



wege entstehen, indem wir sie gehen
paths emerge in that we walk them

Wegener Center
www.wegcenter.at



Atmospheric Remote Sensing and Climate System Research Group

ARSCISys

Monitoring der globalen Erwärmung mit GPS Satellitensignalen

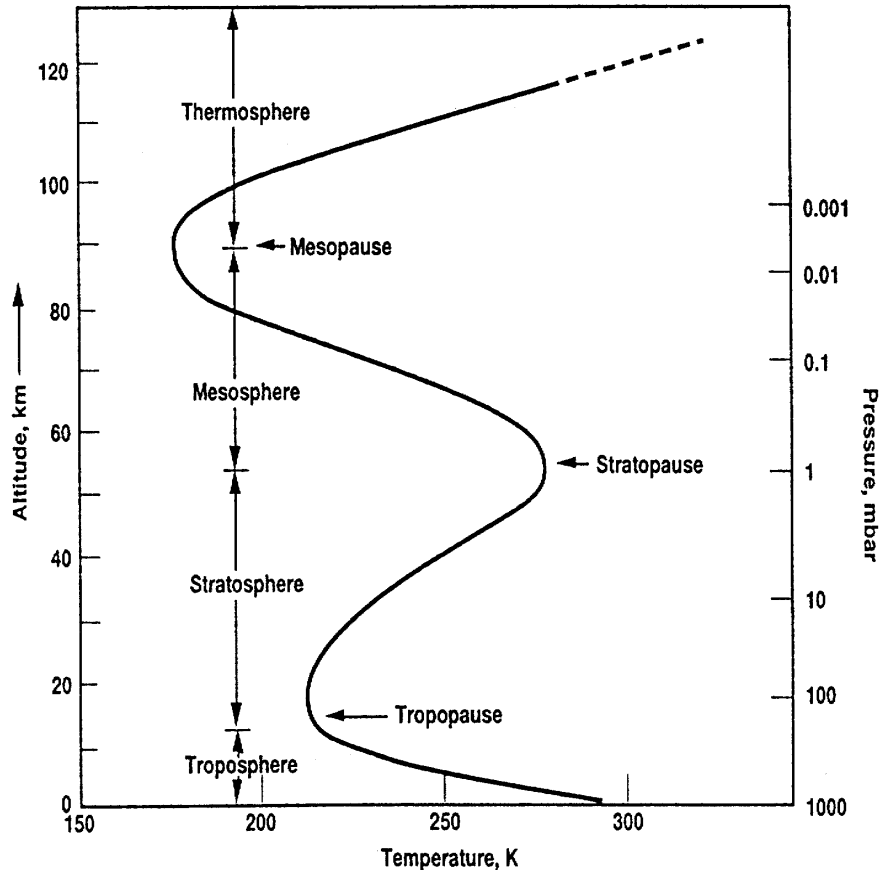
A. K. Steiner¹, B. C. Lackner¹, F. Ladstädter¹, B. Scherllin-Pirscher¹, U. Foelsche¹, G. C. Hegerl² und G. Kirchengast¹

(1) Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WEGC) und
Institutsbereich Geophysik, Astrophysik, und Meteorologie/Inst. für Physik
(IGAM/IP), Karl-Franzens-Universität Graz, Österreich

(2) University of Edinburgh, School of GeoSciences, Edinburgh, U.K.

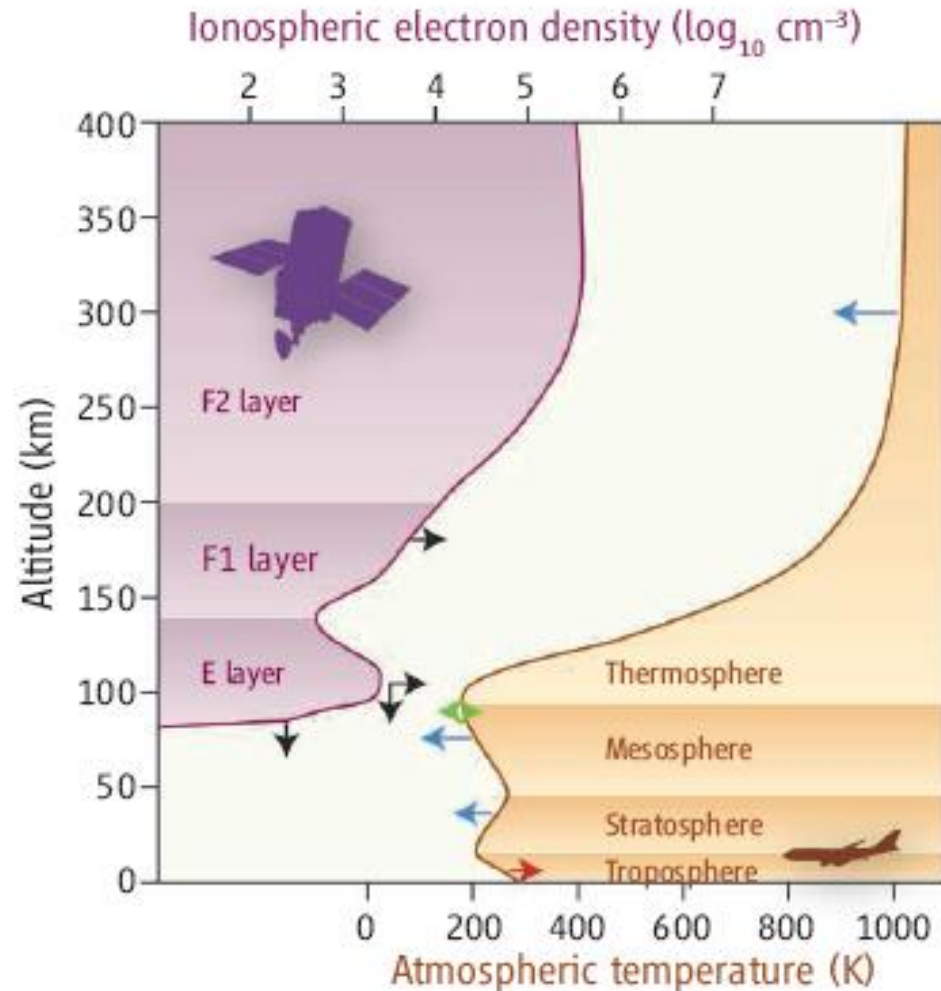
andi.steiner@uni-graz.at

- Aufbau und Klimaänderung der Atmosphäre
- Beobachtungsmethoden und Datensätze
- GPS Radio-Okkultation (RO)
- Von der Messung zu Klimavariablen
- Eigenschaften von GPS RO Daten
- Klimatrendstudien



Vertical temperature profile
(Source: Melbourne et al. (1994)
adapted by Kehrer et al. (2008))

- **Vertikale thermische Struktur**
- **Troposphäre**
bis 8 km am Pol und 18 km in Tropen
Temperaturabnahme bis -50°C
Wolken-, Niederschlagsbildung
Vertikale Durchmischung,
Strahlungsprozesse
- **Stratosphäre** bis ~ 50 km, $\sim 0^{\circ}\text{C}$
Temperaturanstieg mit der Höhe
Ozonschicht, O_3 absorbiert UV-Strahlung
- **Mesosphäre** bis ~ 85 km, -90°C
bis hier gut durchmischte Luft
- **Thermosphäre**
Temperaturanstieg (~ 1000 K), 400 km konst.
Absorption kw UV-Strahlung – Ionisation
Ionosphäre
Geringe Dichte, Diffusion, Gasentmischung
Große Temperaturschwankungen, keine
“fühlbare” Temperatur



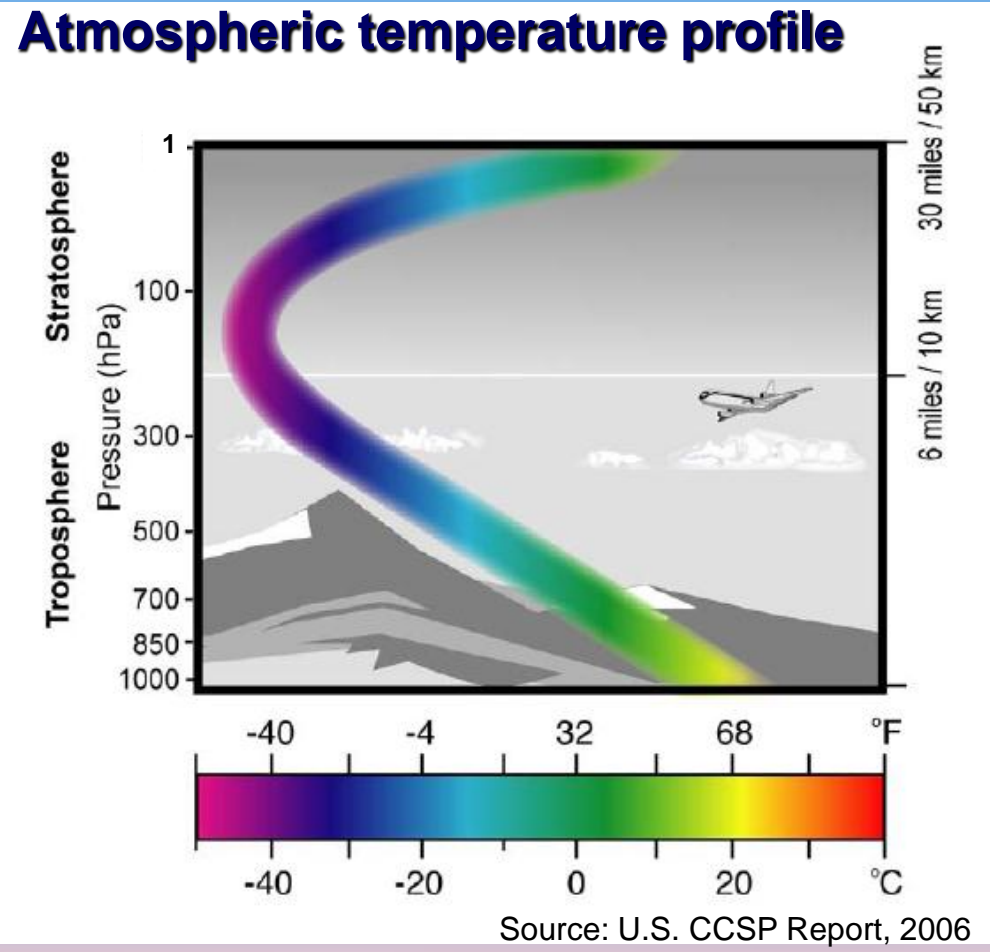
Lastovicka et al., Science, 2006

- **Erdoberfläche – Erwärmung**
- **Untere – mittlere Atmosphäre**
Erwärmung der Troposphäre
Abkühlung der Stratosphäre
- **Obere Atmosphäre**
wenig Daten vorhanden,
Abkühlung um einige °C/Dekade
Dichteabnahme in Thermosphäre
aufgrund der Abkühlung
- **Hauptursache: Treibhausgase**
Anstieg der Kohlendioxidkonzentration
Abnahme der Ozonkonzentration
Anstieg von Wasserdampf
Natürliche Ursachen:
Schwankungen der Sonnenaktivität

Troposphäre - Stratosphäre

50 km
45 km
40 km
35 km
30 km
25 km
20 km
15 km
10 km
5 km

Weather balloon
Ozone Layer

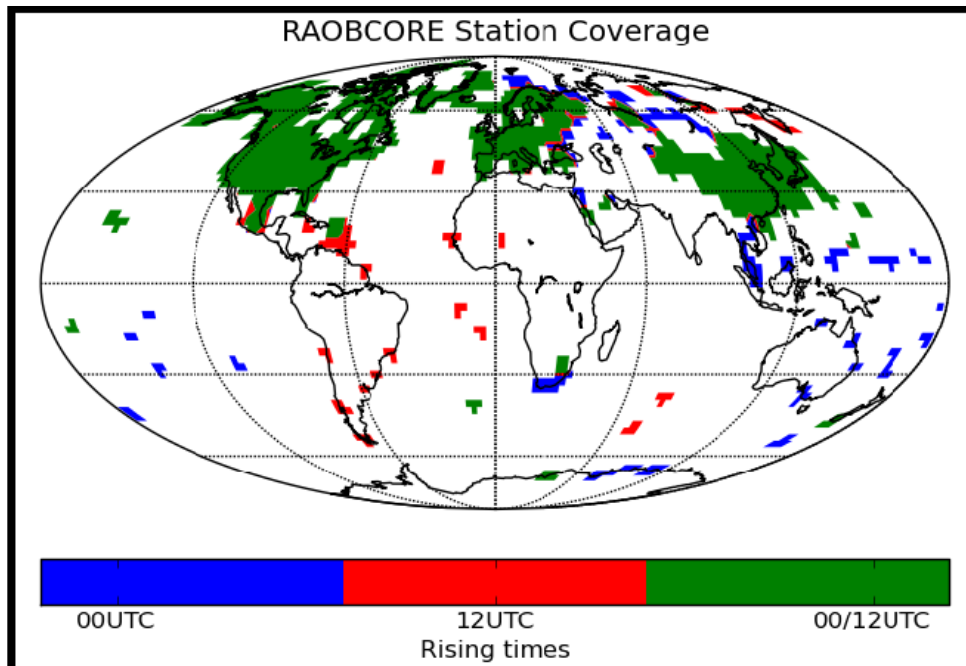


Klimadaten – Atmosphäre

- Klimamodeldaten
- Reanalyse Daten (Model + Beobachtungen)
- Beobachtungsdaten
 - Radiosondenmessungen (Wetterballone)
 - Satellitenbasierte Messungen, z.B.:
 - Mikrowellensondierung
 - GPS Radio-Okkultation

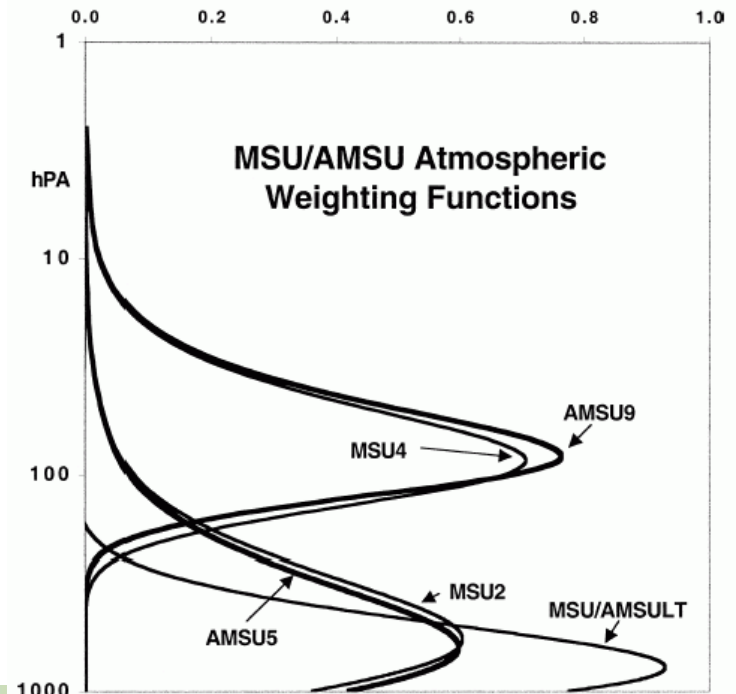
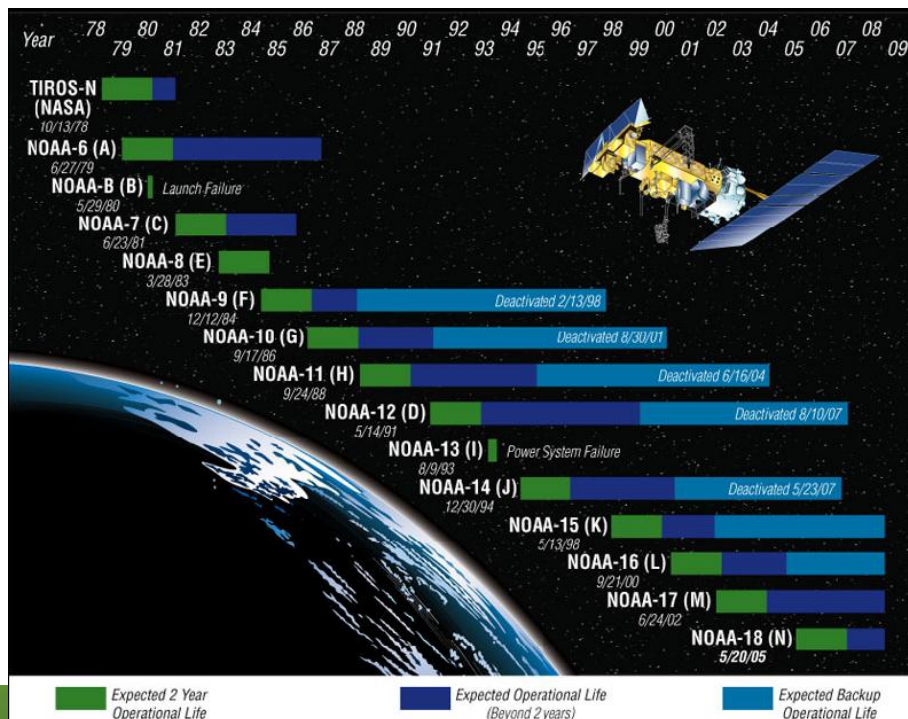
Radiosonden

- Seit 1958 zur Wetterbeobachtung
- Inhomogene Verteilung, mehr Stationen auf Kontinenten, Nordhemisphäre
- systematische Fehler (Aufheizung des Sensors bei Tag)
- Fehler wegen Stationsänderungen, versch. Instrumententypen

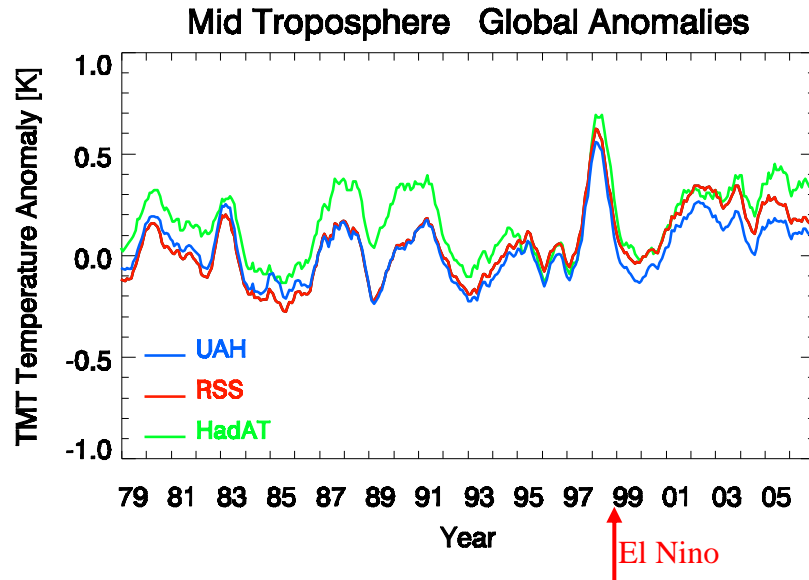


(Advanced) Microwave Sounding Unit – (A)MSU

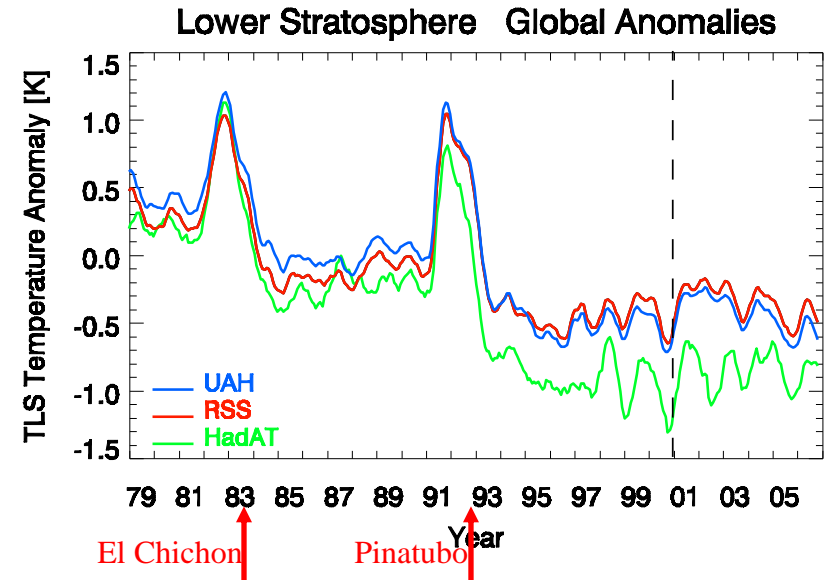
- Passiver Mikrowellensensor seit 1979 zur Wetterbeobachtung
- misst die Erdatmosphäre im MW-Bereich (50–60 GHz Sauerstoff Absorption)
- Grobe vertikale Auflösung (Schichttemperaturen in der Tropo- und Stratosphäre)
- Gute globale horizontale Bedeckung
- Für die Erstellung von Klimazeitreihen müssen die Daten verschiedener Satelliten kalibriert/korrigiert werden (z.B.: wegen Satellitendrift)



Erwärmung der Troposphäre



Abkühlung der Stratosphäre



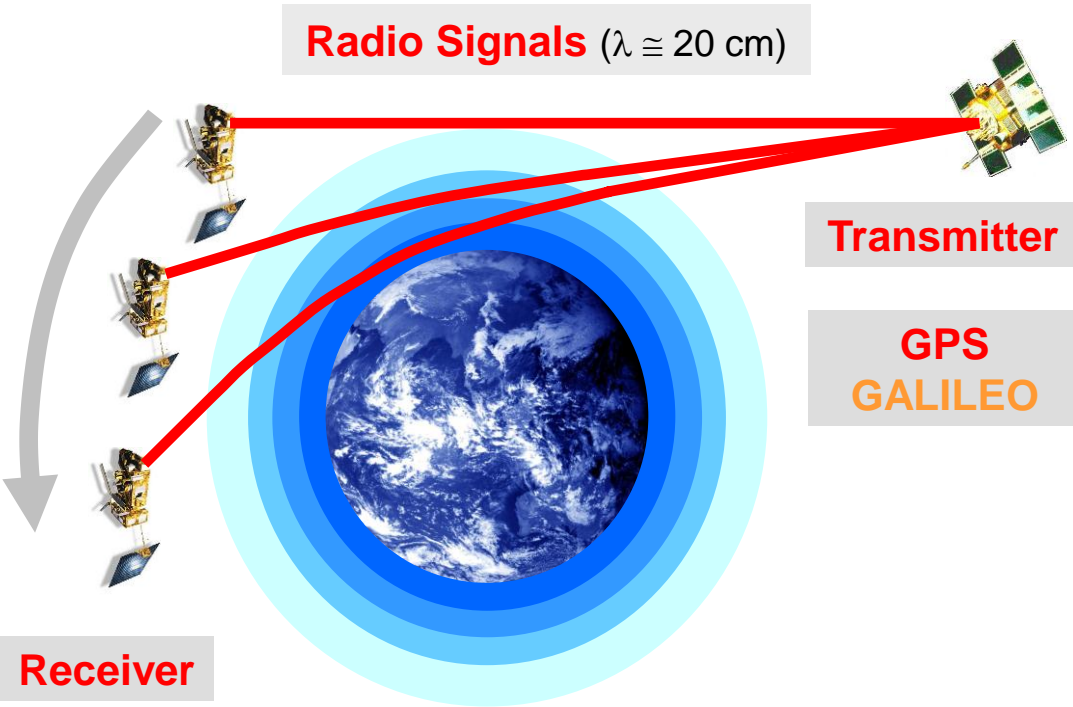
Probleme

- Interkalibrierung und Homogenisierung notwendig für Klimazeitreihen bei Radiosonden und (A)MSU Daten
- Prinzipielle Übereinstimmung von Trendwerten, aber große Ungenauigkeiten
- Neue, genauere Datensätze erfordert



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

GNSS-LEO Satellitenkonstellation



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

Satellite in Low Earth Orbit:

GPS/MET, CHAMP, SAC-C, GRACE, Formosat-3/COSMIC, MetOp, Oceansat-2 ...

Courtesy: U. Foelsche

Signalquelle

Global Positioning System (GPS)

- 24 (30) Satelliten in ~20200 km Höhe
- Seit 1978, 1994 volle Konstellation
- ~1 t schwer, ~5 m Durchmesser
- ~55° Inklination
- Radiowellen, 2 Frequenzen:
1575,42 MHz (19 cm)
1227,60 MHz (24 cm)
- Positionierung mit mm-Genauigkeit



GLONASS

Russland, seit 1982; 1996, 24 (31) Satelliten

GALILEO

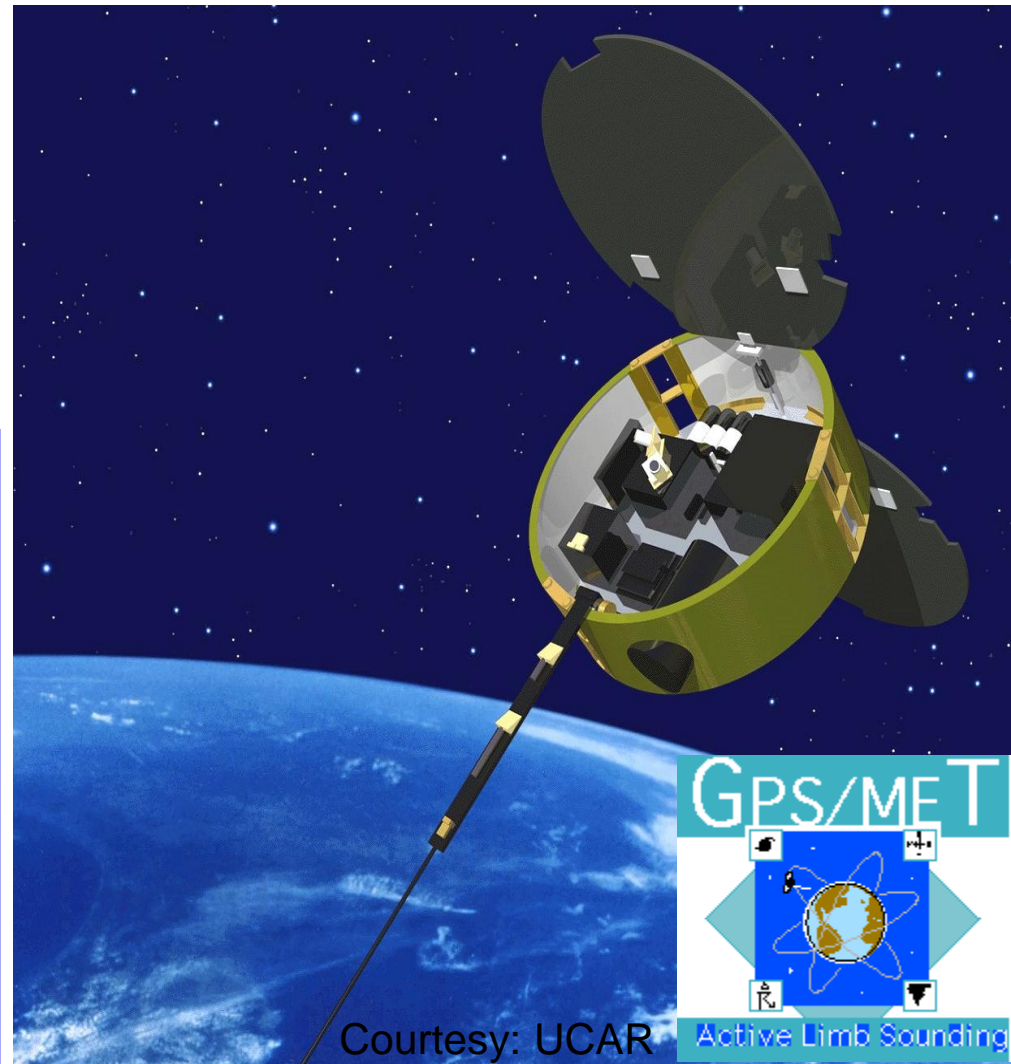
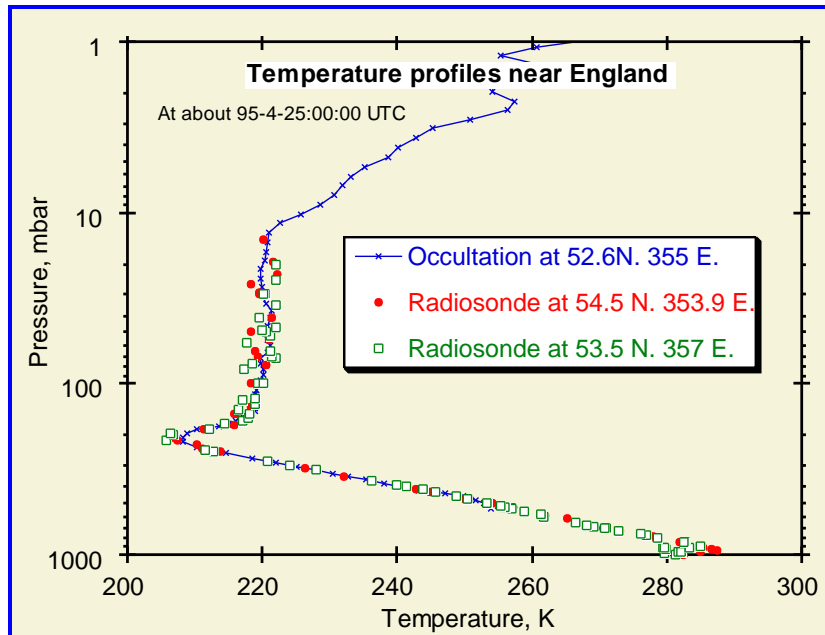
ESA, 2 im Orbit, 30 Satelliten, 23200 km

KOMPASS

China, 10 (35) Satelliten bis 2015, 22000 km

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

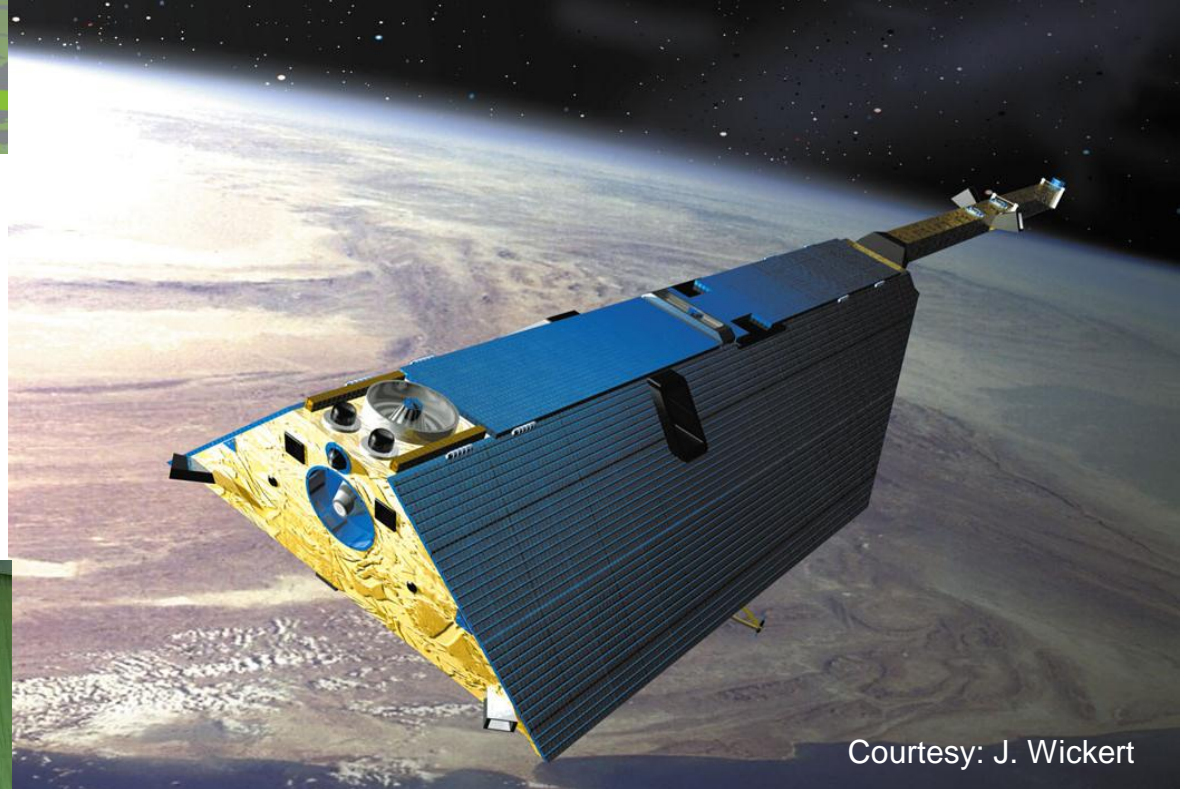
U.S. GPS/Met Experiment
auf MicroLab-I 1995
Messungen 1995 bis 1997
'Proof of Concept' Mission



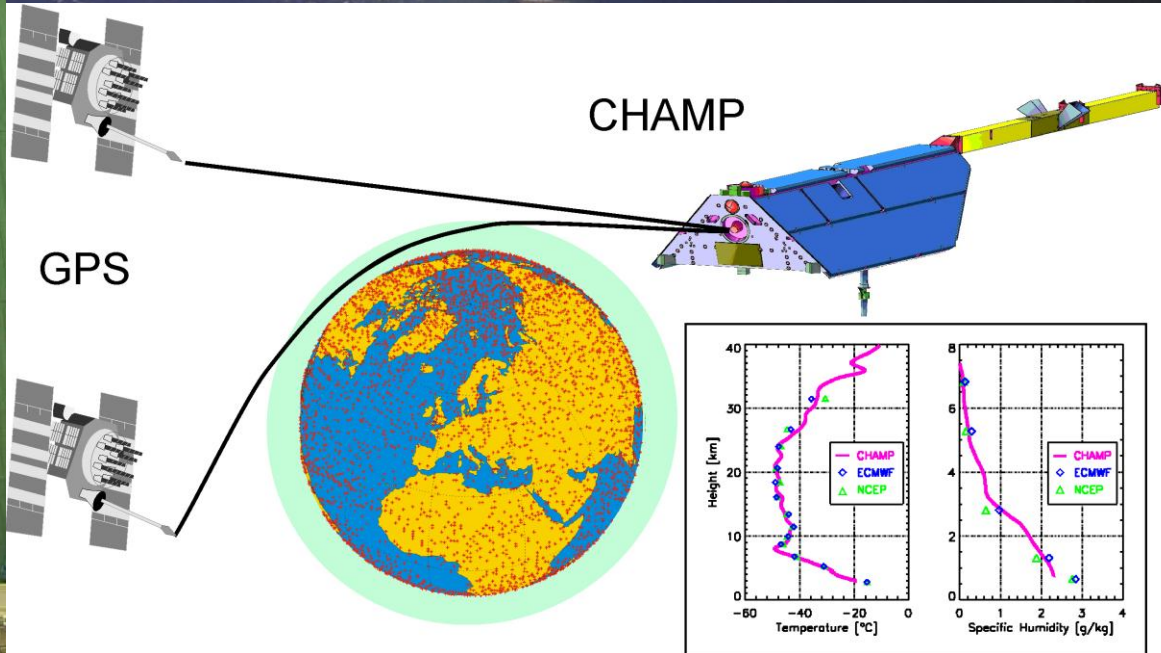
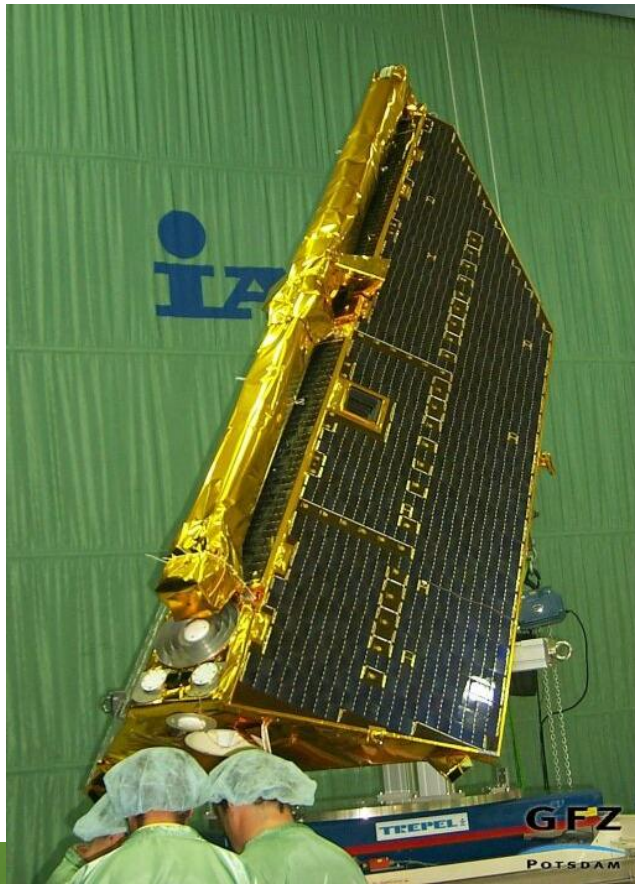
GPS RO mit CHAMP

■ CHAMP

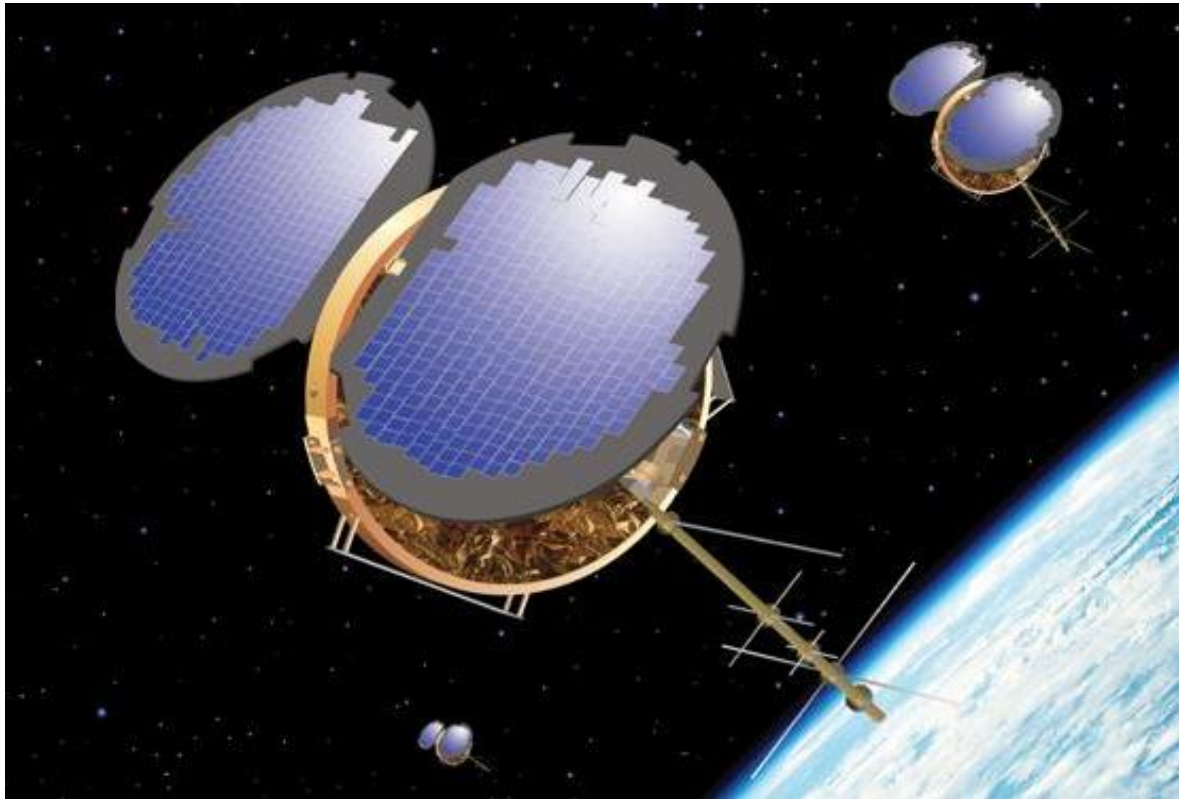
Sep 2001 bis Sep 2008
kontinuierliche
GPS RO Messungen
~250 pro Tag



Courtesy: J. Wickert



■ Formosat-3/COSMIC



Taiwan/US Mission
6 Satelliten
Start 14. April 2006
~800 km Höhe
~2500 RO Profile/Tag

■ MetOp A



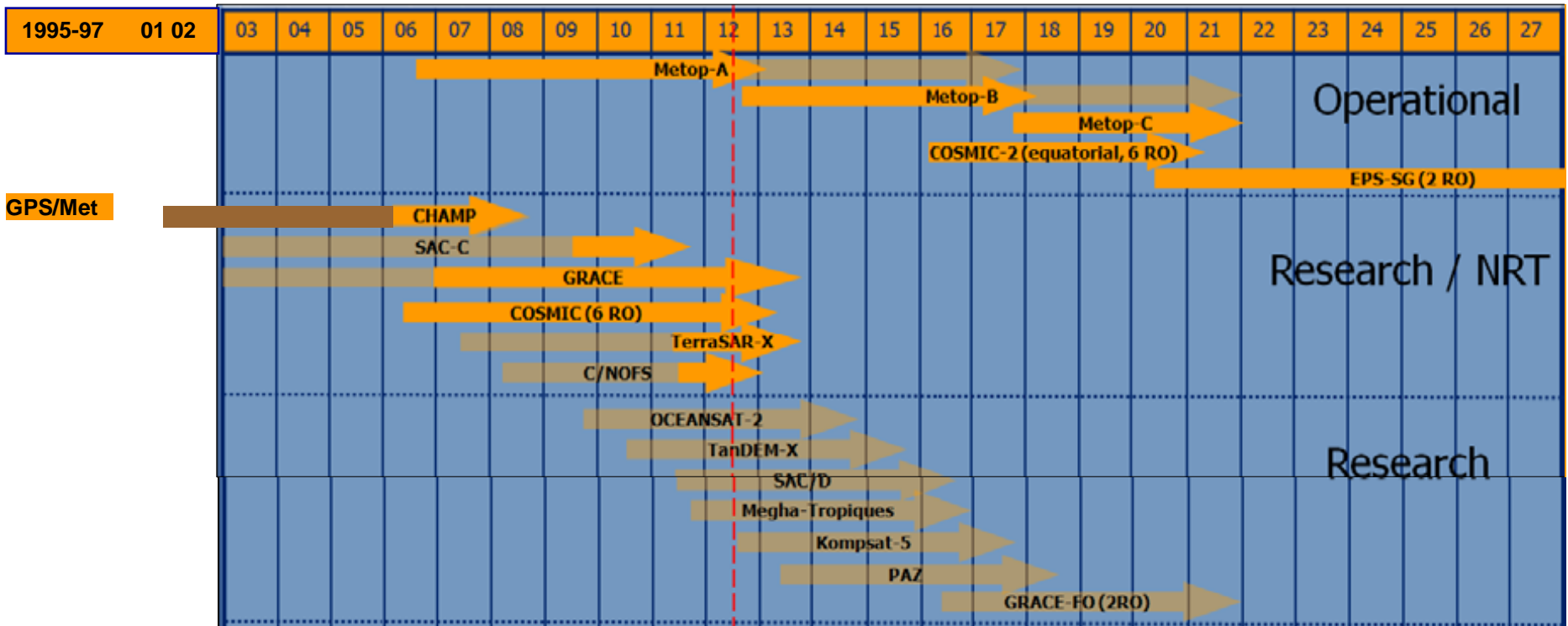
MetOp

Europäische Mission
Start 19. Oktober, 2006
~800 km Höhe
~600 RO Profile pro Tag
Erster von 2 weiteren
Satelliten (MetOp A, B, C)
im Abstand von 5 Jahren
Start MetOp B im Sep. 2012
Operationell bis 2020

GRAS

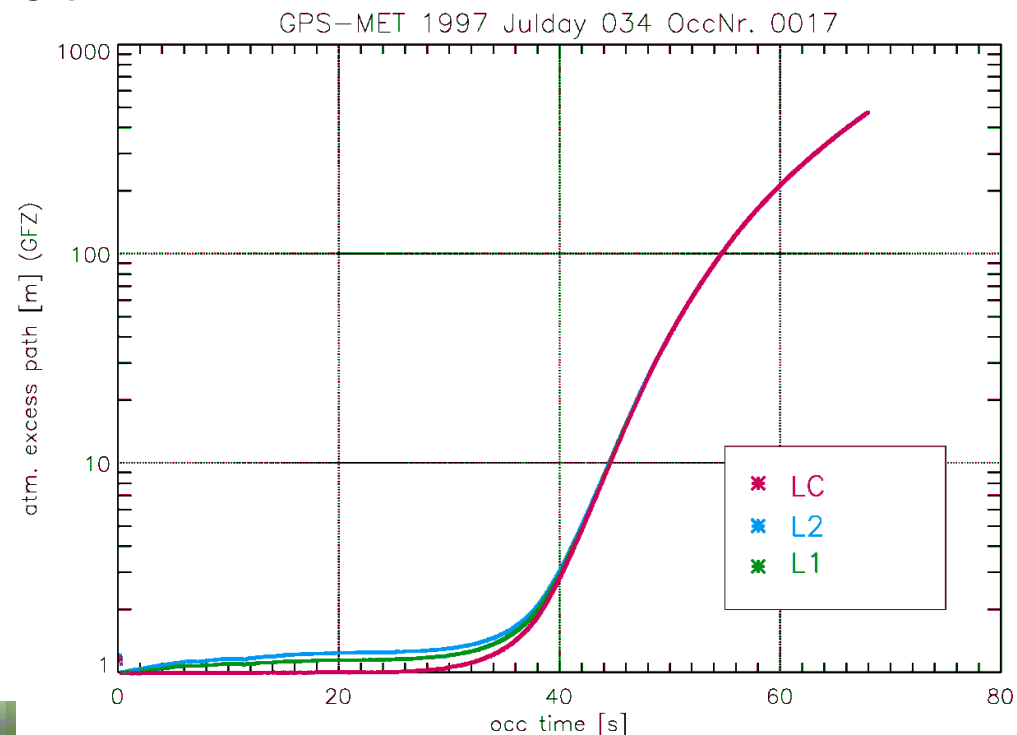
GNSS Receiver for
Atmospheric Sounding
neuer Empfänger

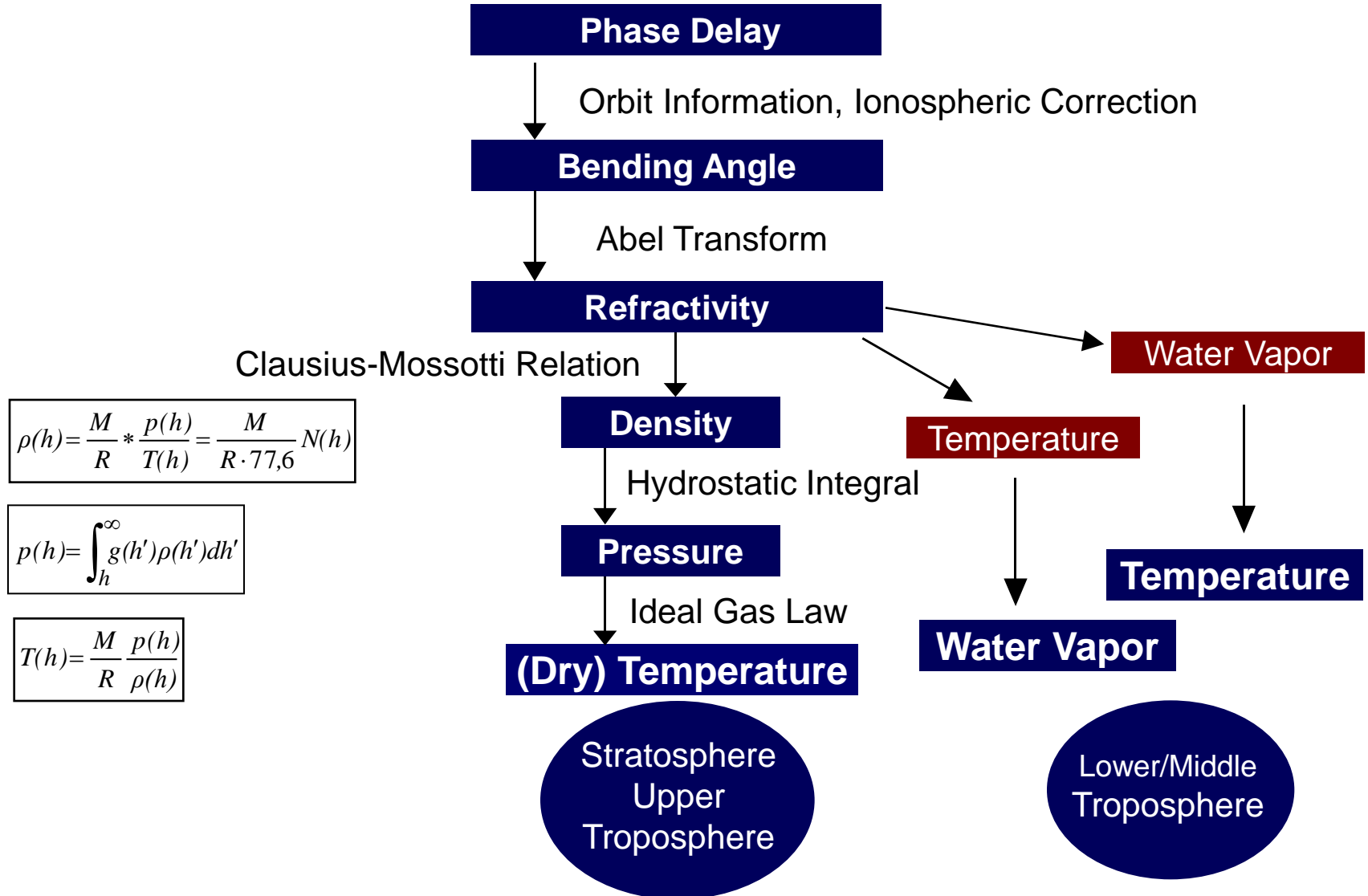
Status und geplante Missionen



Messdaten

- Phasenwegsverlängerungen (atmospheric excess phase) und Amplituden für beide Frequenzen f_1 und f_2 .
- Phasenweg beinhaltet den geometrischen Weg (Vakuum) und den zusätzlichen Weg aufgrund der Atmosphäre und Ionosphäre (Refraktivitätsfeld).
- Geometrischer Weg wird abgezogen und der Ionosphäreneinfluss durch lineare Kombination von f_1 und f_2 eliminiert.
- **Atmosphärischer Phasenweg**
 - ~1 mm Mesopause
 - ~20 cm Stratopause
 - ~20 m Tropopause
 - ~1–2 km Untere Troposphäre



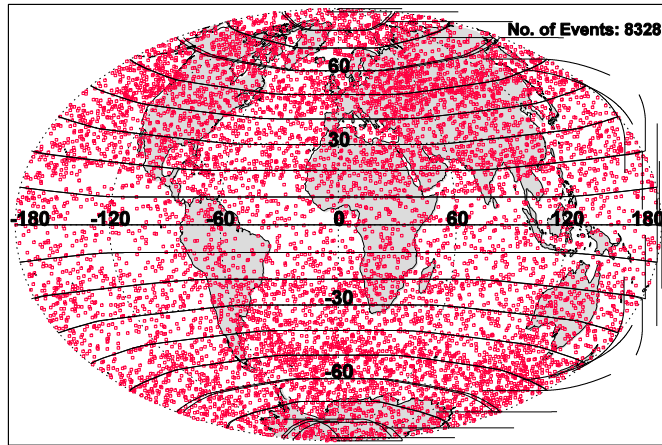


- Globale Bedeckung
- Allwettertauglichkeit
- Hohe vertikale Auflösung und Genauigkeit (0,5 km bis 1,5 km) in oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre (UTLS) ~8–30 km
- Fehlercharakterisierung von Datenprodukten
- Langzeitstabilität und Konsistenz
Messung mittels hochpräziser Atomuhren (SI-Traceability)
- Keine Inter-Satelliten Kalibrierung/Korrekturen nötig
- Genauigkeit für Beobachtung von essentiellen Klimavariablen*
 - Troposphäre 0,05 K pro Jahrzehnt
 - Stratosphäre 0,1 K pro Jahrzehnt

Definition der World Meteorological Organization (WMO):
Global Climate Observing System (GCOS) Essential Climate Variables (ECV)

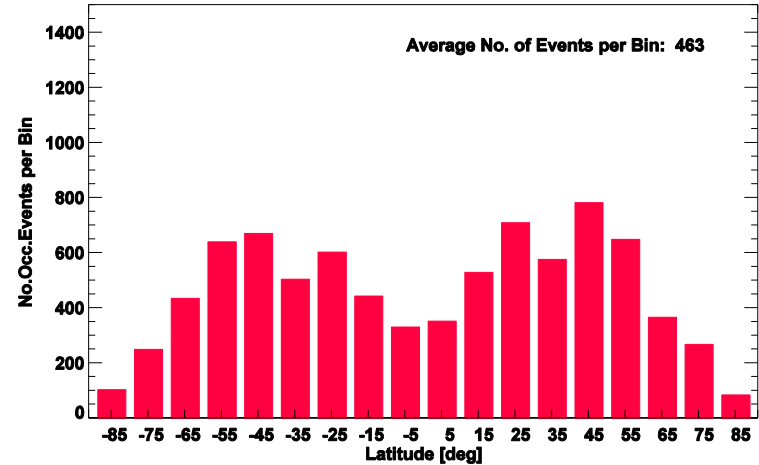
Verteilung von Okkultationsprofilen

December 2009 : COSMIC-C4 Event Distribution



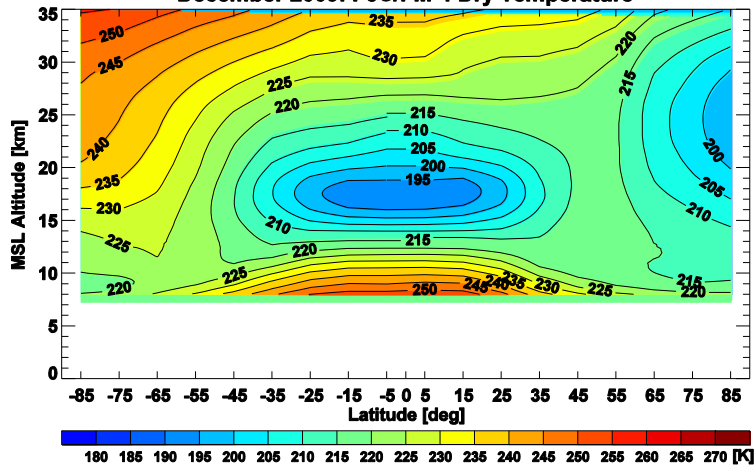
Anzahl von Profilen pro Bin

December 2009: F3C/FM-4 Occultation Event Statistics



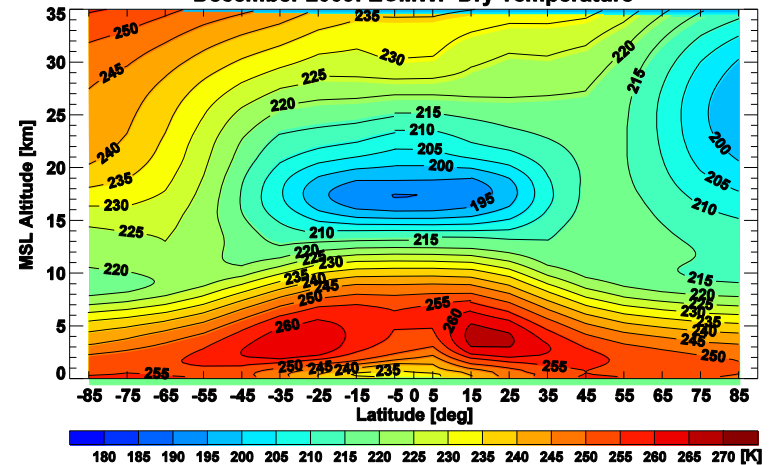
RO Klimatologie Temperatur

December 2009: F3C/FM-4 Dry Temperature

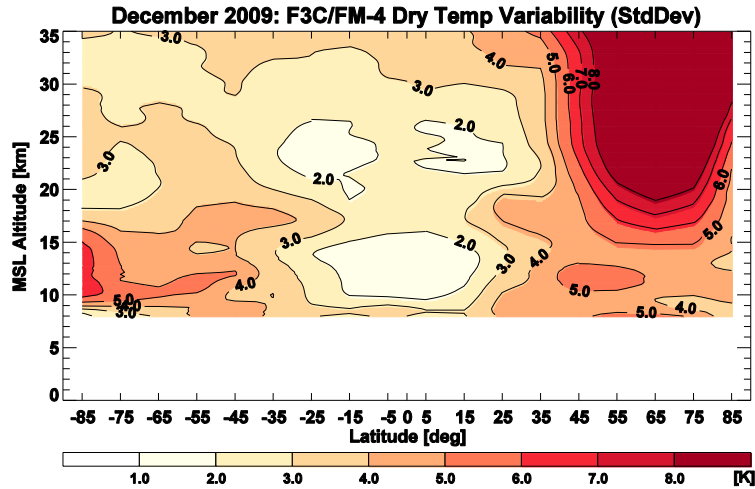


Referenz ECMWF

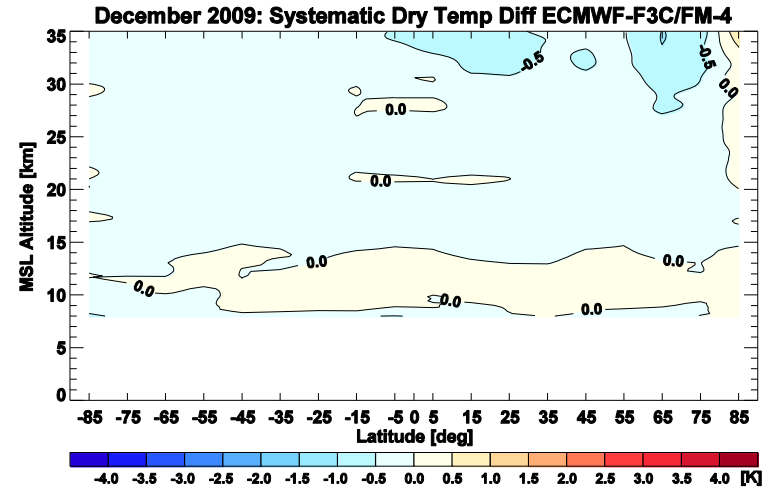
December 2009: ECMWF Dry Temperature



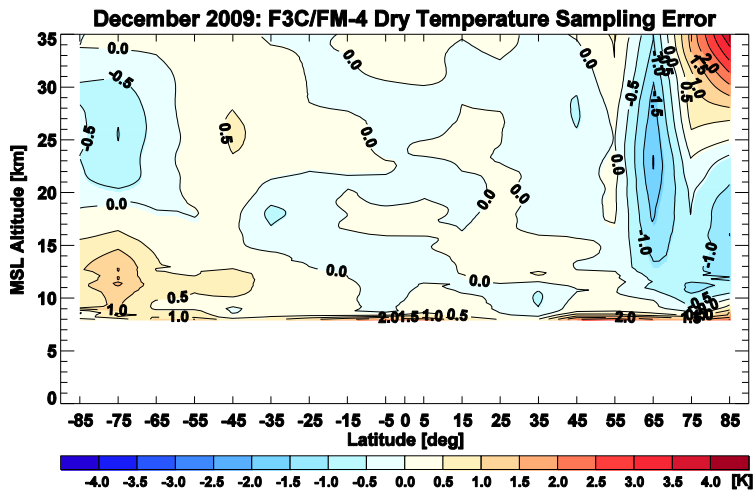
Variabilität



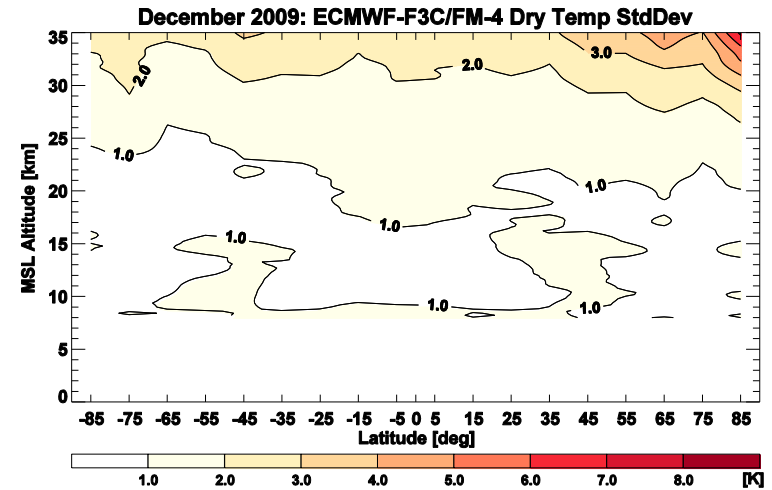
Differenz Referenz – RO



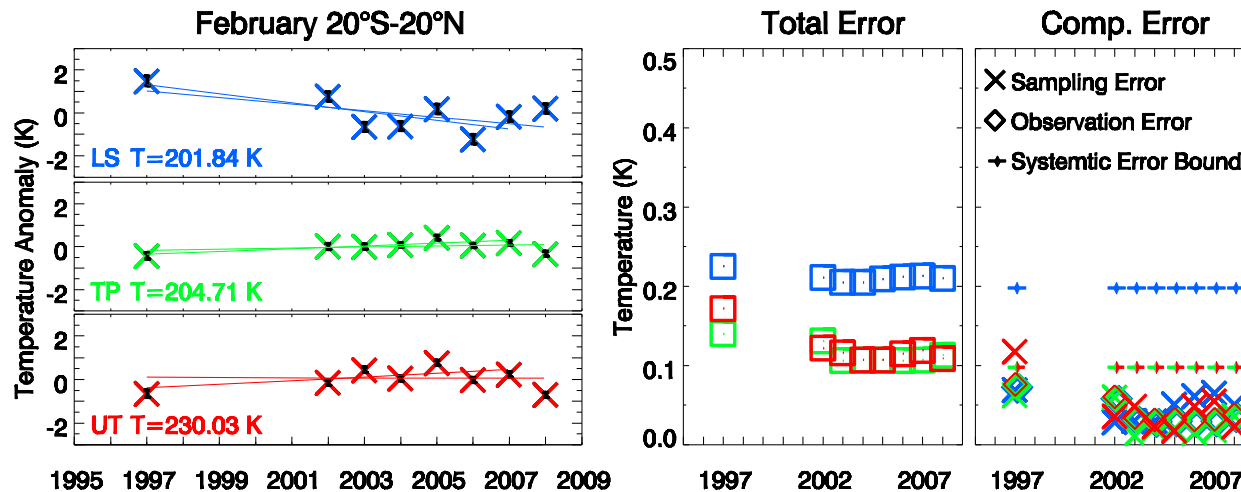
Abtastfehler Temperatur



StdDev Referenz – RO

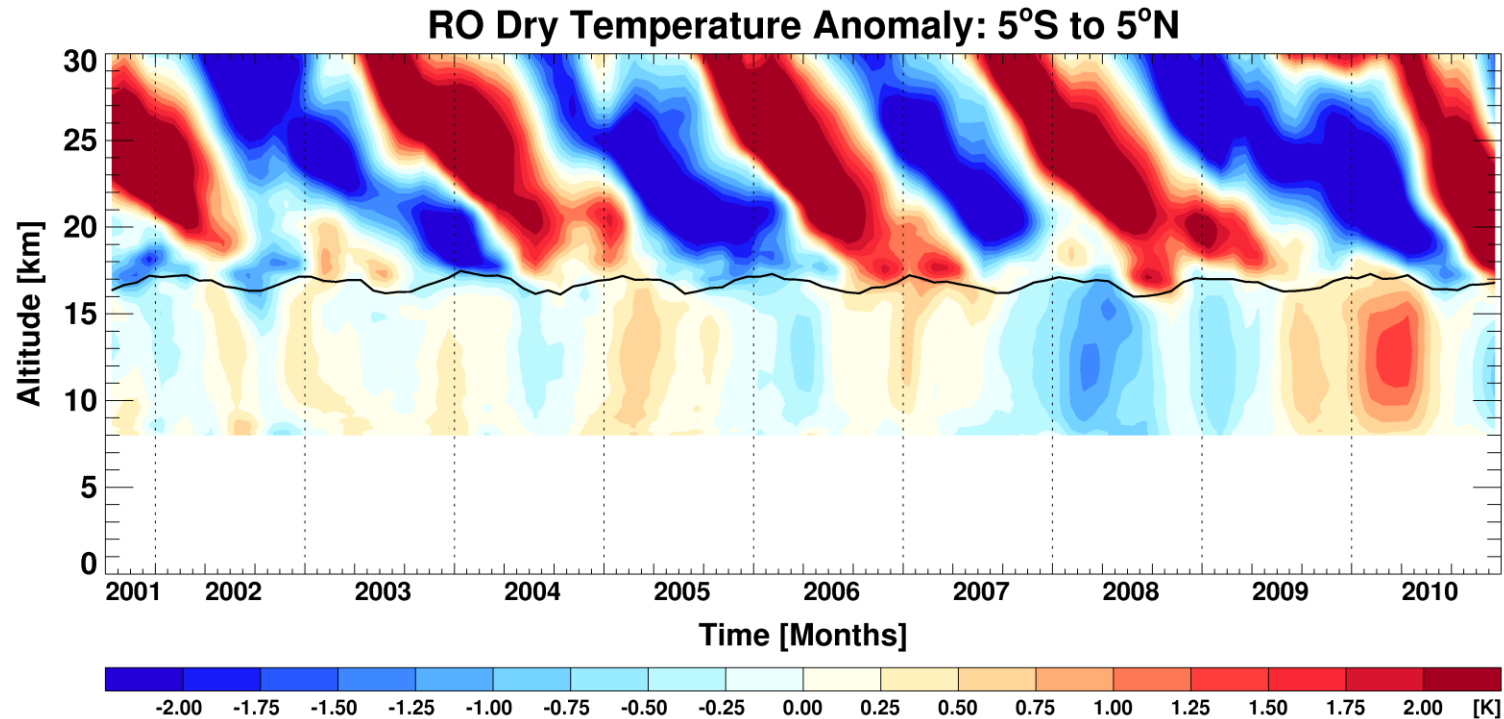


Erste Demonstrationsstudie – RO Temperaturtrends



- Tropenregion; Februar 1997, 2002 bis 2008 (updated bis 2010)
- Lineare Regression mit Berücksichtigung der Datenqualität
- **Untere Stratosphäre:** Signifikanter Trend detektierbar, Februar 1997 bis 2010
- **Obere Troposphäre:** Kein signifikanter Trend detektierbar, natürliche Variabilität im betrachteten Zeitraum zu hoch

Demonstrationsstudie [Steiner et al. GRL 2009]; aktualisierte Ergebnisse [Steiner et al. Radio Sci. 2011]



Quasi-Biennale-Oszillation (QBO)

- quasi-periodische Variabilität (~ 28 Monate) in **unterer Stratosphäre** der Tropen
- Saisonale Änderungen der “Strahlungsheizung”, nach unten fortschreitende Wind/Temperaturanomalien ± 0.5 K bis ± 6 K, ~ 16 – 30 km

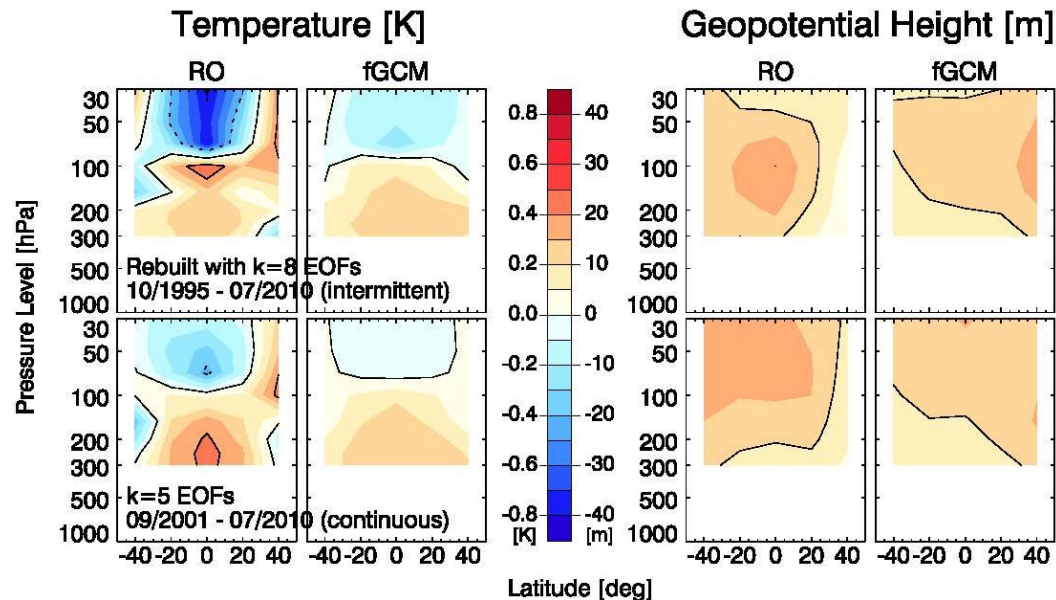
El Niño Southern Oscillation (ENSO)

- Phänomen mit quasi-Periodizität von 3 bis 7 Jahren in **Troposphäre**, Änderungen der Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik, Kopplung Ozean-Atmosphäre

■ Optimal Fingerprinting

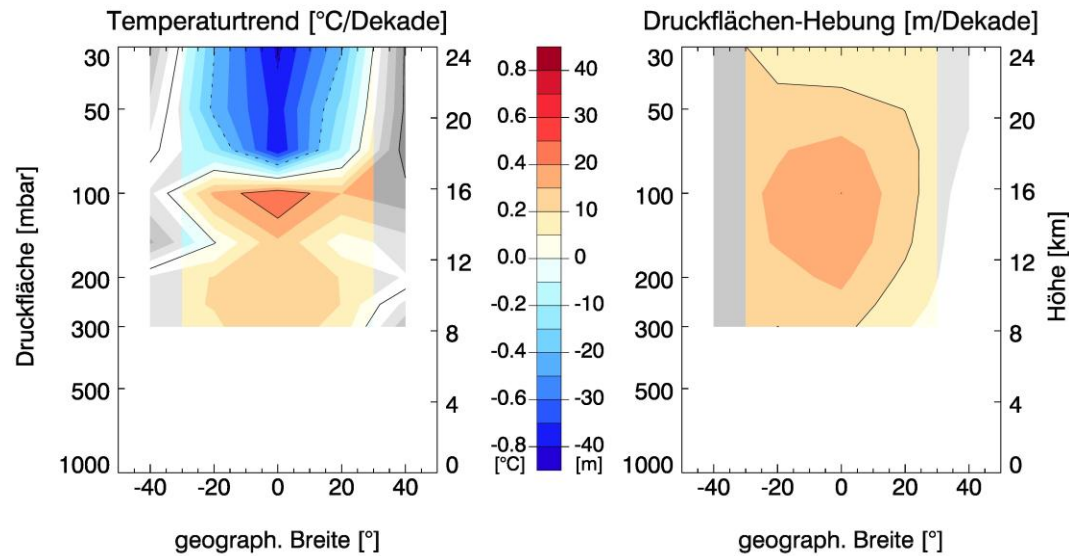
Methode zur Untersuchung von Trendmustern

- Je nach Ursache haben Trendmuster unterschiedliche Raumverteilung natürliche Variabilität (El Niño)/anthropogen verursachte Trends
- „Herausfiltern“ von anthropogen verursachten Trendmustern mit Verwendung/Vergleich von Klimamodelldaten (fGCM)



[Lackner, Steiner, Hegerl, Kirchengast, Atmos climate change detection by RO data using fingerprinting, *J. Clim.*, 2011]

■ Optimal Fingerprinting



- RO Trendmuster für Temperatur (links) und die geopotentielle Höhe (rechts)
- Signifikantes Klimaänderungssignals für Temperatur (96 %) und geopotentielle Höhe (99 %)
- Eine Hebung der Druckflächen in der oberen Troposphäre reflektiert die Erwärmung und Ausdehnung der Troposphäre
- In der unteren Stratosphäre findet eine Abkühlung statt – am stärksten in den Tropen

[Lackner, Steiner, Hegerl, Kirchengast, Atmos climate change detection by RO data using fingerprinting, *J. Clim.*, 2011]

- GPS RO liefert hochqualitative Daten atmosphärischer Variablen
- Eigenschaften umfassen hohe Genauigkeit, hohe vertikale Auflösung
Langzeitstabilität und Konsistenz
- GPS RO ist daher optimal geeignet für Klimabeobachtungen
- Erstellung RO basierter Klimatologien
- Detektion eines signifikanten Klimaänderungssignals in der Atmosphäre
- Referenzstandard für Kalibrierung von Daten anderer Beobachtungssystem
- Potential als zukünftiges globales Klimabeobachtungssystem (GCOS)

Thanks for funds to

FWF

esa

asap
FFG