



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

ARSCIISys

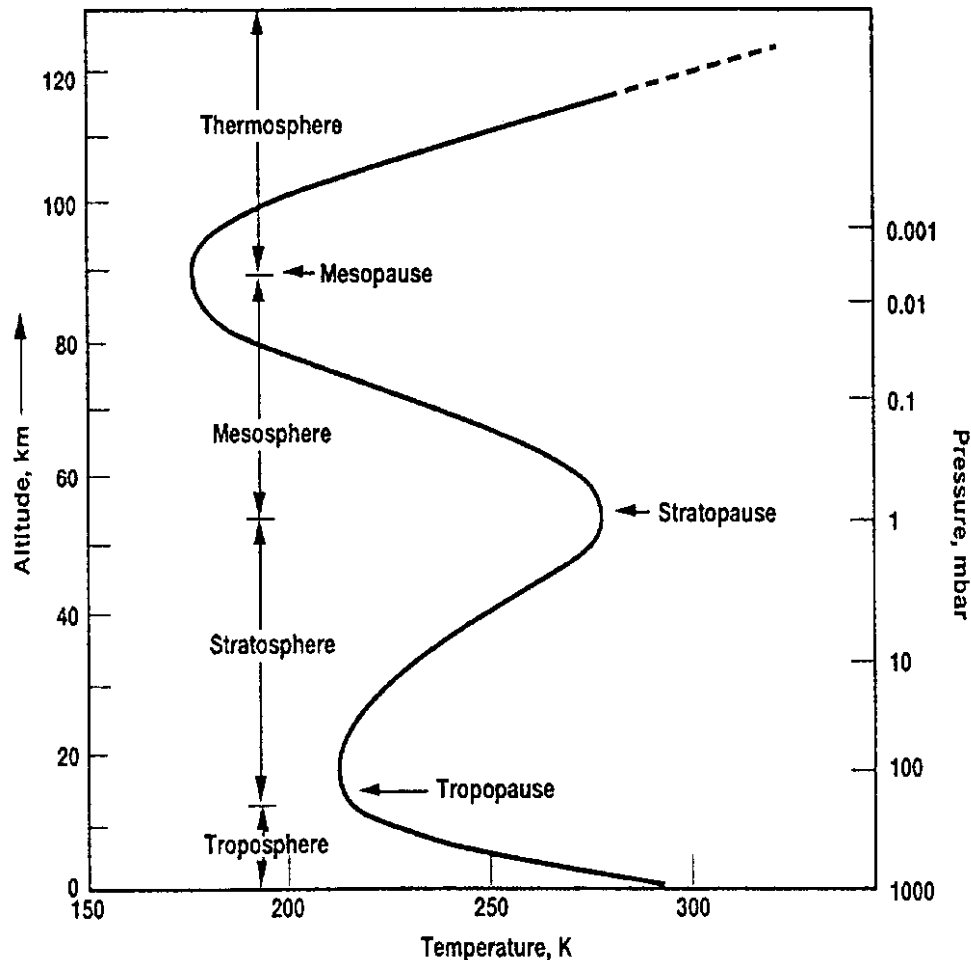
Klimamonitoring der Erdatmosphäre mit GPS Radio-Okkultation

**A. K. Steiner, B. Scherllin-Pirscher, M. Schwärz,
F. Ladstädter, T. Rieckh, R. Klingler,
U. Foelsche, und G. Kirchengast**

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

andi.steiner@uni-graz.at

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



Vertikales Temperaturprofil
[Quelle: Melbourne et al. 1994,
adaptiert Kehler 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

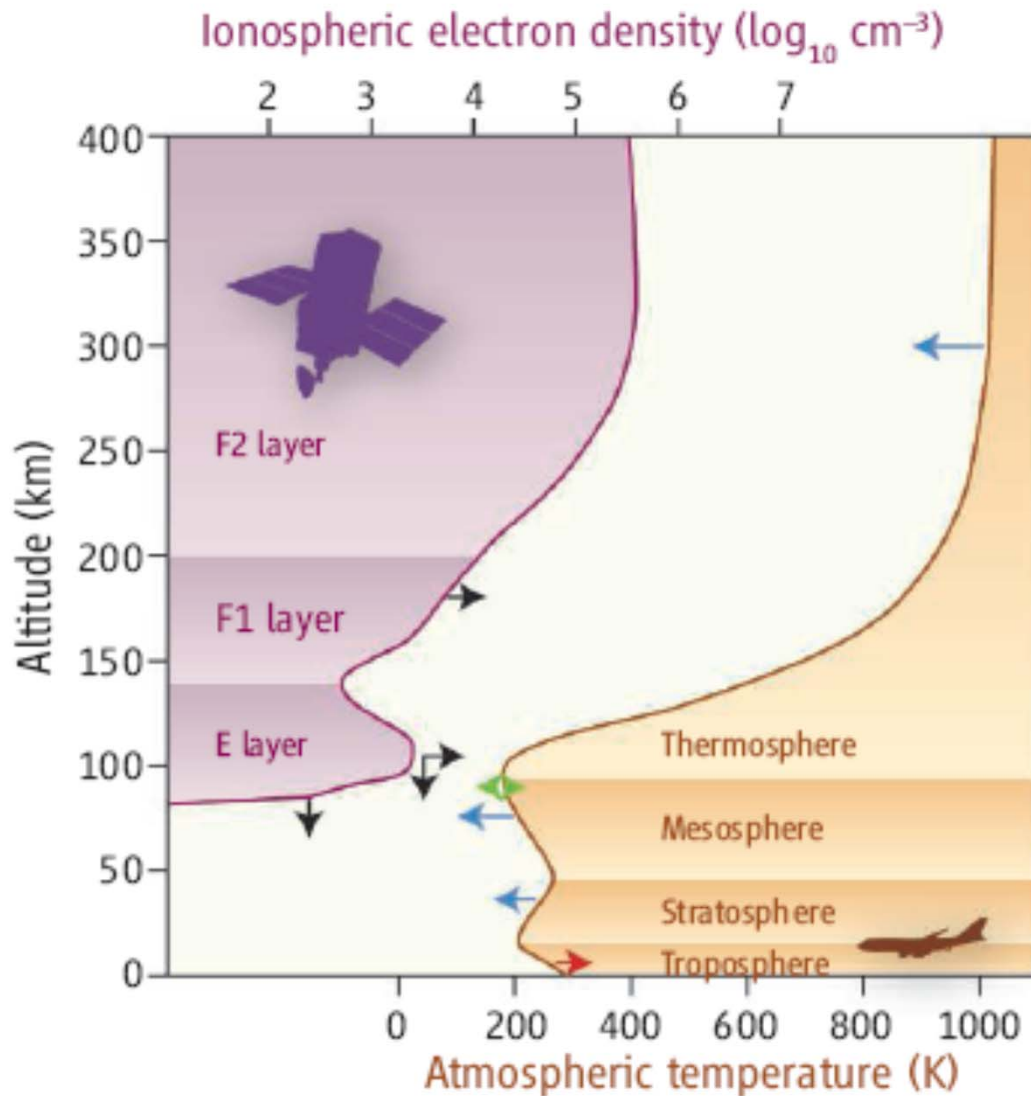
bis hier gut durchmischte Luft

■ Thermosphäre

Temperaturanstieg (~ 1000 K), 400 km konst.
Absorption kw UV-Strahlung – Ionisation

Ionosphäre

Geringe Dichte, Diffusion, Gasentmischung
Große Temperaturschwankungen, keine
“fühlbare” Temperatur

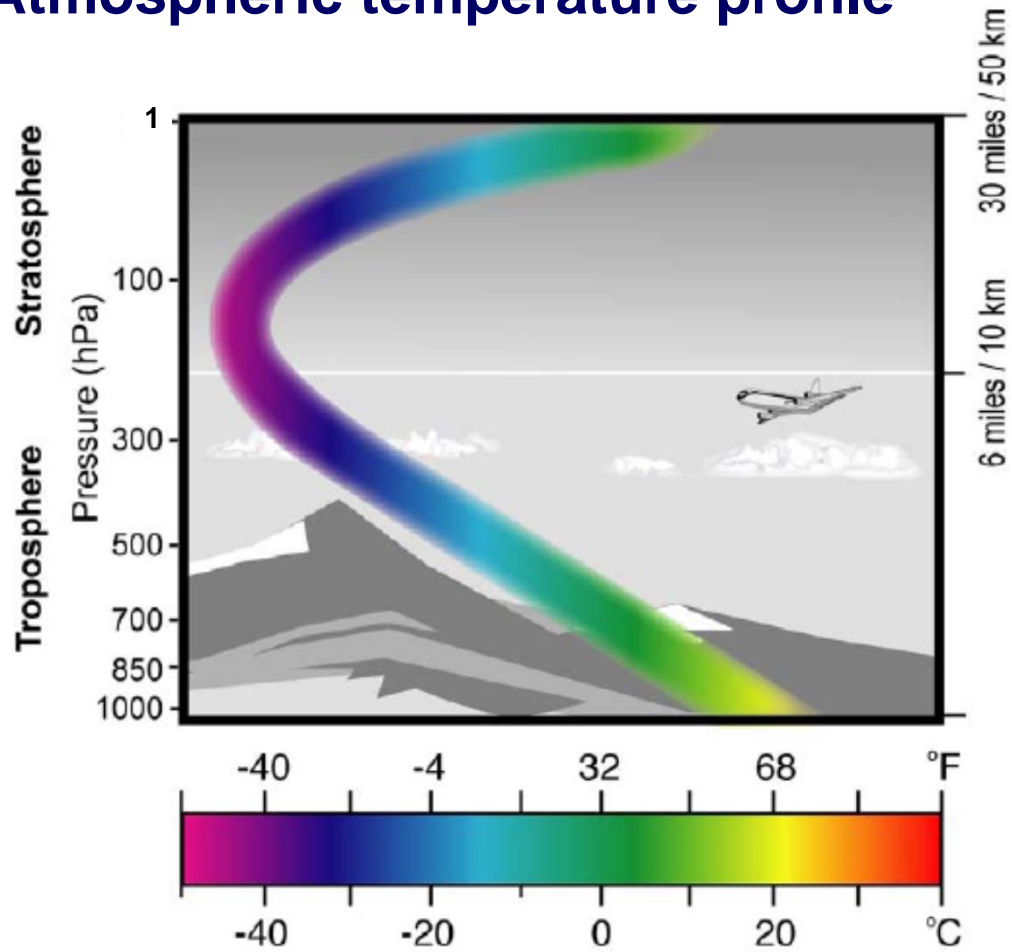


[Lastovicka et al., *Science*, 2006]

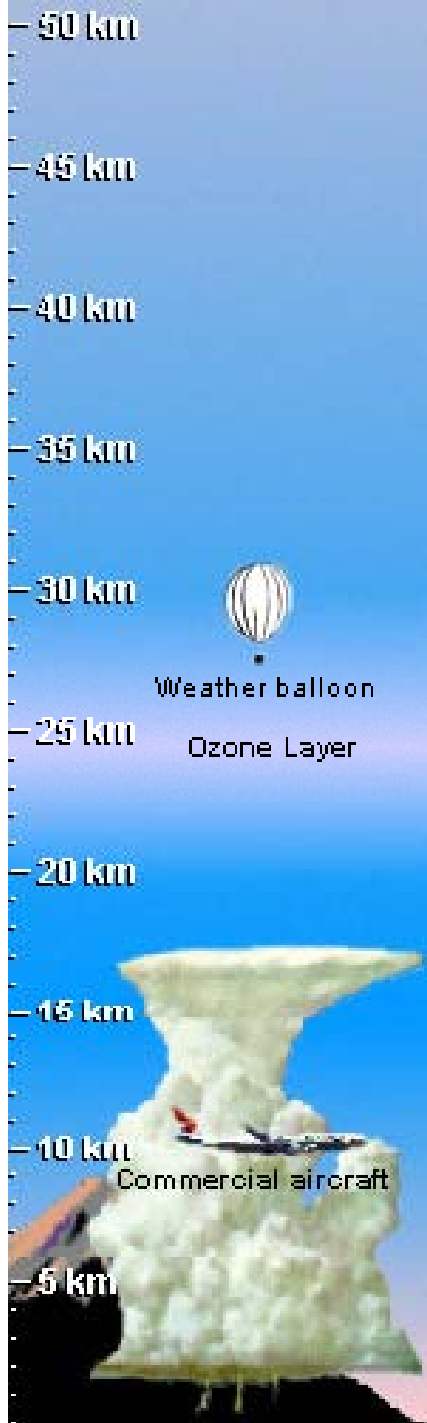
- **Erdoberfläche – Erwärmung**
- **Untere – mittlere Atmosphäre**
Erwärmung der Troposphäre
Abkühlung der Stratosphäre
- **Obere Atmosphäre**
wenig Daten vorhanden,
Abkühlung um einige °C/Dekade
Dichteabnahme in Thermosphäre
aufgrund der Abkühlung
- **Hauptursache: Treibhausgase**
Anstieg der Kohlendioxidkonzentration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

Troposphäre - Stratosphäre

Atmospheric temperature profile



Source: U.S. CCSP Report, 2006

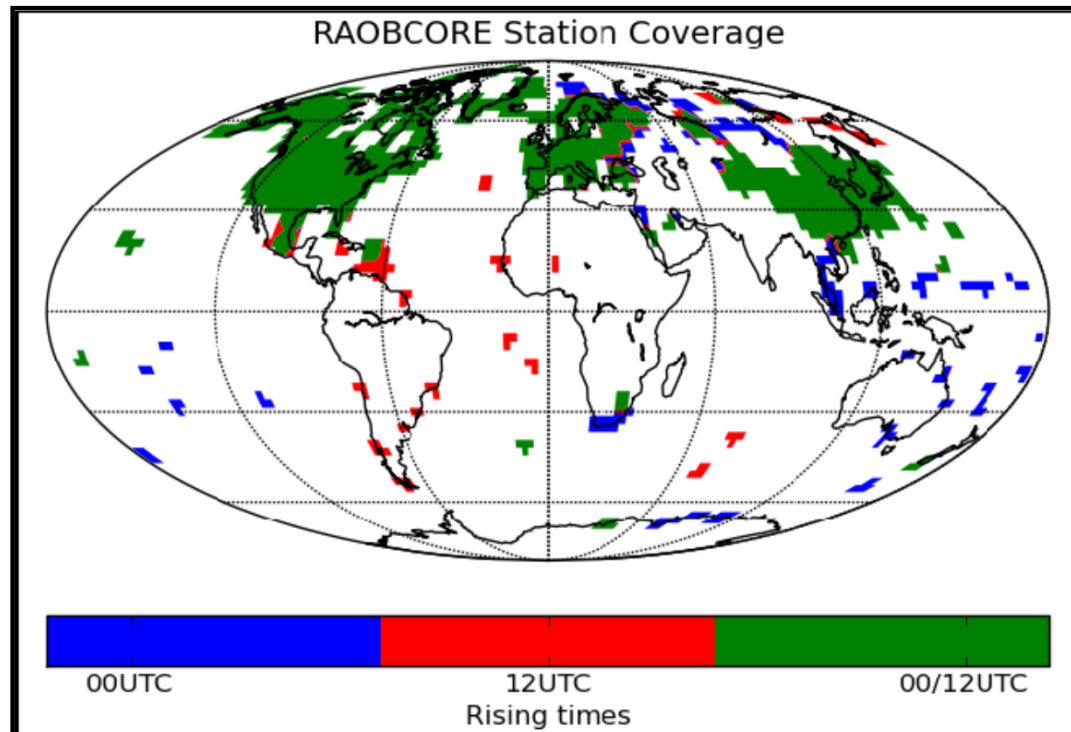


Klimadaten – Atmosphäre

- Beobachtungsdaten
 - Radiosondenmessungen (Wetterballone)
 - Satellitenbasierte Messungen
- Klimamodelldaten
- Reanalyse Daten (Modell + Messdaten)

Radiosonden

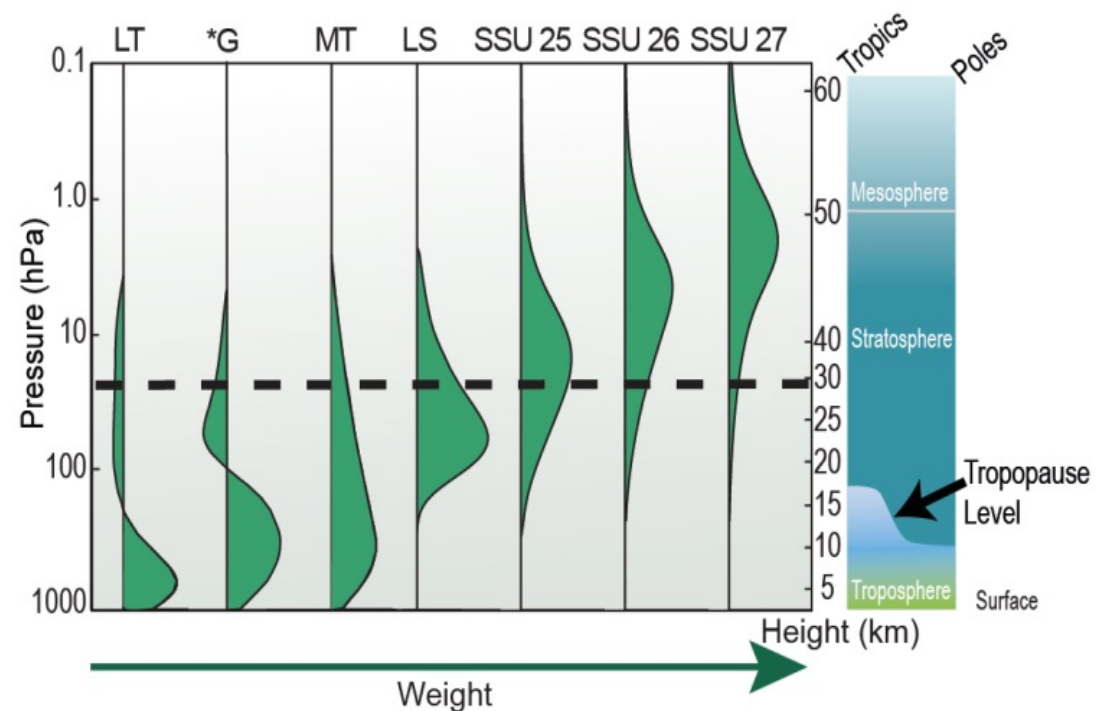
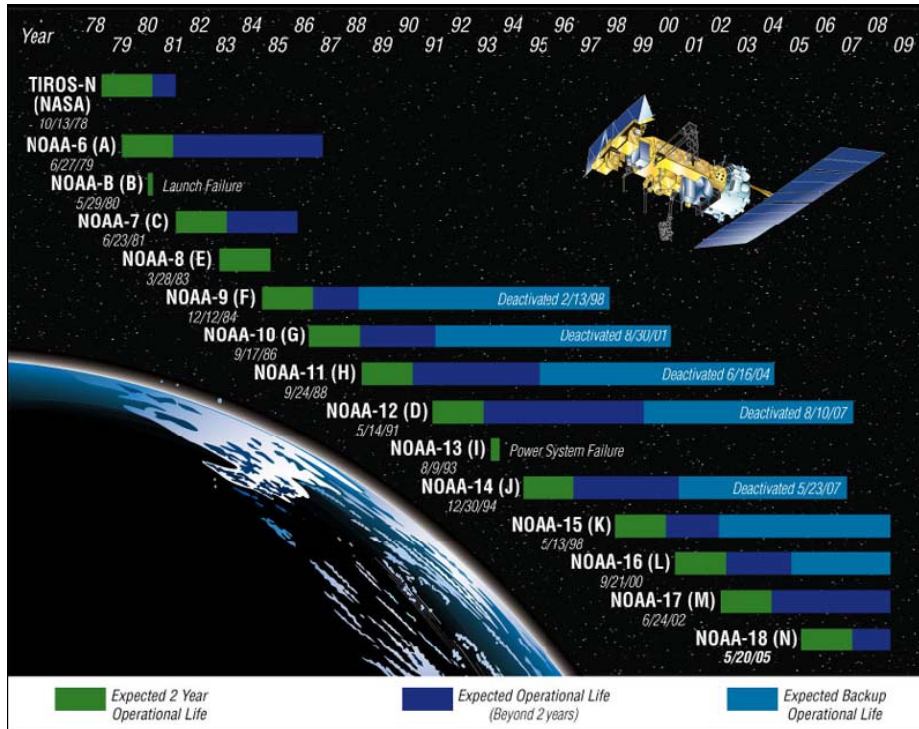
- Seit 1958 zur Wetterbeobachtung
- Inhomogene Verteilung, mehr Stationen auf Kontinenten, Nordhemisphäre
- systematische Fehler (Aufheizung des Sensors bei Tag)
- Fehler wegen Stationsänderungen, versch. Instrumententypen



[Ladstädter et al., AMT, 2011]

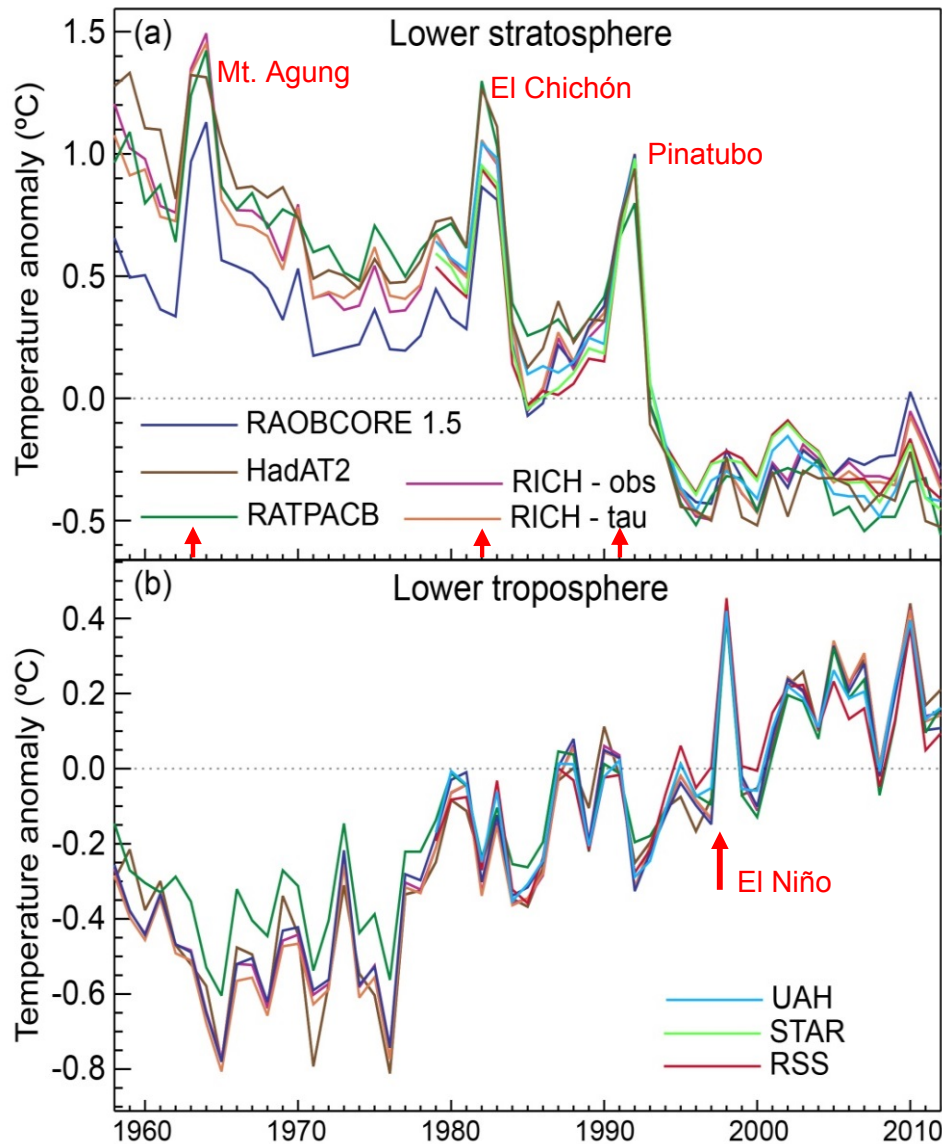
(Advanced) Microwave Sounding Unit – (A)MSU

- Passiver Mikrowellensensor seit 1979 zur Wetterbeobachtung
- misst die Erdatstrahlung 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)

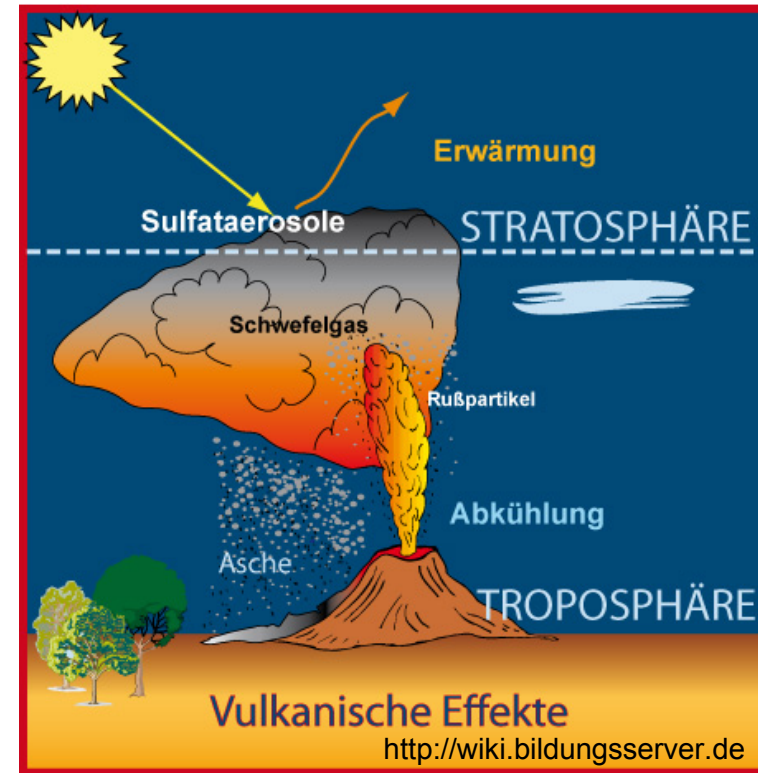


[Figure 2.23 IPCC 2013]

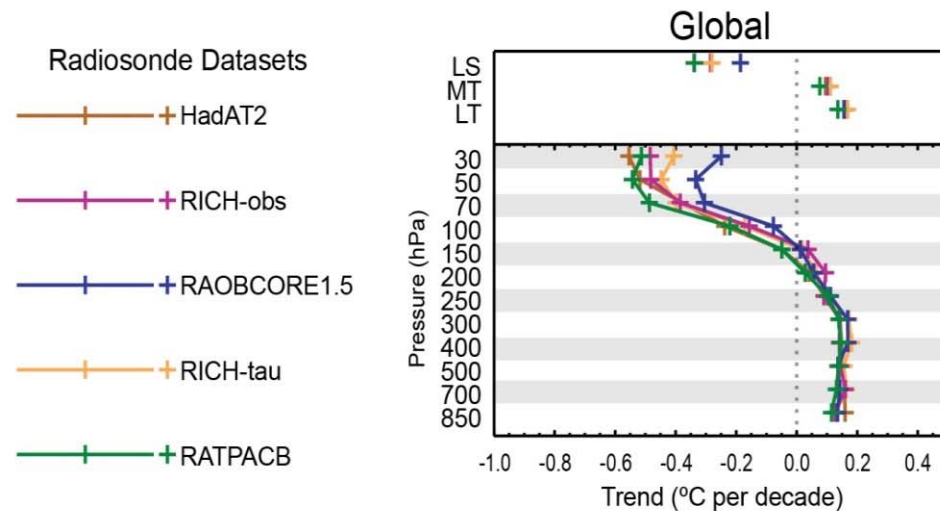
Abkühlung der Stratosphäre



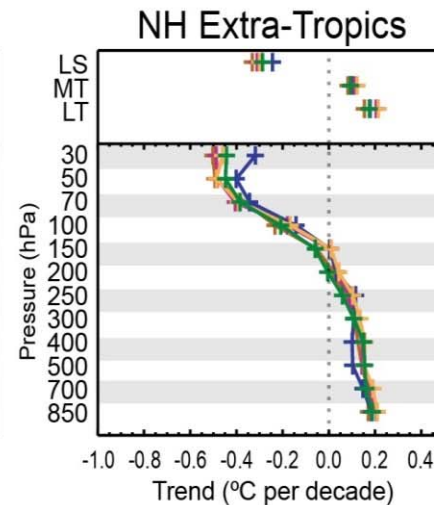
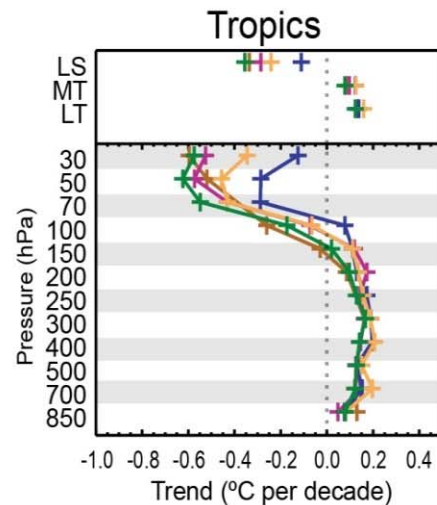
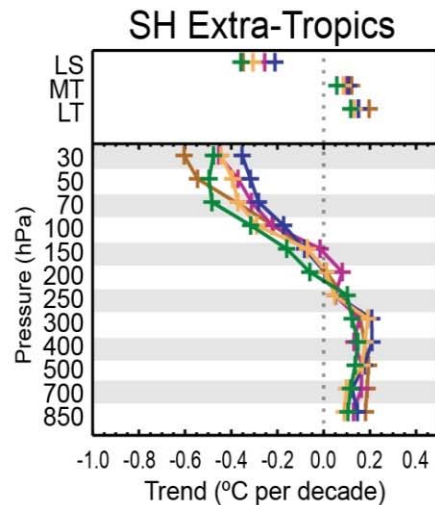
Erwärmung der Troposphäre



Global annual average lower stratospheric (top) and lower tropospheric (bottom) temperature anomalies relative to 1981–2010 [Fig. 2.24, IPCC 2013].



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



Atmospheric temperature trends from radiosonde and AMSU observation for the satellite era 1979–2012 [Fig.2.27, IPCC 2013].



World Meteorological Organization (WMO)
Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)
United Nations Environment Programme (UNEP)
UN Educational Scientific & Cultural Org. (UNESCO)
International Council for Science (ICSU)

Fundamentale Klimadatenätze (FCDR) für

- Klimamonitoring, besseres Verständnis des Klimasystems
- Detektion von Klimänderungen und Ursachenzuweisung
- Evaluierung von Klimamodellen
- Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen

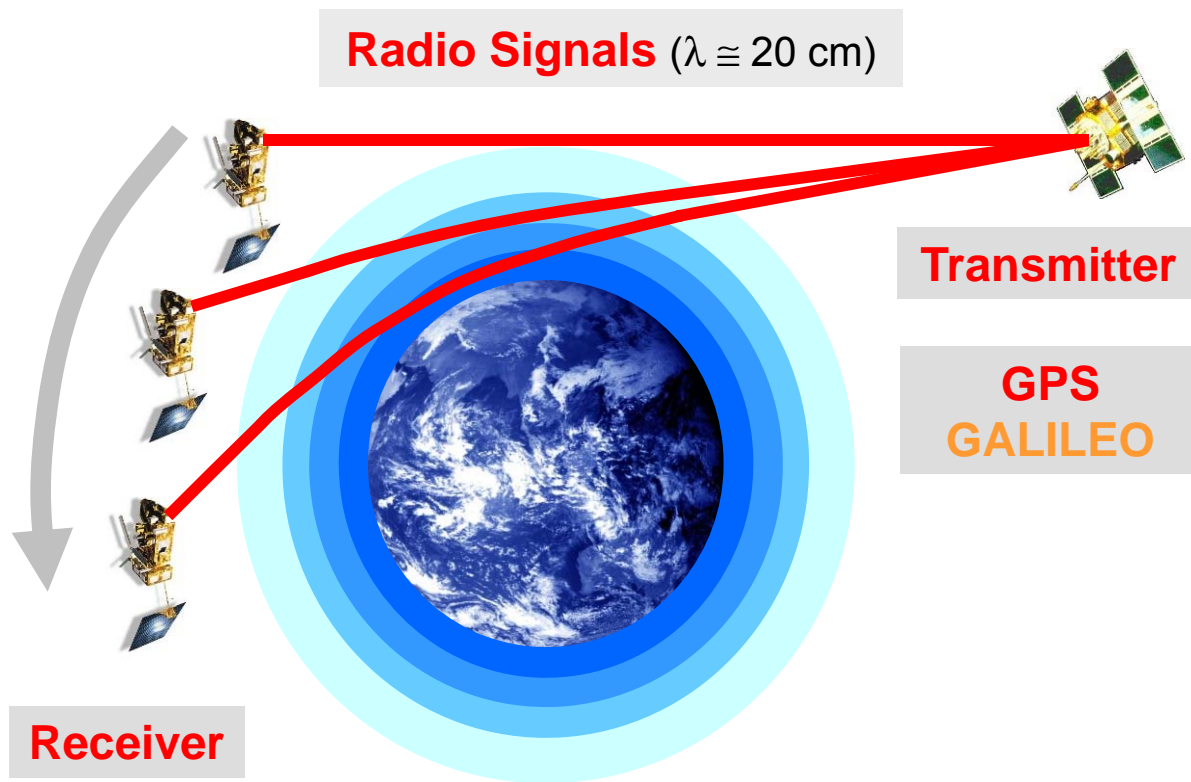
Anforderungen

- Langzeitstabilität
- Homogenität
- Reproduzierbarkeit
- Globale Bedeckung
- Genauigkeit
- Auflösung in Zeit und Raum



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

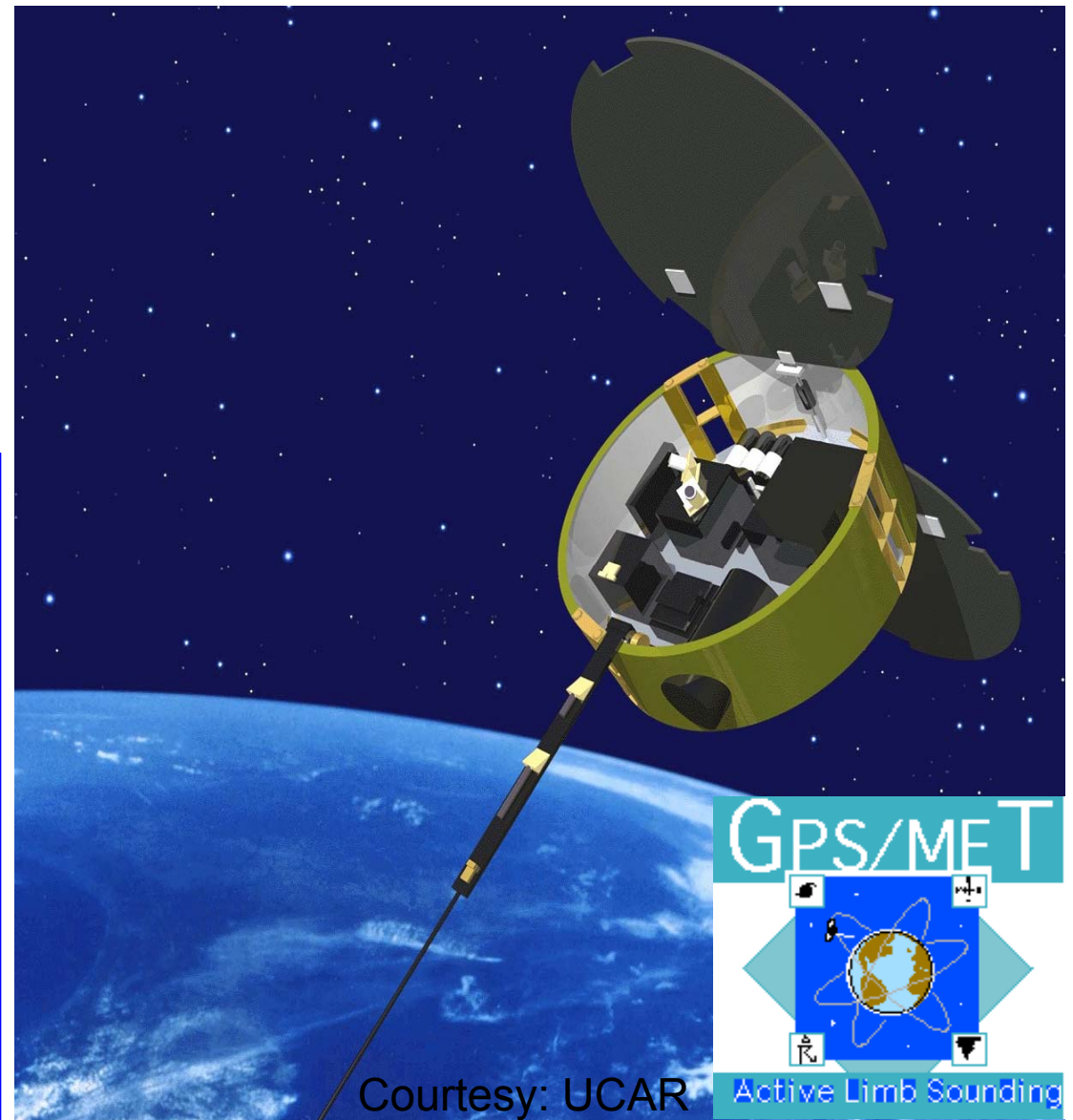
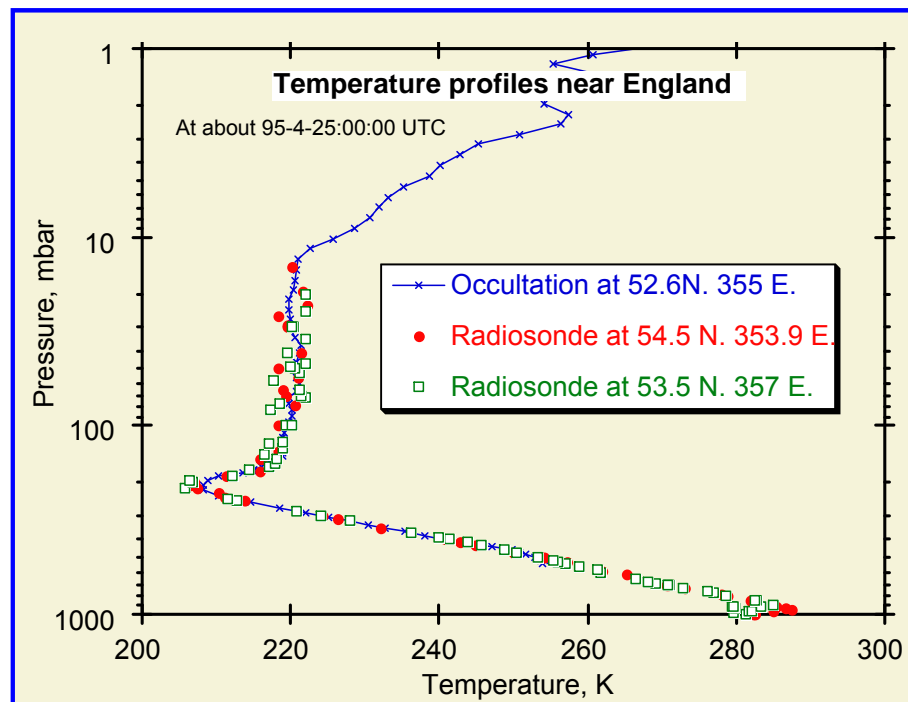
ESA, 3 im Orbit, 30 Satelliten, 23200 km

BeiDou/KOMPASS

China, 10 (35) Satelliten bis 2020, 22000 km

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

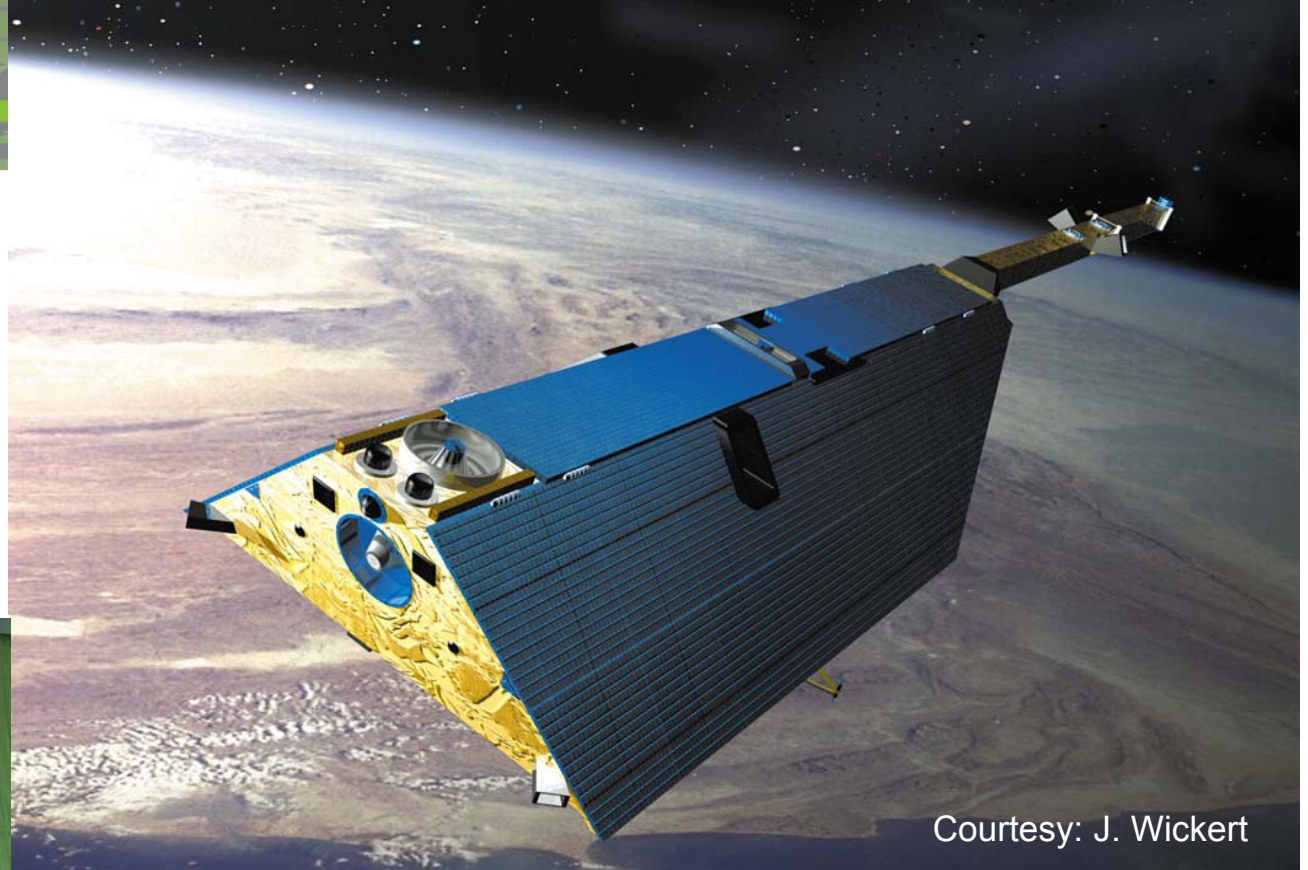
U.S. GPS/Met Experiment
auf MicroLab-I 1995
Messungen 1995 bis 1997
'Proof of Concept' Mission



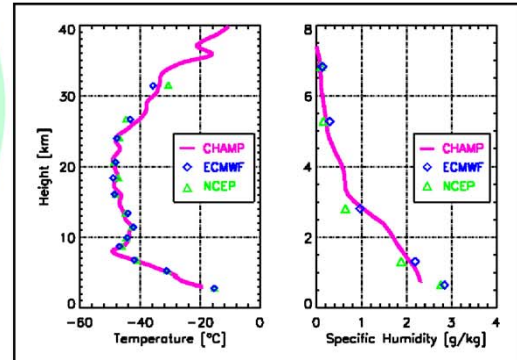
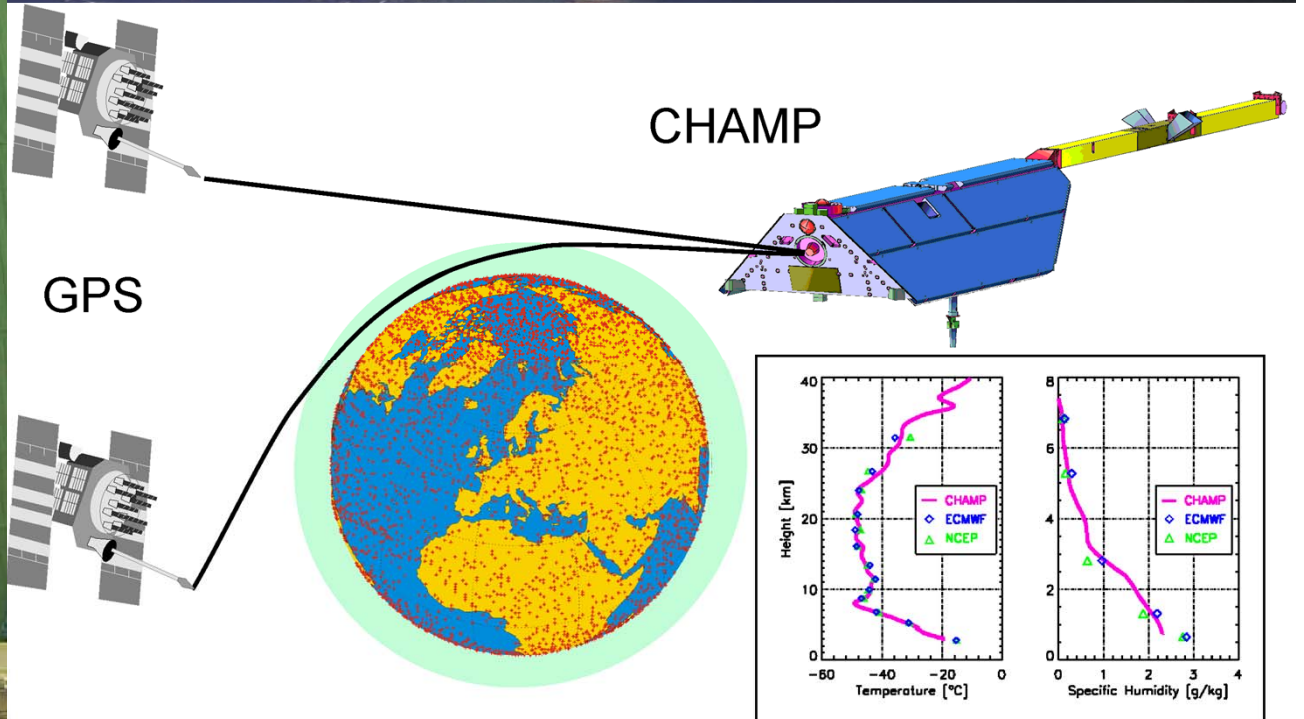
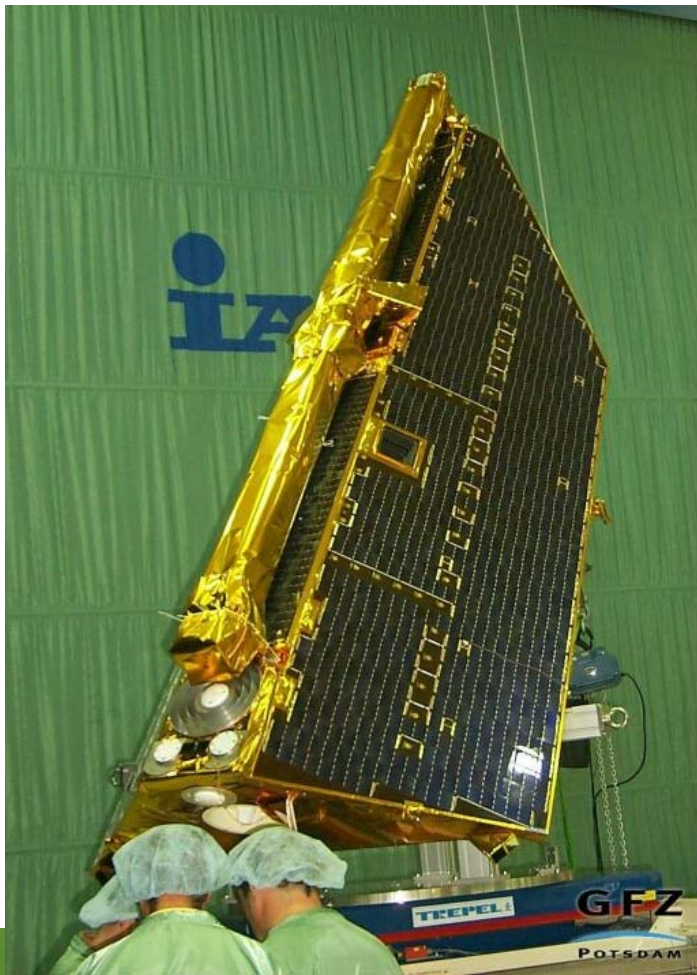
GPS RO mit CHAMP

■ CHAMP

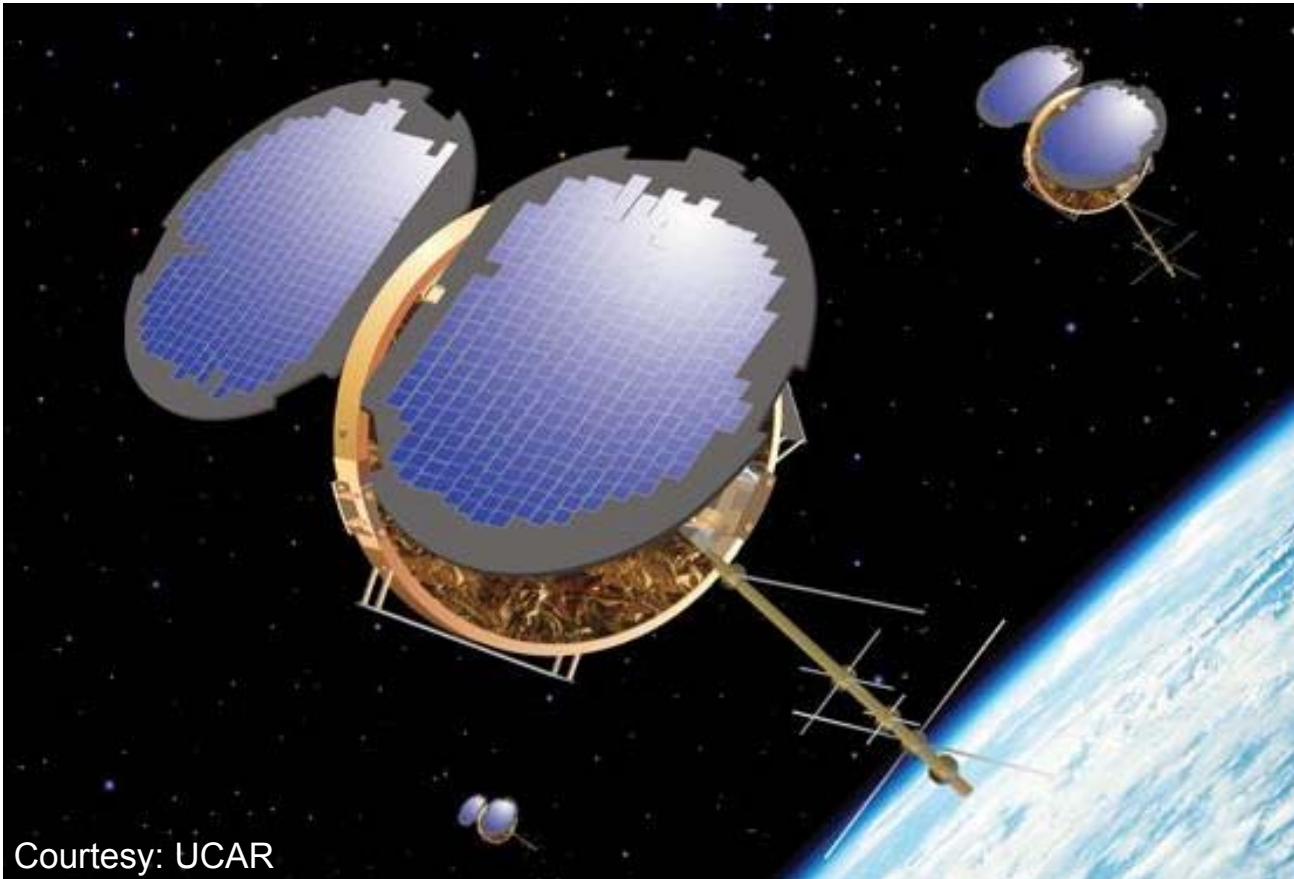
Sep 2001 bis Sep 2008
kontinuierliche
GPS RO Messungen
~250 pro Tag



Courtesy: J. Wickert

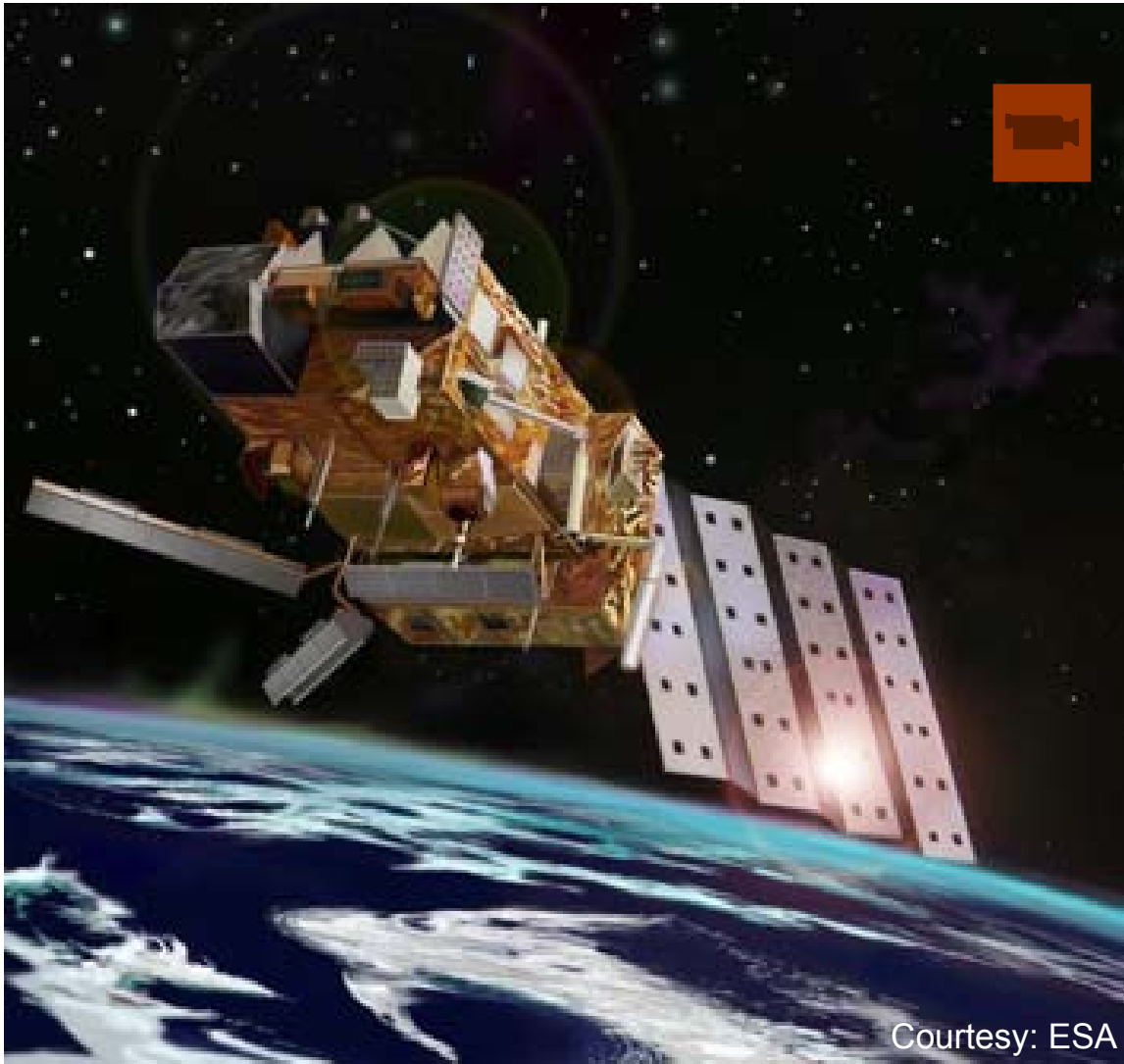


■ Formosat-3/COSMIC



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

■ MetOp



Europäische Mission
Satelliten MetOp A, B, C
im Abstand von 5 Jahren
Operationell 15 Jahre

Metop-A

Start: Okt 2006

~800 km Umlaufbahn

~600 RO Profile pro Tag

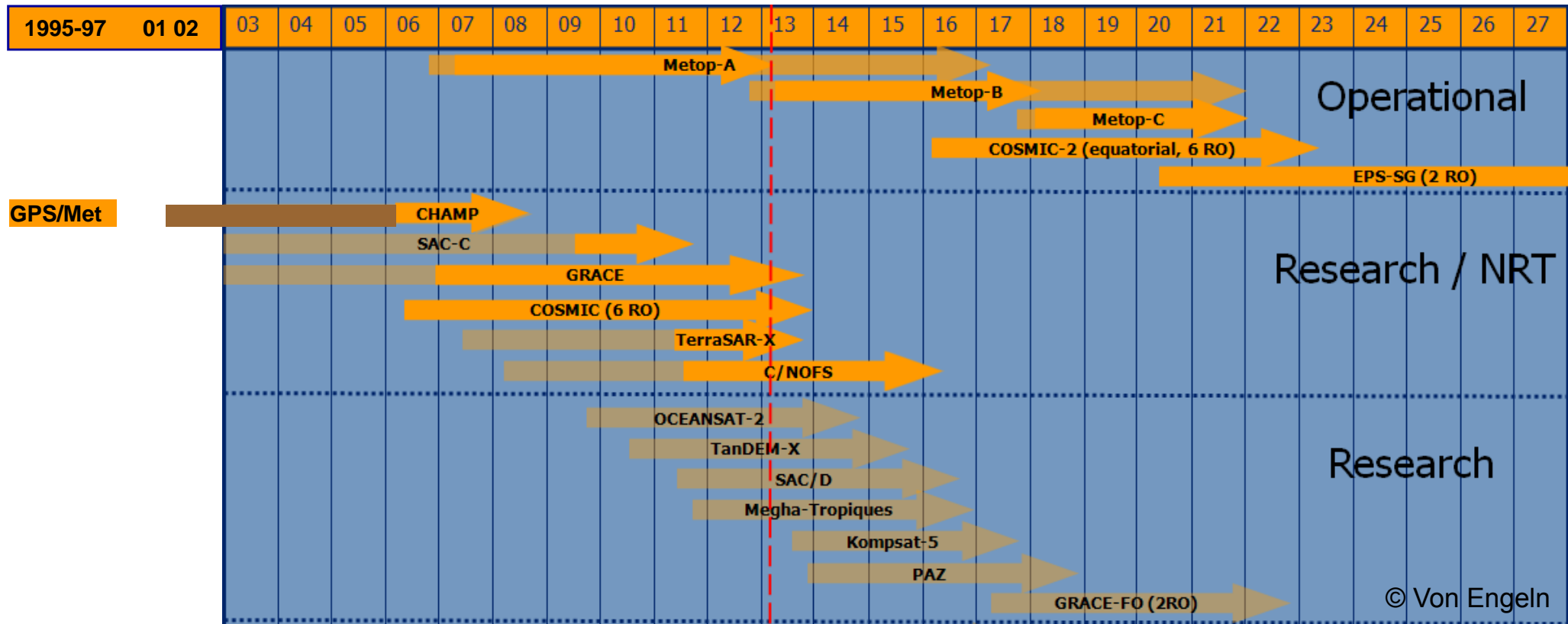
Metop-B

Start: 2012

GRAS

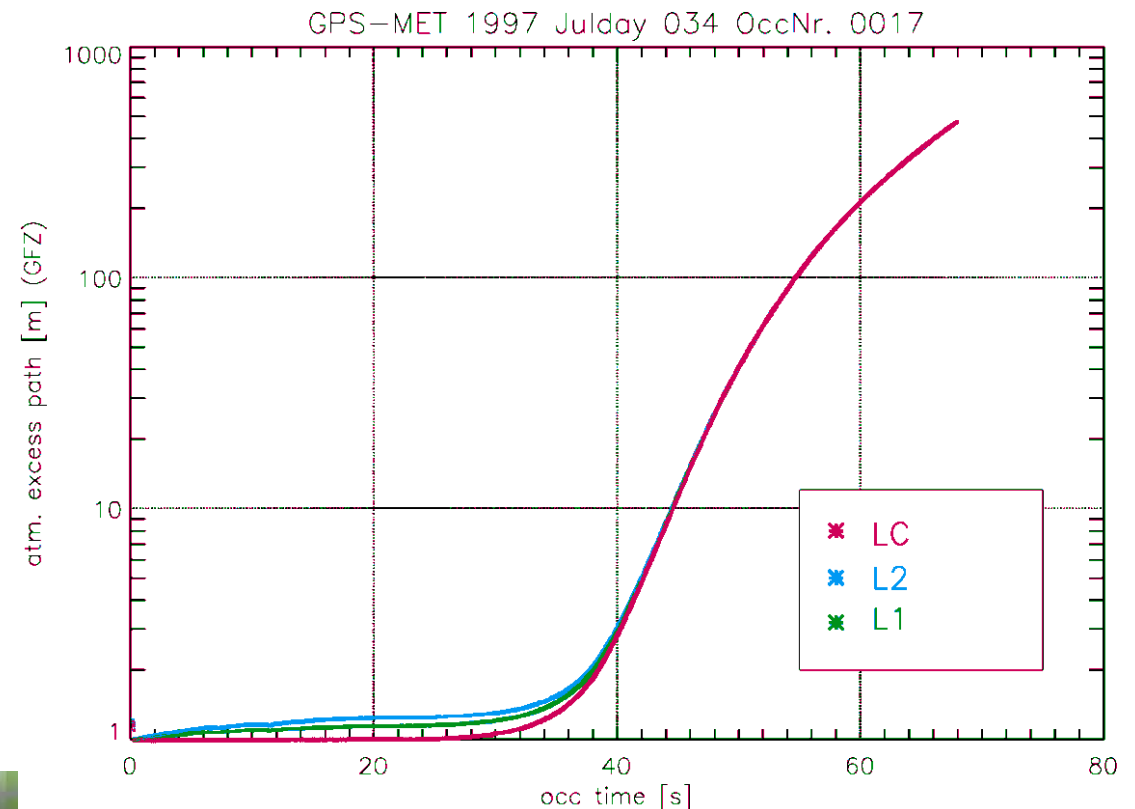
GNSS Receiver for
Atmospheric Sounding
neuer Empfänger

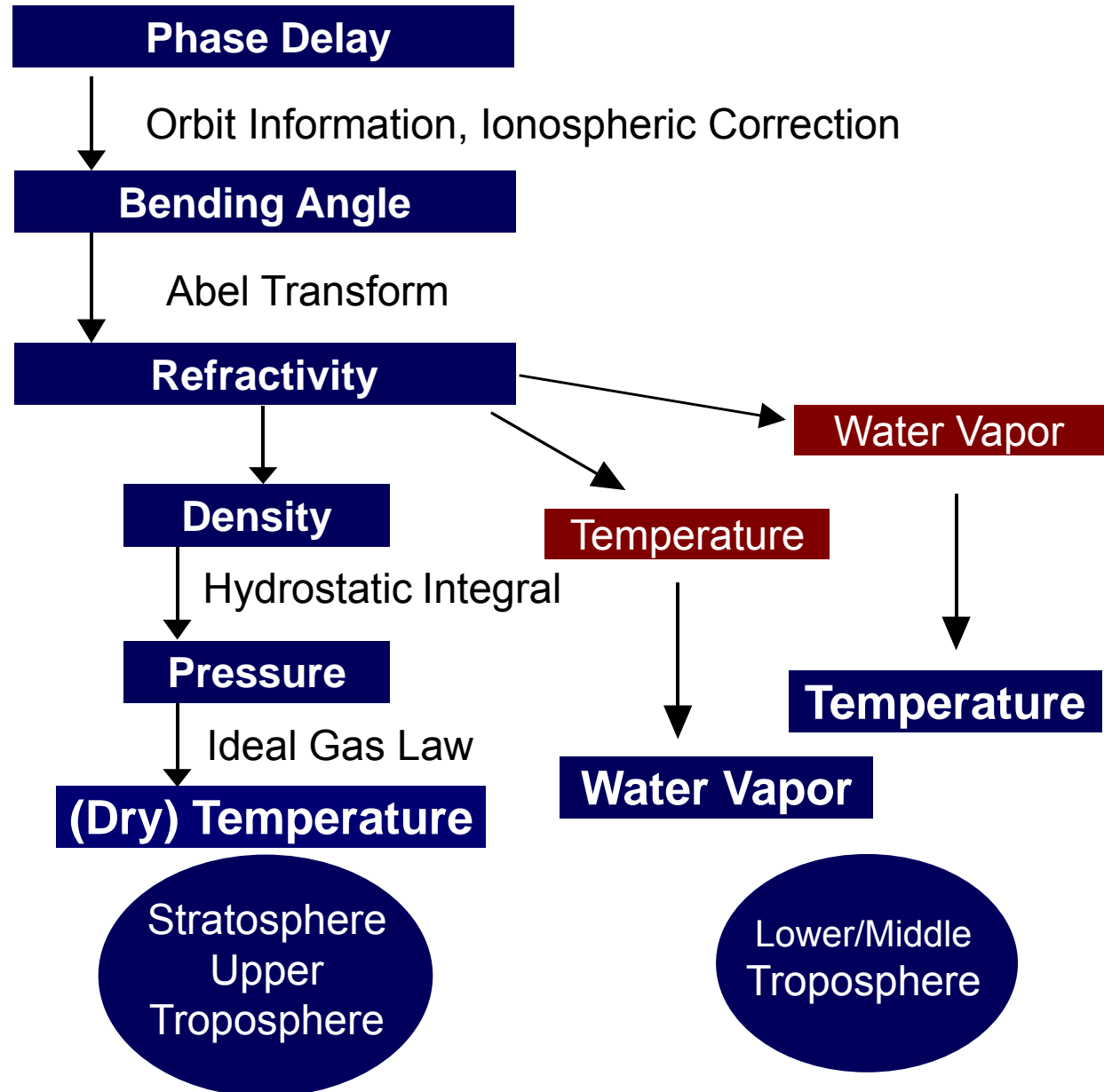
■ Status und geplante Missionen



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





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

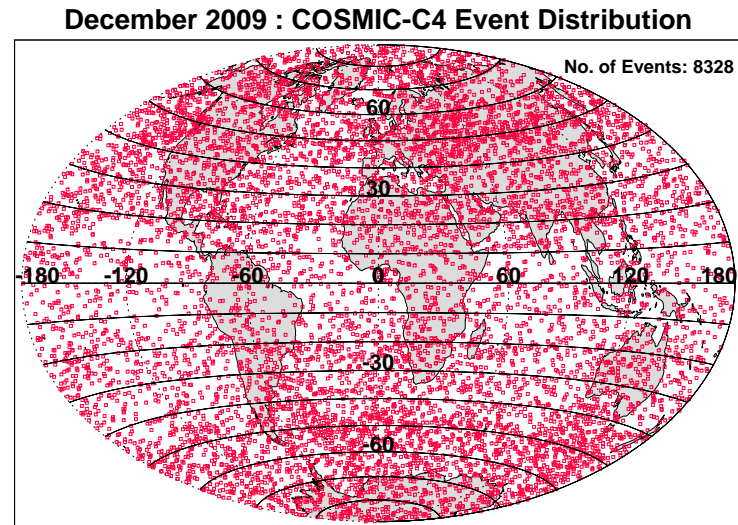
$$p(h) = \int_h^{\infty} g(h') \rho(h') dh'$$

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

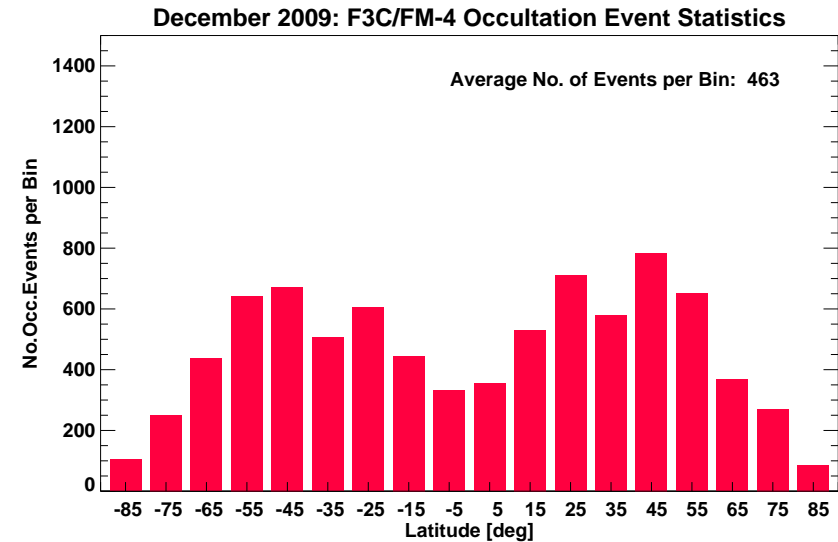
- Globale Bedeckung
- Allwettertauglichkeit
- Hohe vertikale Auflösung und Genauigkeit (0,5 km bis 1,5 km) in oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre (UTLS) ~8–30 km
- Fehlercharakterisierung von Datenprodukten
- Langzeitstabilität und Konsistenz
Messung mittels hochpräziser Atomuhren (SI-Traceability)
- 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)

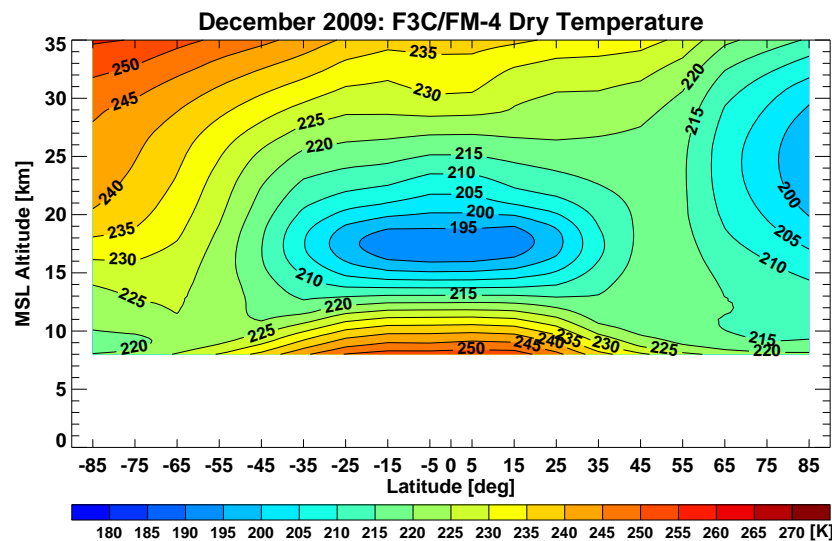
Verteilung von Okkultationsprofilen



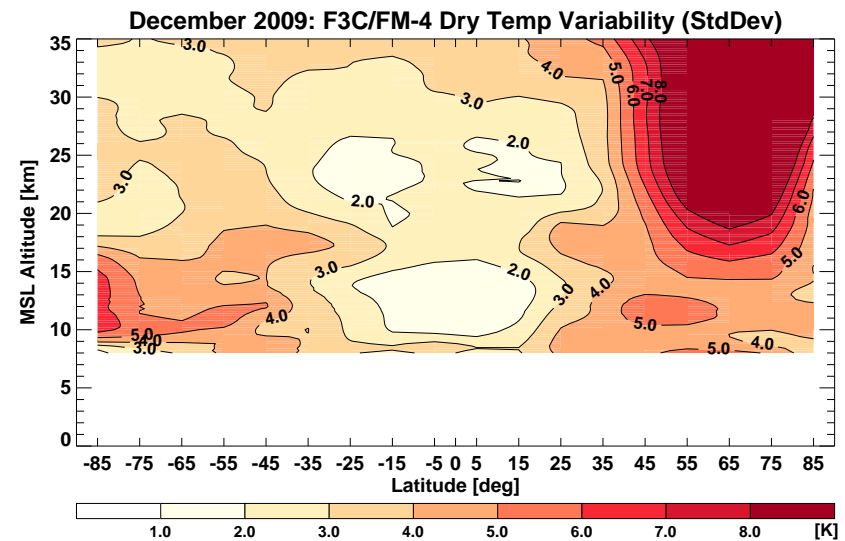
Anzahl von Profilen pro Bin



RO Temperatur Klimatologie

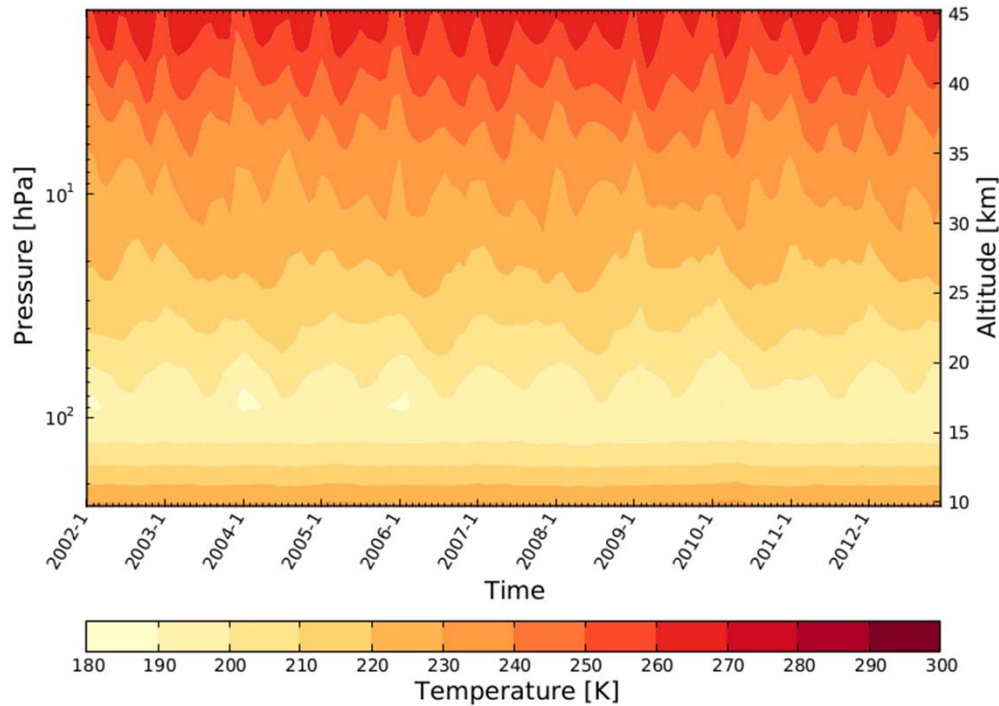


Variabilität

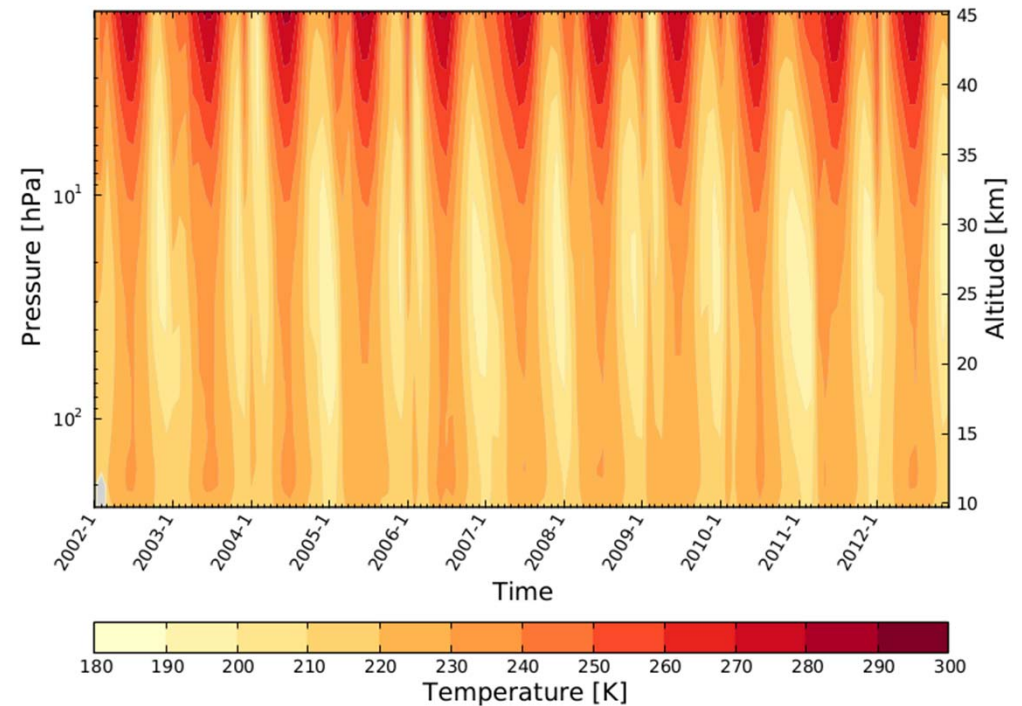


10-deg zonale mittlere Temperatur

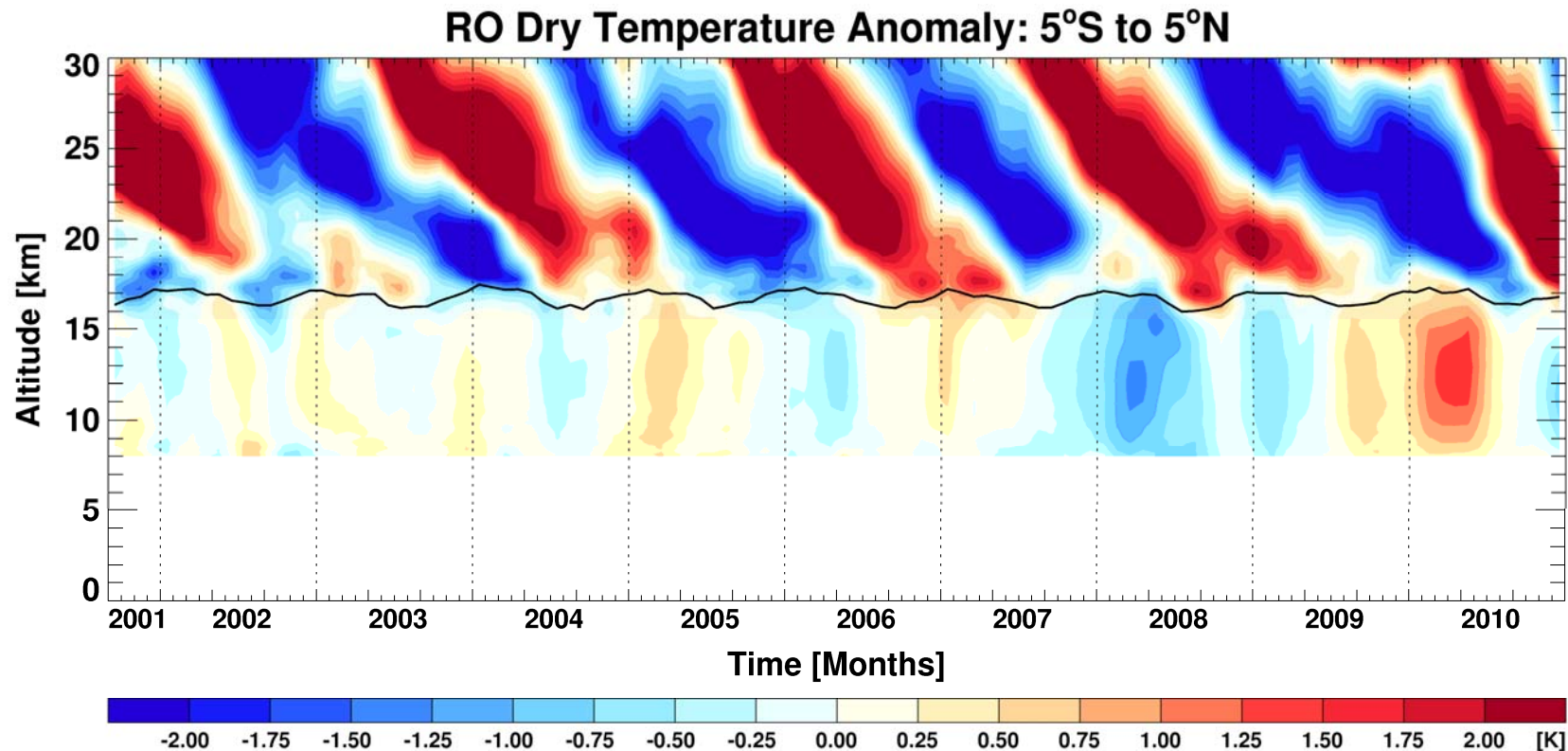
5°N latitude band



85°N latitude band



- Seasonalen Zyklus entfernen
- Monatsmitteltemperatur 2002-2012 abziehen
- Temperaturanomalien

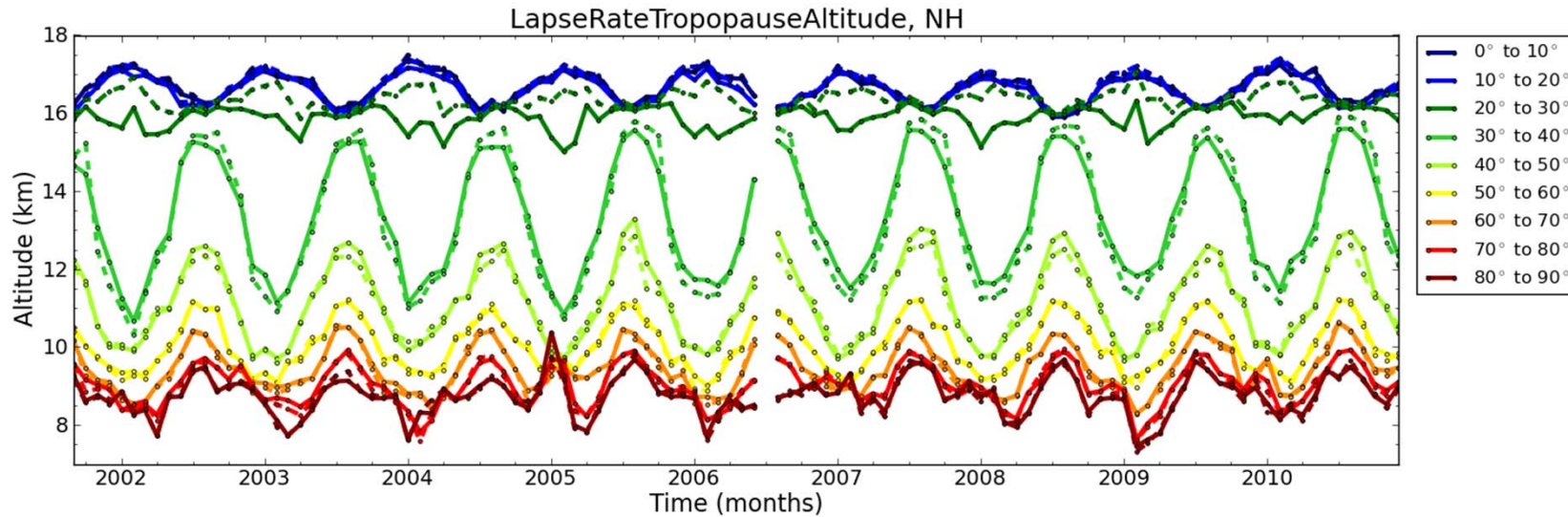


Quasi-Biennale-Oszillation (QBO)

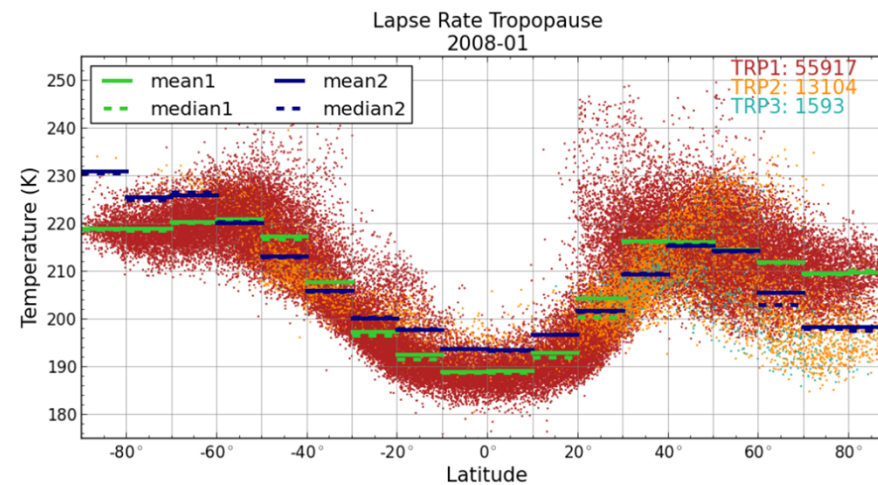
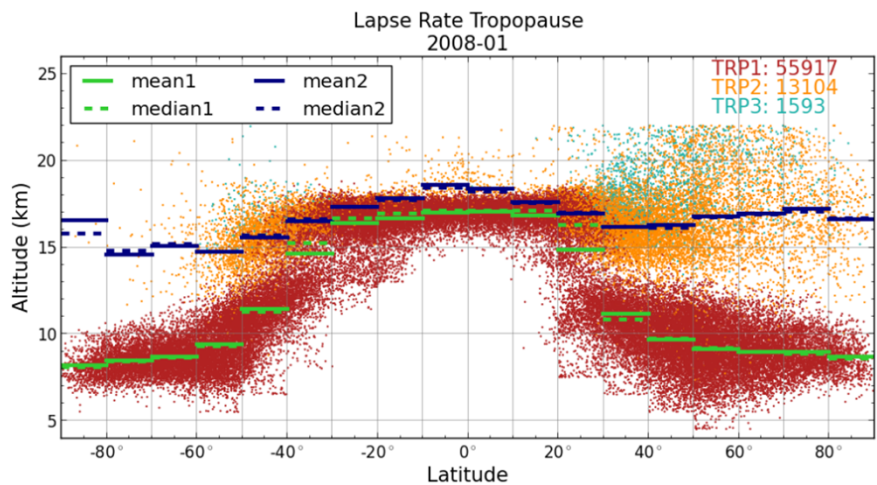
- quasi-periodische Variabilität (~28 Monate) in **unterer Stratosphäre** der Tropen
- Saisonale Änderungen der “Strahlungsheizung”, nach unten fortschreitende Wind/Temperaturanomalien ± 0.5 K bis ± 6 K, ~16–30km

El Niño Southern Oscillation (ENSO)

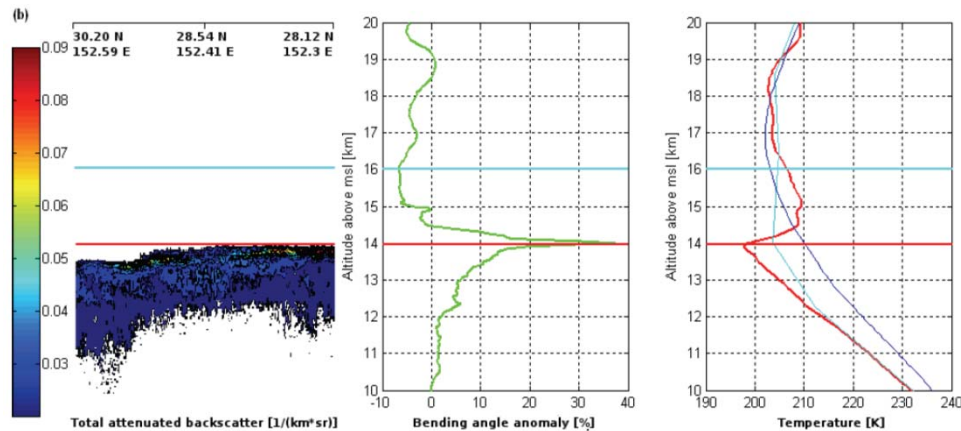
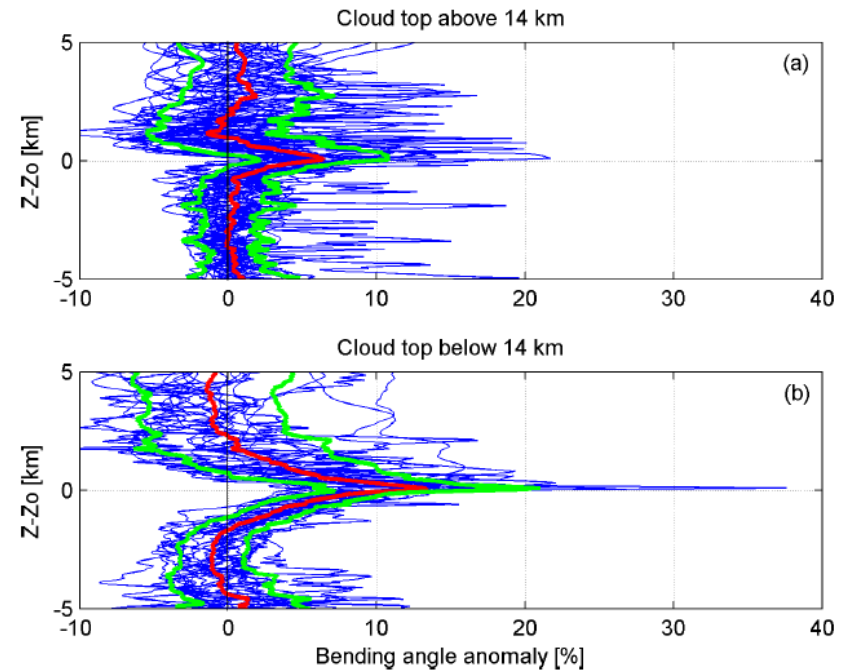
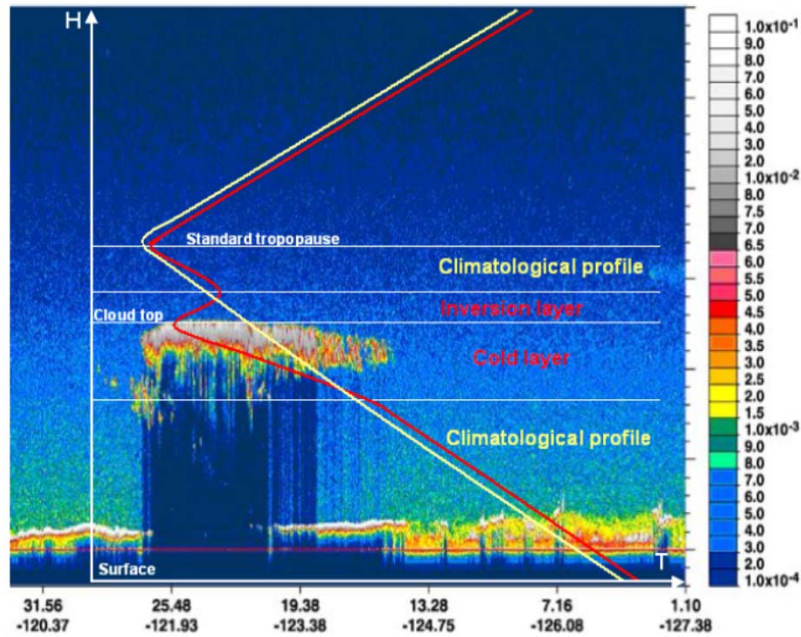
- Phänomen mit quasi-Periodizität von 3 bis 7 Jahren **in Troposphäre**, Änderungen der Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik, Kopplung Ozean-Atmosphäre

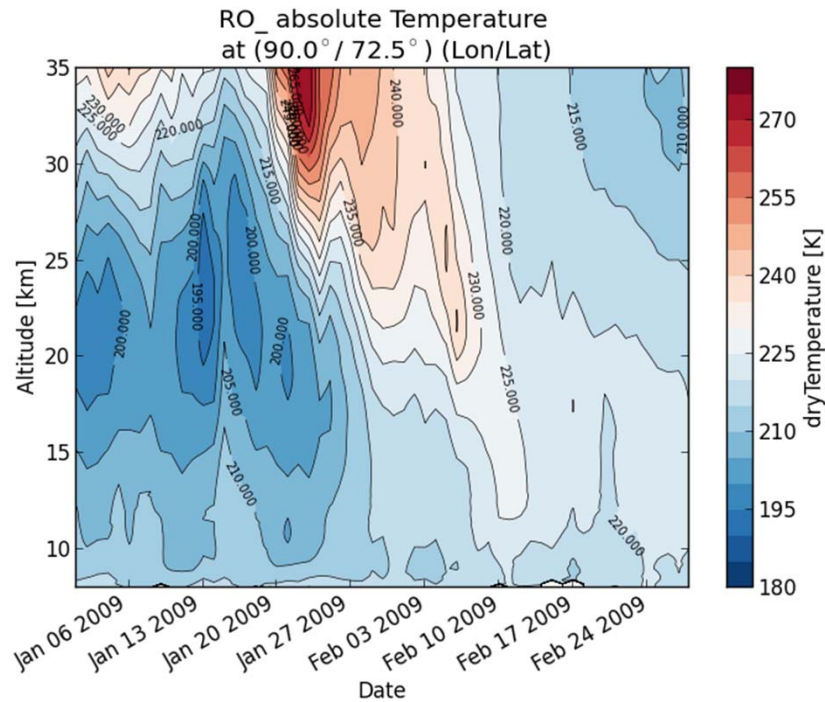


- Beobachtung der **Höhe der Tropopause** im Zeitverlauf (oben)
- Struktur: Höhe (links) und **Temperatur der Tropopause** (rechts) als Funktion der Breite

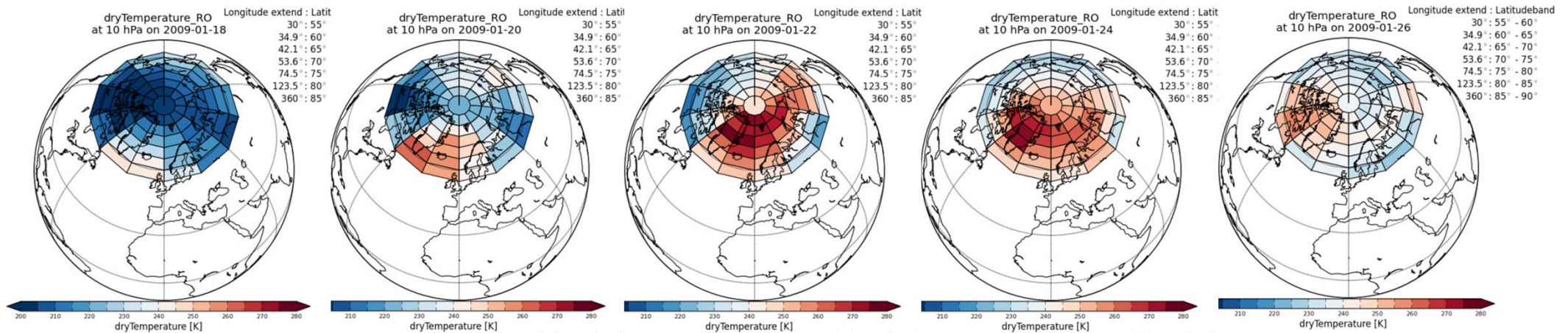


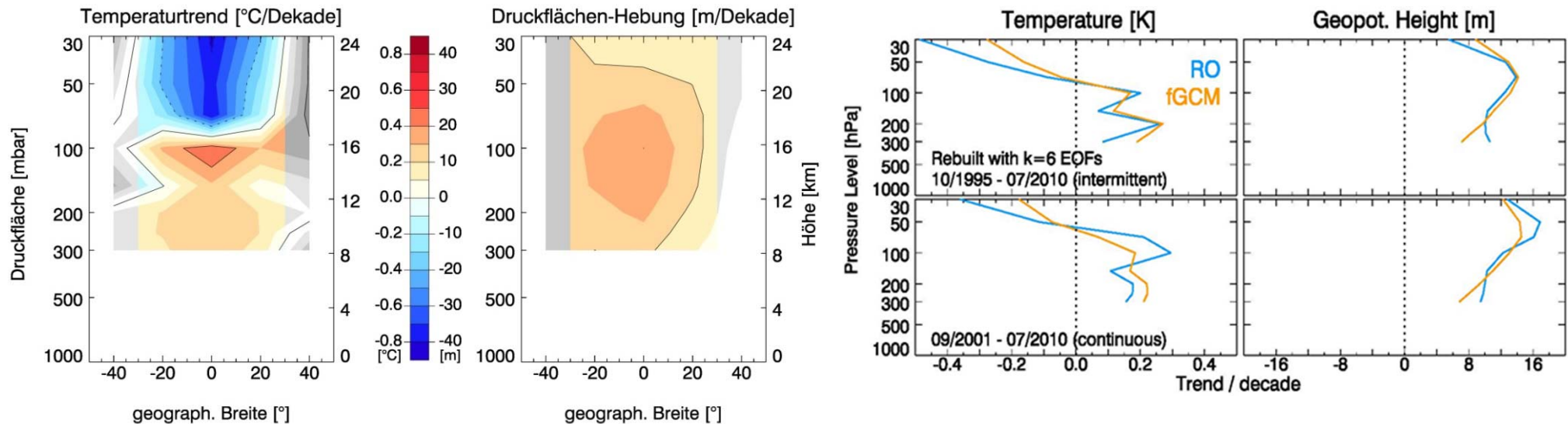
- Einblick in die thermische **Struktur von Konvektionssystemen**
- Detektion der Wolkenobergrenze





- Plötzliche Stratosphärenenerwärmung (Sudden Stratospheric Warmings, SSW)
- Starke Erwärmung der polaren Stratosphäre im Winter (50 K in einigen Tagen)
- Ursache: Umkehr West- in Ostwinde, Zusammenbruch des Polarwirbels.





- Trendstudien
- Signifikantes Klimaänderungssignals für Temperatur (96 %) und geopotentielle Höhe (99 %)
- Eine Hebung der Druckflächen in der oberen Troposphäre reflektiert Erwärmung und Ausdehnung der Troposphäre
- In der unteren Stratosphäre findet eine Abkühlung statt, am stärksten in den Tropen
- Stabilität und Genauigkeit von RO < 0.1 K erfüllt Anforderungen von GCOS in UTLS
- Unsicherheiten sind weit kleiner als detektierte Trends

- GPS RO liefert hochqualitative Daten atmosphärischer Variablen
- Eigenschaften umfassen hohe Genauigkeit, hohe vertikale Auflösung
Langzeitstabilität und Konsistenz
- Beobachtung von Klimavariabilität und atmosphärischen Prozessen
- 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