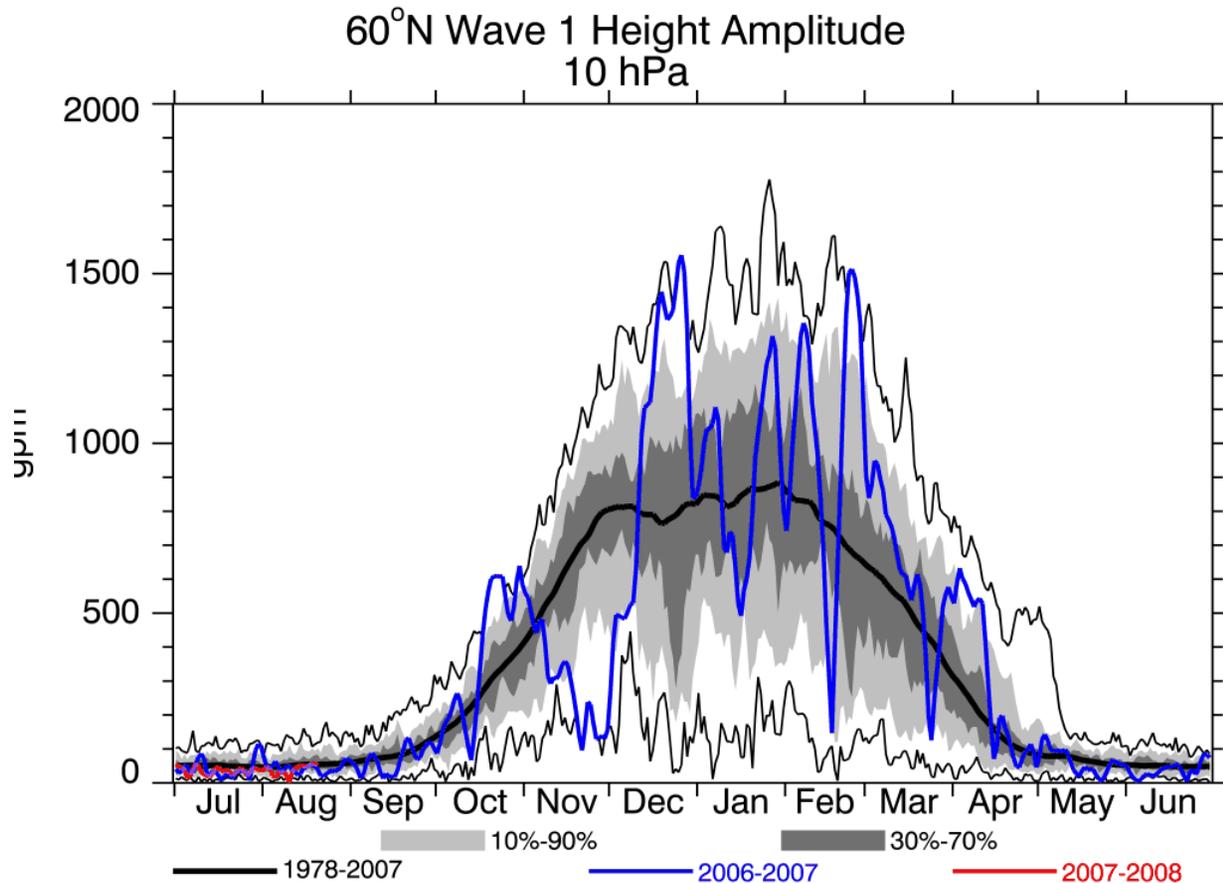


Kapitel 9

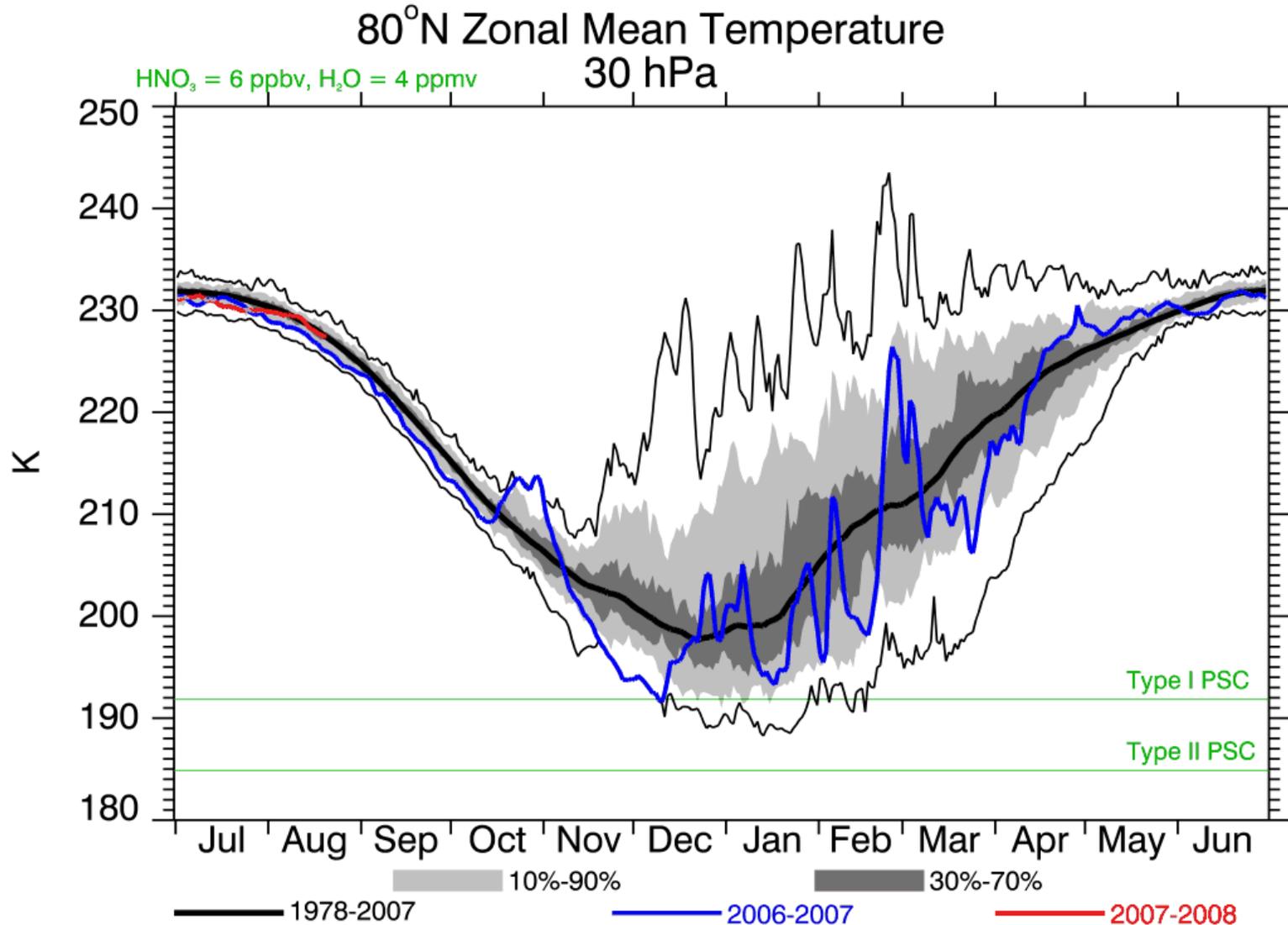
Änderungen der Stratosphärentemperatur durch andere Effekte



Kapitel 9: Gliederung

- Einleitung
- Indirekte Effekte
- Anregung und Ausbreitung planetarer Wellen
- Tropische Meeresoberflächentemperaturen
- Troposphärische Antriebe
- Effekte brechender Schwerewellen

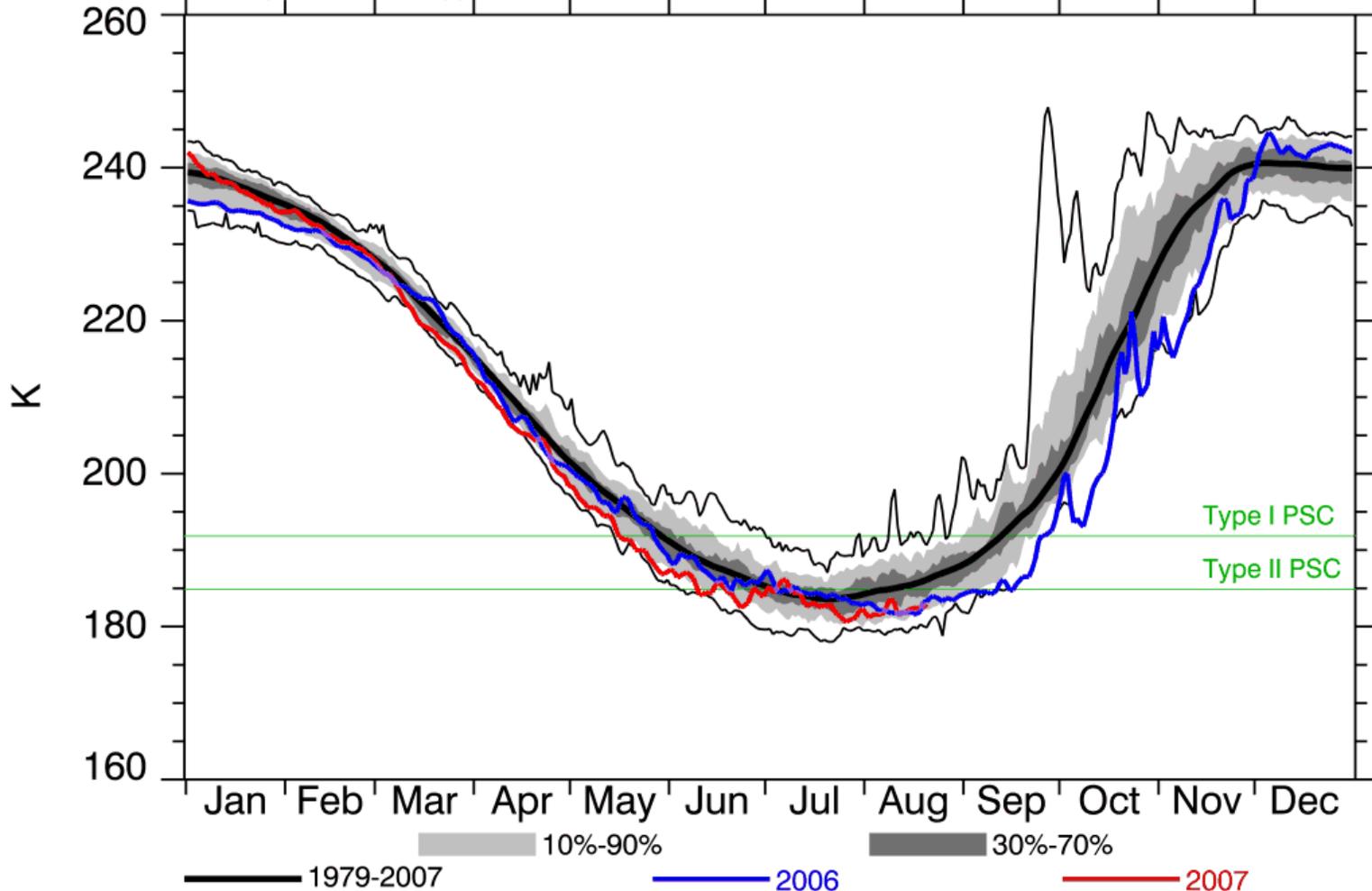
Temperatur der Stratosphäre



Temperatur der Stratosphäre

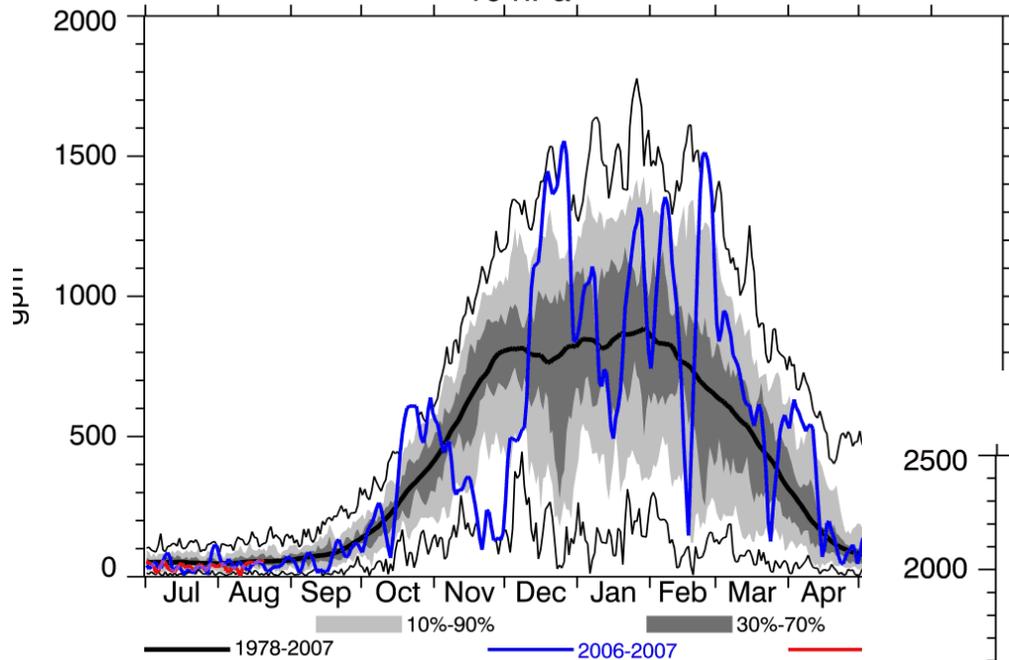
80°S Zonal Mean Temperature
30 hPa

HNO₃ = 6 ppbv, H₂O = 4 ppmv



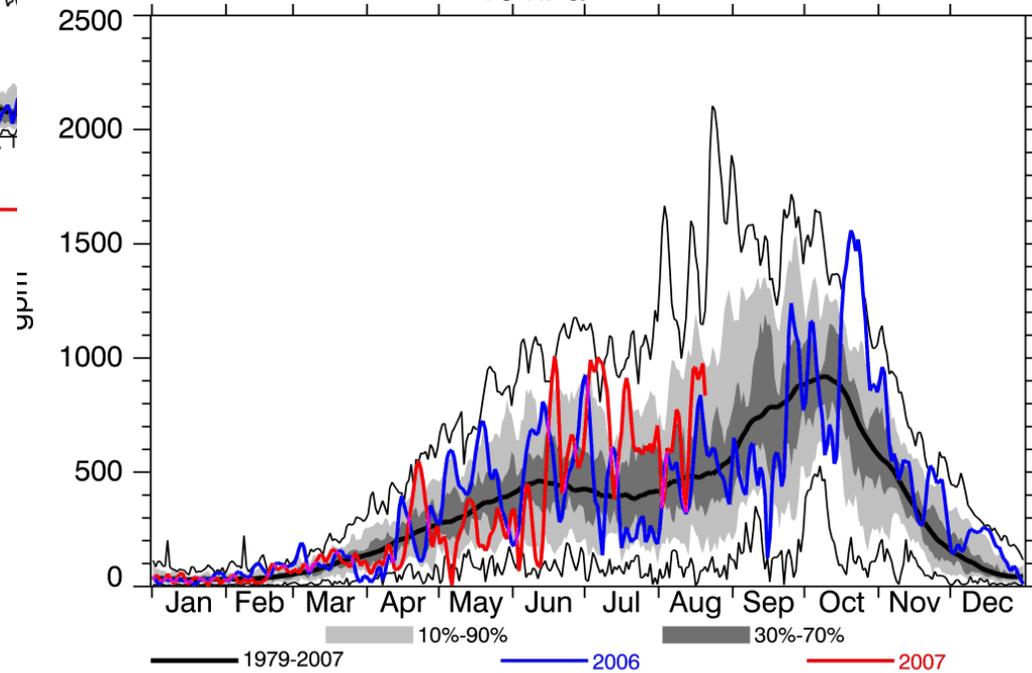
Dynamik der Stratosphäre

60°N Wave 1 Height Amplitude
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

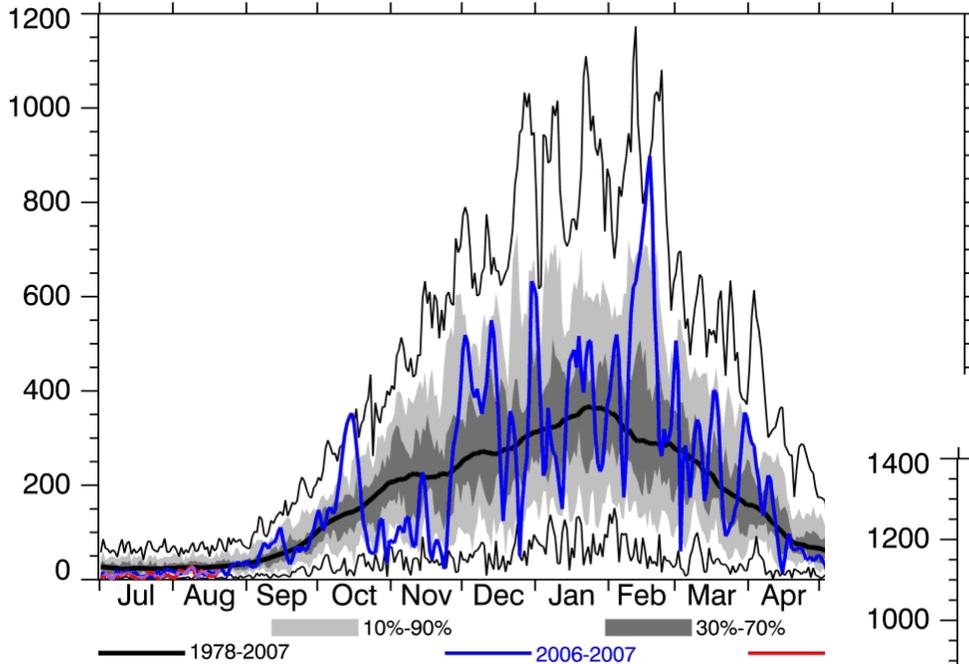
60°S Wave 1 Height Amplitude
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

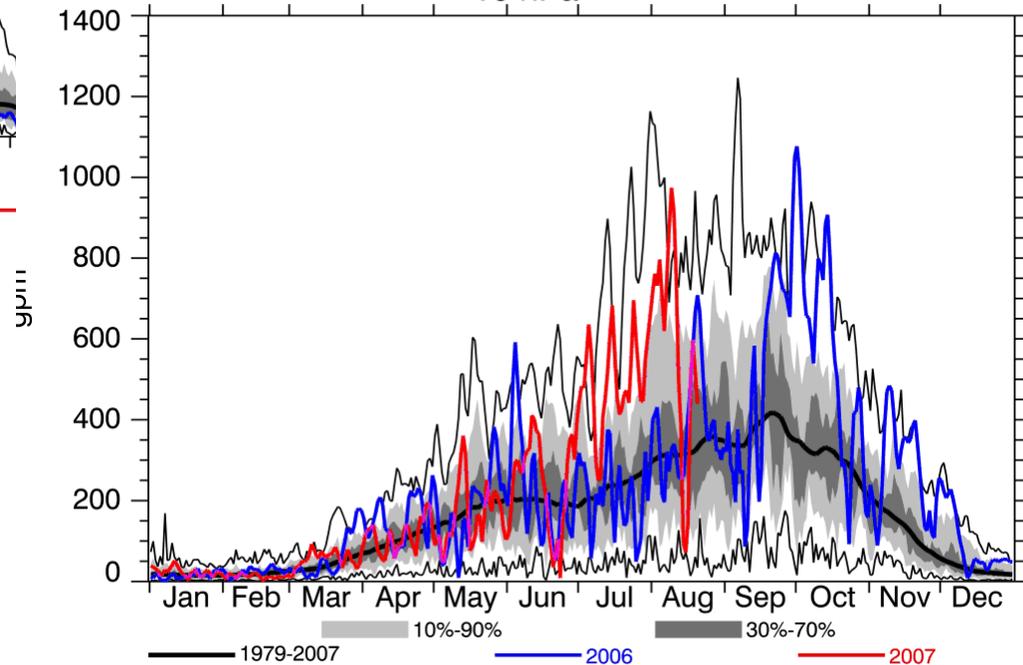
Dynamik der Stratosphäre

60°N Wave 2 Height Amplitude
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

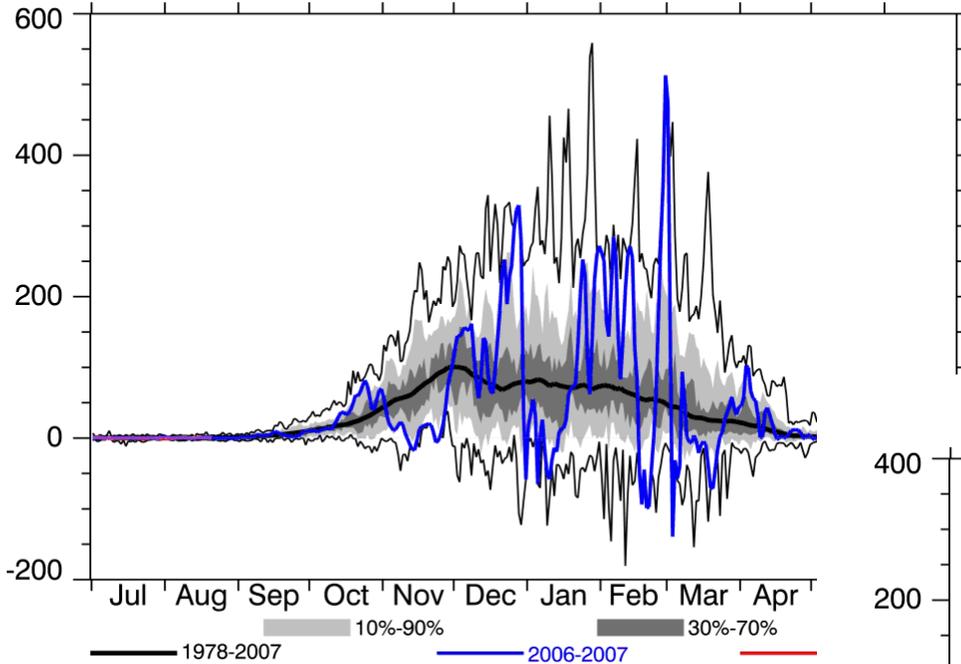
60°S Wave 2 Height Amplitude
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

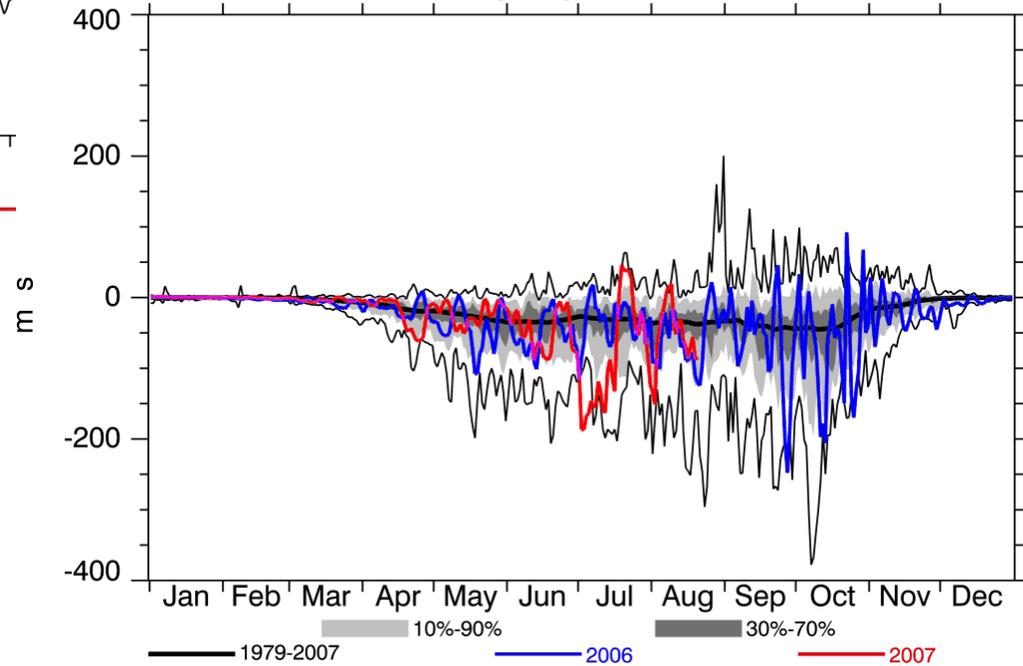
Dynamik der Stratosphäre

45-75°N Momentum Flux (Waves 1-3)
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

45-75°S Momentum Flux (Waves 1-3)
10 hPa



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), C. Long (NOAA)

Indirekte Effekte

- Zukünftige Änderungen des Strahlungsantriebs haben einen direkten Einfluss auf die Stratosphärentemperatur (siehe Kapitel 8); einen indirekten Einfluss erhält man durch Veränderungen in der Wellenanregung in der Troposphäre.
- Für die Stratosphäre kann man annehmen, dass sich beide Effekte "addieren"; demnach können sie separat betrachtet werden (Sigmond et al., 2004; Fomichev et al., 2007).

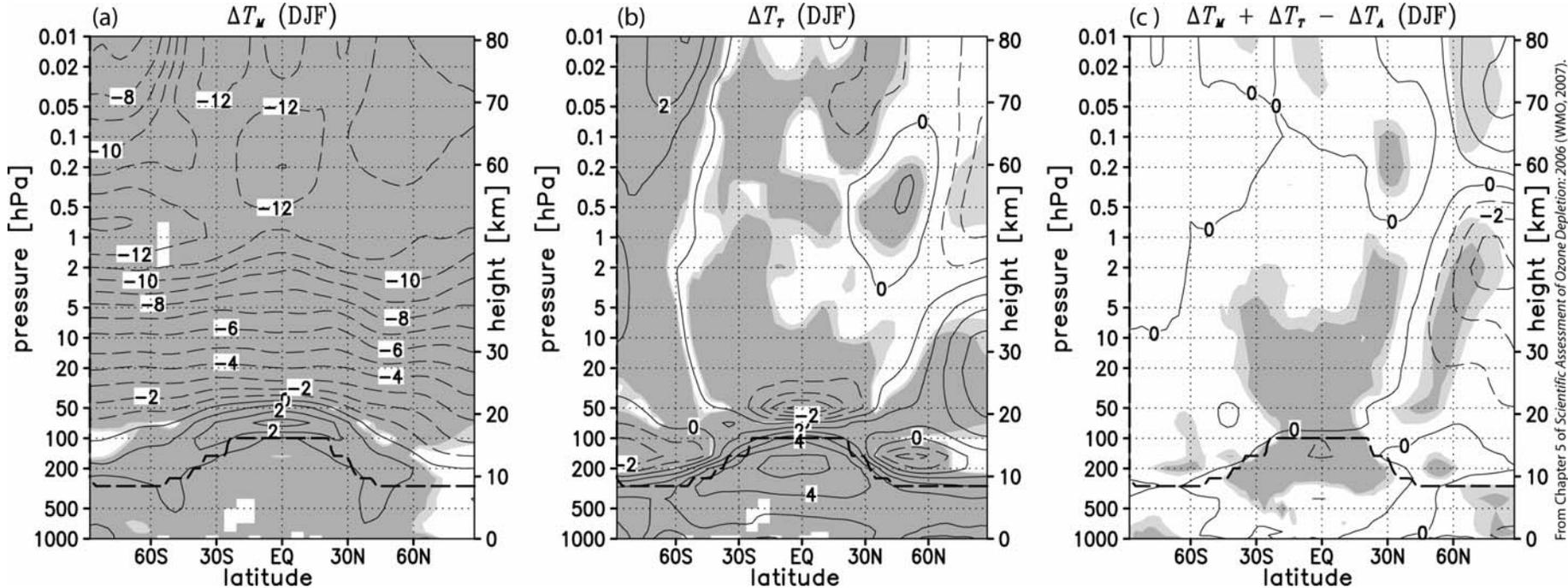
Sigmond, M., P.C. Siegmund, E. Manzini, and H. Kelder, A simulation of the separate climate effects of middle-atmospheric and tropospheric CO₂ doubling, *J. Clim.*, 17 (12), 2352-2367, 2004.

Fomichev, V.I., A.I. Jonsson, J. de Grandpré, S.R. Beagley, C. McLandress, K. Semeniuk, und T.G. Shepherd, Response of the middle atmosphere to CO₂ doubling: Results from the Canadian Middle Atmosphere Model, *J. Clim.*, 20 (7), 1121–1144, 2007.

Indirekte Effekte

- Die nachfolgende Abbildung stammt aus der Arbeit von Sigmond et al. (2004): Sie zeigt die Reaktion der Mittleren Atmosphäre (hier 10-80 km) auf eine vorgegebene Verdopplung des CO₂-Gehalts, jeweils separat in der Mittleren Atmosphäre (a), der Troposphäre (b) und in der gesamten Atmosphäre, also gemeinsam in der Troposphäre und Mittleren Atmosphäre (c).

Indirekte Effekte



Changes in the middle atmosphere resulting from different doubling CO₂ model runs for the months of December-January-February: **(a)** The change in the zonally averaged temperature due to a doubling of CO₂ in the middle atmosphere ΔT_M , **(b)** the change due to a doubling of CO₂ in the troposphere ΔT_T , and **(c)** the degree of non-additivity, i.e. the sum of the temperature changes due to a doubling of CO₂ separately in middle atmosphere and troposphere, minus the temperature change resulting from a doubling of CO₂ in all the atmosphere ($\Delta T_M + \Delta T_T - \Delta T_A$). Light (dark) shading denotes significance at 95% (99%) level of the changes in (a) and (b) and of the non-additivity in (c). The contour interval is 1 K.

Anregung planetarer Wellen

- Klimaänderungen verändern
 - die Meeresoberflächentemperaturen (engl. sea surface temperatures, SSTs),
 - die Unterschiede zwischen Landoberflächen- und Meeresoberflächentemperaturen,
 - die Troposphärenjets (Lage und Windgeschwindigkeit) sowie
 - die dynamische Aktivität auf der synoptischen Skala.
- Alle die mit diesen Veränderungen einhergehenden Prozesse beeinflussen sowohl die Anregung von planetaren Wellen in der Troposphäre als auch ihre regionalen Effekte in der unteren Stratosphäre.

Anregung planetarer Wellen

- Der Klimawandel kann auch die Ausbreitung von planetaren Wellen in die Stratosphäre und damit auch die Dissipation dieser Wellen beeinflussen (Rind et al., 2005a; 2005b; Scott und Polvani, 2004; Scott et al., 2004).
- ⇒ Der Klimawandel beeinflusst die planetare Wellenaktivität und damit die Dynamik der Stratosphäre und Mesosphäre (= Mittlere Atmosphäre)!

Anregung planetarer Wellen

Rind, D., J. Perlwitz, und P. Lonergan, AO/NAO response to climate change: 1. Respective influences of stratospheric and tropospheric climate changes, *J. Geophys. Res.*, 110, D12107, doi: 10.1029/2004JD005103, 2005a.

Rind, D., J. Perlwitz, P. Lonergan, und J. Lerner, AO/NAO response to climate change: 2. Relative importance of low- and high-latitude temperature changes, *J. Geophys. Res.*, 110, D12108, doi: 10.1029/2004JD005686, 2005b.

Scott, R.K., und L.M. Polvani, Stratospheric control of upward wave flux near the tropopause, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02115, doi: 10.1029/2003GL017965, 2004.

Scott, R.K., D.G. Dritschel, L.M. Polvani, und D.W. Waugh, Enhancement of Rossby wave breaking by steep potential vorticity gradients in the winter stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 61 (8), 904-918, 2004.

Anregung und Ausbreitung planetarer Wellen

- Veränderungen in der Aktivität planetarer Wellen in der polaren Winterstratosphäre sind der Hauptgrund für Unsicherheiten bei der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Ozonverluste, insbesondere in der arktischen Stratosphäre (Austin et al., 2003).

Austin, J., D. Shindell, S.R. Beagley, C. Brühl, M. Dameris, E. Manzini, T. Nagashima, P. Newman, S. Pawson, G. Pitari, E. Rozanov, C. Schnadt und T.G. Shepherd , Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1-27, 2003.

- Betrachtet man die Ergebnisse von Klima-Chemie-Modellen in dem vorletzten WMO-Ozonbericht (2003) so zeigt sich, dass noch nicht einmal das Vorzeichen für die vorhergesagte Änderung der Aktivität planetarer Wellen übereinstimmt.

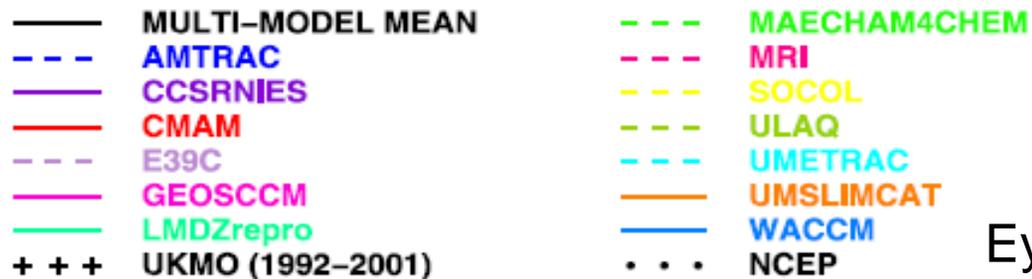
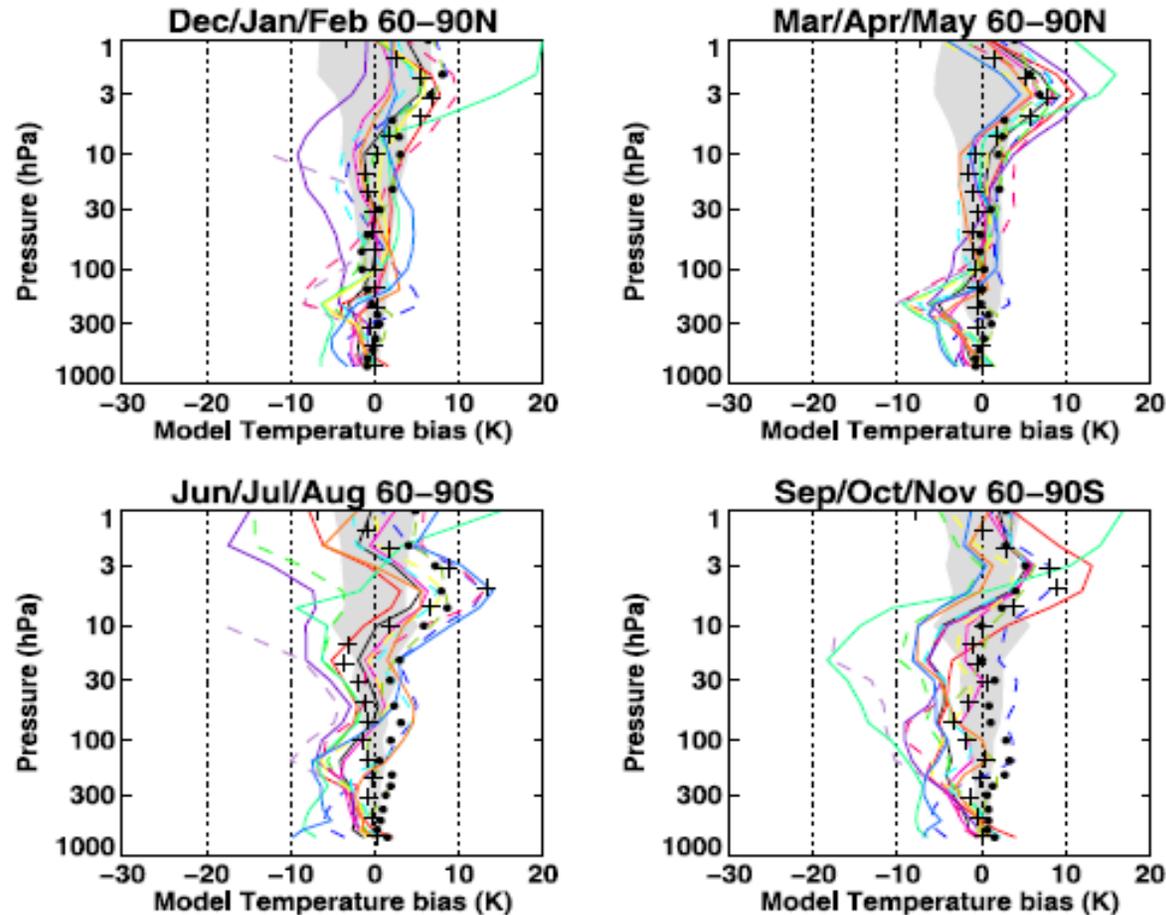
Indirekte Effekte

- Kürzlich fanden Fomichev et al. (2007) heraus, dass in ihrem numerischen Modell die Reaktion der polaren Stratosphäre auf eine Verdopplung des CO₂-Gehalts in den ersten 15 Jahren einer 30-jährigen Simulation anders ist, als in den zweiten 15 Jahren. Dies stützt die Hypothese, dass die Dynamik der polaren Stratosphäre im (Nord-)Winter auf dekadischen Zeitskalen aufgrund der internen Variabilität nicht vorhersagbar ist.
- Seit dem WMO-Bericht (2003) wurden eine Reihe sogenannter transienter Simulationen mit Klima-Chemie-Modellen bis weit in das 21. Jahrhundert durchgeführt, bei denen die gleichen Änderungen im "Klimaantrieb" und der Halogenbeladung angenommen wurden.

Indirekte Effekte

- Eyring et al. (2006) verglichen die Modellergebnisse der Simulationen für die vergangenen Dekaden und fanden heraus, dass die Temperaturabweichungen in der nördlichen polaren Winterstratosphäre recht klein sind und dass in den meisten Modellen eine richtige Reaktion der Temperatur aufgrund von Variationen der troposphärischen Wellenanregung liefern.
- Dies sind deutliche Verbesserungen im Vergleich mit den in Austin et al. (2003) publizierten Ergebnisse.
- Im Gegensatz dazu gibt es kaum nennenswerte Verbesserungen in der Südhemisphäre, wo die meisten Klima-Chemie-Modelle im Frühjahr einen Kältefehler zeigen und die Umstellung von der Winter- auf die Sommerzirkulation später als beobachtet erfolgt.

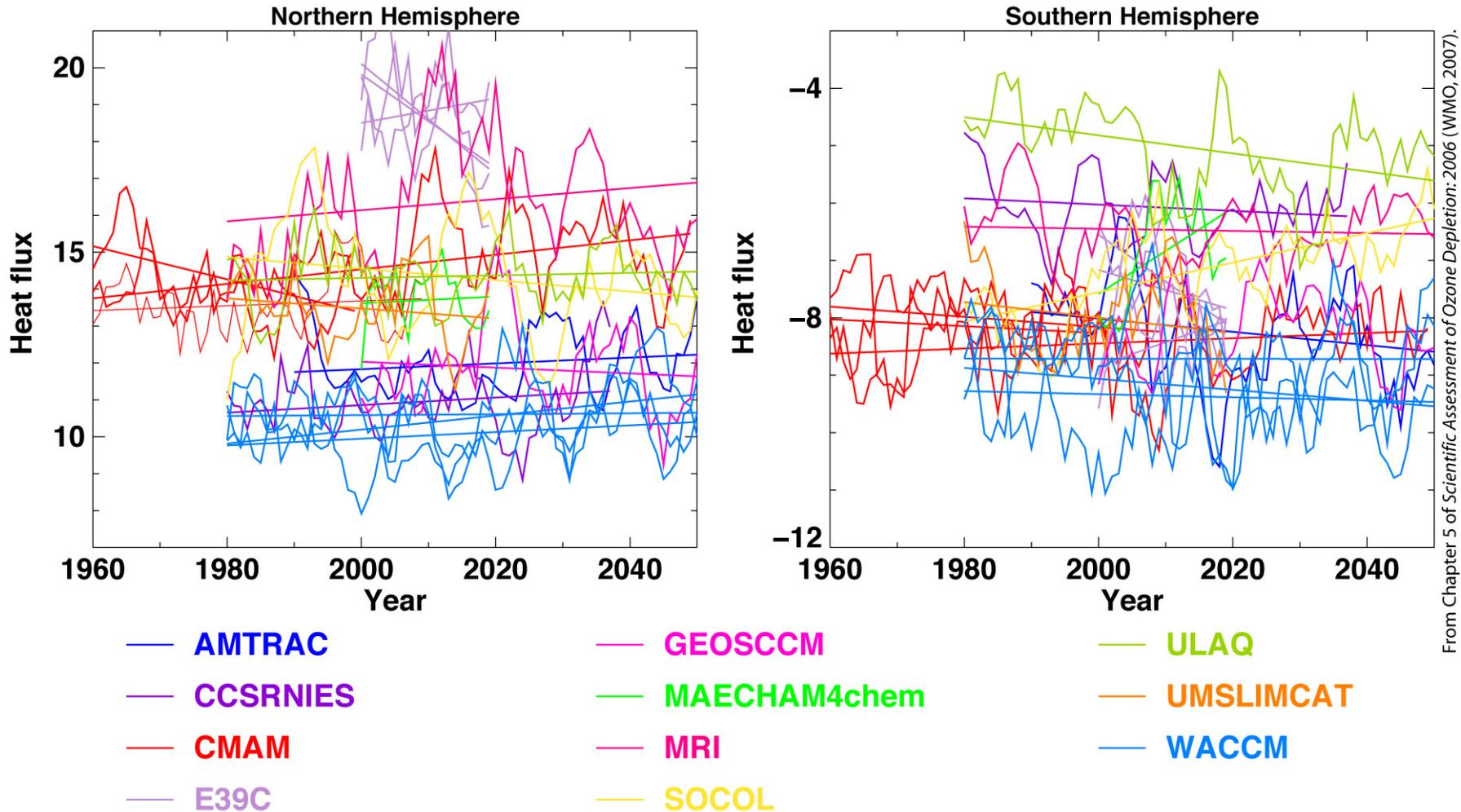
Kältefehler in der Stratosphäre (relativ zu ERA40)



Anregung planetarer Wellen

- Aber auch diese neuesten Simulationsergebnisse von Klima-Chemie-Modellen zeigen keinen Konsens im Hinblick auf die Entwicklung der Anregung planetarer Wellen in der Troposphäre in einem zukünftigen Klima (siehe nachfolgende Abbildung), obwohl jedes Modell die gleichen Szenarien für die Entwicklung der Treibhausgas- und Halogenkonzentrationen verwenden.

Entwicklung des Wärmeflusses ($v'T'$)



From Chapter 5 of Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 (WMO, 2007).

Evolution of the heat flux at 100 hPa as derived from CCM calculations. The analysis is based on model data derived from the REF2 and SCN2 simulations. Left panel: Heat flux averaged over 40°N to 80°N in January and February. Right panel: Heat flux averaged over 40°S to 80°S in July and August.

Anregung planetarer Wellen

- Die Gründe dafür, warum die Modelle weiterhin keine (wenigstens qualitative) Übereinstimmung zeigen, ist nach wie vor unklar.
- Teilweise kann es damit zusammen hängen, dass, speziell in der Südhemisphäre, viele Modelle nicht in der Lage sind, die richtige Sensitivität der polaren Temperatur auf die Wellenanregung aus der Troposphäre (und entsprechende Dissipation in der Stratosphäre) zu reproduzieren.

Anregung planetarer Wellen

- Andererseits kann es aber auch schlicht das atmosphärische Verhalten wieder spiegeln: Möglicherweise kann in einem chaotischen System die Wellenanregung aus der Troposphäre grundsätzlich nicht vorhergesagt werden und deshalb reflektieren die Modellergebnisse einen Bereich der möglichen Ergebnisse.
- Hier ist eine schnelle Klärung notwendig, da die Abschätzung der weiteren Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht unter anderem stark davon abhängt, wie die Klima-Chemie-Modelle die Änderungen der Wellenaktivität vorhersagten.

Tropische Meeresoberflächentemperaturen

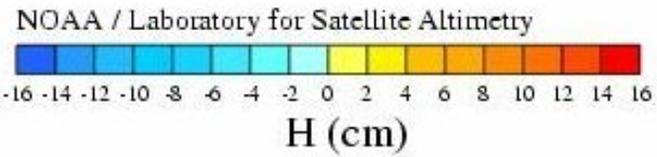
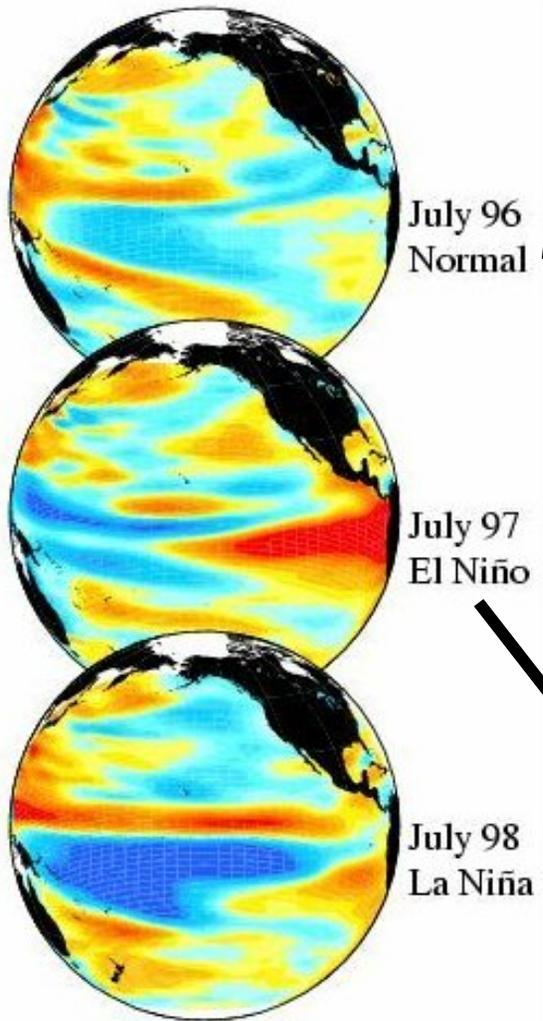
- Der wichtigste zu berücksichtigende Faktor der Änderungen der Meeresoberflächentemperaturen, der die Troposphäre und die Stratosphäre beeinflusst, ist der Gradient der tropischen Meeresoberflächentemperaturen, wie man sie während den "El Niño-Southern Oscillation (ENSO)" Ereignisse vorfindet.
- Anomale tropische Gradienten der Meeresoberflächentemperatur haben auch einen Einfluss auf die Anregung von planetaren Wellen.

SO-Index: hPa (Darwin) - hPa (Tahiti) [jeweils Bodendruck]

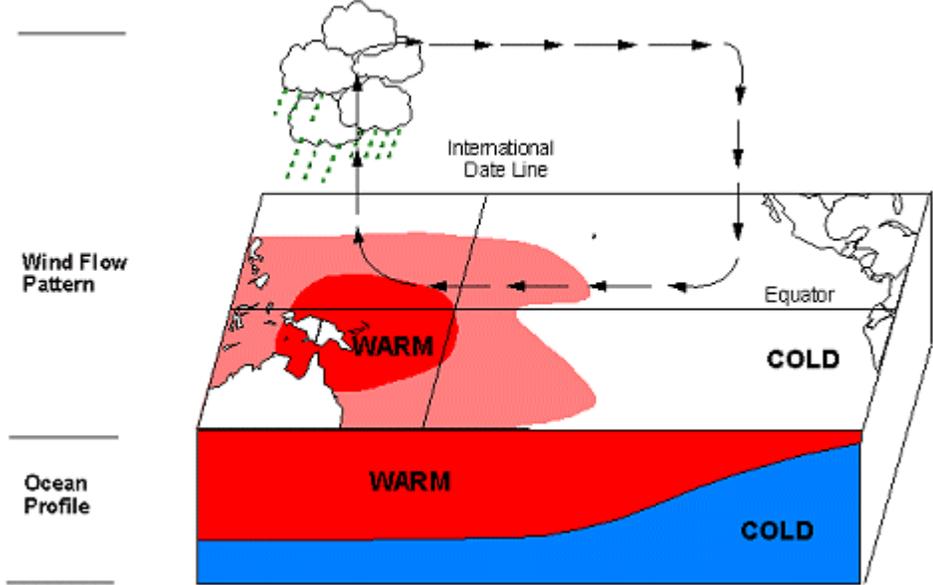
Index positiv: WALKER - Zirkulation existiert;

Index negativ: WALKER - Zirkulation ist schwach oder kehrt sich um.

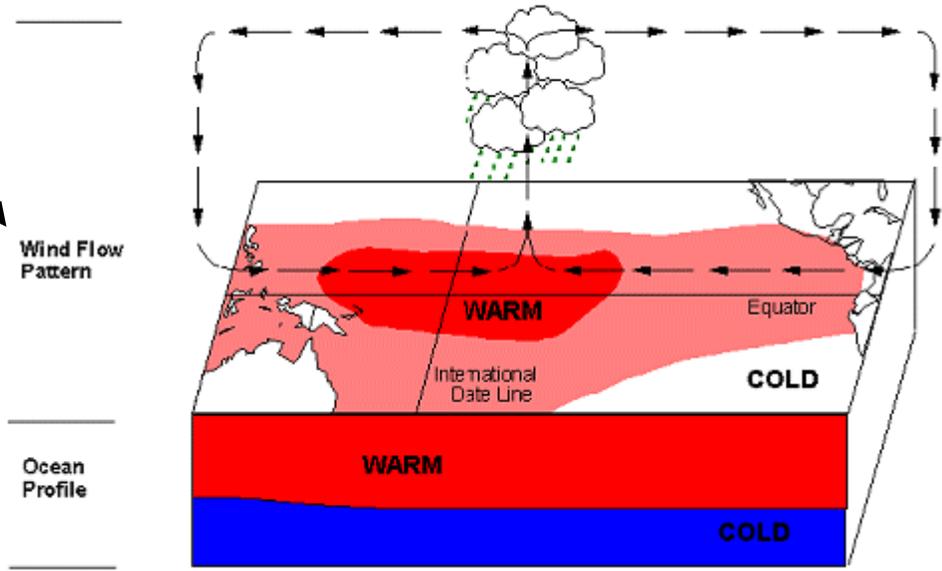
Tropische Meeresoberflächentemperaturen



Typical Tropical Pacific Conditions



El Niño Tropical Pacific Conditions



Tropische Meeresoberflächentemperaturen

- Der stratosphärische Polarwirbel ist in warmen ENSO Jahren tendenziell schwächer als im Mittel, wenn die Meeresoberflächentemperaturen im östlichen tropischen Pazifik anomal warm sind (van Loon und Labitzke, 1987), während in kalten ENSO Jahren die Häufigkeit von plötzlichen stratosphärischen Erwärmungen deutlich geringer ist (Limpasuvan et al., 2005).

van Loon, H., und K. Labitzke, The Southern Oscillation, Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 115 (2), 357-369, 1987.

Limpasuvan, V., D.L. Hartmann, D.W.J. Thompson, K. Jeev, und Y.L. Yung, Stratosphere-troposphere evolution during polar vortex intensification, *J. Geophys. Res.*, 110, D24101, doi: 10.1029/2005JD006302, 2005.

Tropische Meeresoberflächentemperaturen

- Ähnliche Beziehungen wurden in einer Reihe von numerischen Simulationen gefunden (Sassi et al., 2004; Manzini et al., 2006).

Sassi, F., D. Kinnison, B.A. Boville, R.R. Garcia, und R. Roble, Effect of El Niño-Southern Oscillation on the dynamical, thermal, and chemical structure of the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 109, D17108, doi: 10.1029/2003JD004434, 2004.

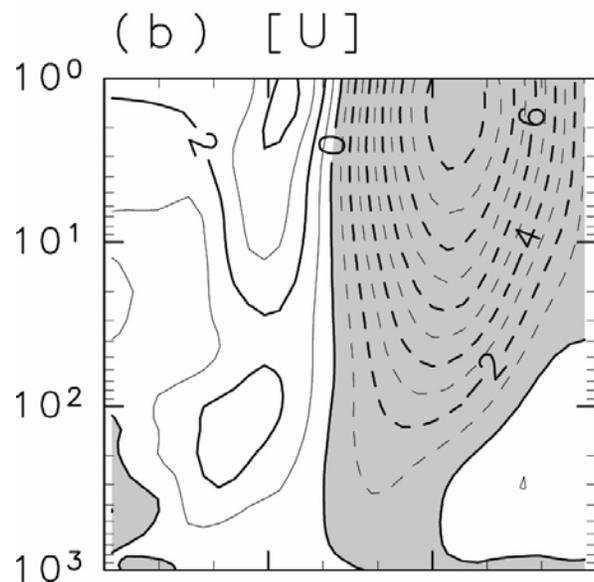
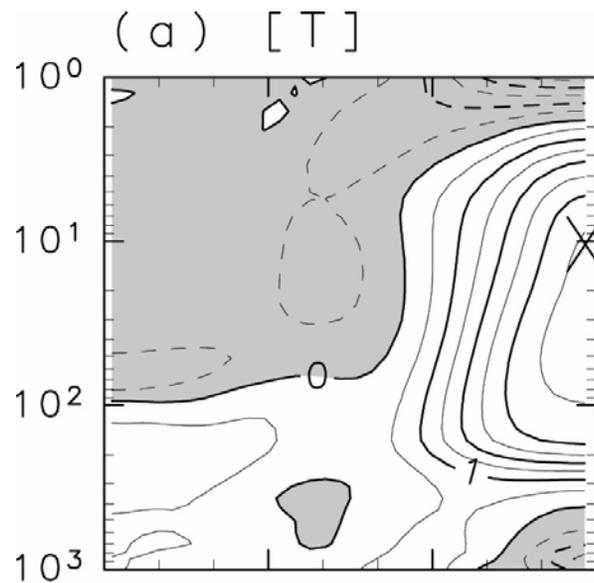
Manzini, E., M.A. Giorgetta, M. Esch, L. Kornblueh, und E. Roeckner, The influence of sea surface temperatures on the Northern winter stratosphere: Ensemble simulations with the MAECHAM5 model, *J. Clim.*, 19 (16), 3863–3881, 2006.

Tropische Meeresoberflächentemperaturen

- Darüber hinaus gibt es in Simulationen mit Klima-Chemie-Modellen Anzeichen für ein erhöhtes Vorkommen von plötzlichen Stratosphärenenerwärmungen, wenn im östlichen tropischen Pazifik große positive Anomalien von Meeresoberflächentemperaturen vorgegeben werden. (Taguchi und Hartmann, 2006; siehe nachfolgende Abbildung).

Taguchi, M., und D.L. Hartmann, Increased occurrence of stratospheric sudden warmings during El Niño as simulated by WACCM, *J. Clim.*, 19 (3), 324-332, 2006.

Tropische Meeresoberflächentemperaturen



From Chapter 5 of Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 (WMO, 2007).

Climatological differences between WACCM simulations forced with high and low SSTs in the eastern tropical Pacific: (a) zonal mean temperature [T] in K and (b) zonal mean zonal wind [U] in m/s. Both pictures display results for the Northern Hemisphere, with the Equator on the left and the North Pole on the right

Tropische Meeresoberflächentemperaturen

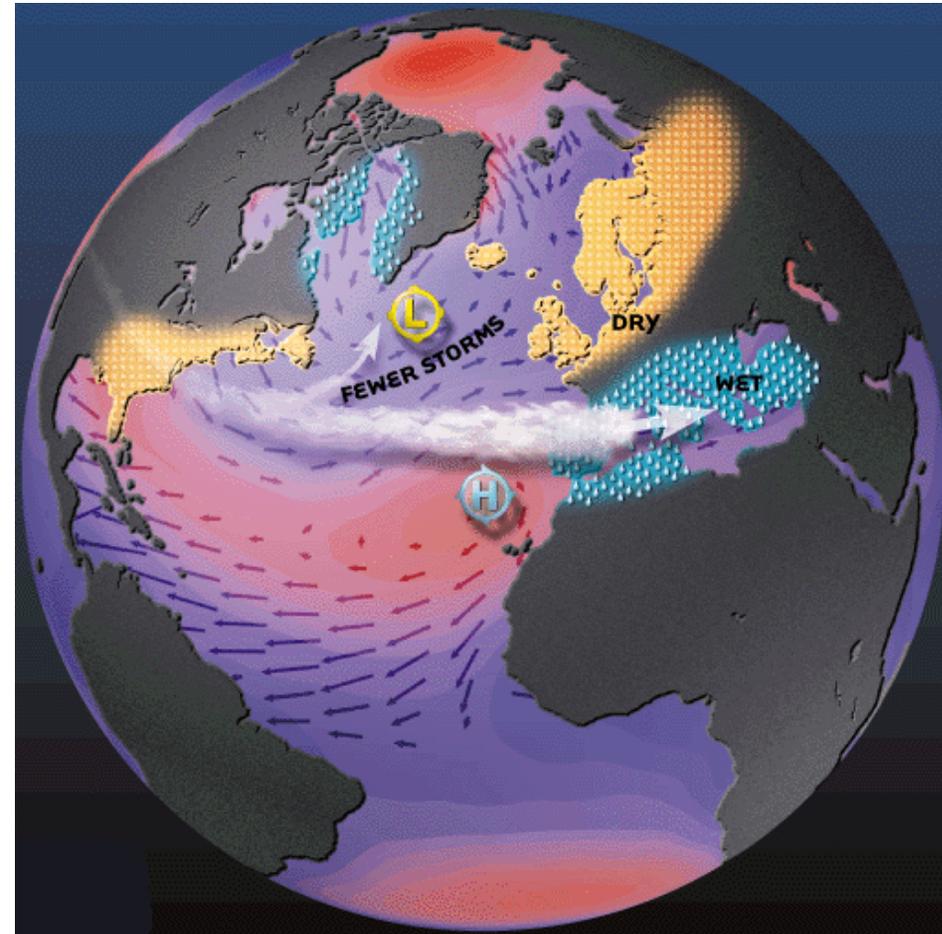
- Hoerling et al. (2001; 2004) und Hurrell et al. (2004) zeigten, dass Änderungen der Meeresoberflächentemperaturen im Indischen Ozean den/die Northern Hemisphere Annular Mode/North Atlantic Oscillation (NAM/NAO) auf dekadischen Zeitskalen beeinflussen; es ist unklar, inwieweit sich diese Veränderungen bis in die Stratosphäre fortpflanzen.

Hoerling, M.P., J.W. Hurrell, und T. Xu, Tropical origins for recent North Atlantic climate change, *Science*, 292 (5514), 90-92, 2001.

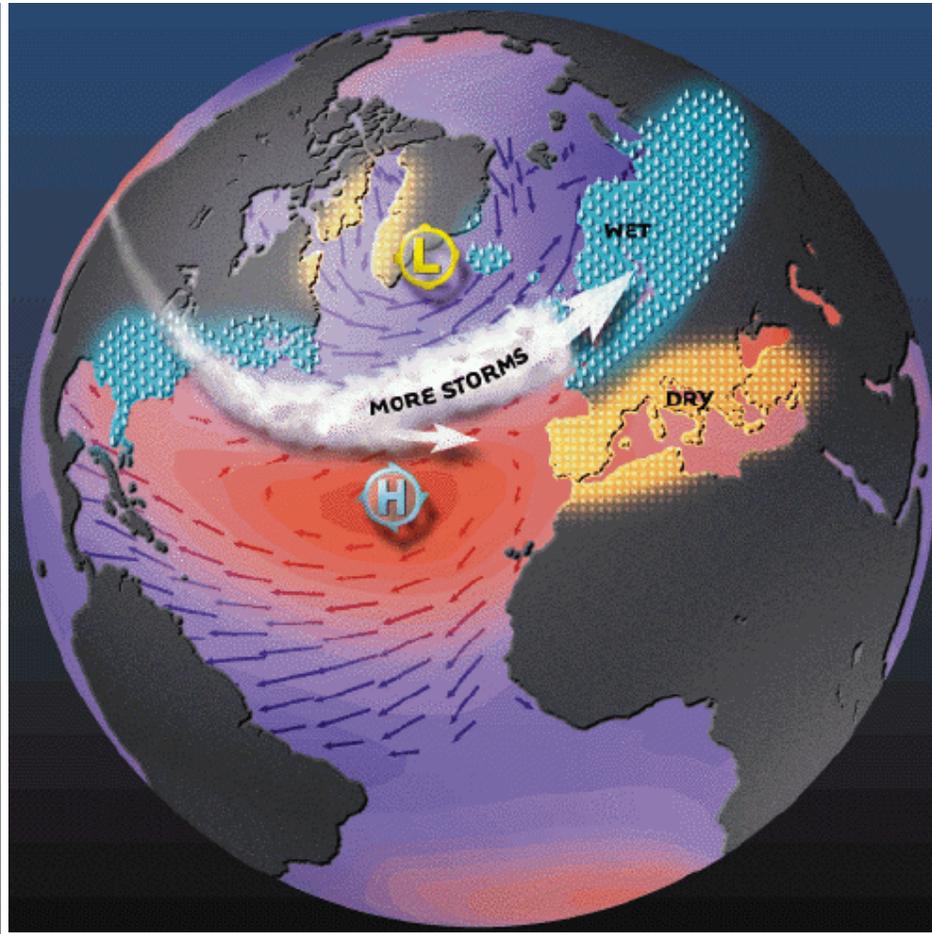
Hoerling, M.P., J.W. Hurrell, T. Xu, G.T. Bates, und A.S. Phillips, Twentieth century North Atlantic climate change. Part II: Understanding the effect of Indian Ocean warming, *Clim. Dyn.*, 23 (3-4), 391-405, 2004.

Hurrell, J.W., M.P. Hoerling, A.S. Phillips, und T. Xu, Twentieth century North Atlantic climate change. Part I: assessing determinism, *Clim. Dyn.*, 23 (3-4), 371-389, 2004.

Nord-Atlantische Oszillation (NAO)



NAO -

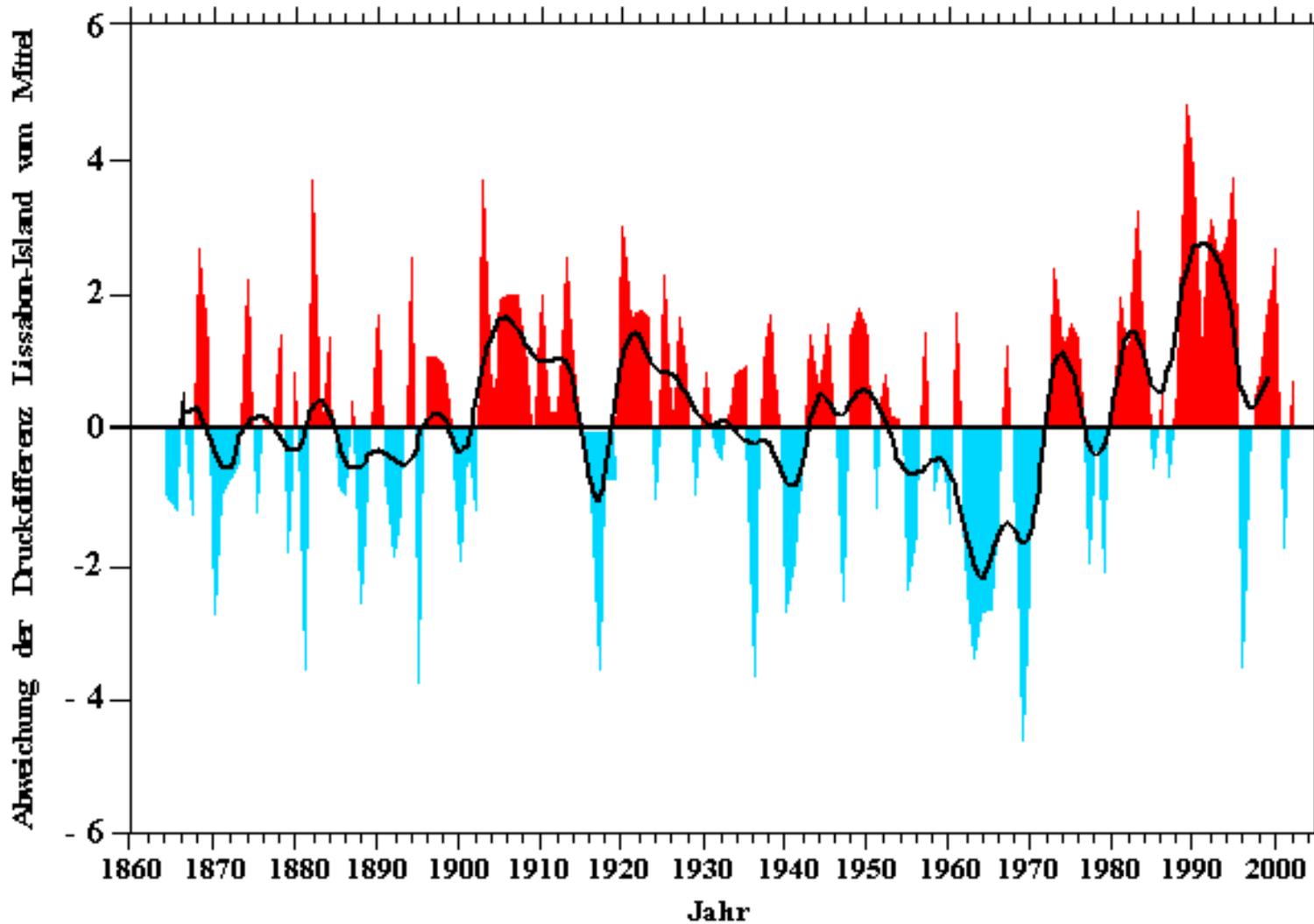


NAO +

Unter der NAO versteht man die Schwankung des Druckverhältnisses zwischen dem Islandtief im Norden und dem Azorenhoch im Süden des Nordatlantiks.

Nord-Atlantische Oszillation (NAO)

NAO-Index (Dezember-März) 1864-2002



Troposphärische Antriebe

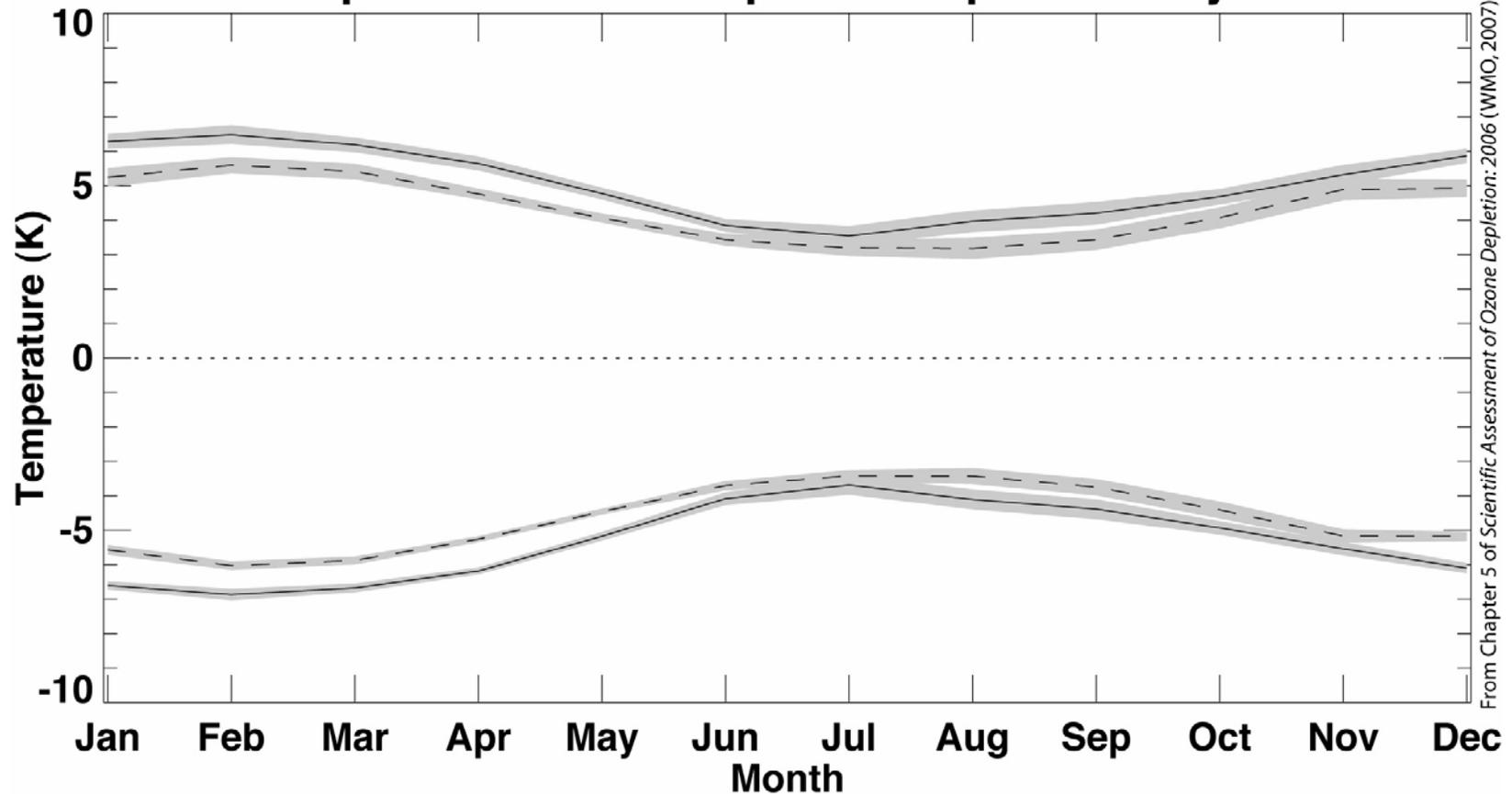
- Außerhalb der winterlichen Polregion haben Änderungen im troposphärischen Antrieb vermutlich während des ganzen Jahres einen Einfluss auf die Temperaturen in der unteren Stratosphäre.
- Es gibt Hinweise auf der Grundlage von Modellabschätzungen, dass anthropogene Klimaänderungen zu einem Anwachsen des Aufsteigen von Luftmassen in der tropischen oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre führen und zu einem verstärkten Absinken in Bereich der Extra-Tropen (siehe auch Kapitel 10 und 14).

Troposphärische Antriebe

- Das assoziierte adiabatische Heizen würde dann zu einer Abkühlung der tropischen unteren Stratosphäre führen und zu wärmeren Extra-Tropen während aller Monate (siehe Abbildung); es wäre im Bereich des borealen Winter und Frühling verstärkt, was konsistent ist mit der im Modell angenommenen Asymmetrie in der Änderung der Meeresoberflächentemperatur zwischen der Nord- und der Südhemisphäre (Fomichev et al., 2007).

Troposphärische Antriebe

Tropical and Extratropical Temperature Cycle



From Chapter 5 of Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 (WMO, 2007).

Annual cycle of the tropical (30°S-30°N; negative curves) and extra-tropical (positive curves) mean temperature, with global mean subtracted, at 50 hPa. The dashed curve results from a model simulation in which the atmospheric CO₂ was doubled, but the SSTs were not adjusted for the doubled CO₂ conditions. The solid curve is from a simulation with both the CO₂ doubling and adjusted SSTs, and therefore includes an additional effect on the temperatures due to changes in wave forcing from the troposphere.

Troposphärische Antriebe

- Andere Klimaänderungssimulationen (Butchart et al., 2006) zeigen ebenfalls, dass im Mittel der Anstieg der planetaren Wellenaktivität in der nördlichen Winterhemisphäre größer ist als in der südlichen Winterhemisphäre.

Butchart, N., A.A. Scaife, M. Bourqui, J. de Grandpre, S.H.E. Hare, J. Kettleborough, U. Langematz, E. Manzini, F. Sassi, K. Shibata, D. Shindell, und M. Sigmund, Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer-Dobson circulation, *Clim. Dyn.*, 27, 727-741, doi:10.1007/s00382-006-0162-4, 2006.

Effekte brechender Schwerewellen

- Alle Klima- und Klima-Chemie-Modelle, welche stratosphärische Temperaturänderungen bestimmen, (siehe Kapitel 8) parametrisieren die Effekte von brechenden kleinskaligen Schwerewellen.
- Die komplexeren dieser Schemata parametrisieren die vertikale Ausbreitung und das "Brechen" dieser Wellen in Termen großskaliger Flüsse. Sie sind deshalb in der Lage auf Klimaänderungen in der Stratosphäre entsprechend zu reagieren, die durch Änderungen im Strahlungsantrieb oder der Anregung planetarer Wellen verursacht sind.

Effekte brechender Schwerewellen

- Darüber hinaus zeigten Shaw und Shepherd (2007), dass, vorausgesetzt die Parametrisierung ist Impuls erhaltend, die Reaktion des Klimas robust auf Änderungen im Schwerewellenspektrum, dem (Hintergrund-) Grundstrom, dem Schwerewellen-Brechungskriterium und auch der Modellobergrenze reagiert.

Shaw, T.A., und T.G. Shepherd, Angular momentum conservation and gravity wave drag parameterization: Implications for climate models, *J. Atmos. Sci.*, 64 (1), 190–203, 2007.

Effekte brechender Schwerewellen

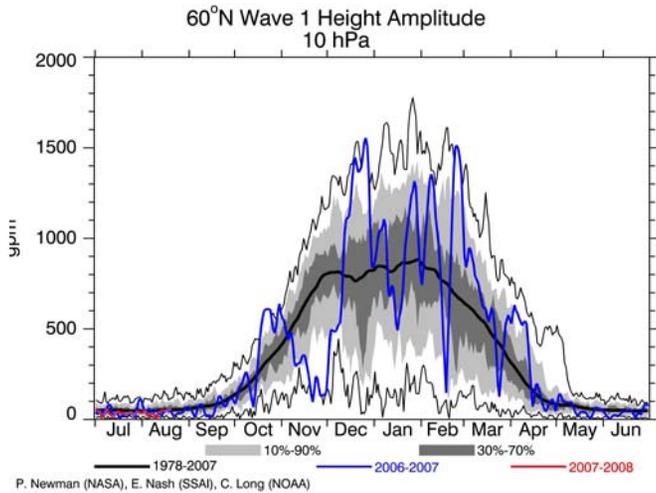
- McLandress und Scinocca (2005) zeigten ebenfalls, dass die Reaktion des Klimasystems nicht entscheidend von der Wahl der Schwerewellenparametrisierung abhängt.

McLandress, C., und J.F. Scinocca, The GCM response to current parameterizations of nonorographic gravity wave drag, *J. Atmos. Sci.*, 62 (7), 2394-2413, 2005.

- Derzeit ist nicht klar, welcher Teil der Änderung des Schwerewellenantriebs durch indirekte Effekte des Klimawandels verursacht ist, der die Ausbreitung und das "Brechen" der Wellen beeinflusst und wie viel direkt durch die Änderung der Quelle der Störung bedingt ist.

Effekte brechender Schwerewellen

- Die größte Unsicherheit besteht darin, dass man kaum abschätzen kann, wie sich die Entwicklung des "Quell-Spektrums" für Schwerewellen in einem zukünftigen Klima ändern wird.
- Leider ist dieses Spektrum auch für das derzeitig vorherrschende Klima nur unzureichend durch Beobachtungen belegt. Es wird schwierig den Effekt der Änderung der Schwerewellenantriebe auf die Stratosphärentemperatur zu quantifizieren, ohne dass man weitere Fortschritte im Hinblick auf die Bestimmung der Quellen in Form anderer Flussparameter erzielt, die eine Bestimmung der Klimarückkopplung erlauben.



Ende Kapitel 9