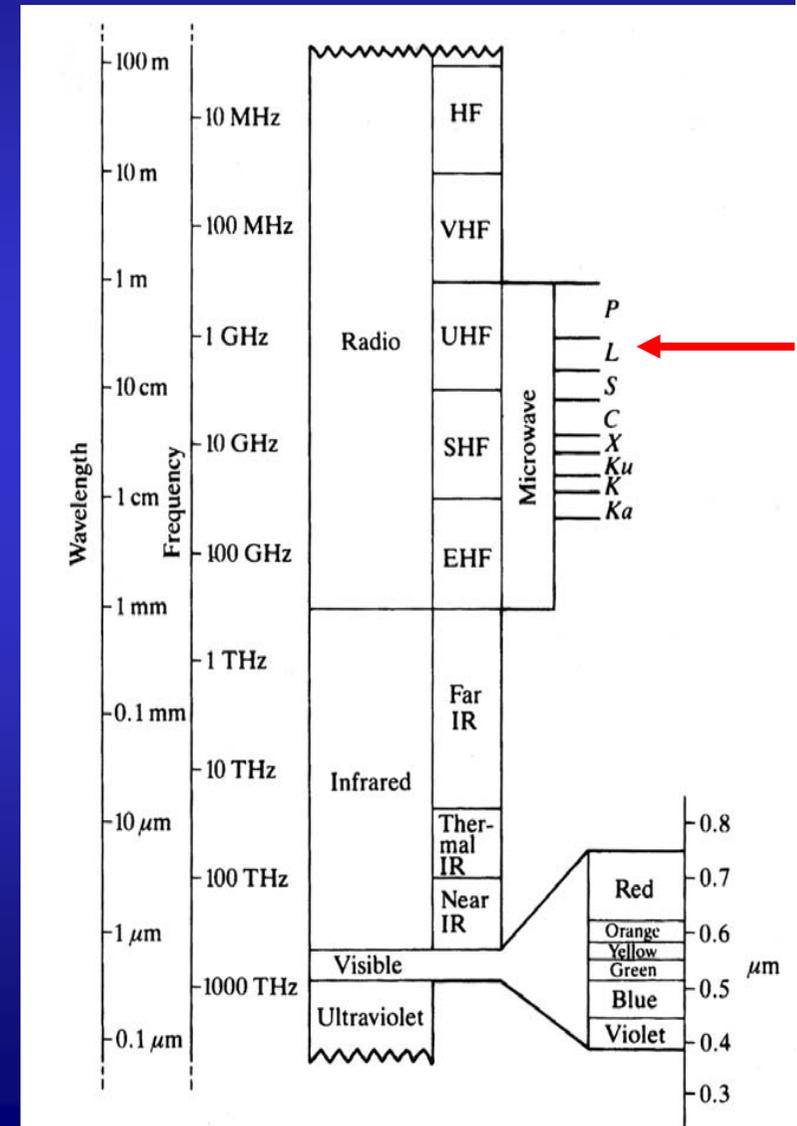


GPS Radio Okkultation

Signalquelle

GPS – Global Positioning System

- 24 (29) Satelliten, ~20.200 km Höhe
- Seit 1978, 1994 volle Konstellation
- ~1t schwer, ~5 m Durchmesser
- Kontrolle und Steuerung durch Bodennetz
- ~55 Grad Inklination
- 2 Frequenzen:
1575,42 MHz (19 cm)
1227,60 MHz (24 cm)
- Positionierung mit mm-Genauigkeit





GNSS Radio Okkultation



Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

GLONASS

Russland; seit 1982; 1996 (21 Satelliten); 2001 (9)

64,8 ° Inklination, ~20.000 km Orbit

*$f_1=1602 \text{ MHz}+k*562,5\text{kHz}$; $f_2=1246 \text{ MHz}+k*437,5\text{kHz}$*

GALILEO

ESA, ~2010 geplant, 30 Satelliten, 23200 km

KOMPASS

China, 5 im Orbit, 30 Satelliten bis 2015, 22000 km

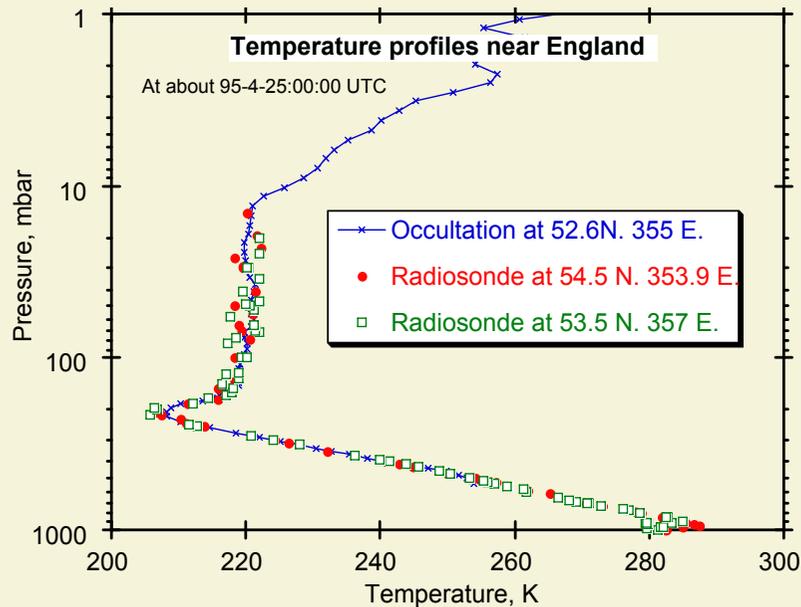
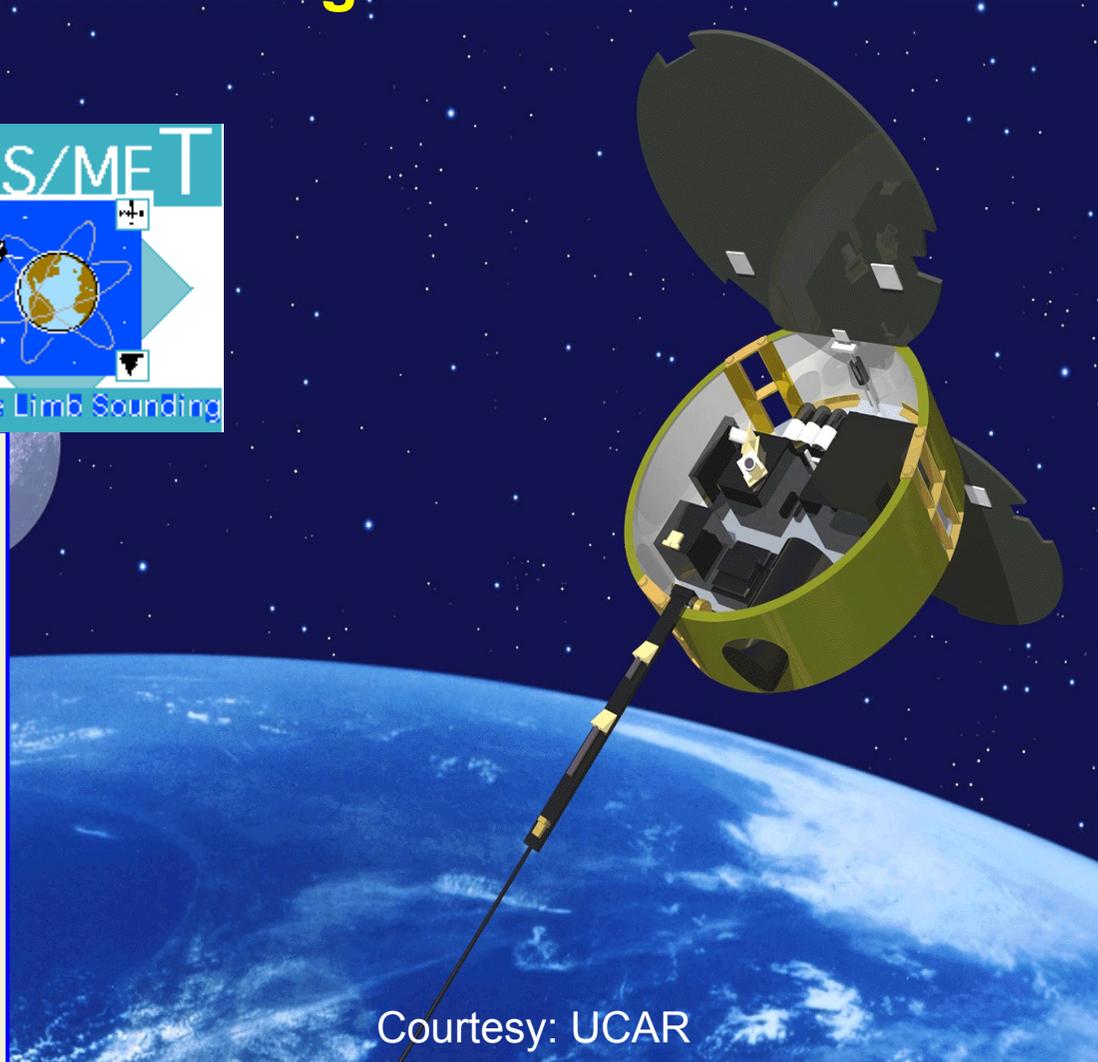


1. RO Mission GPSMet



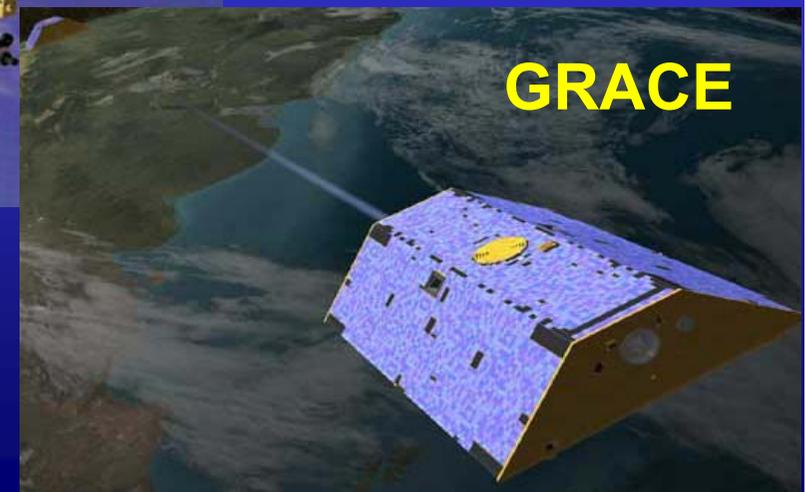
GPS Empfänger auf Satellit in niedriger Erdumlaufbahn (Low Earth Orbit LEO)

U.S. GPS-MET Experiment
auf MicroLab-I 1995
Messungen 1995-1997
'Proof of Concept' Mission



Courtesy: UCAR

RO Missionen (2)



(courtesy J. Wickert)



RO mit CHAMP

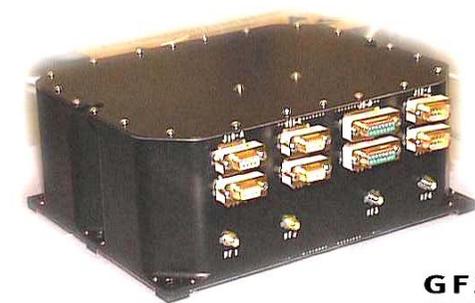


**CHAMP ist seit
July 15, 2000 im Orbit
Kontinuierliche
Messungen
seit Sep 2001**

**Okkultationsantenne
(„Satellitenauge“)**

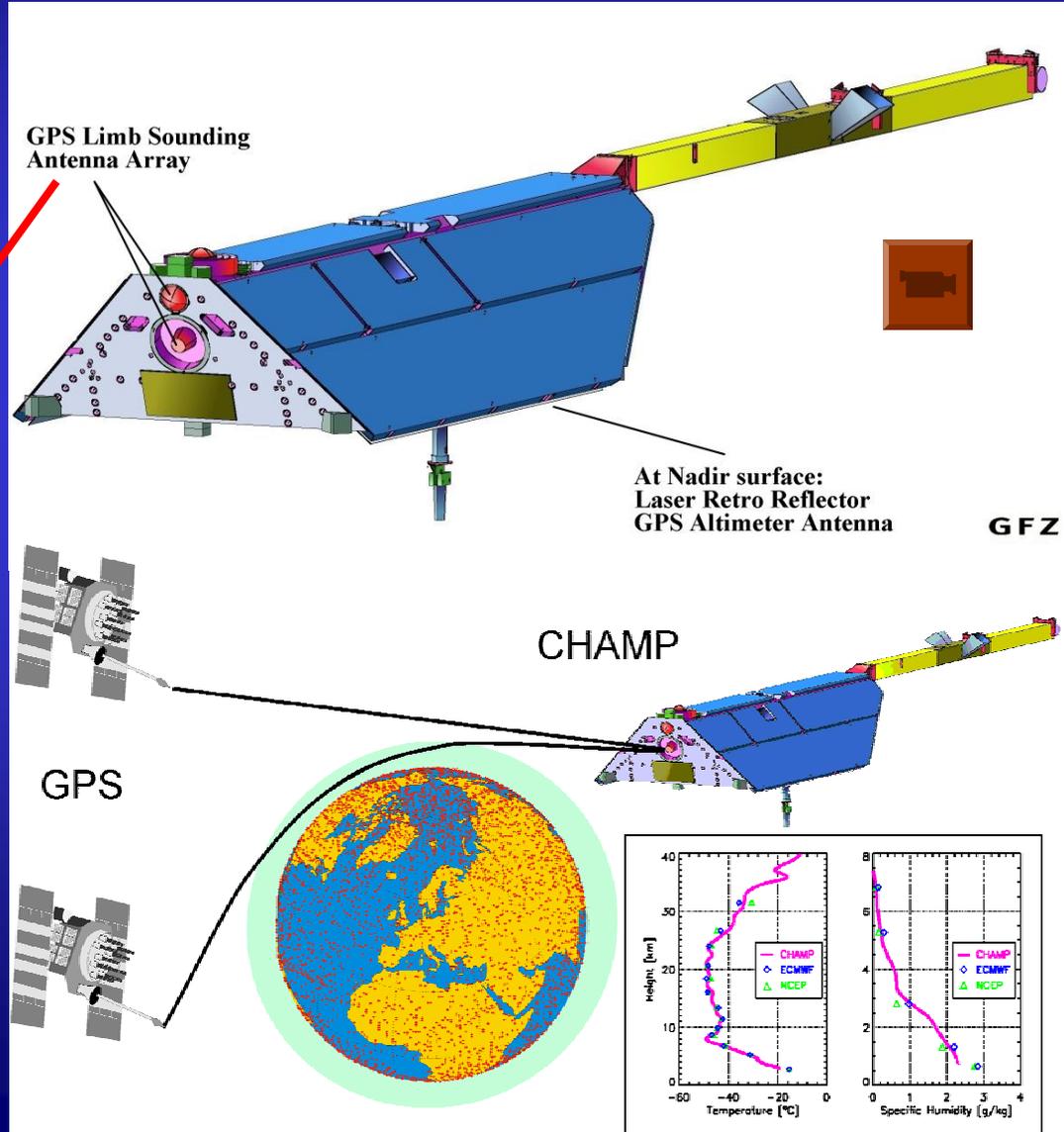
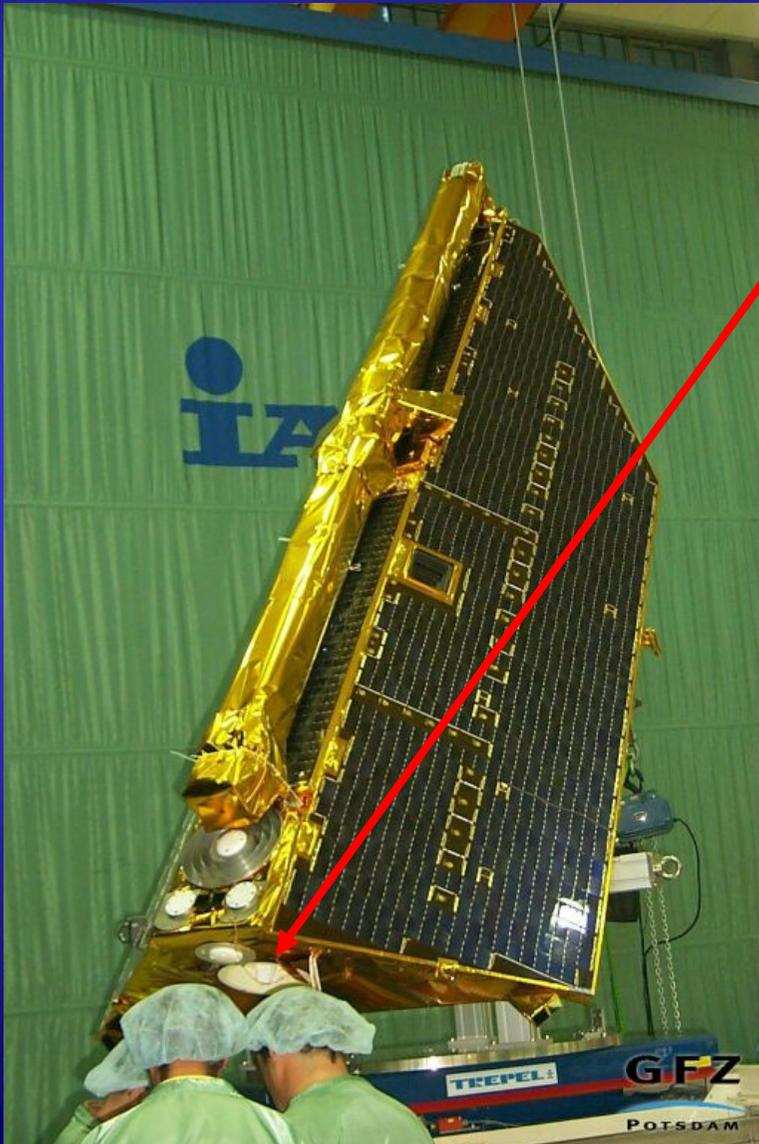


**GPS Empfänger
an Bord von CHAMP**



Courtesy: J. Wickert

RO mit CHAMP

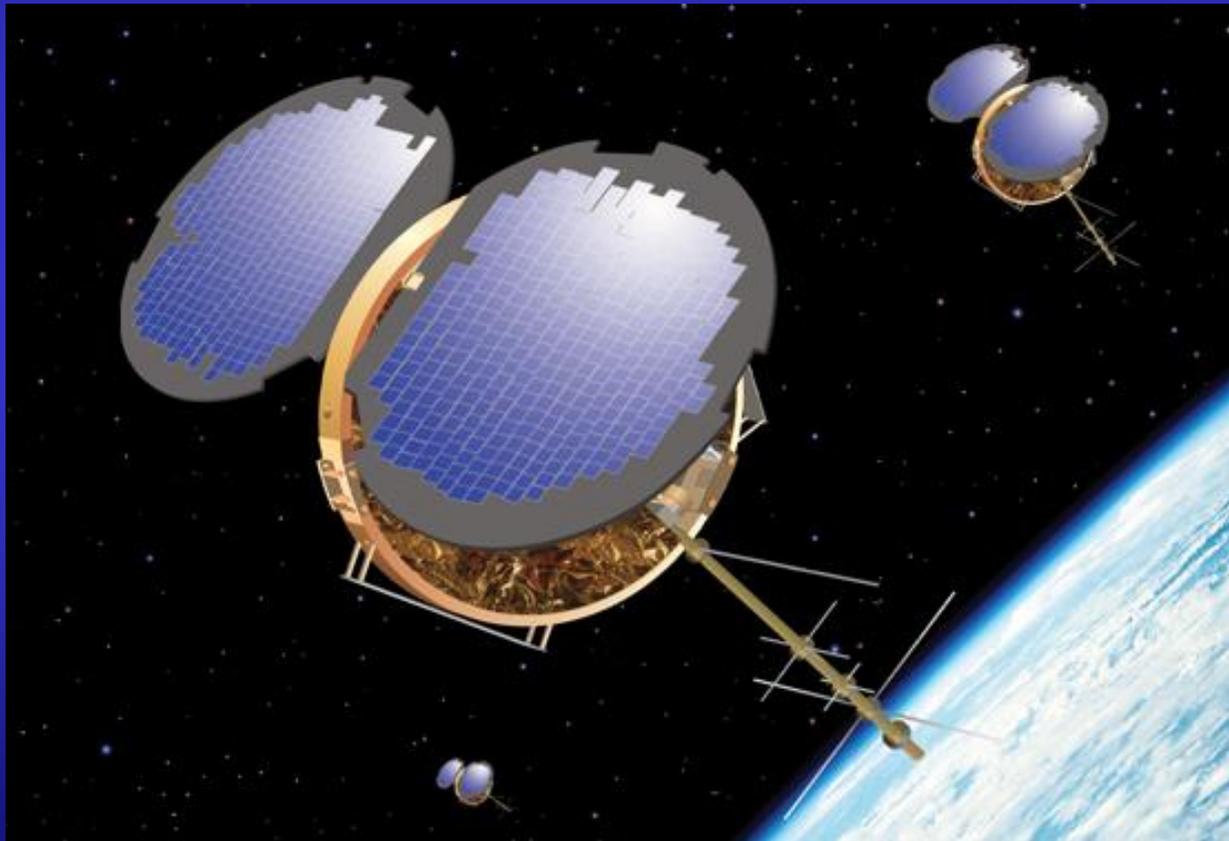




RO mit F3/COSMIC



Formosat-3/COSMIC



FORMOSAT-3/COSMIC

Taiwan/US Mission

6 Satelliten

Start am 14. April, 2006

~800 km Umlaufbahn

~2500 RO Profile pro Tag



RO mit Metop/GRAS



MetOp A



MetOp

Europäische Mission
Start 19. Oktober, 2006
~800 km Umlaufbahn
~600 RO Profile pro Tag
Erster von 2 weiteren
Satelliten (MetOp A, B, C)
im Abstand von 5 Jahren
Operationell 15 Jahre

GRAS

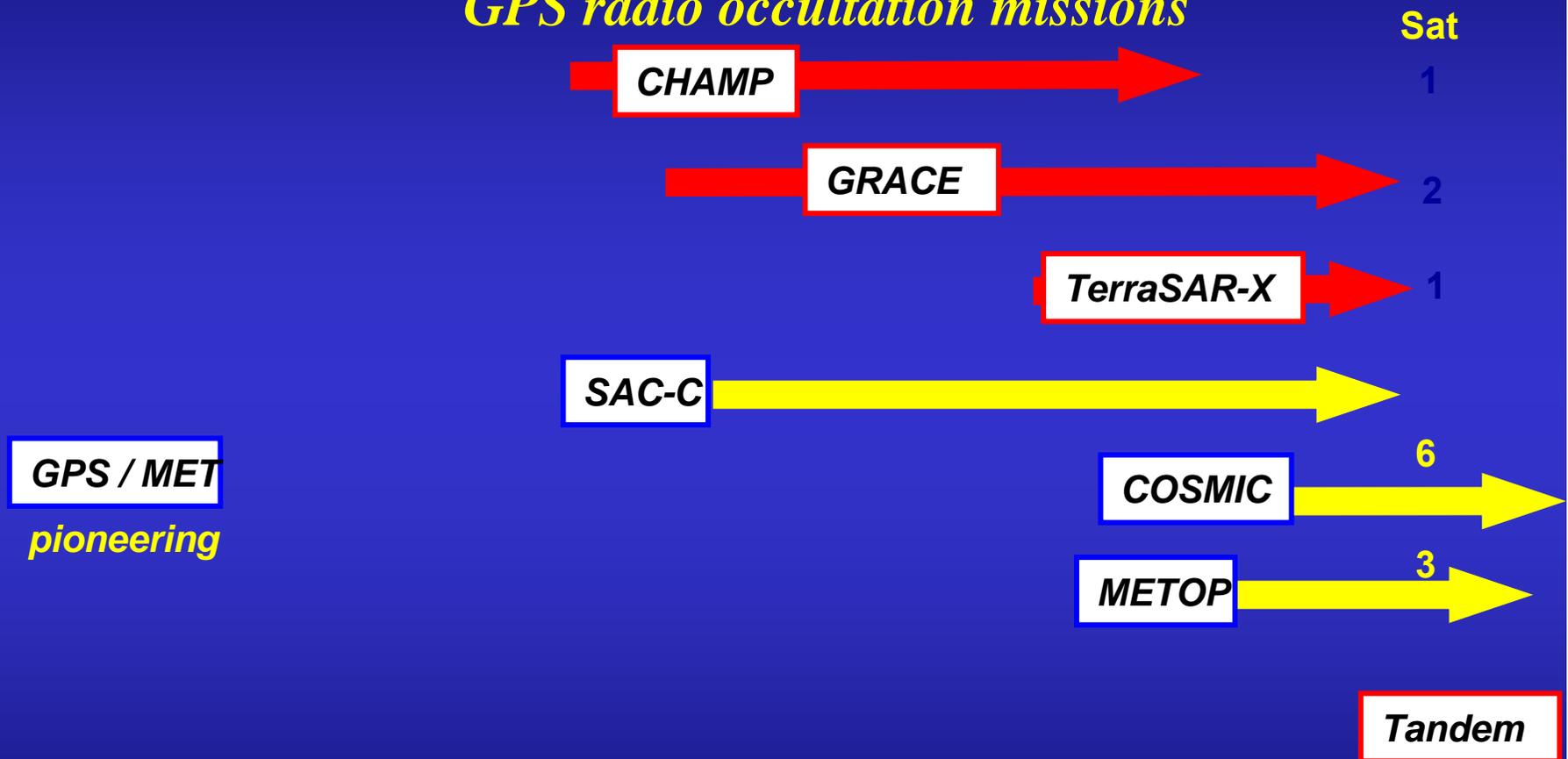
GNSS Receiver for
Atmospheric Sounding
neuer Empfänger



Fernerkundung / Radio-Okkultationsmethode

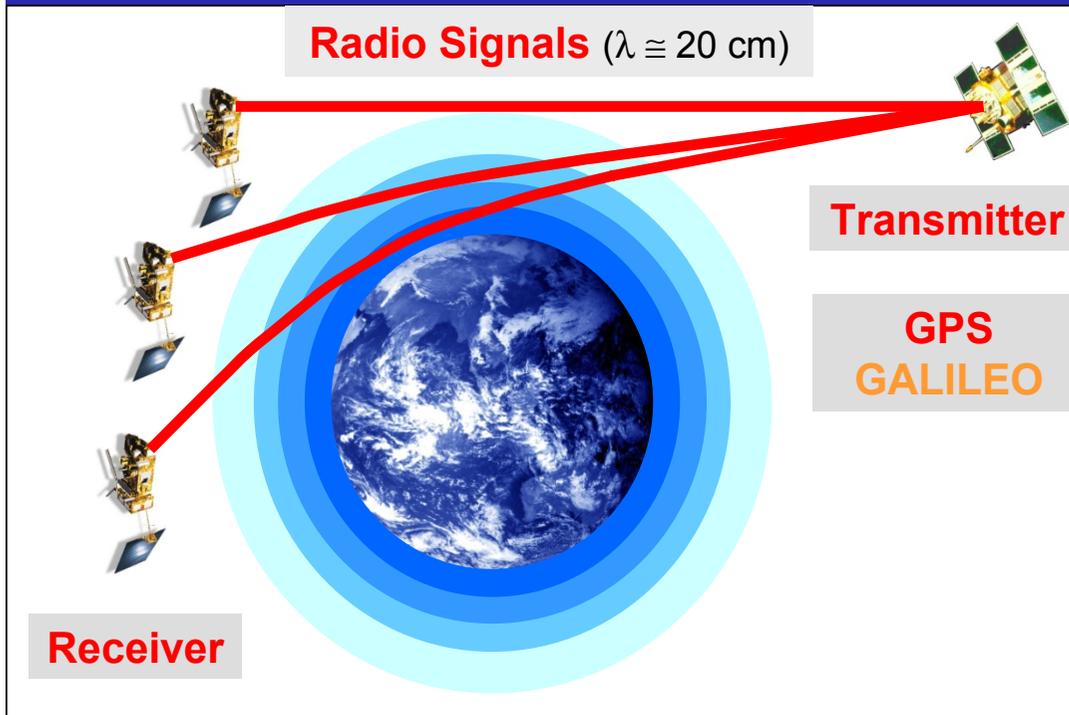
RO-Missionen: Satelliten im Low Earth Orbit (LEO)

GPS radio occultation missions



1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010

Radio Okkultations Prinzip



Satellite in Low Earth Orbit:
GPS/MET, CHAMP,
SAC-C, GRACE, COSMIC, MetOp, Oceansat-2 ...

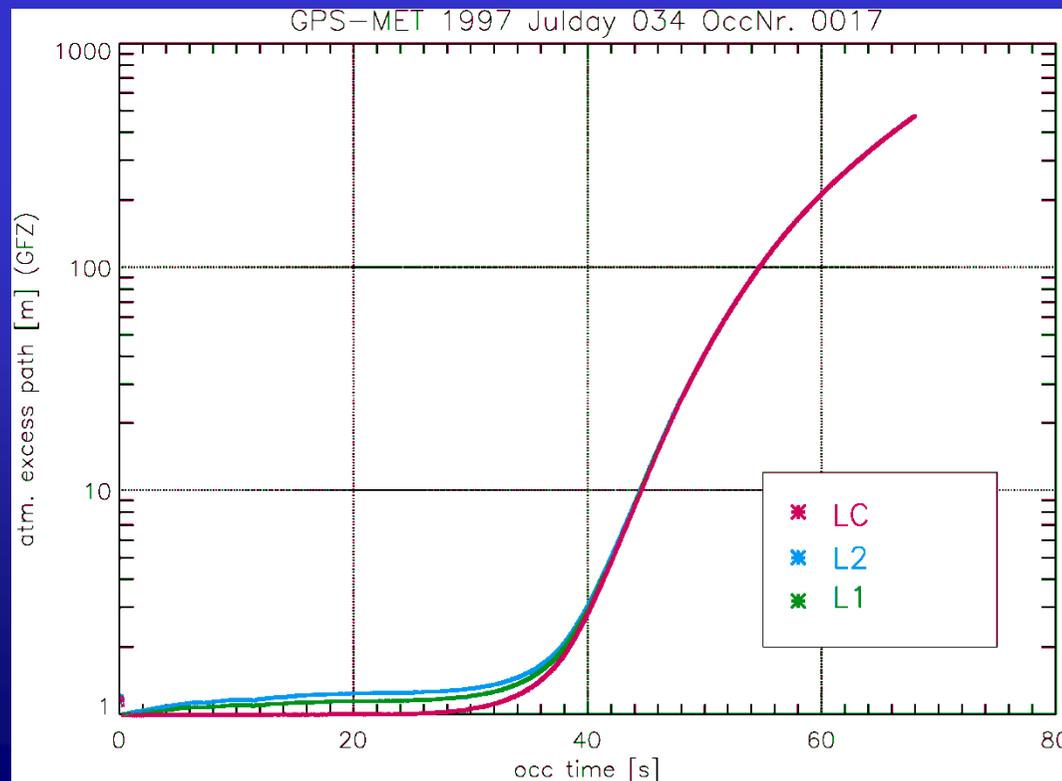
GPS-LEO

Satellitenkonstellationen

- Radio-Okkultationsbeobachtungen
- mittels Atmosphärensondierung
- Brechung des EM Radiosignals entlang des Strahlweges
- Messung des Phasenwegs durch die Atmosphäre
- Gewinnung von atmosphärischen Klimaparametern:
 Refraktivität, Dichte, geopotentieller Höhe (Höhe konst. Druckflächen), Temperatur, Feuchte.

RO Messungen

Messdaten: Phasenwegsverlängerung (atmospheric phase delay) (L1,L2) und Amplituden für beide Frequenzen f_1 und f_2 . Der **Phasenweg** beinhaltet den **geometrischen Weg (Vakuum)** und den **zusätzlichen Weg aufgrund der Atmosphäre und Ionosphäre (Refraktivitätsfeld)**. Der geometrische Weg wird abgezogen und der größte Teil des Ionosphäreneinflusses wird durch lineare Kombination von **L1** und **L2** eliminiert. Übrig bleibt der atmosphärische Phasenweganteil **LC**.

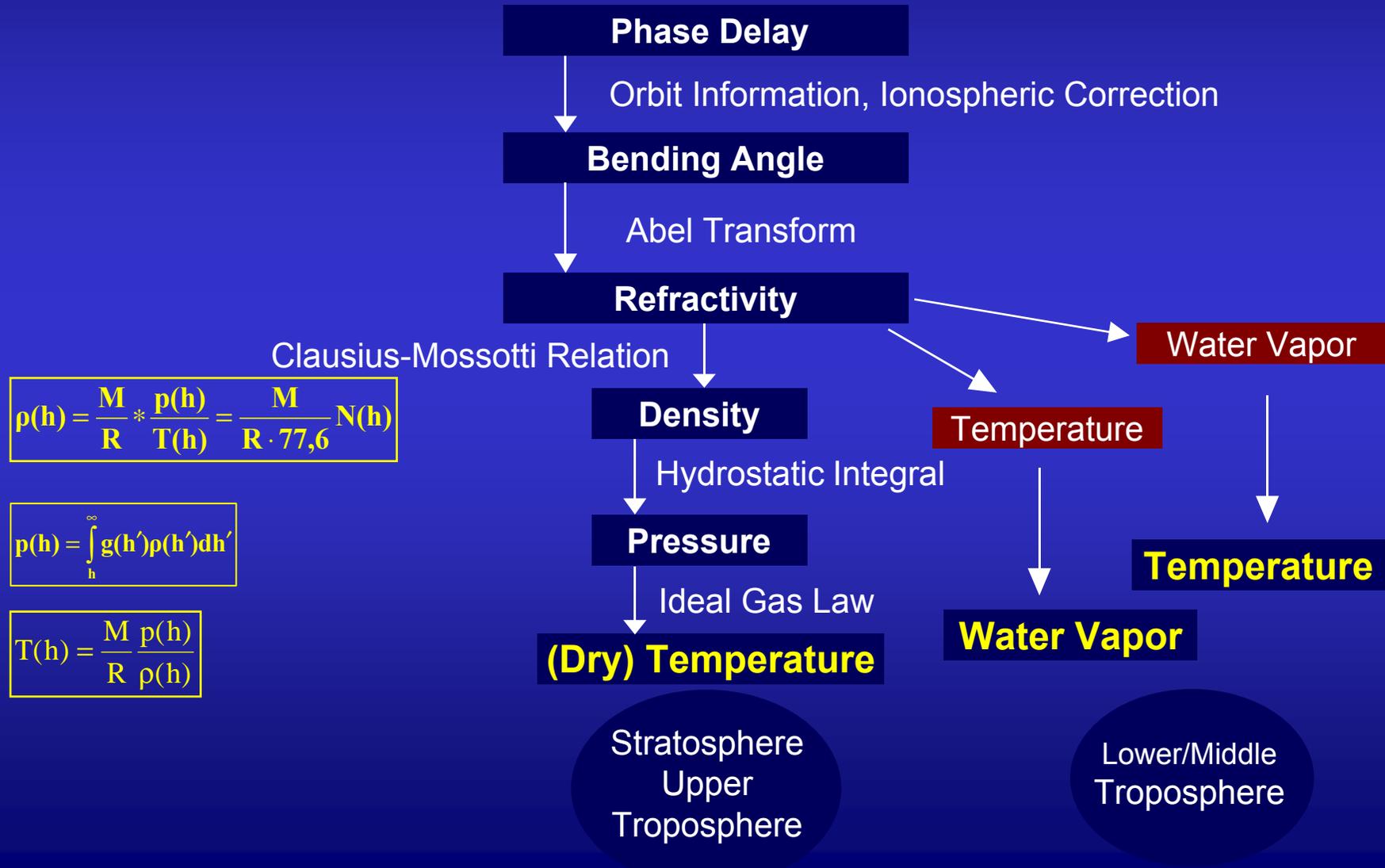


Atmosphärischer Phasenweg

- ~ 1 mm Mesopause
- ~ 20 cm Stratopause
- ~ 20 m Tropopause
- ~ 1-2 km Surface

RO Retrieval (1)

Von der Messung zur Temperatur



$$\rho(h) = \frac{M}{R} * \frac{p(h)}{T(h)} = \frac{M}{R \cdot 77,6} N(h)$$

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

$$T(h) = \frac{M}{R} \frac{p(h)}{\rho(h)}$$

RO Retrieval (2)

Von der Messung zur Temperatur

Refraktivität

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

Trocken-, Feuchte-, Ionosphären- und Streuterm

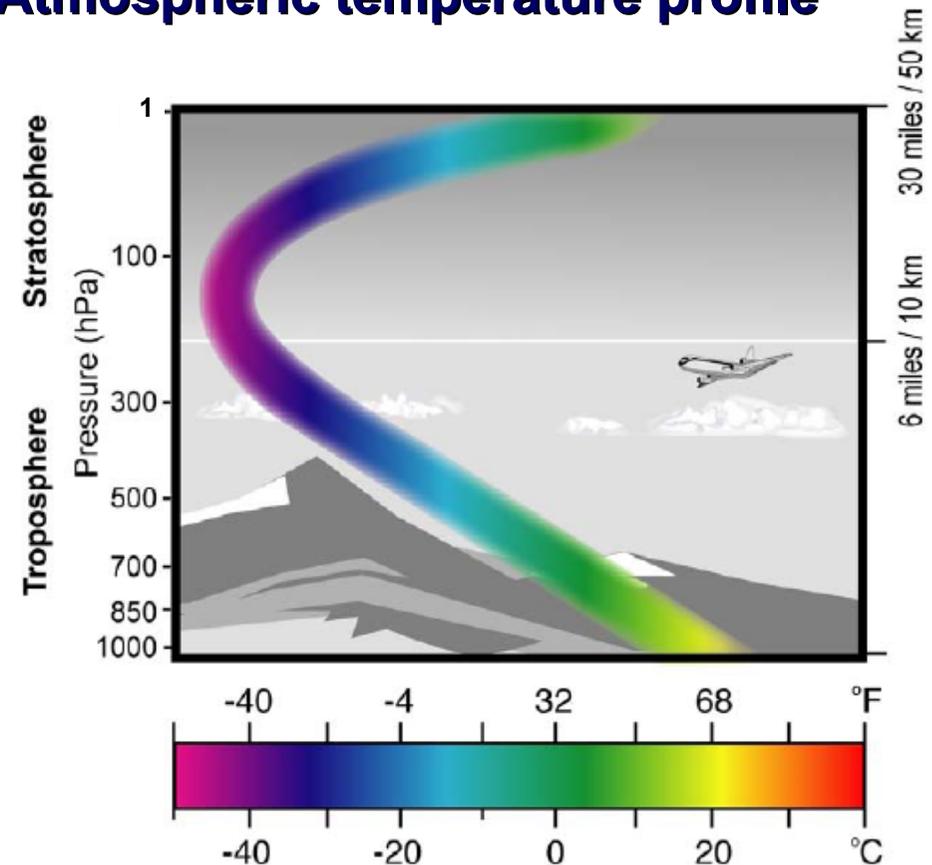
$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{p_w}{T^2} - 4,03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1,4 \times W .$$

| | |
|-------|------------------|
| n | Brechungsindex |
| N | Refraktivität |
| T | Temperatur |
| p | Druck |
| p_w | Wasserdampfdruck |
| n_e | Elektronendichte |
| f | Frequenz |
| W | Flüssigwasser |

RO Dateneigenschaften

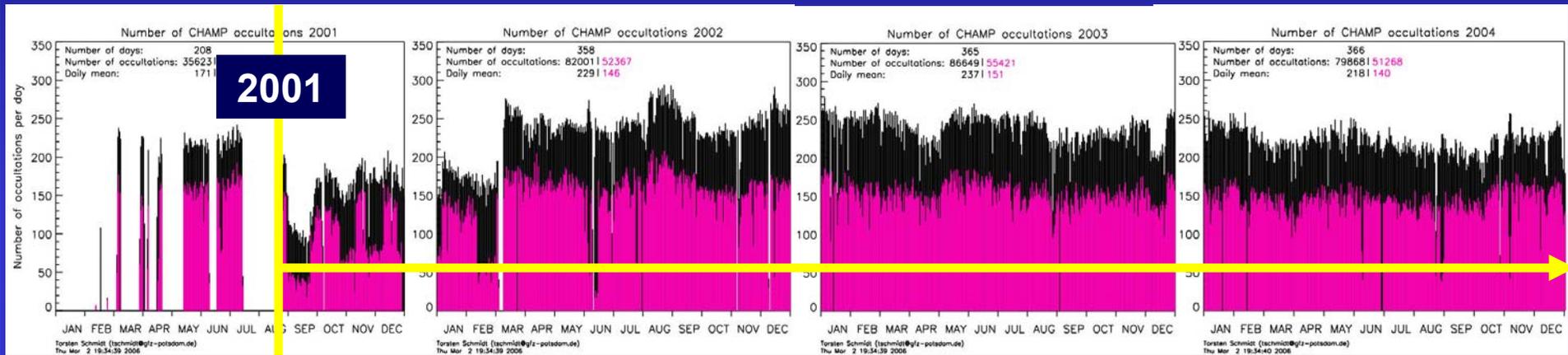
- **Globale Bedeckung**
~250 Profile pro Tag (CHAMP)
130 – 180 atmosphärische Profile pro Tag
- **Allwettertauglichkeit**
- **Hohe vertikale Auflösung und Genauigkeit**
in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre (UTLS)
~8 – 30 km
- **Langzeitstabilität**
aufgrund Selbstkalibrierung (SI traceability); Klimabeobachtung:
Troposphäre 0.05 K pro Jahrzehnt
Stratosphäre 0.1 K pro Jahrzehnt

Atmospheric temperature profile

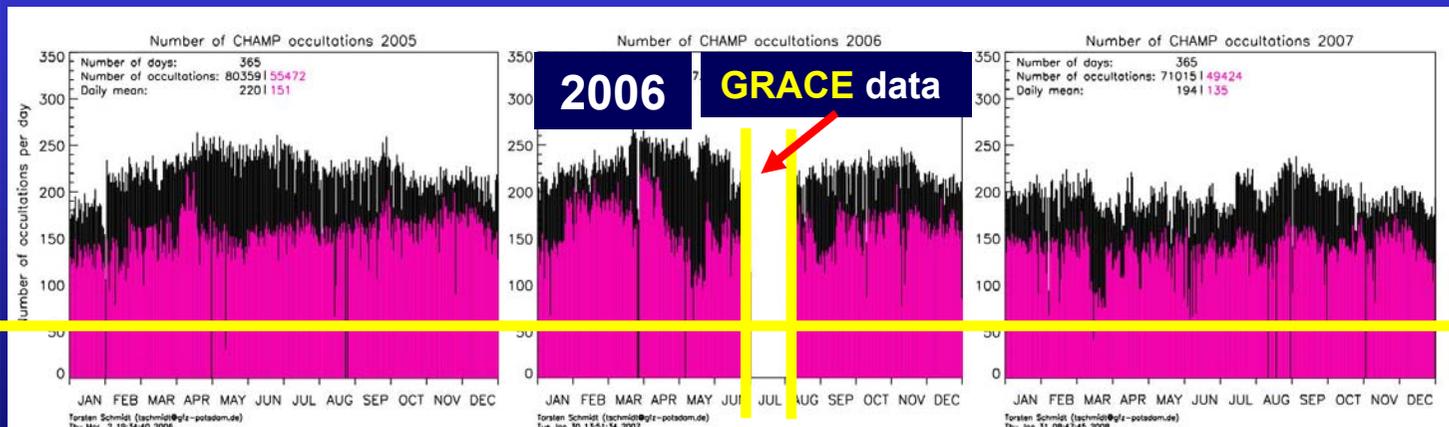


Karl et al., 2006

CHAMP RO Datensatz



© T. Schmidt, GFZ Potsdam



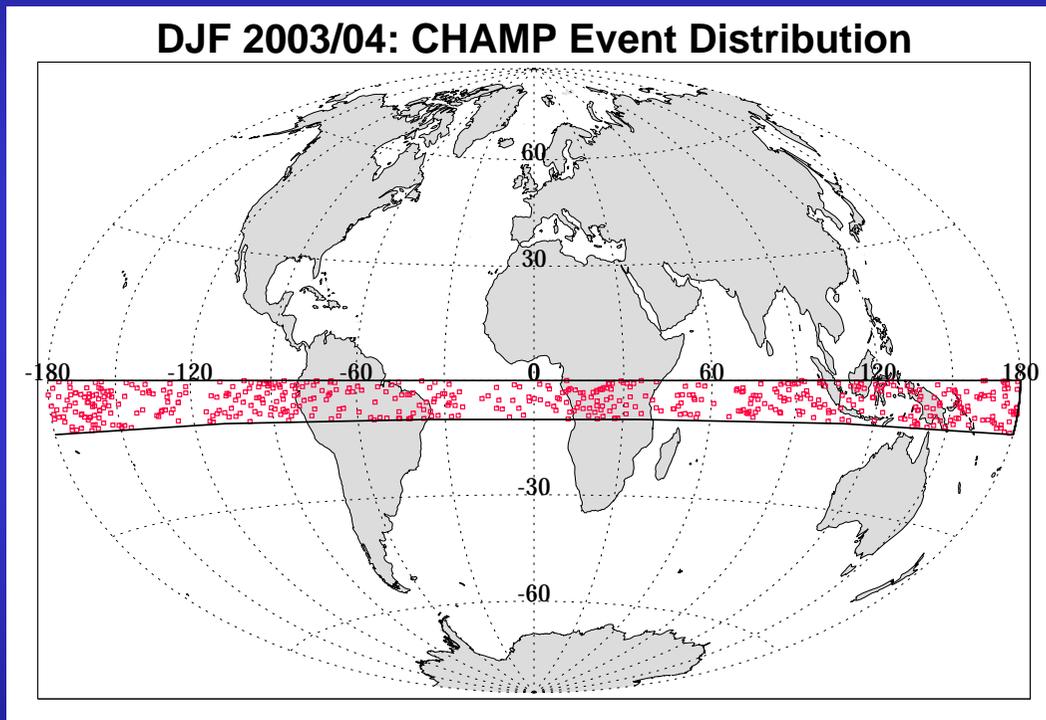
~130 – 180 RO
Atm. Profile/Tag

**Oktober
2008**

CHAMP: 1. kontinuierliche Zeitreihe von RO Daten

Erstellung von RO Klimatologien

Beispielsaison: Winter 2003/04



Zonale Mittel,
Seasonale Klimatologien:
Trockene Temperatur

- CHAMP RO Phasendaten von GFZ Potsdam
- Berechnung RO Klimatologien WegCenter Graz
- Mittelung von Einzelprofilen in vordefinierten Bereichen
- 18 zonal gemittelte Bänder in 10° Breitenausdehnung
- Zonal gemittelte Felder durch „binning and averaging“



Qualität der Klimatologien

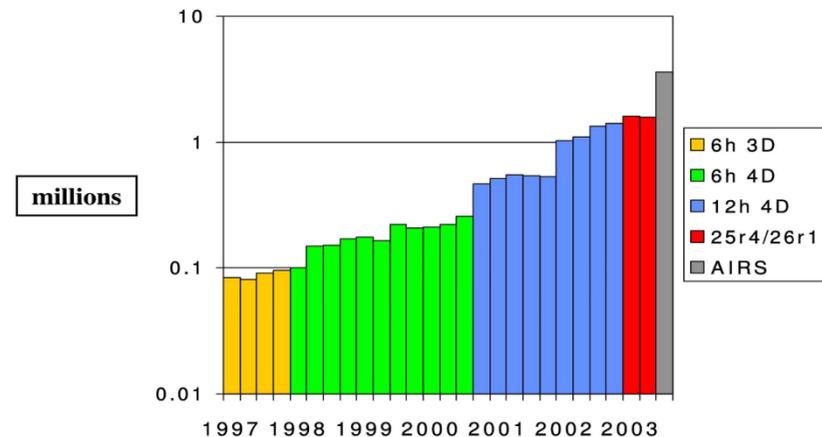


Vergleich der RO-basierten Klimatologien mit Analysefeldern des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage
 ECMWF Analysen werden auf Basis eines Atmosphärenmodells unter Einbindung von Millionen von Beobachtungsdaten erstellt.

**Systematische Differenz:
 ECMWF minus CHAMP**

Abtastfehler (Sampling Error):
 Fehlerabschätzung wie gut RO die Atmosphäre abtastet in Raum und Zeit
**“Wahre” Profile an RO Lokation minus
 “wahres” mittleres Feld**

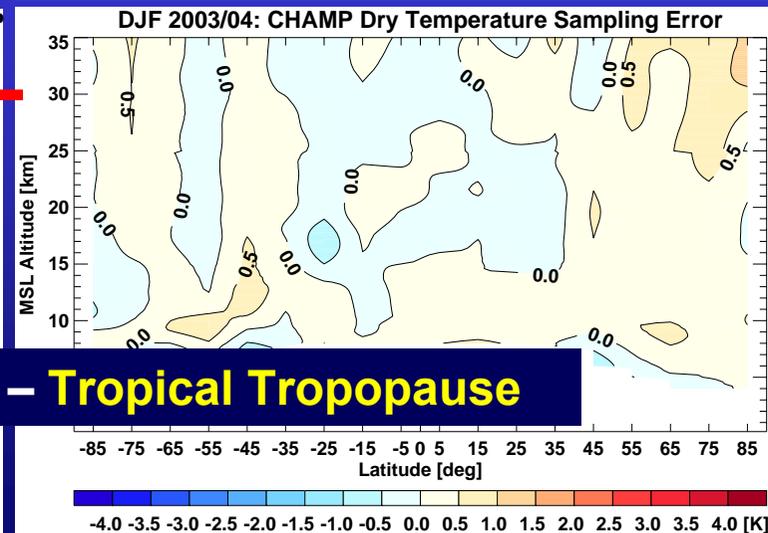
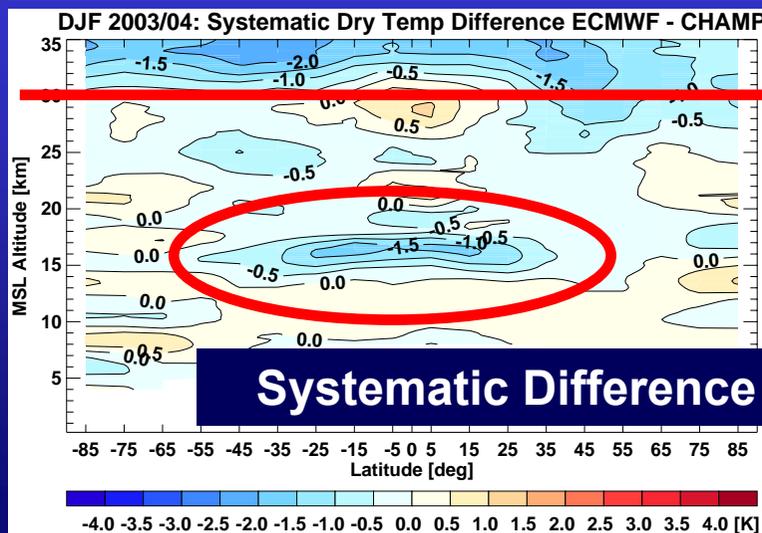
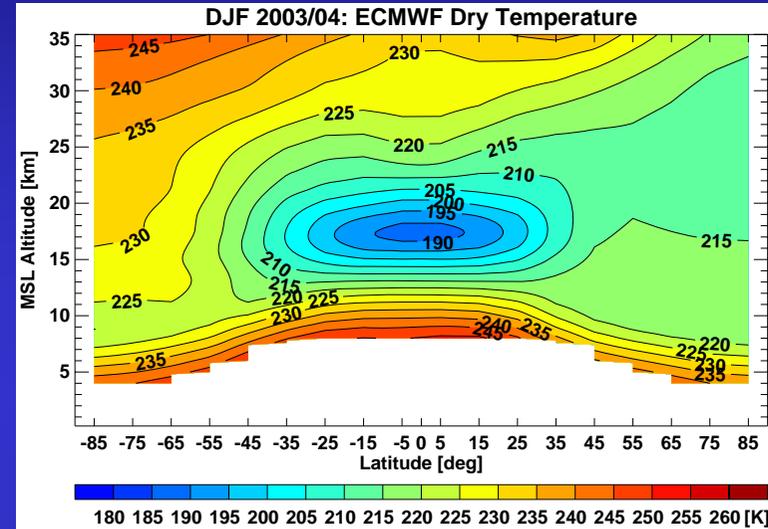
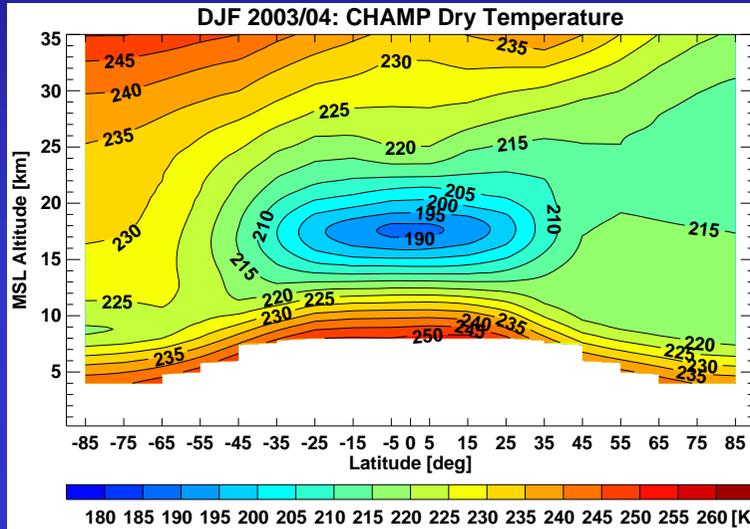
Number of observational data used in the ECMWF assimilation system (with AIRS)



© Crown copyright, Marquard, OPAC-2 presentation, 2004

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecast

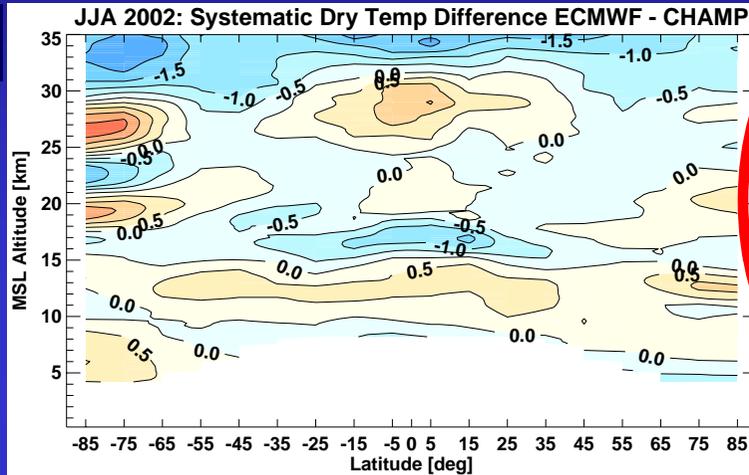
Temperaturfeld - Winter 2003/04



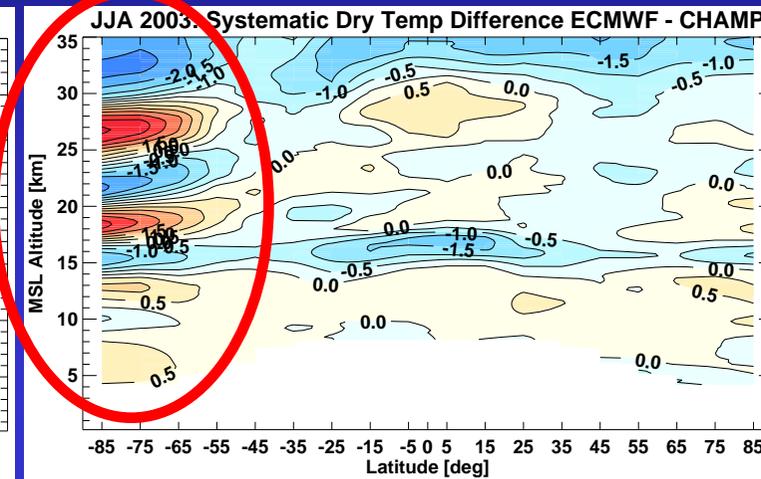
Systematic Difference – Tropical Tropopause

Systematische Differenz Sommer

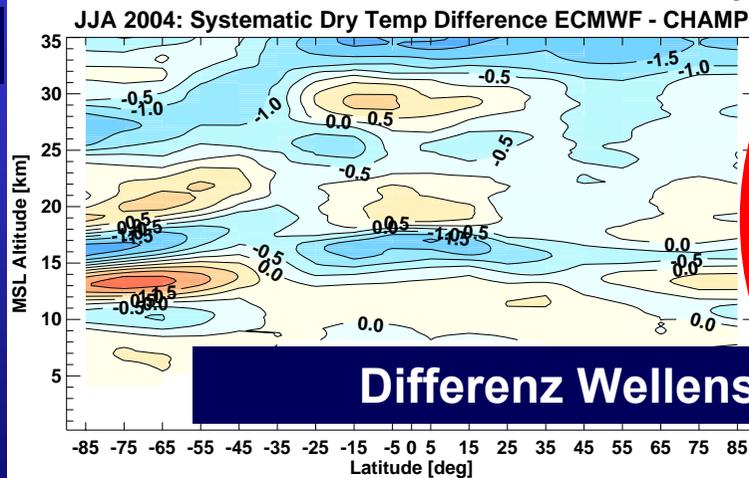
2002



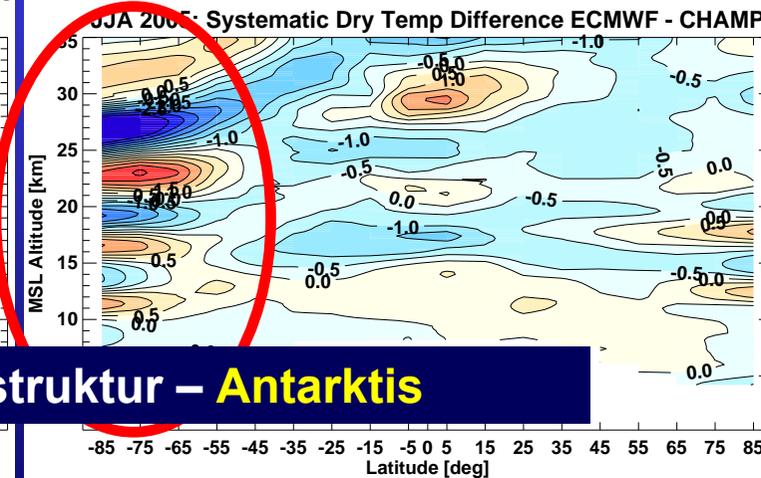
2003



2004



2005



Differenz Wellenstruktur – Antarktis

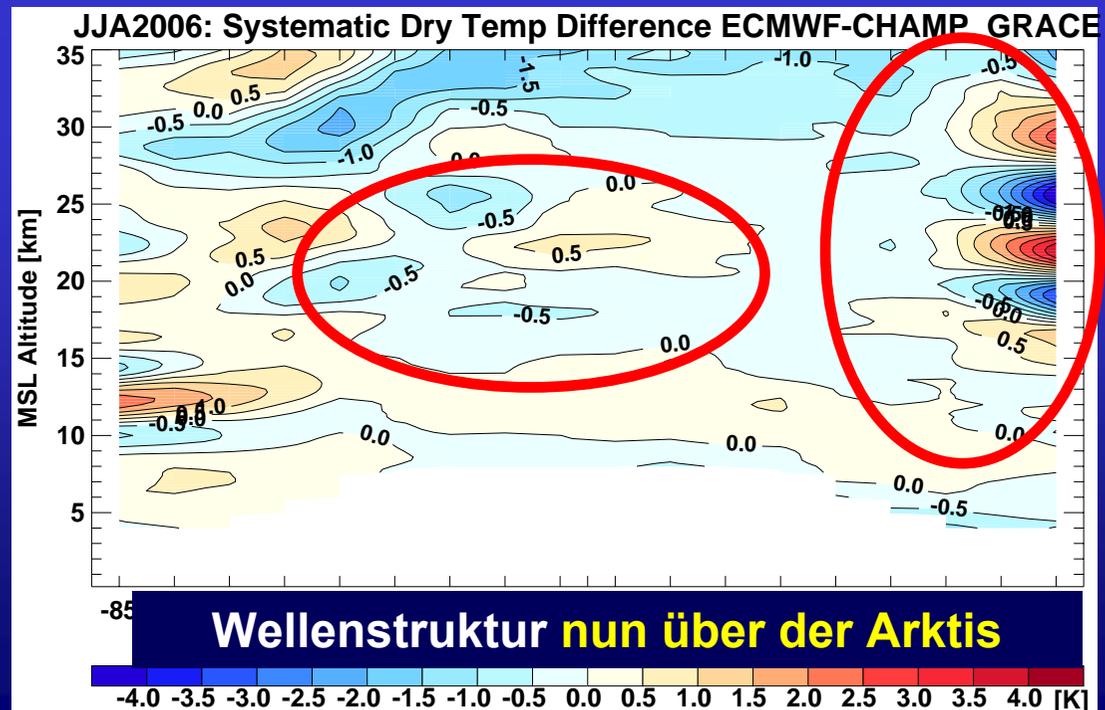
Systematische Differenz – JJA2006

Februar 2006: **Änderung bei ECMWF**

Horizontale Auflösung: T511 → T799

Vertikale Auflösung: L60 → L91

Obergrenze: 0.1 hPa → 0.01 hPa





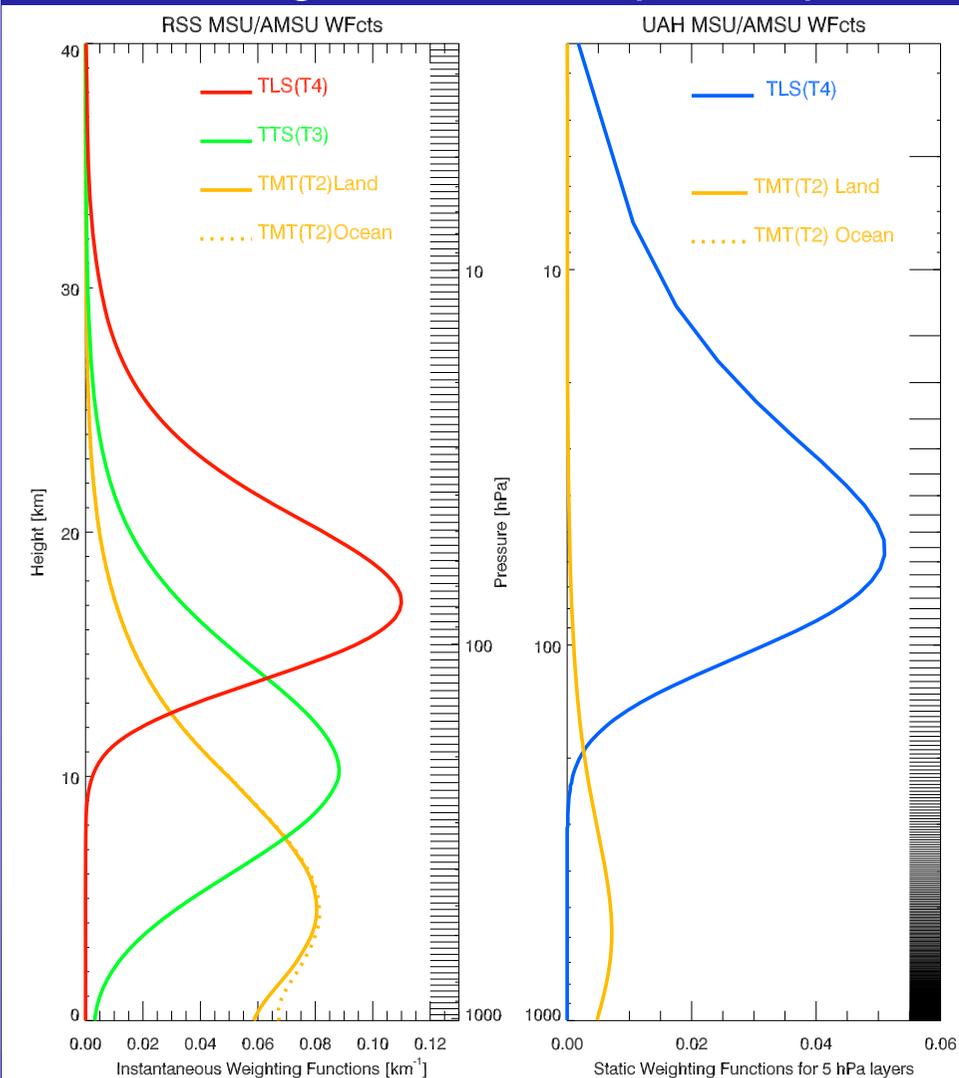
Vergleich von Atmosphären Daten



- **Radio-Okkultationsdaten**
- **MSU/AMSU Mikrowellensondierung**
- **Radiosondendaten**

Vergleich von Atmosphären Daten

Umrechnung von RO Temperaturprofilen in MSU/AMSU Schichttemperaturen



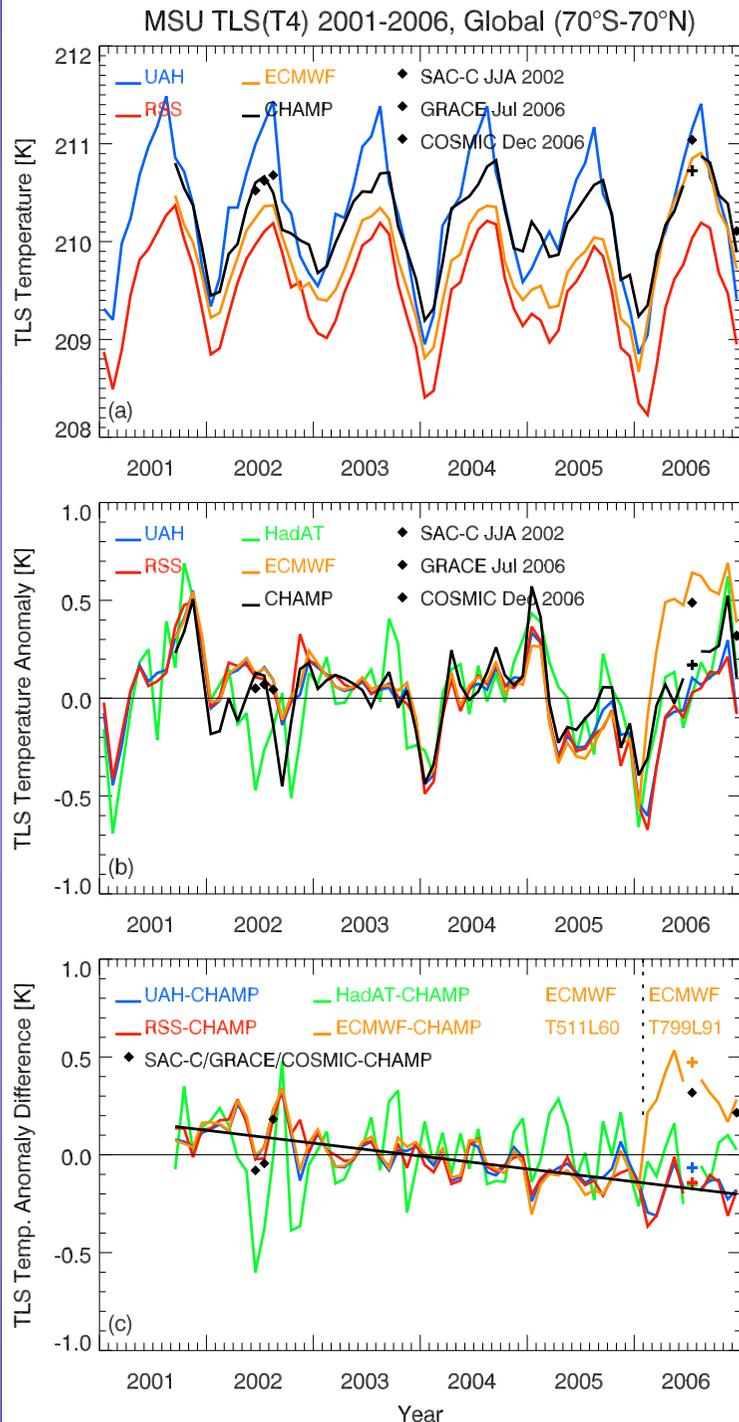
MSU/AMSU Globale Gewichte

Temperatur Lower Stratosphere TLS/T4
 (Temperature Tropo/Stratosphere TTS/T3)
 Temperature Middle Troposphere TMT/T2

Remote Sensing Systems, RSS, CA
 (links)

Gewichtsfunktionen als Funktion der
 Höhe [km]

Univ. of Alabama Huntsville, UAH (rechts)
 Mittlere Gewichtsfunktionen für 5 hPa
 Druckschichten



Vergleich von RO, (A)MSU und Radiosonden Temperaturen

TLS absolute Temperatur: Globale Unterschiede

UAH-CHAMP: +0.11 K (± 0.31 K)

RSS-CHAMP: -0.69 K (± 0.16 K)

TLS Temperaturanomalien:

= Absolute Temperatur minus Mittelwert von 2001-05

Gute Übereinstimmung der MSU Anomalien mit den CHAMP RO Anomalien

Differenz der TLS Temperaturanomalien:

- Radiosondendaten stimmen mit CHAMP Daten gut überein

- MSU Daten weisen einen statistisch signifikanten Unterschied zu CHAMP RO in den Tropen auf

Tropen: -0.40 bis -0.42 K/5yrs

Global: -0.30 bis -0.36 K/5yrs

- Ursachen hierfür könnte die unterschiedliche vertikale Auflösung der RO und MSU Daten sein (Studie in Arbeit)



Tropopause



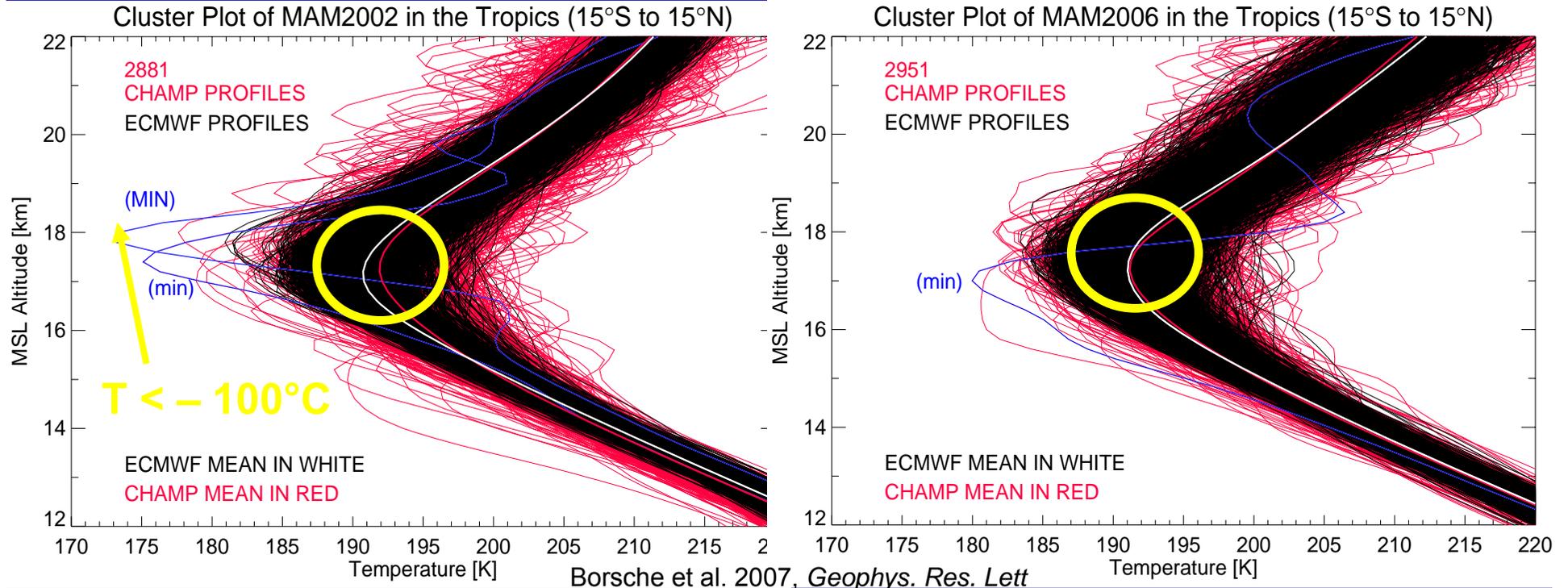
- **Übergang von Troposphäre zu Stratosphäre**
- **In etwa 8 km Höhe am Pol**
- **in etwa 16-18 km in den Tropen**
- **Temperaturminimum**
- **Definition “Cold Point Tropopause”**
- **Besonders ausgeprägt in den Tropen**
- **Tropopausentemperatur und Tropopausenhöhe als Klimawandel Indikatoren**

Tropische Tropopause

Tropopause: Übergang von Troposphäre in Stratosphäre
Mittleres Tropopausenprofil in den Tropen

MAM 2002

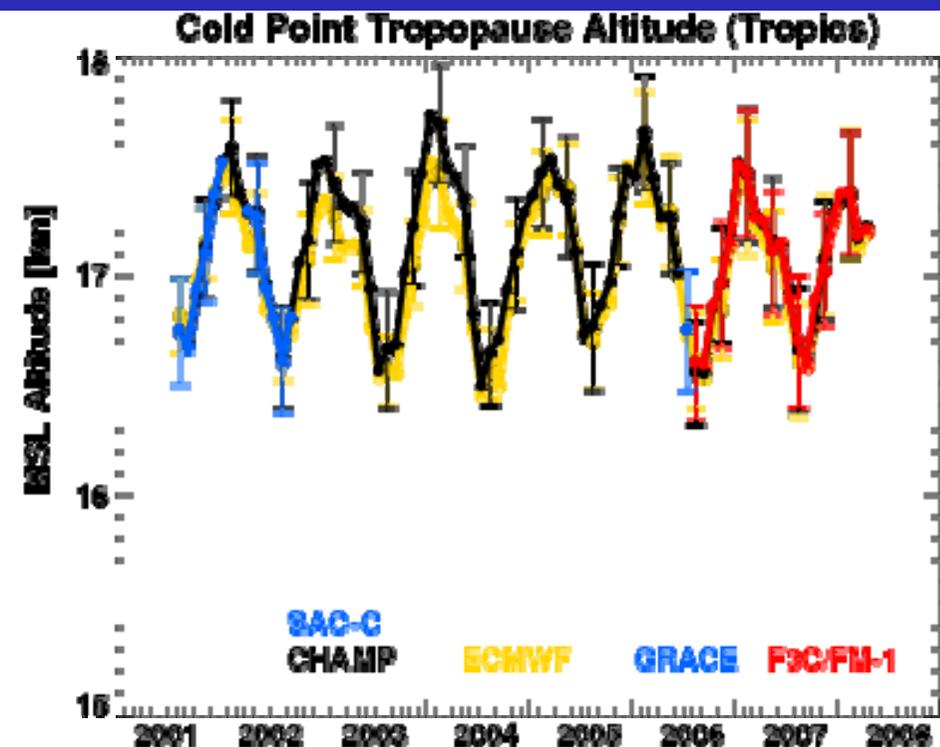
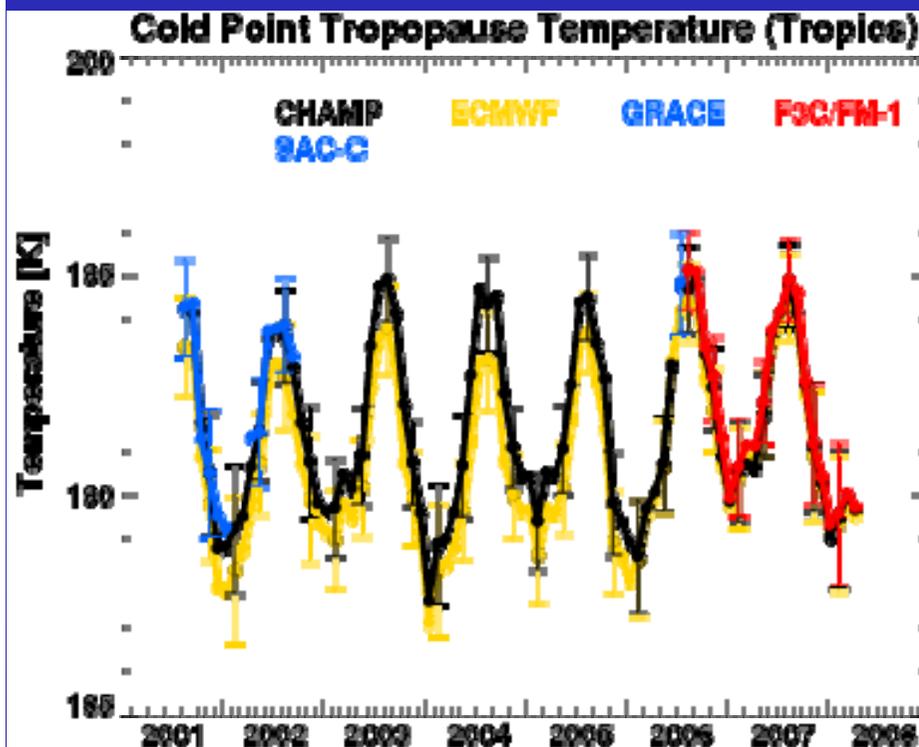
MAM 2006



Systematische Differenz in der tropischen Tropopausen-region verschwindet mit neuem ECMWF Analysen (bis Feb06 war ECMWF Tropopause zu kalt)

Tropische Tropopause

Zeitliche Entwicklung der „Cold Point Tropopause“ 2001-2006

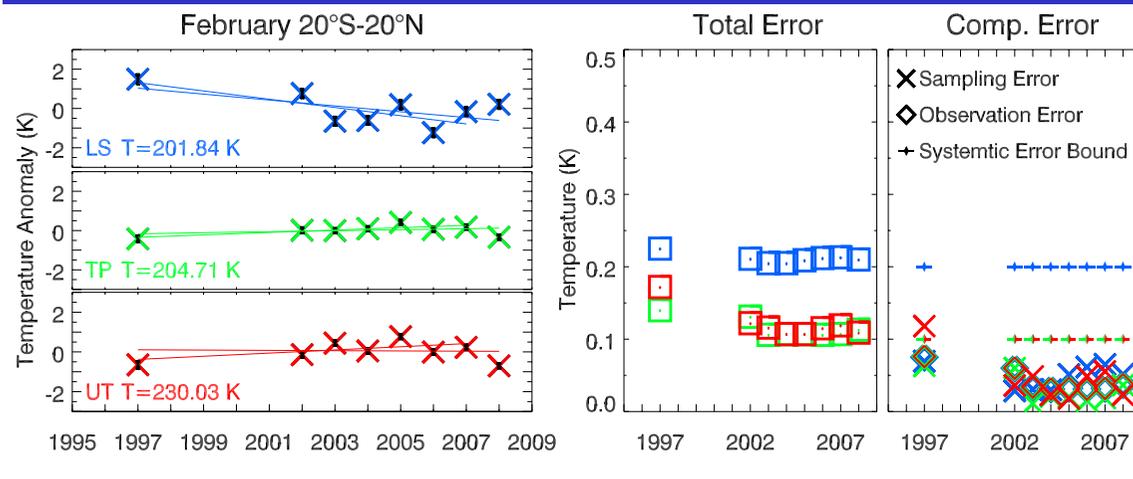


- ECMWF upgrade im Februar, 2006; danach ist ECMWF ähnlich CHAMP
- RO Missionen untereinander sehr ähnlich => Konsistenz unterschiedlicher RO Daten

RO Temperaturdaten und Fehler

February 1997- 2009, Tropen

Trendstudie
GPSMet Daten 1995
CHAMP Daten 2001-2008
COSMIC Daten 2009



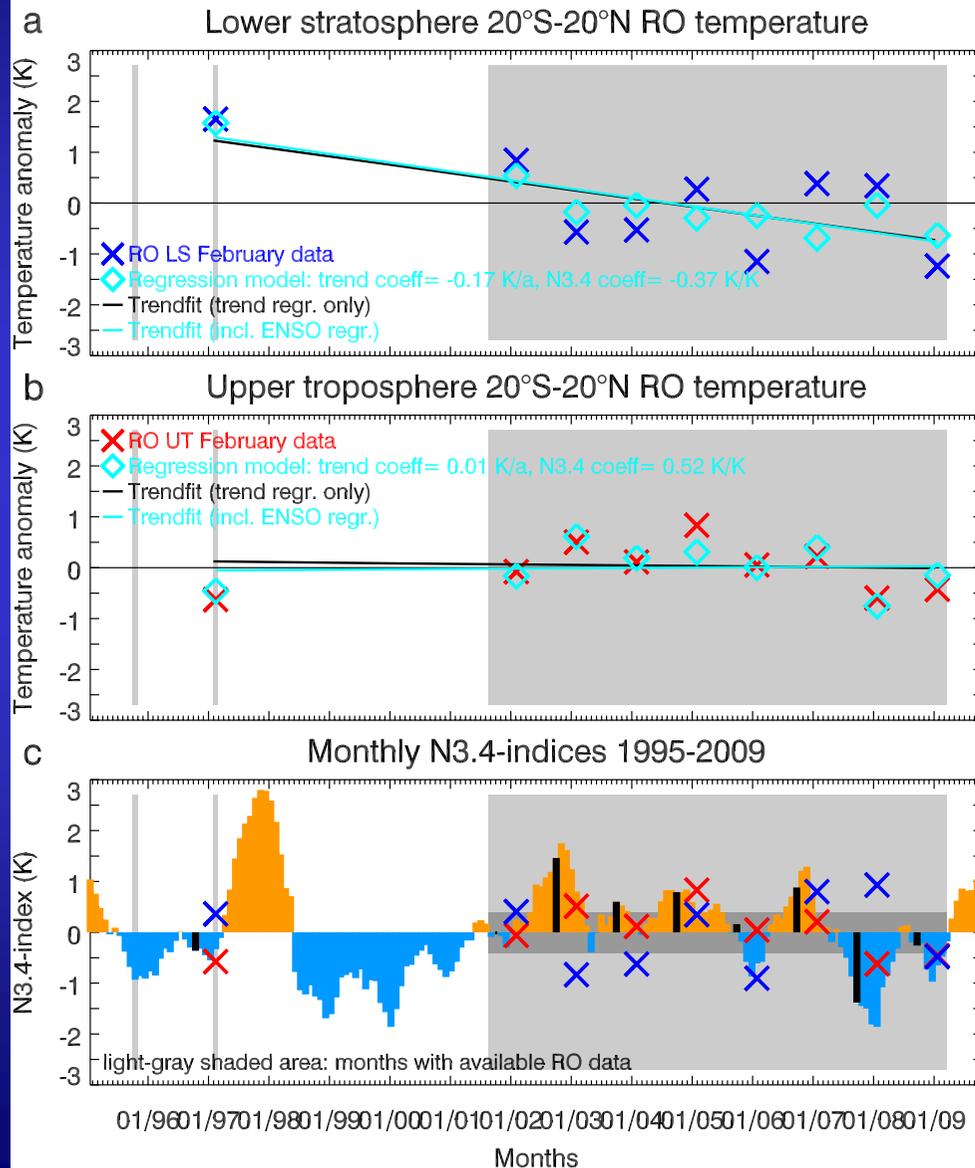
Berücksichtigung der Datenfehler
Max Total RO Datenfehler:
~0.5K im Februar 1997

Ergebnis:

Obere Troposphäre: Kein signifikanter Trend detektierbar, das natürliche Variabilität im betrachteten Zeitraum zu hoch

Untere Stratosphäre: Signifikanter Trend detektierbar Februar 1997-2008

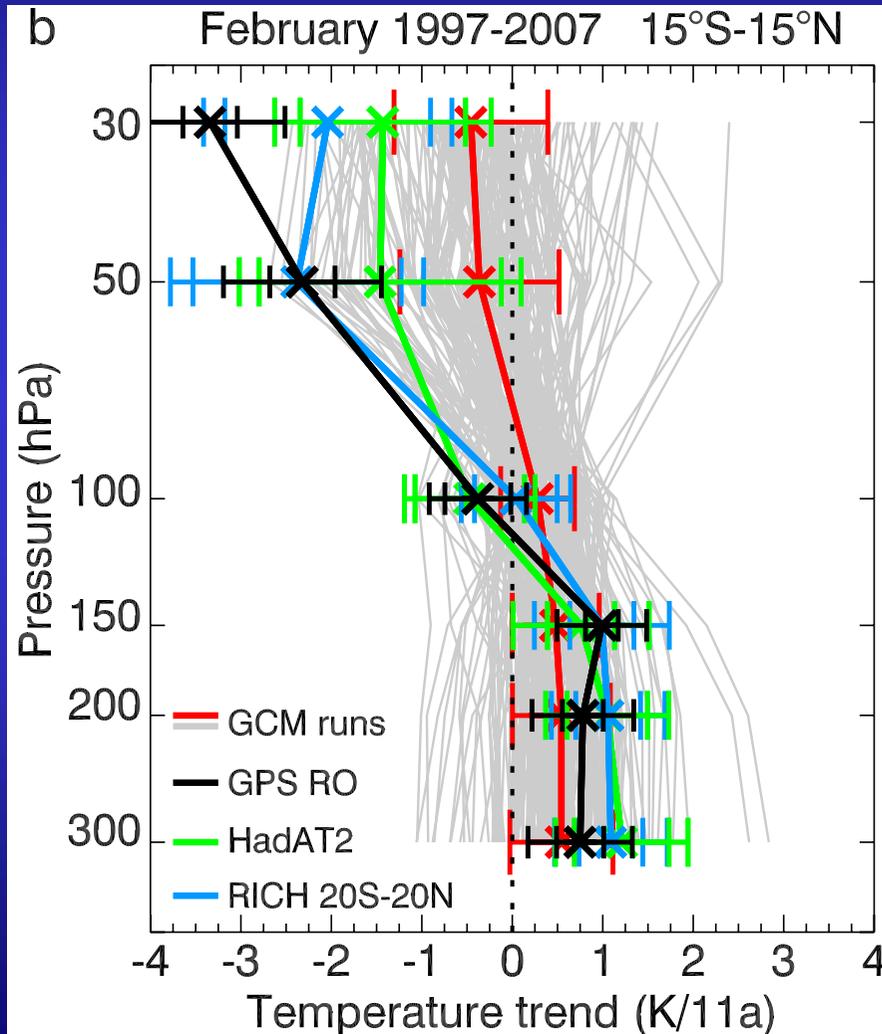
RO Trendstudie



Ergebnis:

- Untere Stratosphäre: Signifikanter Trend Februar 1997-2009
- Obere Troposphäre: Kein signifikanter Trend detektierbar, das natürliche Variabilität im betrachteten Zeitraum zu hoch
- Natürliche Variabilität

RO Trendstudie



Vergleich mit Modellen:

- rot: Modell
 - Schwarz: RO
 - Grün/blau: Radiosonden
-
- Trends zw. Beobachtungen und Modellen zeigen Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen



Zusammenfassung



- RO Messungen optimal geeignet für Klimabeobachtung der Atmosphäre
- RO Messungen haben das Potenzial zur Langzeitstabilität
- Konsistenz von RO Daten verschiedener Satelliten und verschiedener GPS Empfänger
- RO Messungen verbessern Wettervorhersagen
- Erstellung RO basierter Klimatologien für Studien der Atmosphäre und von Klimatrends



**Danke für Ihre
Aufmerksamkeit !**