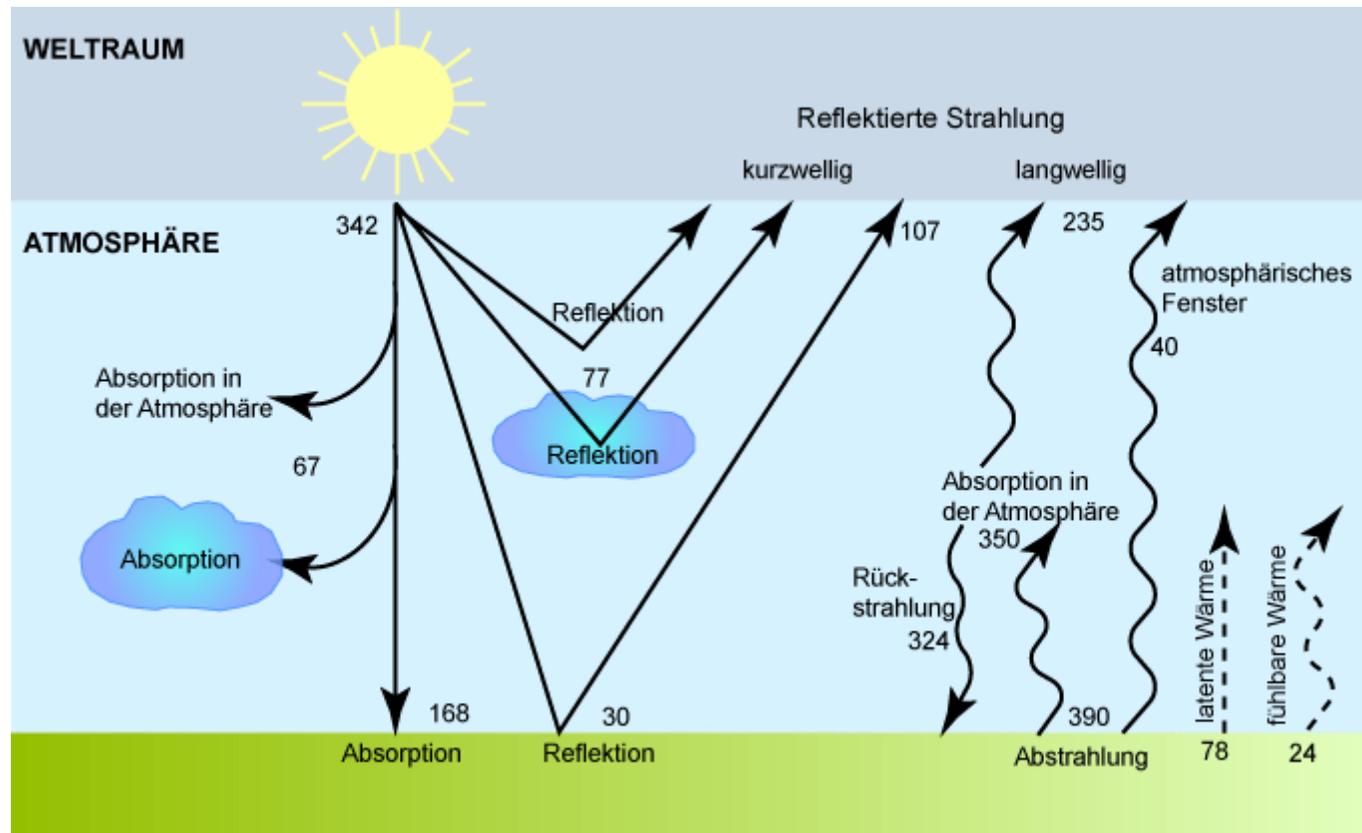


# Kapitel 2

## Kopplung der Troposphäre und Stratosphäre: Strahlung



## Kapitel 2: Gliederung

- Strahlung und Strahlungsantrieb
- Klimasensitivität
- Einfluss der Sonnenaktivität
- Wechselwirkungen der Sonnenaktivität und äquatorialer stratosphärischer Winde
- Andere mögliche Einflüsse

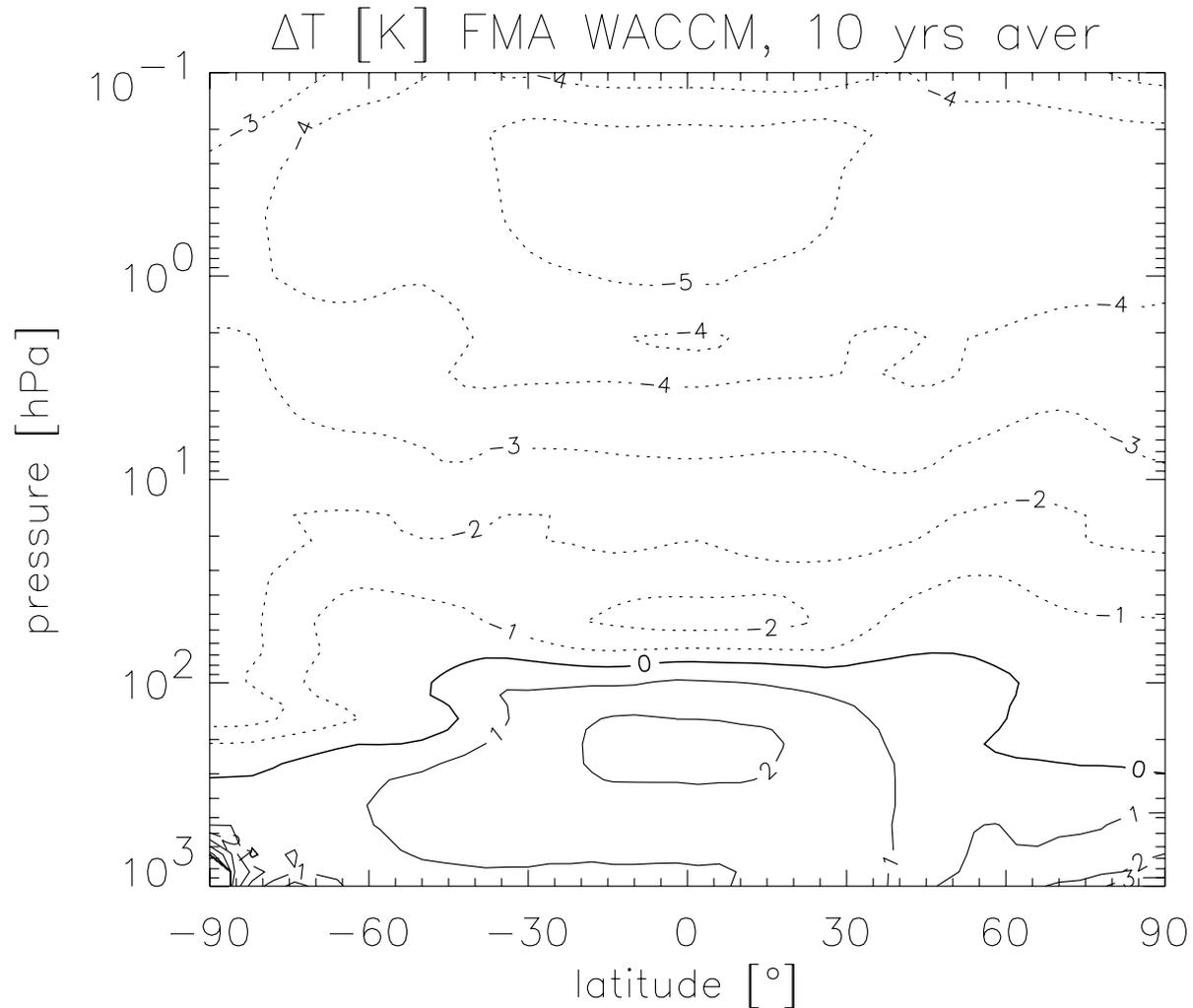
# Strahlung

- Treibhausgase (engl. greenhouse gases, GHGs), vor allem CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, erwärmen die Troposphäre durch Absorption von der Erde abgestrahlter infrarot (IR) Strahlung (langwellige Wärmestrahlung). Dies ist der allgemein gut bekannte **Treibhauseffekt**.
- Die Balance in der Troposphäre wird bestimmt einerseits durch die Freisetzung latenter Wärme, andererseits durch strahlungsbedingte Abkühlung durch Treibhausgase.
- In der Stratosphäre führen erhöhte Treibhausgaskonzentrationen zu einer Netto-Abkühlung, da sie mehr IR-Strahlung in den Weltraum emittieren als sie absorbieren.

# Strahlung

- Die Emission von IR-Strahlung wächst mit der lokalen Temperatur an. Deshalb steigt der Abkühlungseffekt mit der Höhe an und erreicht an der Stratopause ein Maximum, da hier die Temperaturen am höchsten sind.
- Der Abkühlungseffekt der Stratosphäre durch Treibhausgase variiert mit der geographischen Breite, da er von der Balance zwischen der Absorption von IR-Strahlung von unten und lokalen Emissionen abhängt.
- Der Netto-Abkühlungseffekt durch Treibhausgase geht bis in tiefere Schichten in höheren geographischen Breiten, er folgt in etwa der Tropopause.

# Muster der Temperaturänderung



Beispiel für die Änderung der troposphärischen und stratosphärischen Temperaturen in einer Modellsimulation.

# Strahlungsantrieb

- Jede Änderung in der Konzentration eines strahlungsaktiven Spurengases ändert die Balance der Netto-Erwärmungsraten, die durch die in die Atmosphäre eintretende solare (kurzwellige) Strahlung und die austretende terrestrische (langwellige) Strahlung in die Atmosphäre bestimmt werden.
- Die Änderung dieses (Strahlungs-) Gleichgewichts nur durch Veränderung der Konzentration der entsprechenden Substanzen, unter Festhalten aller anderen Klimavariablen, nennt man **Strahlungsantrieb**.
- Der Strahlungsantrieb wird für gewöhnlich als Netto-Änderung des Strahlungsflusses an der Tropopause angegeben, da dieser ein akzeptabler Indikator für Änderungen der Bodentemperatur sein kann.

## Strahlungsantrieb von Ozon

- Ozon absorbiert sowohl kurz- als auch langwellige Strahlung. Um den Strahlungsantrieb durch Ozonänderungen richtig zu bestimmen ist es wichtig, zwischen den unmittelbaren Effekten und den Effekten nach Angleichung der Stratosphärentemperatur zu unterscheiden.
- Eine Ozonzerstörung in der **unteren Stratosphäre** verursacht einen sofortigen Anstieg der kurzwelligen solaren Strahlungsflüsse an der Tropopause und eine leichte Reduzierung der nach unten gerichteten langwelligen Strahlung.

## Strahlungsantrieb von Ozon

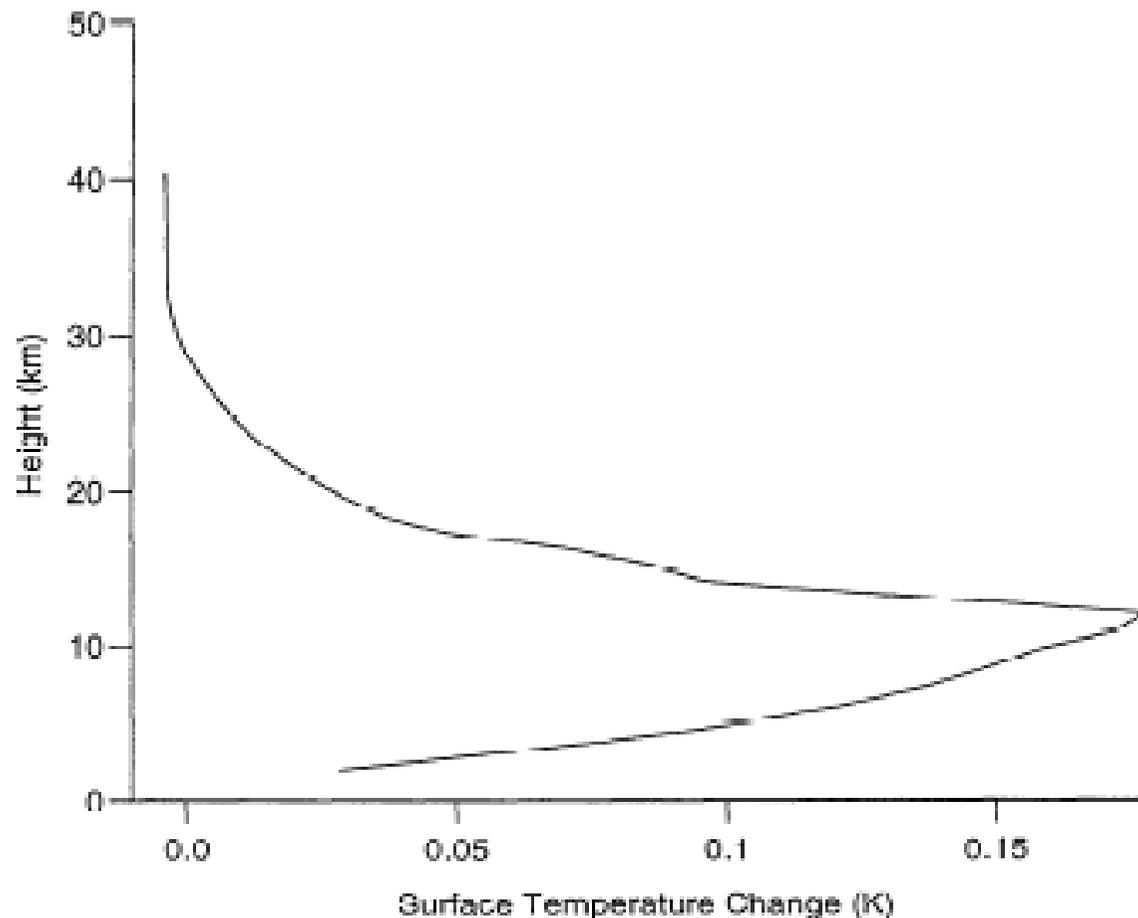
- Der unmittelbare Nettoeffekt ist ein positiver Strahlungsantrieb. Aber der Rückgang der Ozonkonzentration verursacht in der Folge eine geringere Absorption von solarer und terrestrischer Strahlung. Dies führt im Folgenden zu einer lokalen Abkühlung.
- Nachdem sich die untere Stratosphäre angepasst hat, ist der Nettoeffekt der Ozonzerstörung hier ein negativer Strahlungsantrieb.
- Im Gegensatz dazu führt eine Ozonzerstörung in der **mittleren und oberen Stratosphäre** zu einem leicht positiven Strahlungseffekt.

# Strahlungsantrieb von Ozon

- Die höchste Empfindlichkeit des Strahlungsantriebs aufgrund von Ozonänderungen wird im Tropopausenbereich gefunden (siehe nächste Abbildungen).
- Die größte Empfindlichkeit von Änderungen der Bodentemperatur wird ebenfalls für den Bereich der Tropopause gefunden (Forster und Shine, 1997).

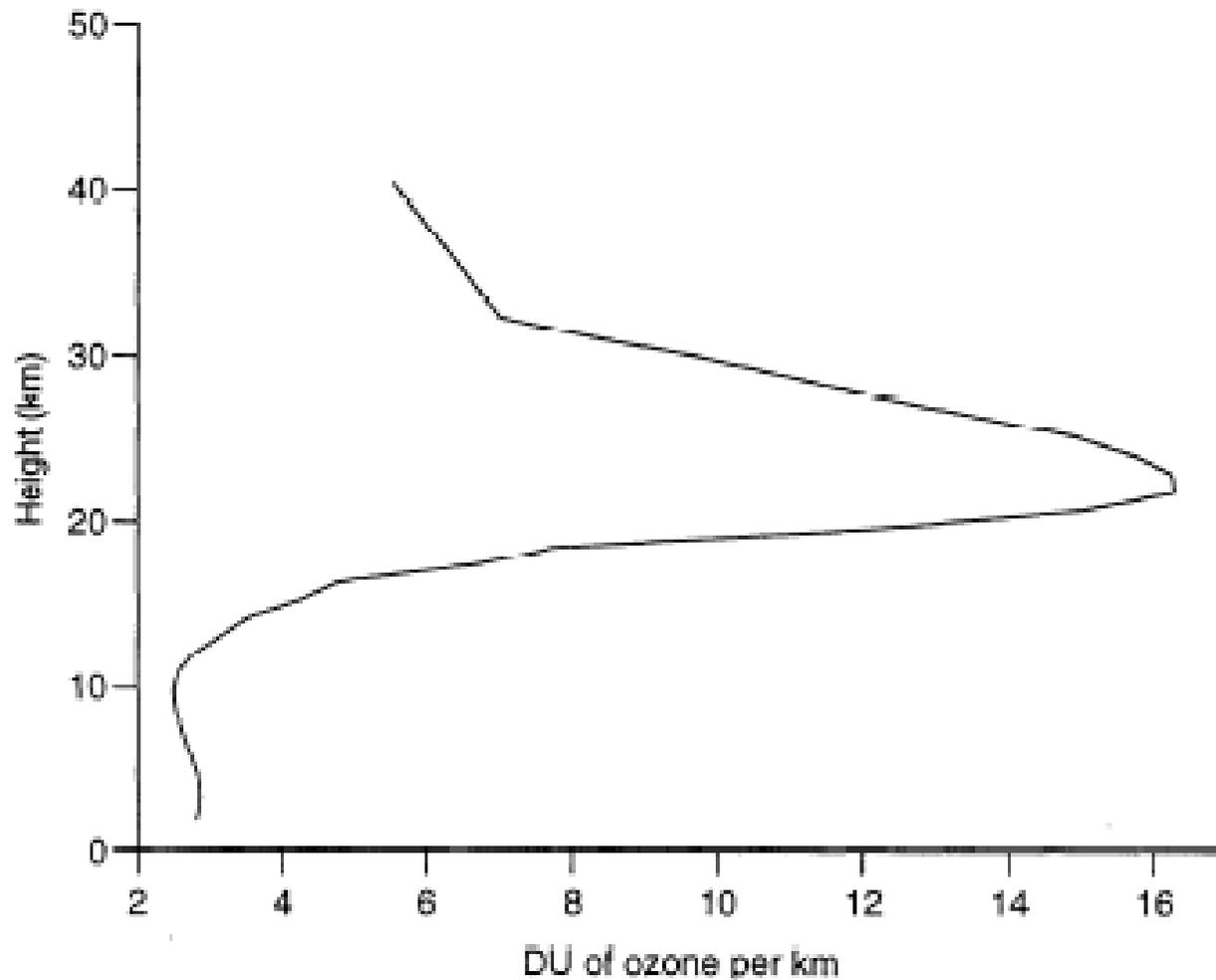
Forster, P.M. de F., und K.P. Shine, Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes, *J. Geophys. Res.*, 102 (D9), 10841-10855, 1997.

## Forster und Shine, 1997:



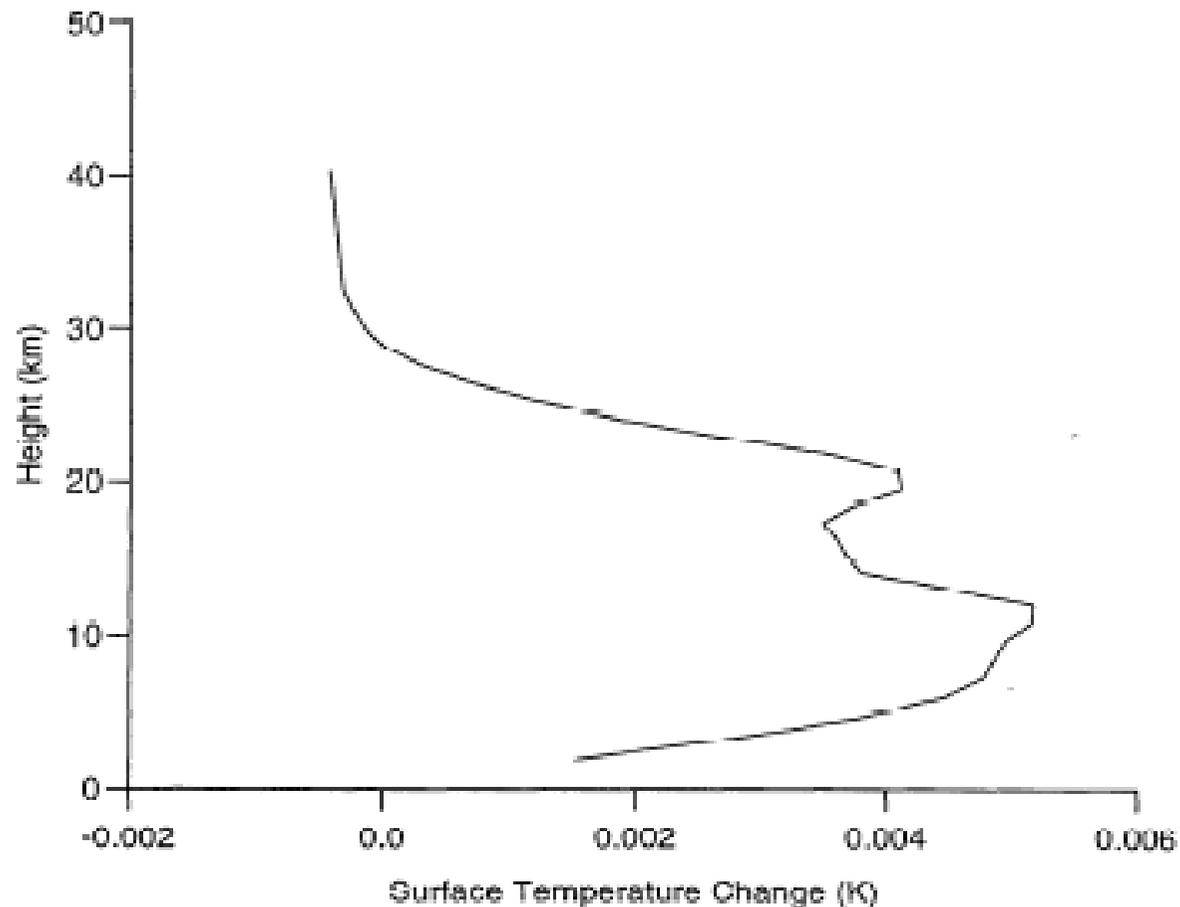
**Figure 9.** The change in surface temperature (Kelvin) as a function of height of ozone change. The figure was produced by adding 10 DU of ozone into each 1km thick layer of the atmosphere in turn. Results are from a radiative-convective model and are for the global mean atmospheric profile. No atmospheric feedbacks are included.

## Forster und Shine, 1997:



**Figure 10.** Dobson units (DU) of ozone per kilometer, as a function of height, for the global mean ozone profile.

## Forster und Shine, 1997:



**Figure 11.** The change in surface temperature (Kelvin) as a function of height of ozone change. The figure was produced by increasing ozone concentrations by 10% in each 1 km thick layer of the atmosphere in turn. Results are from a radiative-convective model and are for the global mean atmospheric profile. No atmospheric feedbacks are included.

# Klimasensitivität

- Die Quantifizierung des Einflusses stratosphärischer Ozonänderungen auf die Bodentemperaturen ist komplizierter als die Abschätzung des Strahlungsantriebs (engl. radiative forcing, RF).
- Der Grund dafür ist, dass ein sogenannter Klimasensitivitätsterm  $\lambda$  eingeführt werden muss, um den Strahlungsantrieb (RF) auf Änderungen der Bodentemperatur ( $T_{\text{surf}}$ ) zu überführen.
- Die Beziehung zwischen  $\lambda$  und Änderungen von  $T_{\text{surf}}$  ist gegeben durch die Beziehung:

$$\Delta T_{\text{surf}} = \lambda \text{ RF},$$

wobei  $\lambda$  die Einheit  $\text{K} (\text{W m}^{-2})^{-1}$ .

# Klimasensitivität

- $\Delta T_{\text{surf}}$  ist die Gleichgewichtsreaktion der mittleren globalen Bodentemperatur und RF ist die strahlungsbedingte Störung.
- Es wurde gezeigt, dass die Annahme der Linearität zwischen dem Strahlungsantrieb und Änderungen der Bodentemperatur für Ozonstörungen gültig ist (Forster und Shine, 1999).

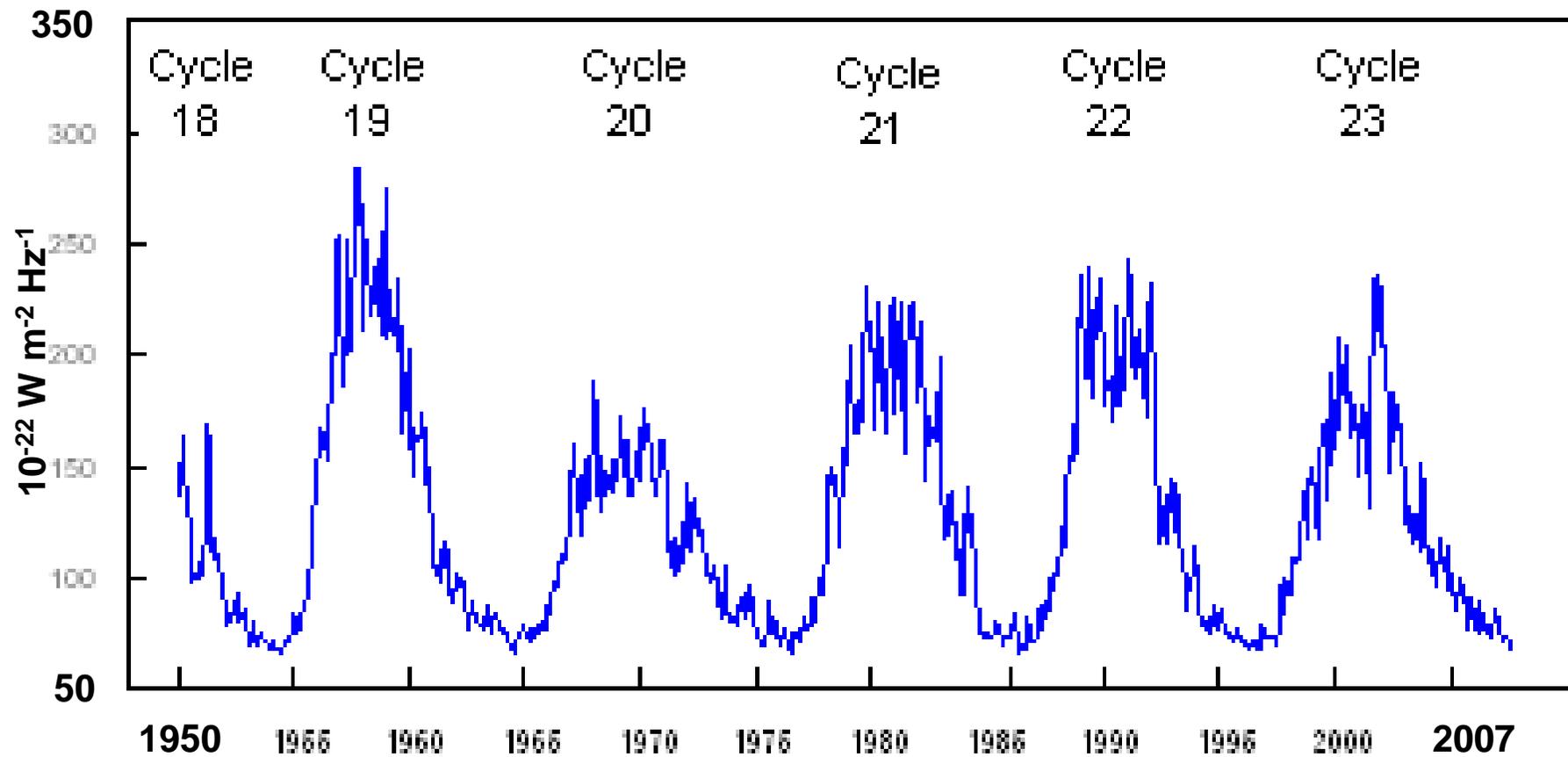
Forster, P.M. de F., und K.P. Shine, Stratospheric water vapour changes as a possible contributor to observed stratospheric cooling, *Geophys. Res. Lett.*, 26 (21), 3309-3312, 1999.

# Klimasensitivität

- $\lambda$  ist durch Beobachtungen nur schlecht belegt und wird deshalb häufig durch Ergebnisse von Klimamodellen überprüft, gängigerweise als die Gleichgewichtsreaktion der mittleren globalen Temperatur aufgrund eines Strahlungsantriebs, der einer CO<sub>2</sub>-Verdopplung entspricht.
- $\lambda$  ist abhängig von der Stärke der Klimarückkopplungen, die zum Beispiel verknüpft sind mit Wolken, Wasserdampf, u.s.w., und daher variiert seine Größe von Modell zu Modell zum Teil beträchtlich. Der Wert von  $\lambda$  liegt im Bereich von 1.5 bis 4.5 K (W m<sup>-2</sup>)<sup>-1</sup>.
- $\lambda$  hängt deutlich von der Art des Antriebs ab, besonders im Falle von stratosphärischen Ozonänderungen und kann sich von der der CO<sub>2</sub>-Verdopplung unterscheiden. (Siehe auch Kapitel 7.)

# Einfluss der Sonnenaktivität

Monthly Mean 2800 MHz Solar Flux ( Observed )  
**Jan 1950 - Sep 2007**



# Einfluss der Sonnenaktivität

- Variationen der solaren Strahlung mit dem 11-jährigen Sonnenaktivitätszyklus haben direkten Einfluss auf den Strahlungs- und Ozonhaushalt der Mittleren Atmosphäre (z.B. Haigh, 1994).

Haigh, J.D., The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate, *Nature*, 370 (6490), 544-546, 1994.

- In Jahren mit maximaler Sonnenaktivität ist die solare ultraviolette (UV) Strahlung erhöht. Dies führt zu einer erhöhten Produktion von Ozon und damit einer Erwärmung der Stratosphäre und der Atmosphäre darüber.
- Durch eine Änderung des meridionalen Temperaturgradienten können sich die Anregungs- und Ausbreitungsbedingungen für planetare und kleiner-skalige Wellen verändern, die die globale atmosphärische Zirkulation antreiben.

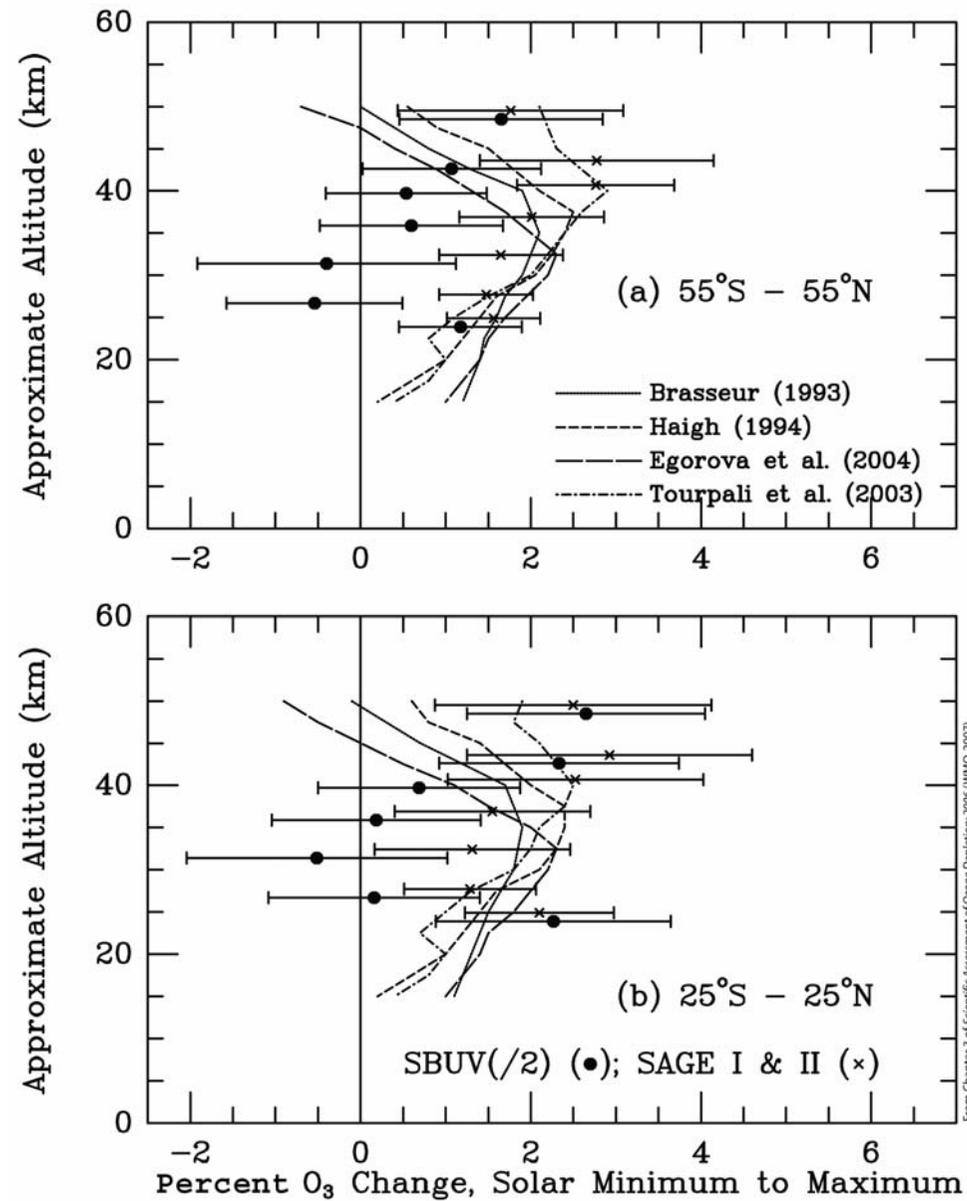
## Einfluss der Sonnenaktivität

- Obwohl der direkte Strahlungsantrieb durch den Sonnenaktivitätszyklus im Bereich der oberen Stratosphäre relativ schwach ist, kann er zu großen indirekten, dynamischen Reaktionen in der unteren Atmosphäre führen und zwar durch die Veränderung des polaren stratosphärischen Jets (Polarwirbel in der Stratosphäre) und der Brewer-Dobson Zirkulation (Kodera und Kuroda, 2002).

Kodera, K., und Y. Kuroda, Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res.*, 107 (D24), 4749, doi: 10.1029/2002JD002224, 2002.

- Solche dynamisch bedingten Änderungen können sich wieder auf den Chemiehaushalt der Atmosphäre auswirken, einerseits über den Transport chemischer Spezies, andererseits über chemische Reaktionen, da viele Reaktionsraten temperaturabhängig sind.

# Einfluss der Sonnenaktivität



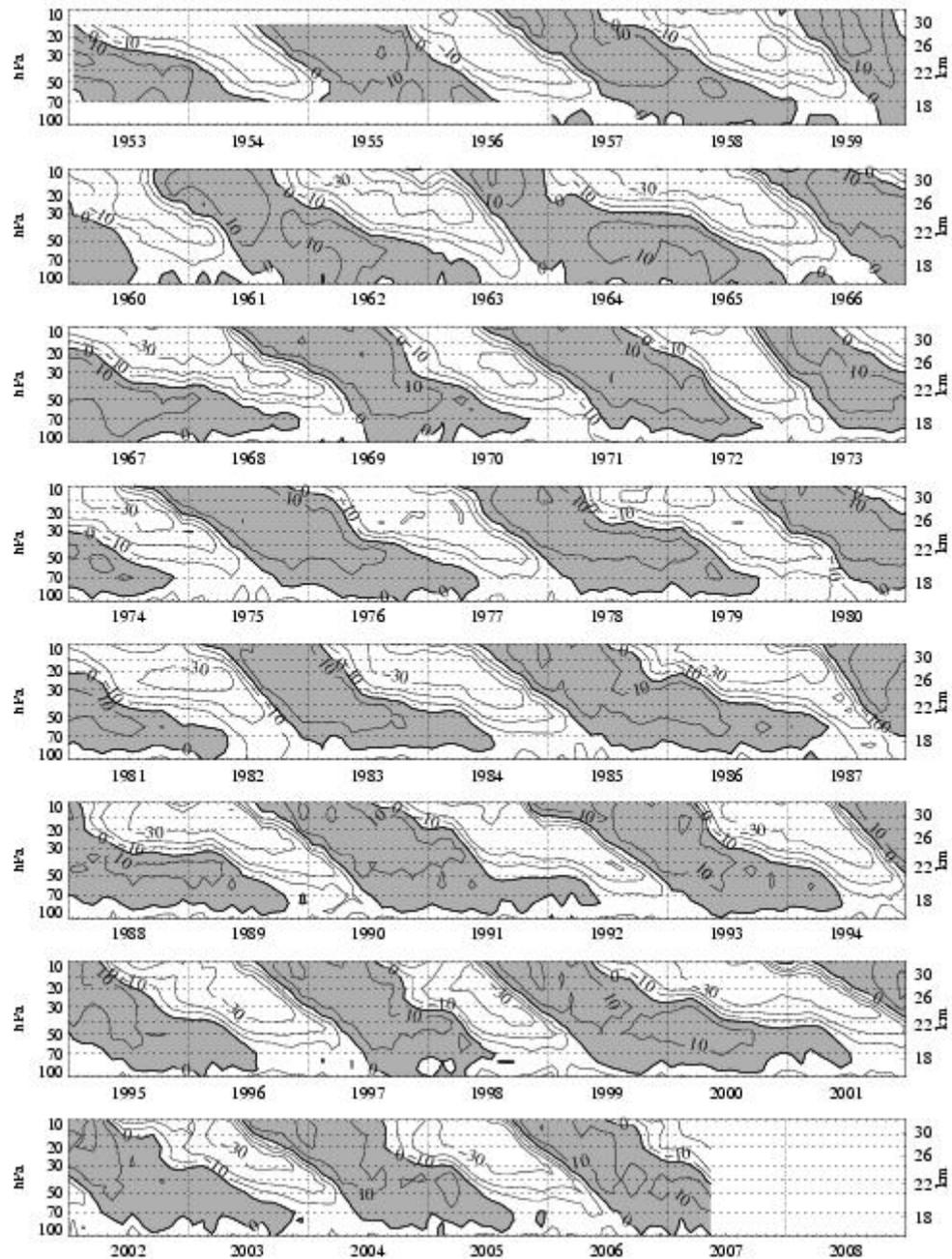
## Sonnenaktivität und QBO

- Die arktische untere und mittlere Stratosphäre neigt dazu, während der Westwindphase der äquatorialen quasi-zweijährigen Oszillation (engl. Quasi-Biennial Oscillation, QBO) kalt und ungestört zu sein; sie ist warm und gestört während der QBO-Ostwindphasen (Holton und Tan, 1980; 1982).

Holton, J.R. und H.-C. Tan, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb, *J. Atmos. Sci.*, 37, 2200-2208, 1980.

Holton, J.R. und H.-C. Tan, The quasi-biennial oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 140-148, 1982.

# Die äquatoriale quasi-zweijährige Oszillation: QBO



# Die äquatoriale quasi-zweijährige Oszillation:

(siehe auch Kapitel 3)

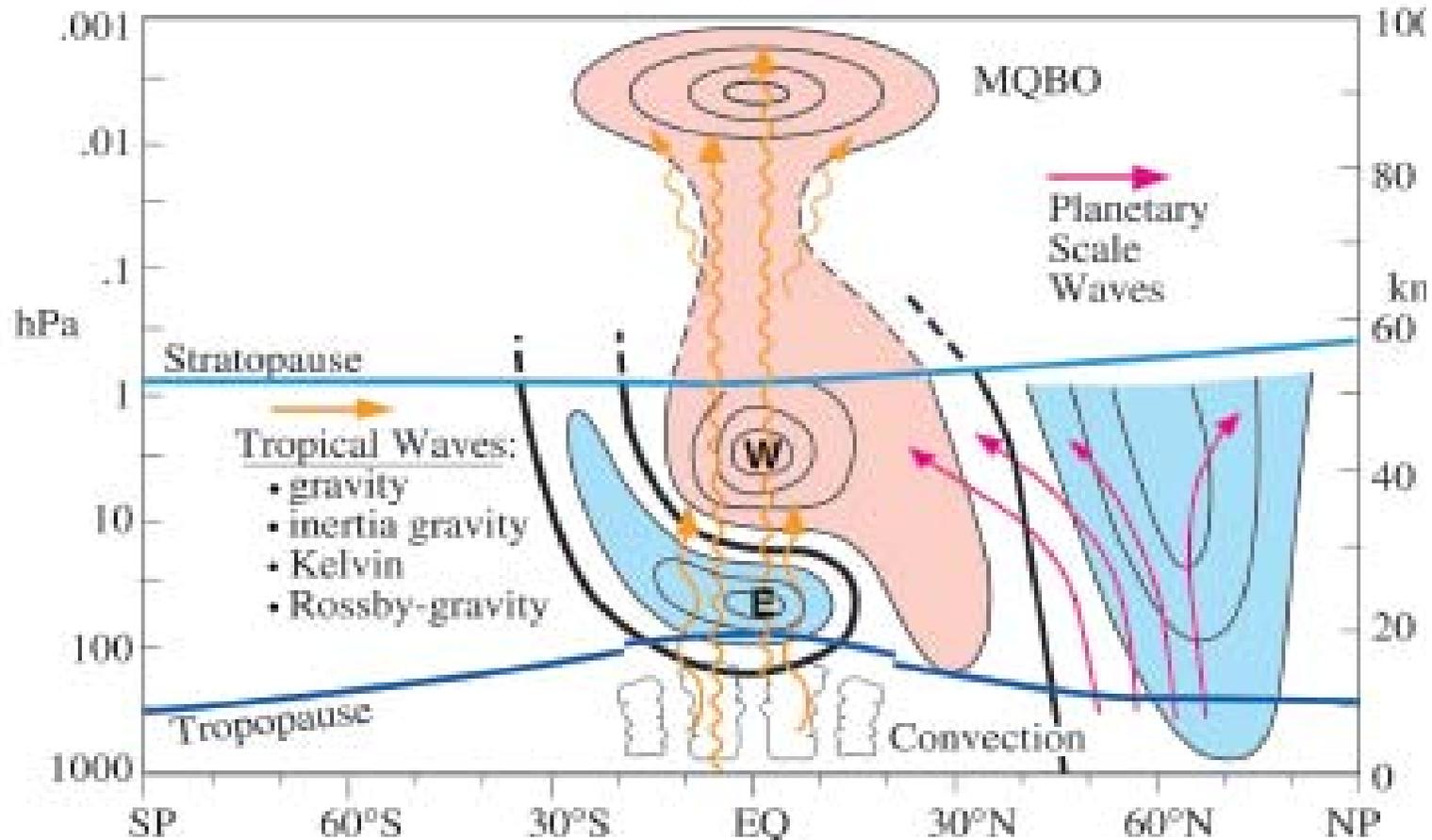
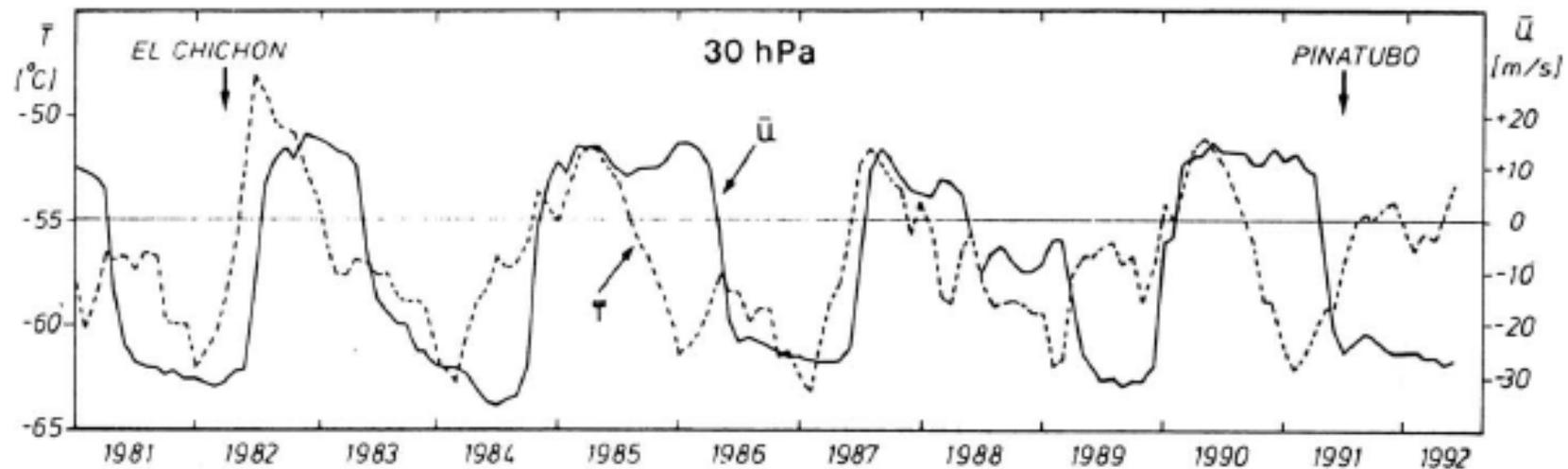


Plate 2. Dynamical overview of the QBO during northern winter. The propagation of various tropical waves is depicted by orange arrows, with the QBO driven by upward propagating gravity, inertia-gravity, Kelvin, and Rossby-gravity waves. The propagation of planetary-scale waves (purple arrows) is shown at middle to high latitudes. Black contours indicate the difference in zonal-mean zonal winds between easterly and westerly phases of the QBO, where the QBO phase is defined by the 40-hPa equatorial wind. Easterly anomalies are light blue, and westerly anomalies are pink. In the tropics the contours are similar to the observed wind values when the QBO is easterly. The mesospheric QBO (MQBO) is shown above ~80 km, while wind contours between ~50 and 80 km are dashed due to observational uncertainty.

## Die äquatoriale quasi-zweijährige Oszillation:

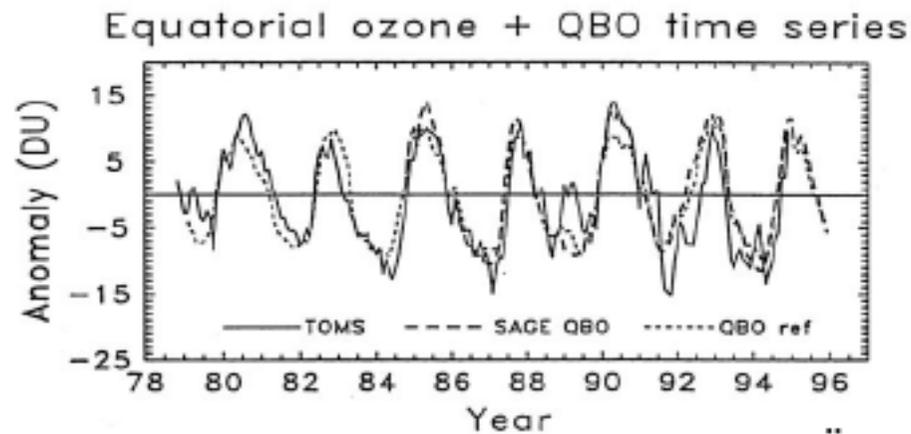
### QBO-Signal in der Temperatur



Monatsmittel: 30 hPa zonaler Wind über Singapur und Breitenkreismittel 30 hPa Temperatur über dem Äquator (aus Analysen der Berliner Stratosphärengruppe)

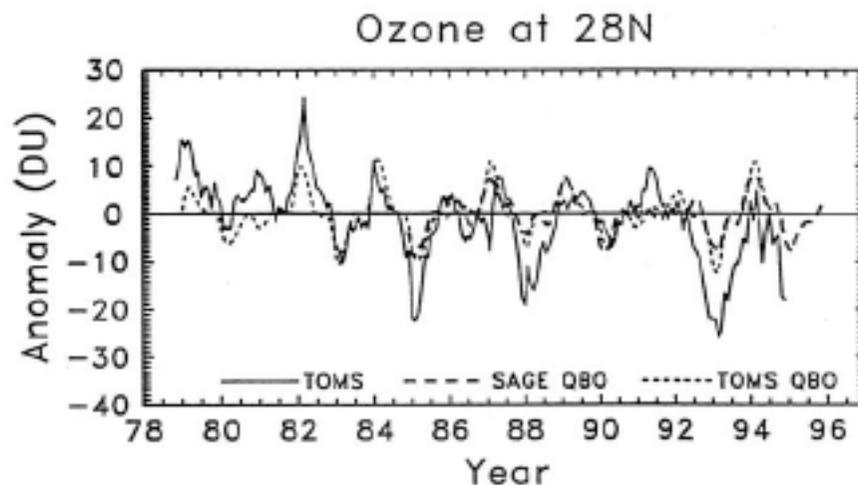
# Die äquatoriale quasi-zweijährige Oszillation:

## QBO-Signal im Ozon



Zeitreihe Anomalien im  
Totalozon  
ohne Jahresgang

Äquator



28°N

## Sonnenaktivität und QBO

- Andere Analysen (Labitzke, 1987; Labitzke und van Loon, 1988) zeigten, dass die Beziehung zwischen der Sonnenaktivität und der Windphase der QBO stark ist zu Zeit geringer Sonnenaktivität und dass sie in Zeiten hoher Sonnenaktivität nicht besteht.

Labitzke, K., Sunspots, the QBO and the stratospheric temperature in the north polar region, *Geophys. Res. Lett.*, 14 (5), 535-537, 1987.

Labitzke, K., und H. van Loon, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO, and the atmosphere, Part I: Troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in winter, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50, 197-206, 1988.

# Labitzke, 1987:

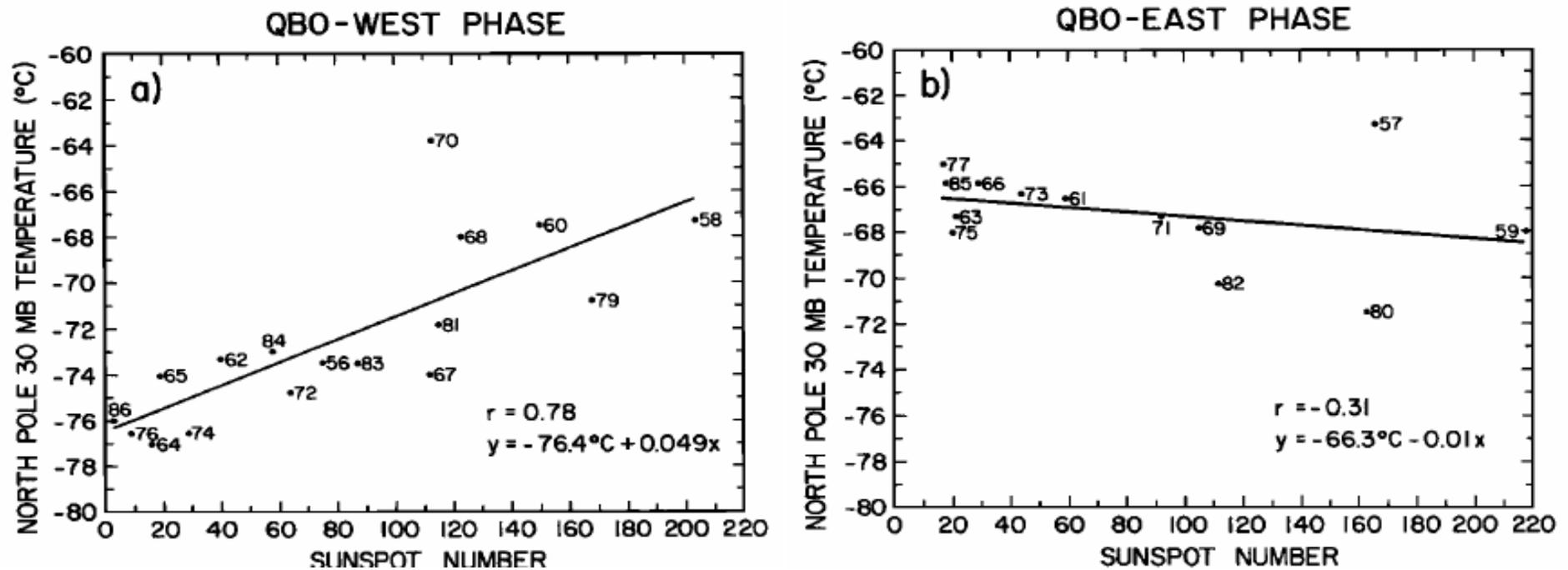
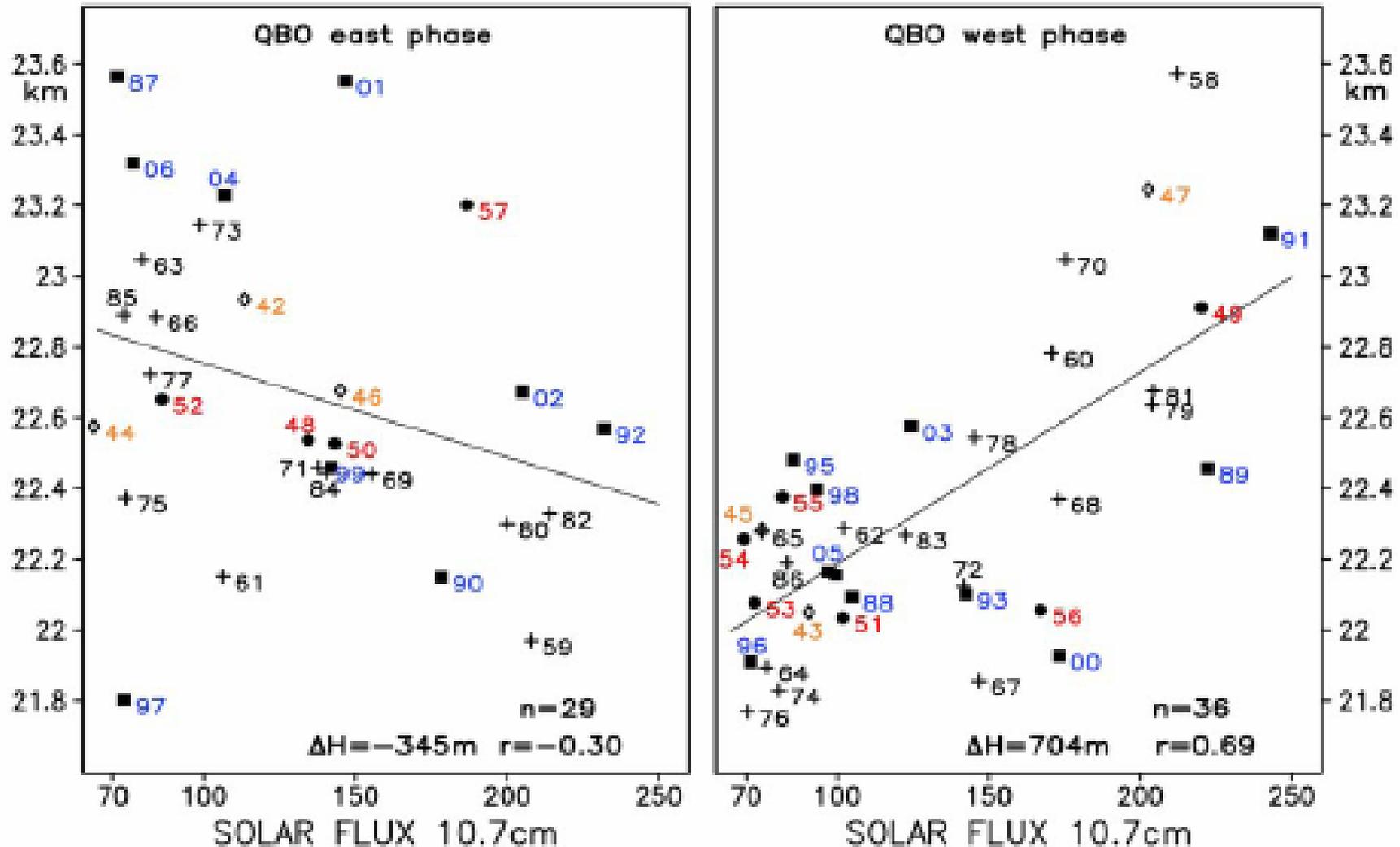


Fig. 1. 30-mb winter temperature (Nov. + Dec. + Jan. + Feb/4) at the North Pole plotted as a function of the sunspot numbers in January. The years plotted are those of January. A. In the west phase of the QBO; B. In the east phase of the QBO.

# Labitzke et al., 2006:

North Pole February 30-hPa Heights NCEP/NCAR + ETH



## QBO und extra-tropische Dynamik

- Äquatoriale Winde im Frühwinter der oberen Stratosphäre scheinen für die Entwicklung der winterlichen nördlichen Stratosphäre von Bedeutung zu sein, besonders für die Ausbildung von großen Stratosphärenerwärmungen (Gray et al., 2001a; 2001b; Gray, 2003; Gray et al., 2004).

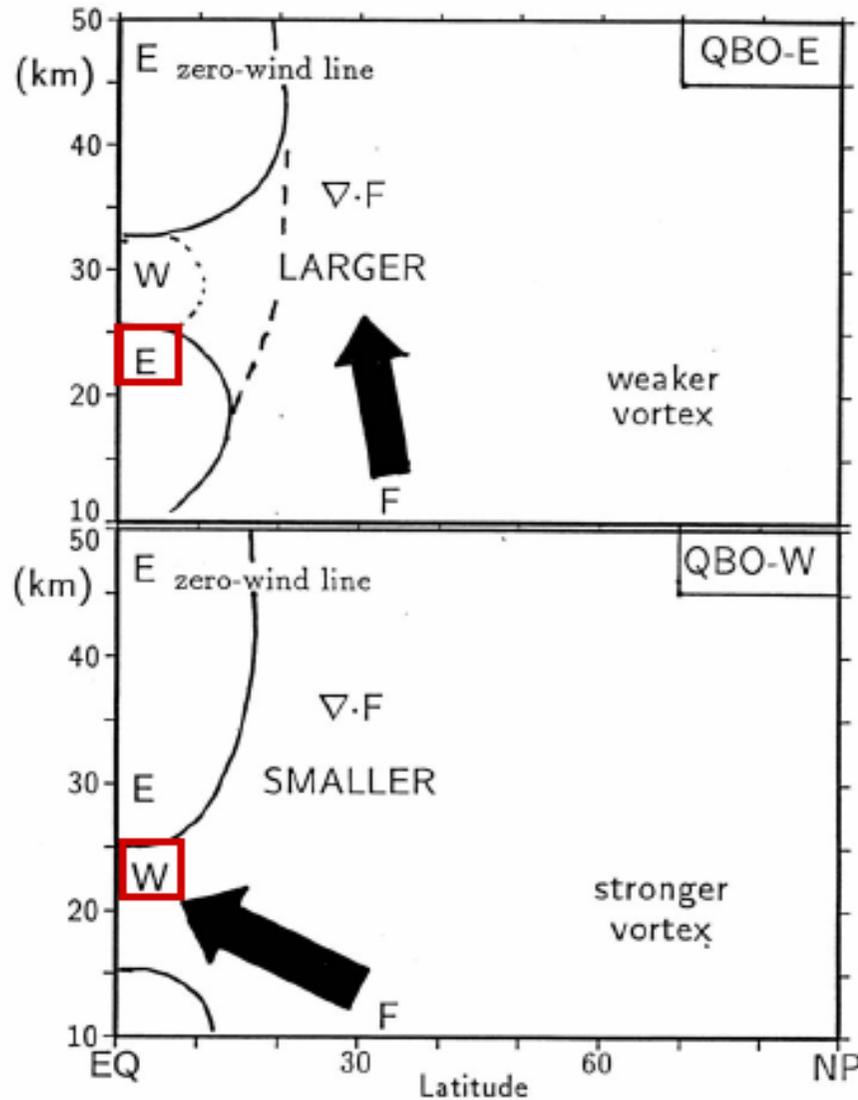
Gray, L.J., The influence of the equatorial upper stratosphere on stratospheric sudden warmings, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (4), 1166, doi: 10.1029/2002GL016430, 2003.

Gray, L.J., E.F. Drysdale, T.J. Dunkerton, und B.N. Lawrence, Model studies of the interannual variability of the northern hemisphere stratospheric winter circulation: the role of the Quasi Biennial Oscillation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 127 (578), 1413-1432, 2001a.

Gray, L.J., S.J. Phipps, T.J. Dunkerton, M.P. Baldwin, E.F. Drysdale, und M.R. Allen, A data study of the influence of the equatorial upper stratosphere on northern hemisphere stratospheric sudden warmings, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 127, 1985-2003, 2001b.

Gray, L.J., S. Crooks, C. Pascoe, S. Sparrow, und M. Palmer, Solar and QBO influences on the timing of stratospheric sudden warmings, *J. Atmos. Sci.*, 61 (23), 2777-2796, 2004.

# QBO und extra-tropische Dynamik



Einfluss der QBO auf  
die Ausbreitung  
planetarer Wellen im  
Nordwinter

Ungehinderte Ausbreitung in  
Westwinden

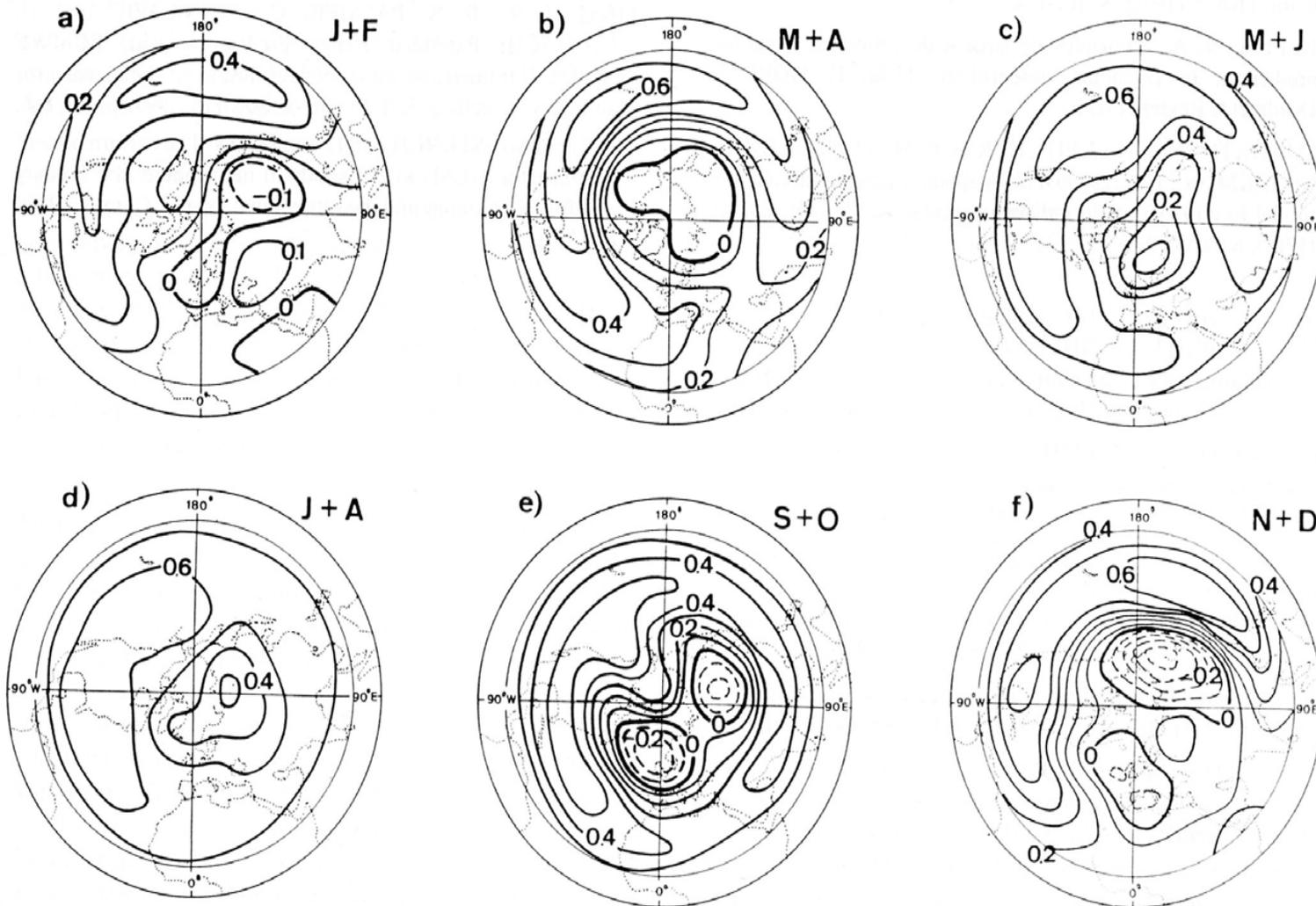
**QBO-Westphase:** vermehrte  
Ausbreitung in die Tropen

**QBO Ostphase:** Konzentration  
auf Extratropen

## Sonnenaktivität und QBO

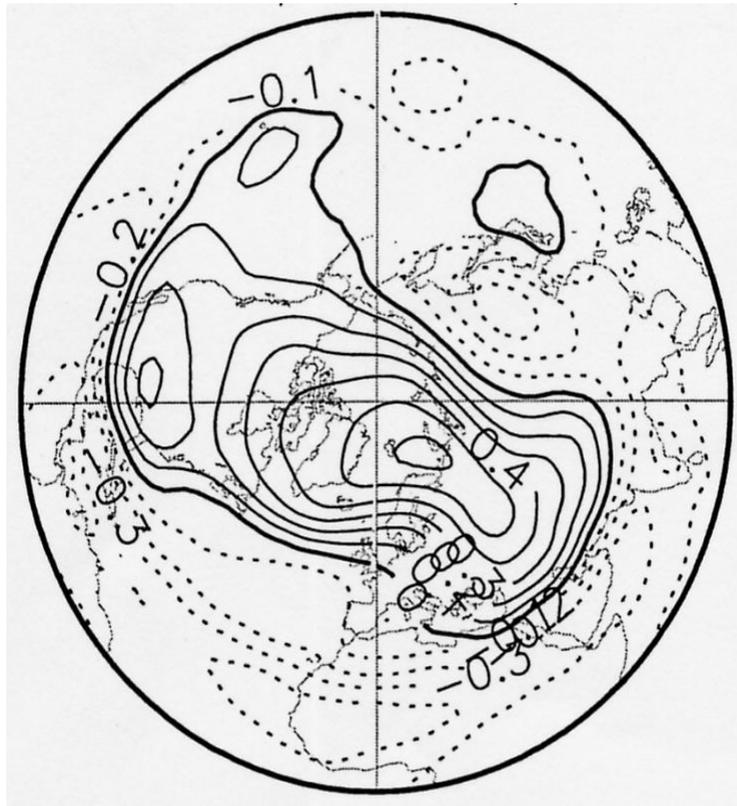
- Die Korrelation zwischen der Sonnenaktivität und den Höhen der 30 hPa-Fläche sind im Winter klein (im übrigen Jahr deutlich größer!).
- Labitzke (1987) zeigte, dass man auch im Winter große Korrelationen erhält, wenn man die Winter (NH) nach der QBO in West- bzw- Ostwind-Winter einteilt.  
⇒ siehe folgende Abbildungen...

# "Labitzke-Analysen": Korrelation zwischen Sonnenaktivität und Höhe der 30 hPa Fläche (Berliner Daten: 1956-1991) - NH

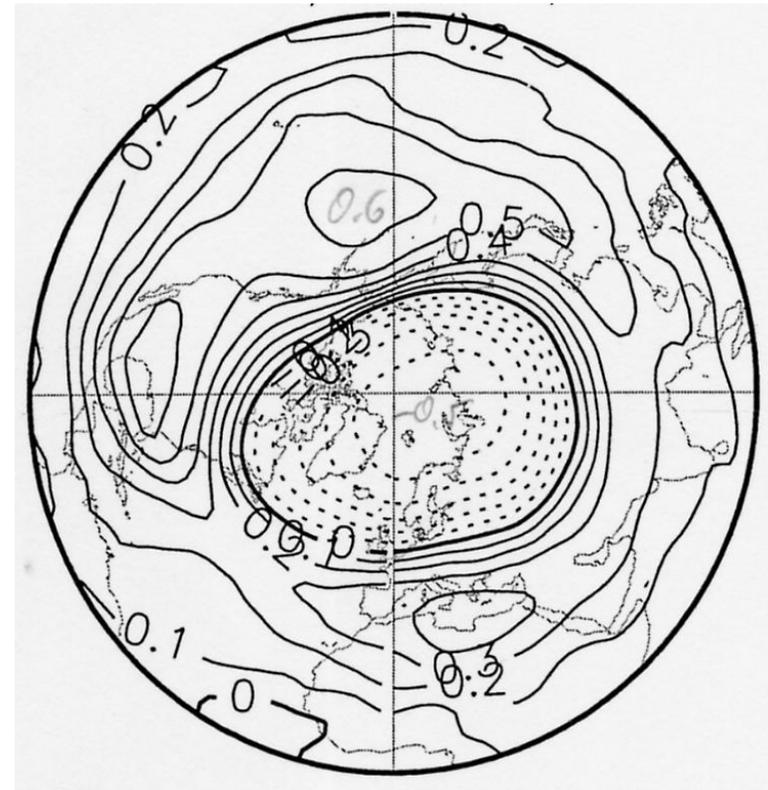


# "Labitzke-Analysen": Korrelation zwischen Sonnenaktivität und Höhe der 30 hPa Fläche

QBO Westwind-Winter



QBO Ostwind-Winter



**ERA-40**

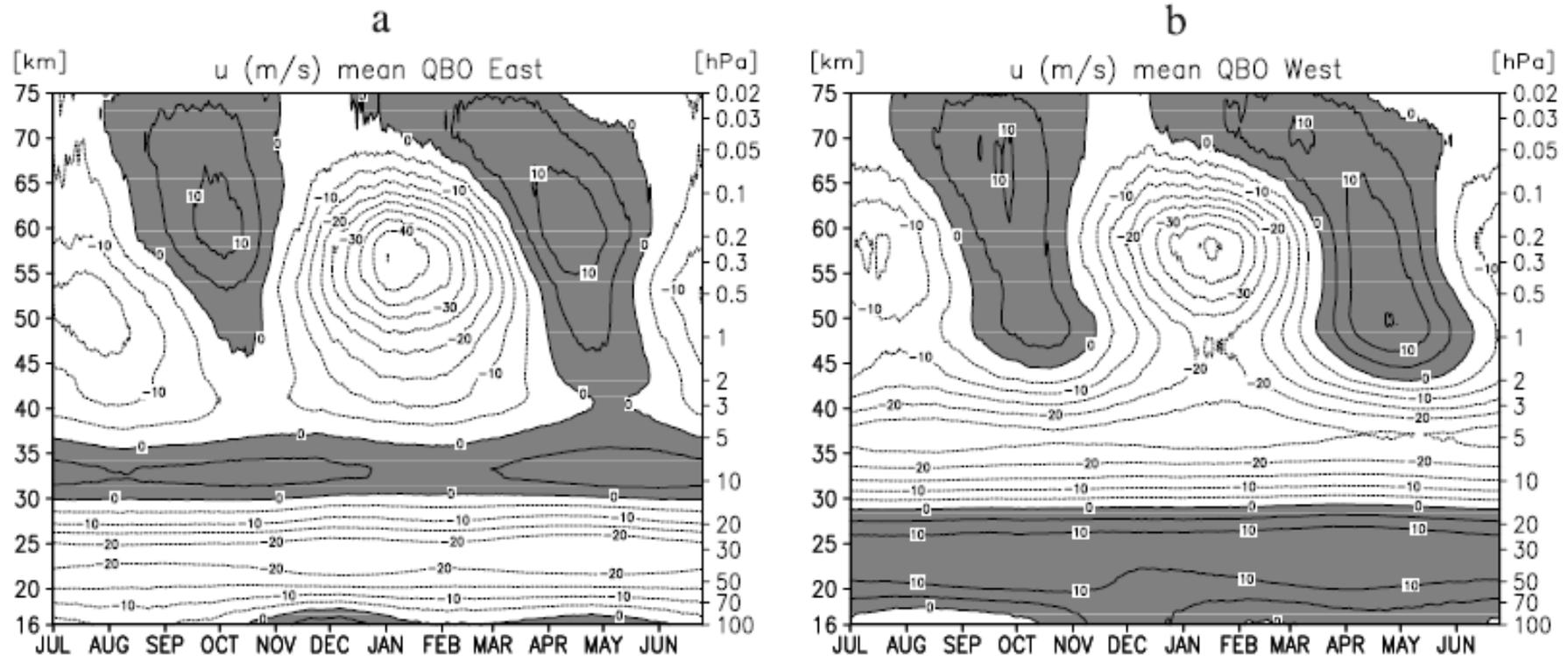
**JF**

## Andere mögliche Einflüsse

- Einige Modellstudien belegen die Modulation der winterlichen Stratosphärenjets und der Brewer-Dobson Zirkulation durch die Sonnenaktivität (z.B. Matthes et al., 2004).

Matthes, K., U. Langematz, L.L. Gray, K. Kodera, and K. Labitzke, Improved 11-year solar signal in the Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAM), *J. Geophys. Res.*, 109, D06101, doi: 10.1029/2003JD004012, 2004.

# Andere mögliche Einflüsse



**Figure 2.** Long-term daily mean equatorial wind from the model after relaxation (averaged from  $2.8^{\circ}\text{S}$  to  $2.8^{\circ}\text{N}$ ) from July until June for (a) mean QBOe and (b) mean QBOW in the equatorial lower stratosphere; west winds are shaded.

## Andere mögliche Einflüsse

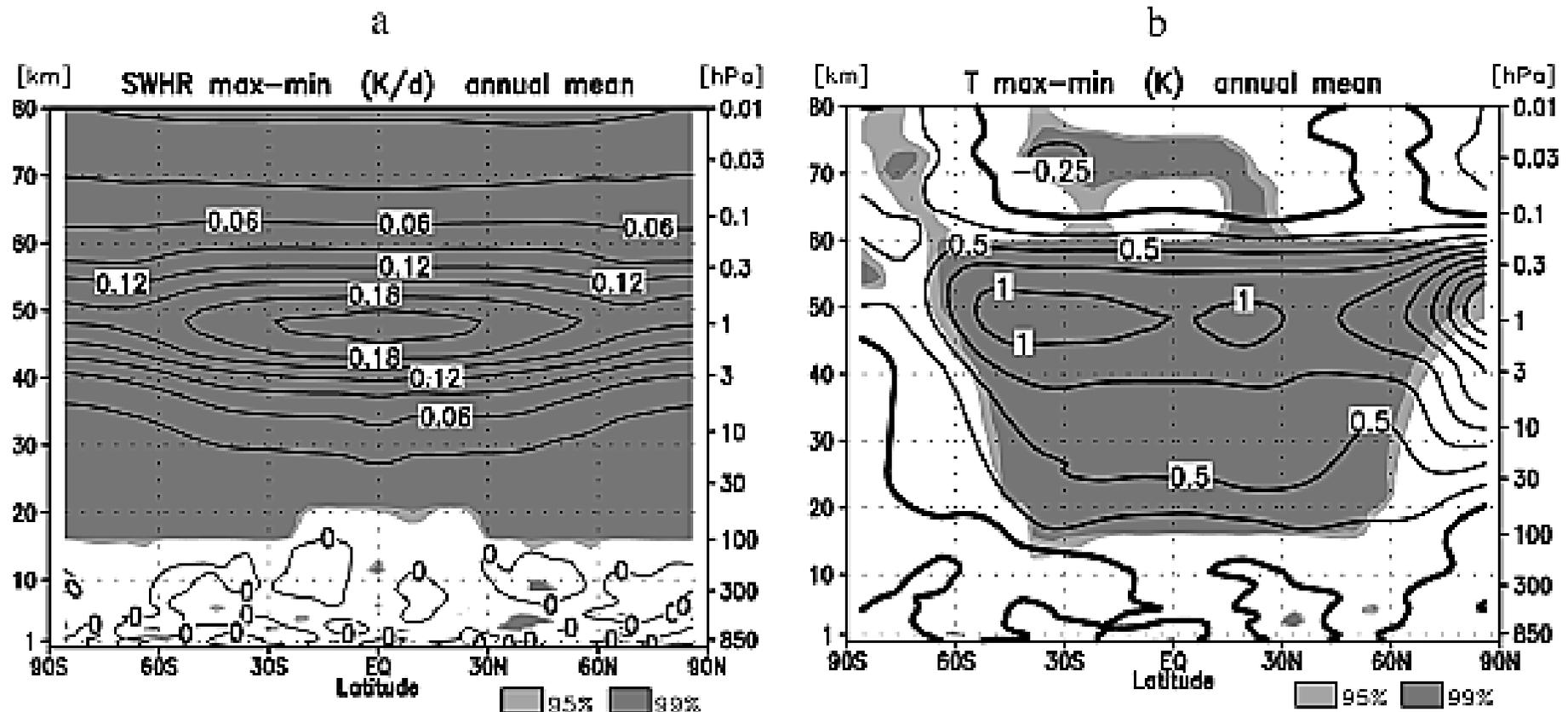


Figure 3. (a) Annual mean SW heating rate difference between 15 solar max and 15 solar min years in Kelvin per day ( $\text{K d}^{-1}$ ); contour interval:  $0.03 \text{ K d}^{-1}$ . (b) Same as Figure 3a but for the annual mean temperature differences in K; contour interval:  $0.25 \text{ K}$ . Light (heavy) shading indicates the 95% (99%) significance level (Student's  $t$  test).

## Andere mögliche Einflüsse

- Der Transfer des Sonnensignals von der Stratosphäre in die Troposphäre ist nach wie vor Gegenstand der aktuellen Forschung. Sie schließt die Modulation der Kopplungsmechanismen von Stratosphäre und Troposphäre ein (Kodera, 2002; Matthes et al., 2006) und Änderungen in der Vertikalbewegung und im Niederschlag in den Tropen (z.B. Kodera, 2004; Haigh et al., 2005; Matthes et al., 2006).

Kodera, K., Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8), 1218, doi: 10.1029/2001GL14557, 2002.

Kodera, K., Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24209, doi: 10.1029/2004GL020928, 2004.

Haigh, J.D., M. Blackburn, und R. Day, The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature, *J. Clim.*, 18 (17), 3672-3685, 2005.

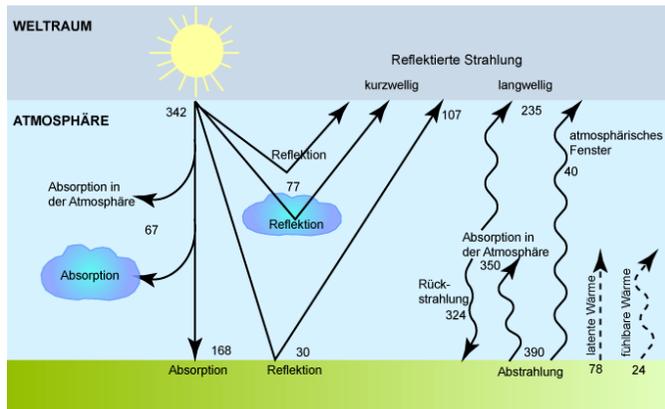
Matthes, K., Y. Kuroda, K. Kodera, und U. Langematz, Transfer of the solar signal from the stratosphere to the troposphere: Northern winter, *J. Geophys. Res.*, 111, D06108, doi: 10.1029/2005JD006283, 2006.

## Andere mögliche Einflüsse

- Möglich ist auch ein sogenannter "Wellen-Ozon-Rückkopplungsmechanismus", der das Sonnensignal auf die QBO überträgt (Cordero und Nathan, 2005), obwohl Mayr et al. (2006) zeigten, dass die Modulation der QBO durch die Sonnenaktivität in ihrem Modell auch ohne die Wellen-Ozon Rückkopplung möglich ist.

Cordero, E.C., und T.R. Nathan, A new pathway for communicating the 11-year solar cycle signal to the QBO, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18805, doi: 10.1029/2005GL023696, 2005.

Mayr, H.G., J.G. Mengel, C.L. Wolff, H.S. Porter, QBO as potential amplifier of solar cycle influence, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05812, doi: 10.1029/2005GL025650, 2006.



**Ende Kapitel 2**