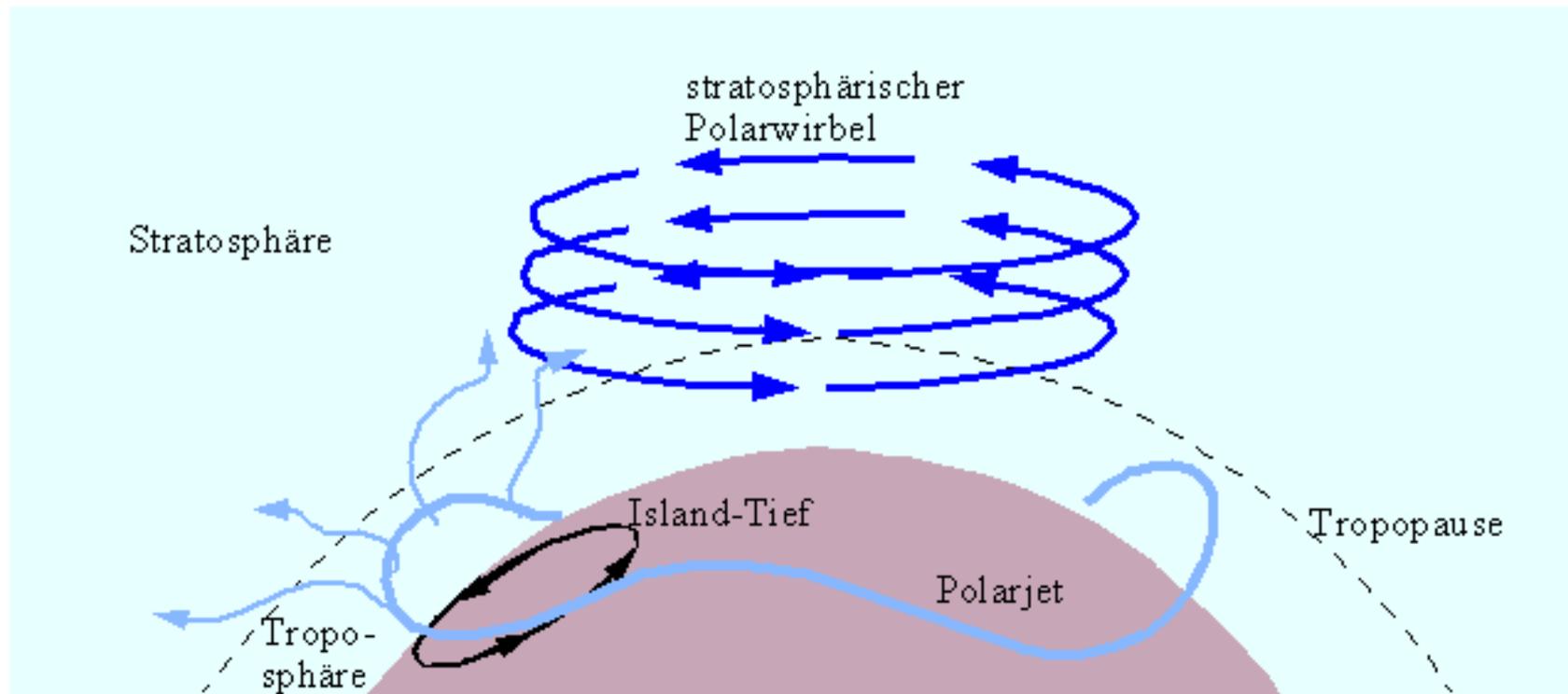


Kapitel 3

Kopplung der Troposphäre und Stratosphäre: Dynamik



Kapitel 3: Gliederung

- Einleitung
- Bedeutung von Wellen
- Interne Variabilität der Stratosphäre
- Transport von Luftmassen in die Stratosphäre
- Modellierung und Parametrisierung von klein-skaligen Wellen
- "Annulare" Moden
- Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

Dynamik

- Obwohl sich die Troposphäre und Stratosphäre in vielen Dingen voneinander unterscheiden, ist die Atmosphäre durchgängig und stetig. Sie erlaubt die vertikale Ausbreitung von Wellen und eine Reihe anderer dynamischer Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Regionen der Atmosphäre.
- Eine vollständige Beschreibung der Dynamik der Atmosphäre erfordert daher ein Verständnis beider Atmosphärenschichten. Die dynamische Kopplung der beiden Schichten ist vor allem durch die Dynamik von atmosphärischen Wellen gegeben.

Dynamik

- Eine Vielzahl von Wellen wird in der Troposphäre angeregt, sie breiten sich nach oben in die Stratosphäre aus und dissipieren. Sie bestimmen somit die räumliche und zeitliche Struktur der stratosphärischen Bewegung (Flüsse).
- Diese Sichtweise einer eher passiven Stratosphäre wird seit einiger Zeit zunehmend abgelöst durch die Einschätzung, dass die Stratosphäre nicht nur ihre eigene Entwicklung gestaltet, sondern auch die der Troposphäre mit bestimmt.

Bedeutung von Wellen

- Die klimatologische Temperaturstruktur der Stratosphäre, wie auch der Jahresgang und ihre Variabilität, hängt entscheidend von der Dynamik atmosphärischer Wellen ab, die vor allem in der Troposphäre angeregt werden.
- Die sogenannte **Wellendynamik** kann man in drei Prozesse einteilen:
 - Anregungsmechanismus,
 - Ausbreitungscharakteristik und
 - Dissipation (vor allem durch "Brechen" der Wellen und thermische Dämpfung).

Bedeutung von Wellen

- Außerhalb der Tropen hängt die Temperaturstruktur der Stratosphäre ab von dem Gleichgewicht zwischen diabatischer Heizung durch Strahlung und adiabatischer Heizung durch vertikale Bewegung (verursacht durch Dissipation planetarer Wellen). (Andrews et al., 1987).

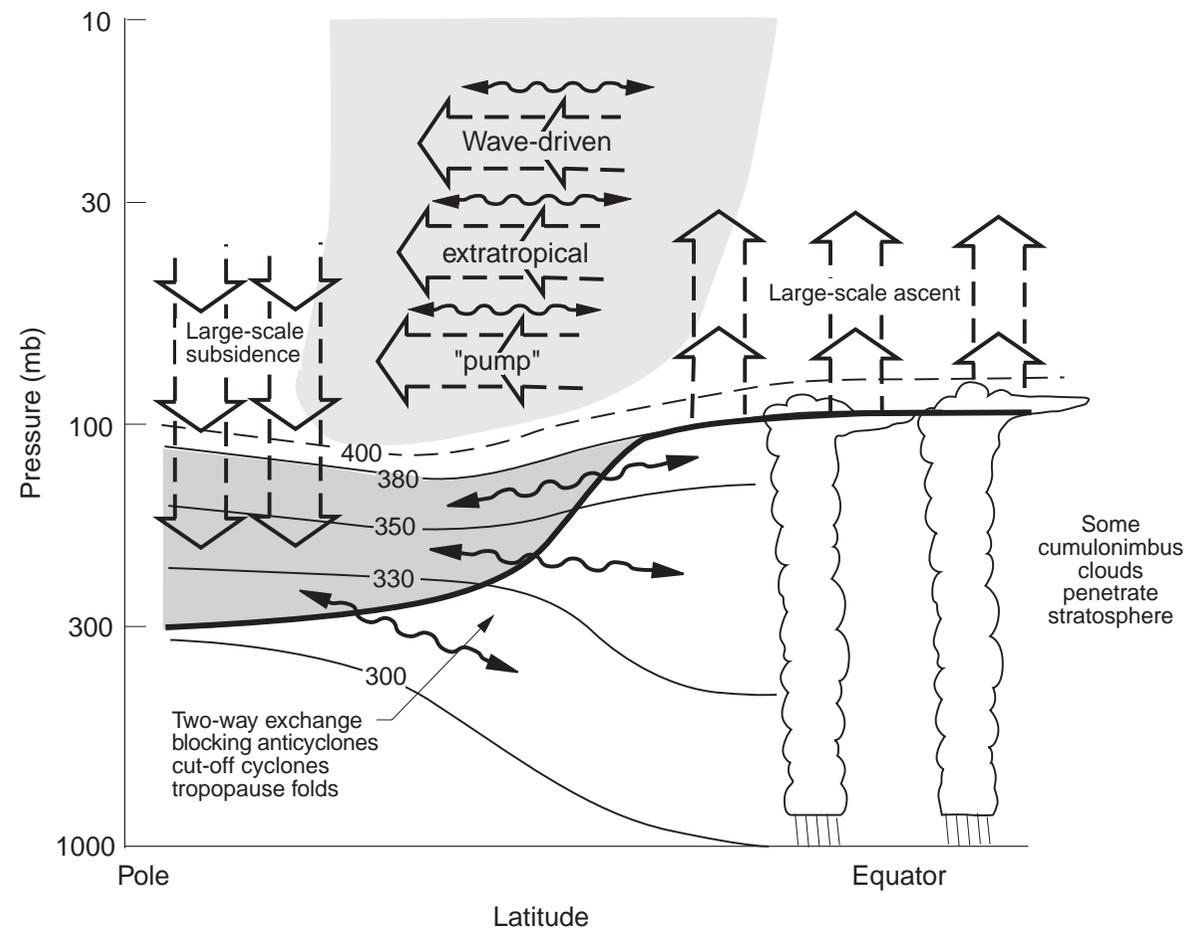
Andrews, D.G., J.R. Holton, und C.B. Leovy, *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic Press, 489 pp., Orlando, Fla., 1987.

- Durch das Brechen von planetaren Wellen in der Winter-Stratosphäre (und Mesosphäre) wird eine westwärts gerichtete Kraft erzeugt, die den Polarjet abbremst. Dies führt in den Tropen zum Aufsteigen von Luftmassen (adiabatische Kühlung) und zum Absinken der Luft über den Polen (adiabatische Erwärmung) (Holton et al., 1995).

Holton, J.R., P.H. Haynes, M.E. McIntyre, A.R. Douglass, R.B. Rood, und L. Pfister, Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33 (4), 403-440, 1995.

Bedeutung von Wellen

- Dieses Reaktionsmuster beschreibt die meridionale Massenzirkulation, sie wird Brewer-Dobson Zirkulation genannt.



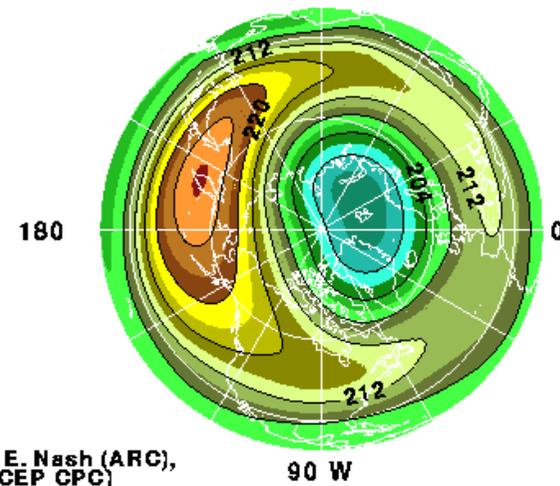
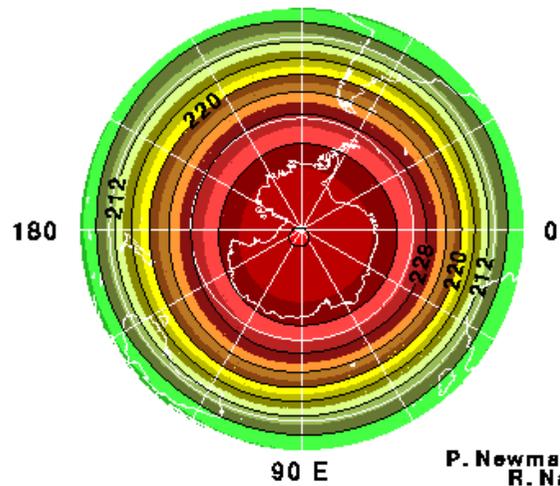
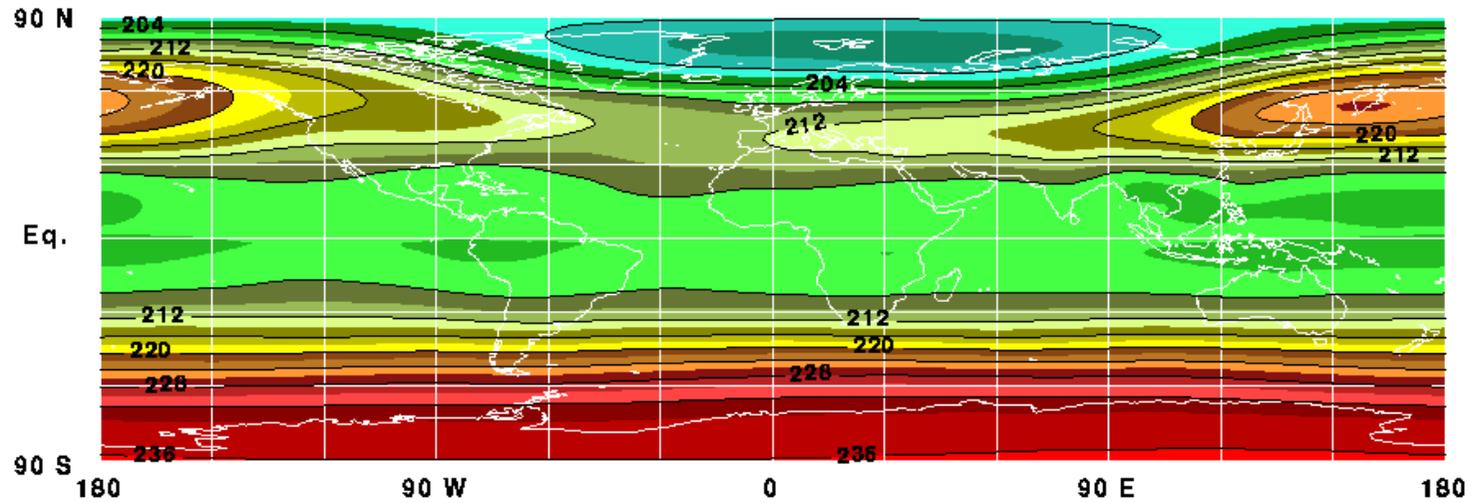
Dynamische Aspekte des Stratosphären-Troposphären Austauschs (Holton et al., 1995).

Bedeutung von Wellen

- Die Klimatologie der extratropischen Stratosphäre wird im wesentlichen durch die Wellendynamik und den Jahresgang der strahlungsbedingten Erwärmung bestimmt.
- Beispiel: Die Ostwinde in der Sommerstratosphäre verhindern die vertikale Ausbreitung planetarer Wellen (Charney und Drazin, 1961) und somit ist die Stratosphäre im Sommer deutlich weniger gestört als im Winter.
- Die Asymmetrie in der kontinentalen Landmassenverteilung zwischen der Nord- und der Südhemisphäre verursachen Asymmetrien in der Effizienz der Antriebsmechanismen planetarer Wellen.
- Aus diesem Grund ist die Aktivität planetarer Wellen in der nördlichen Winterstratosphäre erheblich größer als in der südlichen Winterstratosphäre.

Bedeutung von Wellen

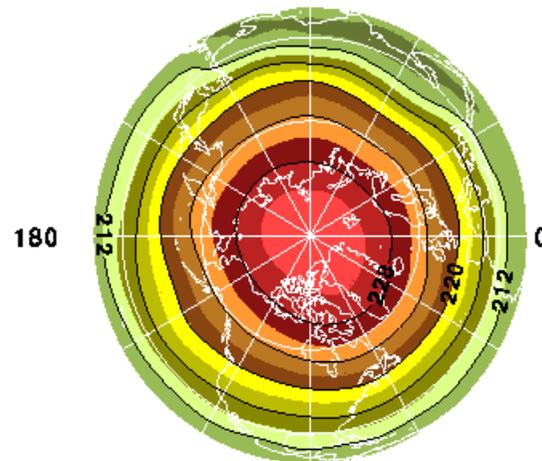
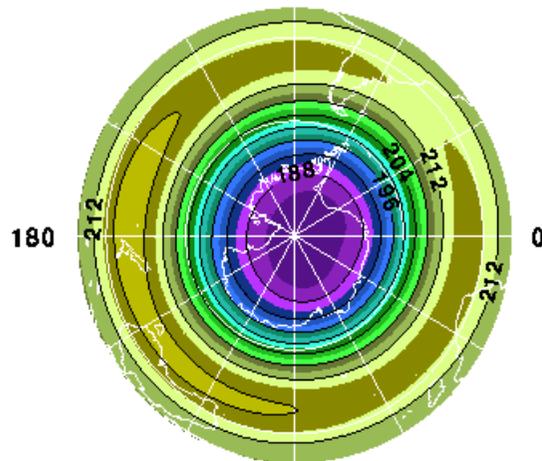
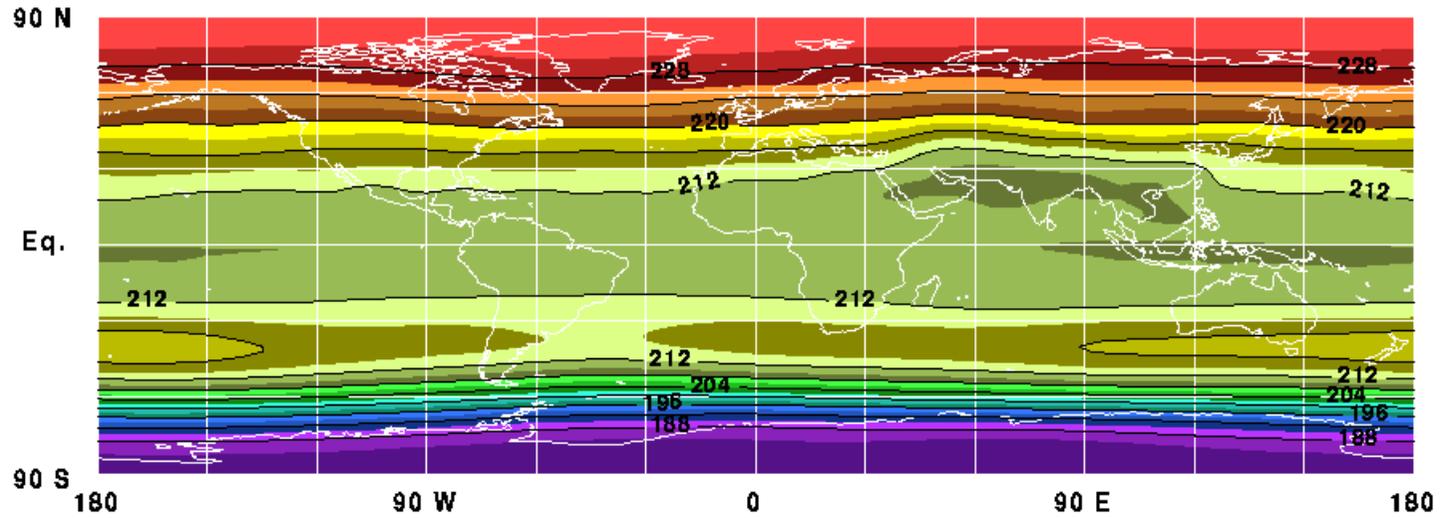
Temperature (K)
50 hPa January 1979-1995



P. Newman (NASA), E. Nash (ARC),
R. Nagatani (NCEP CPC)

Bedeutung von Wellen

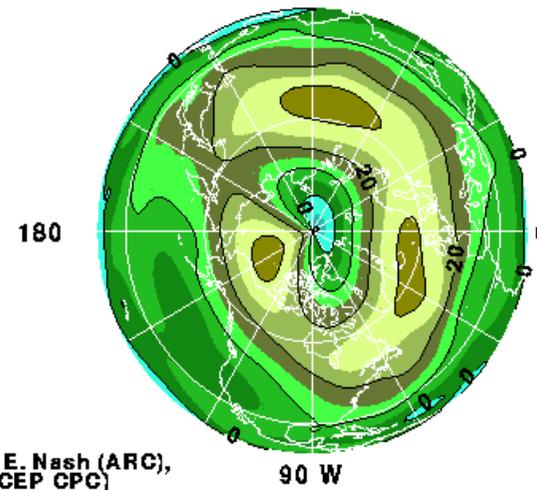
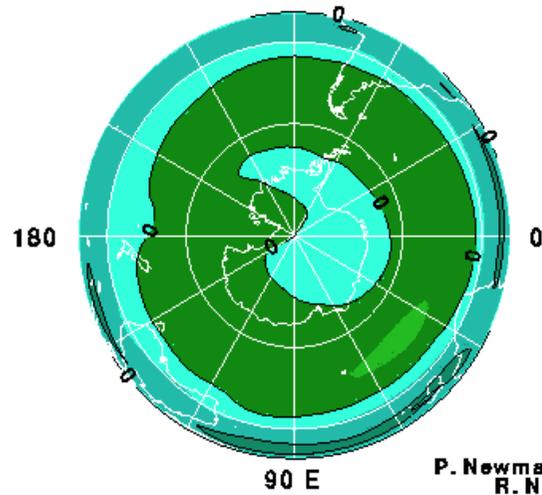
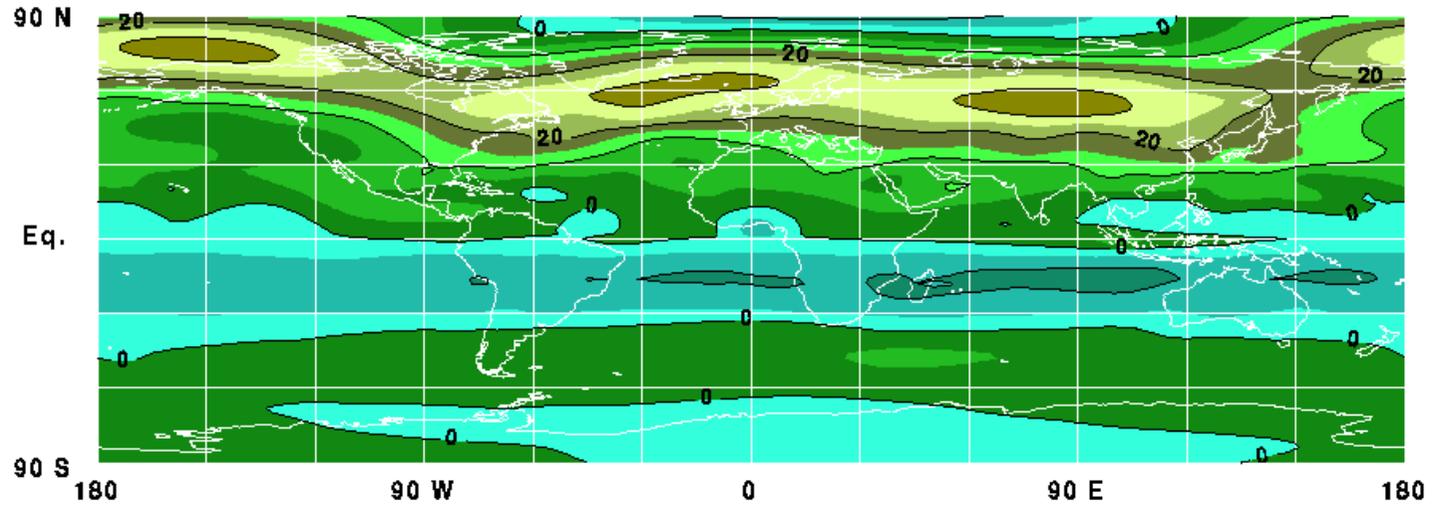
Temperature (K)
50 hPa July 1979-1995



P. Newman (NASA), E. Nash (ARC),
R. Nagatani (NCEP CPC)

Bedeutung von Wellen

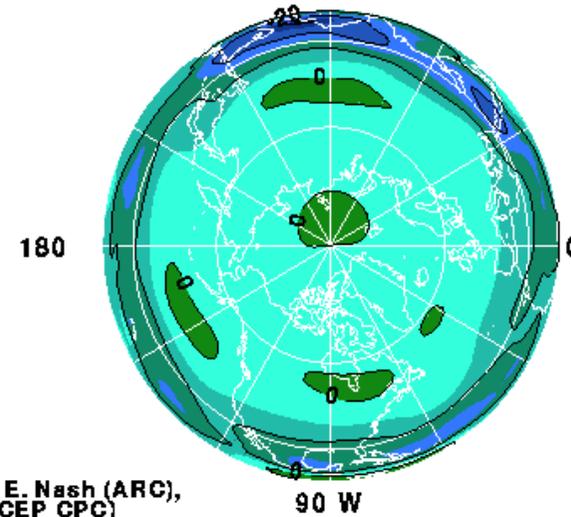
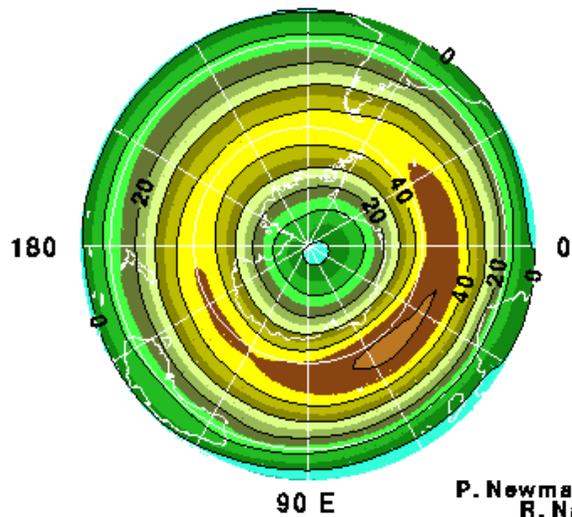
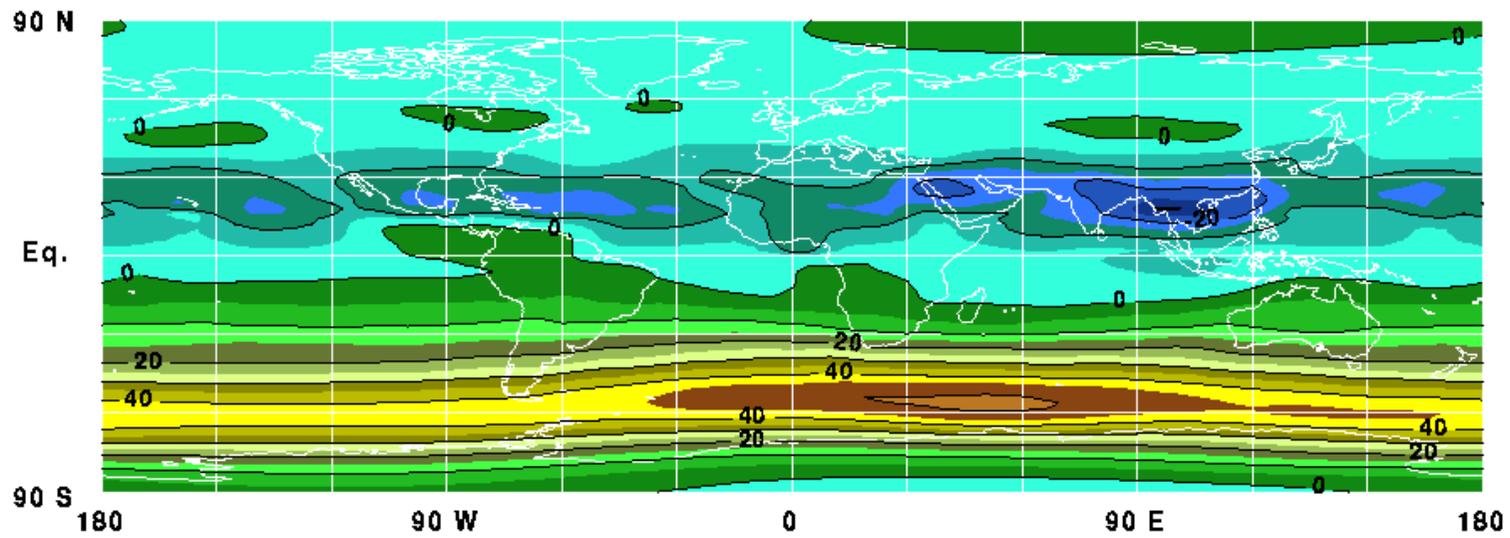
Balanced Zonal Wind (m/s)
50 hPa January 1979-1995



P. Newman (NASA), E. Nash (ARC),
R. Nagatani (NCEP CPC)

Bedeutung von Wellen

Balanced Zonal Wind (m/s)
50 hPa July 1979-1995



P. Newman (NASA), E. Nash (ARC),
R. Nagatani (NCEP CPC)

Bedeutung von Wellen

- In der tropischen Stratosphäre wird die dynamische Variabilität durch die QBO (siehe Kapitel 2) bestimmt.
- Die Gesamtamplitude der QBO im Zonalwind beträgt etwa 55 m/s in 25-30 km (Baldwin und Gray, 2005), in der Temperatur etwa 8 K.

Baldwin, M.P., und L.J. Gray, Tropical stratospheric zonal winds in ECMWF ERA-40 reanalysis, rocketsonde data, and rawinsonde data, *Geophys. Res. Lett.*, 32 (9), L09806, doi: 10.1029/2004GL022328, 2005.

Bedeutung von Wellen

- Die QBO beeinflusst die globale Stratosphäre! Sie beeinflusst eine Vielzahl extra-tropischer Phänomene, einschließlich der Stärke und Stabilität des stratosphärischen Polarwirbels und der Verteilung von Ozon und anderen Spurengasen (siehe Baldwin et al., 2001 für einen vollständigen Überblick).

Baldwin, M.P., L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton, P.H. Haynes, W.J. Randel, J.R. Holton, M.J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D.B.A. Jones, J.S. Kinnnersley, C. Marquardt, K. Sato, und M. Takahashi, The Quasi-Biennial Oscillation, *Rev. Geophys.*, 39 (2), 179-229, 2001.

Bedeutung von Wellen

- Die QBO wird durch die Dissipation einer Reihe verschiedener äquatorialer Wellen angetrieben, die im wesentlichen durch die tiefe Cumulus Konvektion in der Tropen angetrieben werden (Lindzen und Holton, 1968; Dunkerton, 2001).

Lindzen, R.S., und J.R. Holton, A theory of the Quasi-Biennial Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 25 (6), 1095-1107, 1968.

Dunkerton, T.J., Quasi-biennial and sub-biennial variations of stratospheric trace constituents derived from HALOE observations, *J. Atmos. Sci.*, 58 (1), 7-25, 2001.

(Siehe auch Abbildung in Kapitel 2.)

Interne Variabilität der Stratosphäre

- Obwohl die stratosphärische Variabilität traditionell als Reaktion auf die Veränderlichkeit troposphärischer Wellenaktivität gesehen wird, wird heute weitestgehend akzeptiert, dass der Zustand der Stratosphäre selbst eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der vertikalen Wellenflüsse aus der Troposphäre spielt.
- Die ursprüngliche Theorie von Charney und Drazin (1961) besagt, dass nur wenn die vorherrschenden stratosphärischen Winde von Westen kommen, die längsten Wellen – hauptsächlich Wellen der Wellenzahlen 1 bis 3 – sich in der Vertikalen ausbreiten können.

Charney, J.G., und P.G. Drazin, Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 66 (1), 83-109, 1961.

Interne Variabilität der Stratosphäre

- Diese Theorie wurde mittlerweile erweitert, um der starken inhomogenen Beschaffenheit des stratosphärischen Hintergrundzustandes Rechnung zu tragen und auch der starken Gradienten der potentiellen Wirbelstärke (engl. potential vorticity, PV) am Rande des Polarwirbels (z.B. Scott et al., 2004).

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

- Nimmt man eine stetige Quelle für Wellen in der Troposphäre an, so führt jede Veränderung im stratosphärischen PV-Gradienten zu einer Änderung der vertikalen Wellenflüsse, was zu einem Anstieg der Möglichkeit intern angetriebener Variabilität der Stratosphäre führt.

Interne Variabilität der Stratosphäre

- Studien mit numerischen Atmosphärenmodellen legen nahe, dass eine realistische stratosphärische Variabilität auch erzeugt werden kann, auch wenn troposphärische Variabilität nicht berücksichtigt wird (Scott und Polvani, 2004; 2006).

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., und L.M. Polvani, Internal variability of the winter stratosphere. Part I: Time independent forcing, *J. Atmos. Sci.*, 63 (11), 2758-2776, doi: 10.1175/JAS3797.1, 2006.

Interne Variabilität der Stratosphäre

- Die Modulation vertikaler Wellenflüsse in die Stratosphäre durch den Aufbau der Stratosphäre ist möglicherweise davon abhängig, in wie weit die Stratosphäre als Resonanzkörper agiert, einschließlich der Reflektion von (quasi-) stationären planetaren Wellen nach unten (McIntyre, 1982; Smith, 1989).

McIntyre, M.E., How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings?, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 60 (1), 37-65, 1982.

Smith, A.K., An investigation of resonant waves in a numerical model of an observed sudden stratospheric warming, *J. Atmos. Sci.*, 46 (19), 3038-3054, 1989.

- Des Weiteren ist die troposphärische Zirkulation selbst durch den Zustand der Stratosphäre, über diese Prozesse, beeinflusst.

Interne Variabilität der Stratosphäre

- Eine Reflektion der Energie stationärer planetarer Wellen kann statt finden, wenn der Polarwirbel einen kritischen Schwellwert in der unteren Stratosphäre übersteigt (hohe Windgeschwindigkeiten), was zu einer strukturellen Änderung der bestimmenden troposphärischen Variabilitätsmuster (Moden) führt (Perlwitz und Graf, 2001; Castanheira und Graf, 2003; Walter und Graf, 2005).

Perlwitz, J., und H.-F. Graf, Troposphere-stratosphere dynamic coupling under strong and weak polar vortex conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2), 271-274, doi: 10.1029/2000GL012405, 2001.

Castanheira, J.M., und H.-F. Graf, North Pacific - North Atlantic relationships under stratospheric control?, *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 4036, doi: 10.1029/2002JD002754, 2003.

Walter, K., und H.-F. Graf, The North Atlantic variability structure, storm tracks, and precipitation depending on the polar vortex strength, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 239-248, 2005.

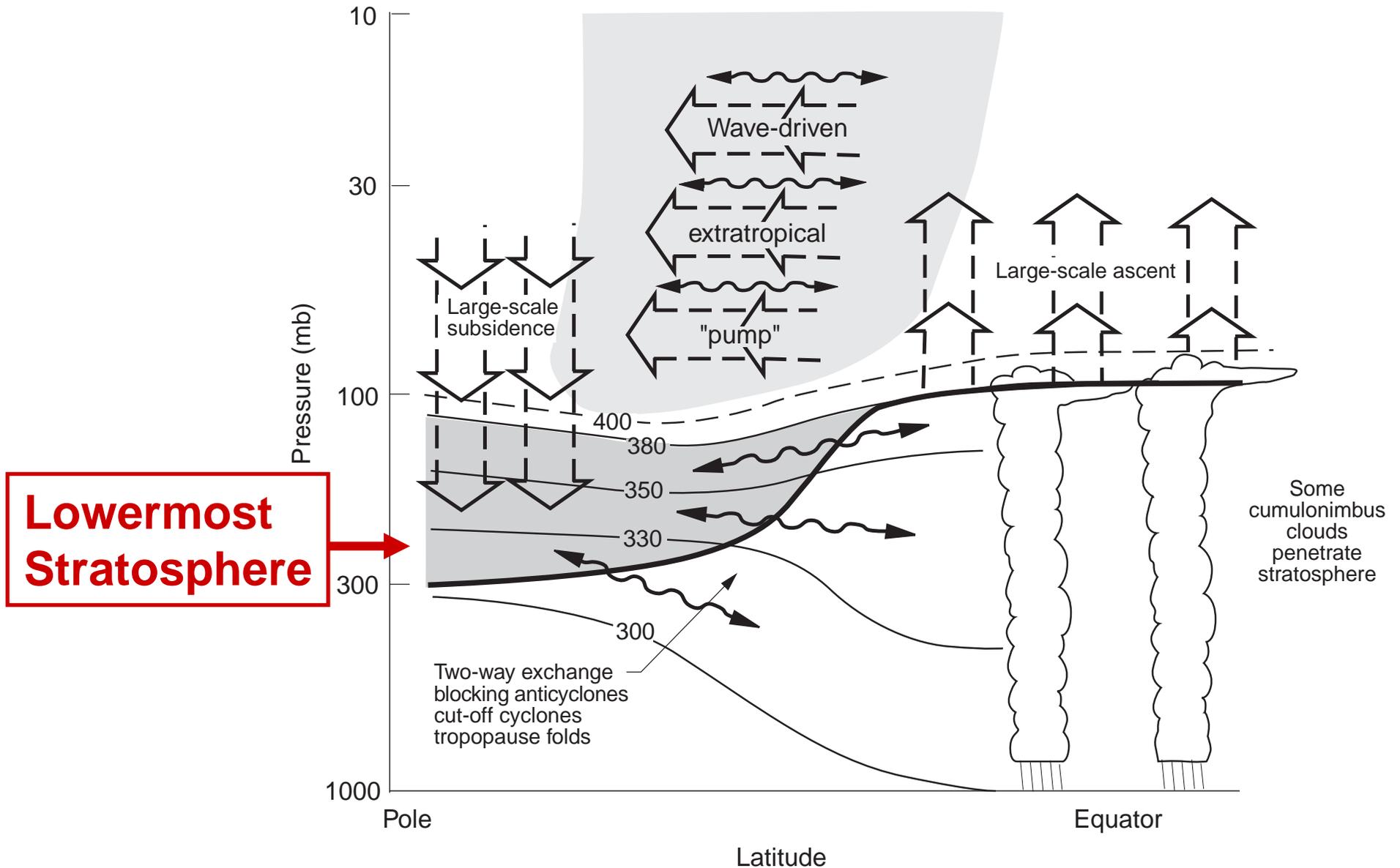
Transport von Luftmassen in die Stratosphäre

- Das Brechen planetarer Wellen in der Stratosphäre ist auch für den Transport von Luftmassen (chemische Substanzen, Partikel) aus der Troposphäre in die Stratosphäre und innerhalb der Stratosphäre wichtig.
- Die mittlere Zirkulation der Stratosphäre ist vor allem eine durch Wellen angetriebene Pumpe ("wave-driven pump", Holton et al., 1995) bei der die stratosphärischen Wellen ("wave drag") Luftmassen polwärts (meridional) und über den Polarregion abwärts verfrachten. (Siehe Kapitel 2.)
- Dies hat u.a. zur Folge, dass Luftmassen aus der tropischen unteren Stratosphäre langsam nach oben aufsteigen (0.2 - 0.3 mm/s) und ozonarme Luft aus der Troposphäre in die Stratosphäre verfrachten.

Transport von Luftmassen in die Stratosphäre

- Dort, mit zunehmender Höhe, wird die photochemische Ozonproduktion effektiver. Das Aufsteigen der Luft in den Tropen wird durch die jahreszeitlichen Veränderungen und die QBO moduliert (Baldwin et al., 2001).
- In der Westphase der QBO (in 40-50 hPa) ist die Aufstiegsrate geringer und somit ist mehr Zeit für die photochemische Ozonproduktion. Die tropische Ozongesamtsäule ist erhöht.
- In den Subtropen und Extra-Tropen gibt es einen Transport von Luftmassen aus der Troposphäre in die unterste Stratosphäre ("lowermost stratosphere") durch quasi-isentrope Bewegung im Zusammenhang mit synoptisch-skaligen und meso-skaligen Bewegungen (z.B. barokline Wirbel, Fronten). Siehe Abbildung.

Transport von Luftmassen in die Stratosphäre



Transport von Luftmassen in die Stratosphäre

- Mit der gleichen Zirkulation findet ein beträchtlicher Transport von der Stratosphäre in die Troposphäre statt.
- Eine Quantifizierung dieser Transporte in zwei Richtungen ($T \rightarrow S = TST$ und $S \rightarrow T = STT$) hat in den letzten Jahren Fortschritte gemacht (Auswertung von Messdaten und Modellsimulationen; siehe Stohl et al., 2003 – guter Übersichtsartikel).

Stohl, A., H. Wernli, P. James, M. Bourqui, C. Forster, M.A. Liniger, P. Seibert, and M. Sprenger, A new perspective of stratosphere-troposphere exchange. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1565-1573, 2003.

- Extra-tropische NH: großer nach oben gerichteter Massenfluss von $372.3 * 10^{17} \text{ kg yr}^{-1}$; nach unten gerichteter Massenfluss ist $376.7 * 10^{17} \text{ kg yr}^{-1} \Rightarrow$ kleiner jährlicher **Netto-Massenfluss von $4.4 * 10^{17} \text{ kg yr}^{-1}$ nach unten.**

Transport von Luftmassen in die Stratosphäre

- Trotzdem bleiben große quantitative Unsicherheiten, vor allem wegen der Bedeutung klein-skaliger Bewegungen, zum Beispiel bei konvektiven Systemen aber auch beim Transport von der Troposphäre in die Stratosphäre und anders herum.

Modellierung und Parametrisierung von klein-skaligen Wellen

- Bei der Bestimmung des klimatologischen Zustandes der Stratosphäre ist die Berücksichtigung der Wellendynamik von großer Bedeutung.
- Jede systematische Änderung in der Erzeugung, Ausbreitung oder Dissipation von Wellen (sowohl die "aufgelösten" als auch die parametrisierten) haben systematische Veränderungen in der Temperaturstruktur der Stratosphäre zur Folge.
- Die Fähigkeit, klimatologische und raum-zeitliche Änderungen stratosphärischer Eigenschaften zu simulieren, hängt ganz wesentlich davon ab, wie zuverlässig man die nicht-lineare Wellendynamik simulieren kann.

Modellierung und Parametrisierung von klein-skaligen Wellen

- Atmosphärenmodelle haben in der Regel eine unzureichende horizontale und vertikale Auflösung, um beispielsweise barokline Wirbel, die Wechselwirkung von Ozean und Landflächen bzw. die Charakteristika der Ausbreitung von planetaren und den Transport über die Tropopause zu beschreiben.
- Ein anderes Problem stellt die "tiefe" Konvektion dar, ein sehr wichtiger Anregungsmechanismus für Wellen, die sich in die Stratosphäre ausbreiten.
- In globalen Modellen ist die Konvektion ein sub-skaliger Prozess und muss daher parametrisiert werden.

Modellierung und Parametrisierung von klein-skaligen Wellen

- Eine der großen Herausforderungen bei der Modellierung der dynamischen Kopplung zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre ist die Parametrisierung nicht-aufgelöster Wellen, vor allem der nicht-orographisch angeregten Schwerewellen und ihre Rückkopplung auf den skaligen (d.h. vom Modell aufgelösten) Fluss.
- Es gibt nur wenige Beobachtungsdaten, um die troposphärischen Quellen und die grundlegende Klimatologie atmosphärischer Schwerewellen zu ermitteln (z.B. Fritts und Alexander, 2003; Kim et al., 2003).

Fritts, D.C., und M.J. Alexander, Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, 41 (1), 1003, doi: 10.1029/2001RG000106, 2003.

Kim, Y.-J., S.D. Eckermann, und H.-Y. Chun, An overview of the past, present and future of gravity-wave drag parameterization for numerical climate and weather prediction models, *Atmos. Ocean*, 41 (1), 65-98, 2003.

Modellierung und Parametrisierung von kleinskaligen Wellen

- Parametrisierungen von zunehmender Komplexität werden entwickelt, um die Dynamik der Wellen realistischer zu modellieren.
- Achtung: Die hierbei frei wählbaren Parameter sind meistens so gewählt, dass sie das heutige Klima gut reproduzieren. Es stellt sich die Frage nach der Gültigkeit in einem zukünftigen Klima.
- Offene Frage: Sind diese Schwerewellenparametrisierungen ohne weiteres in Klimaänderungsszenarien gültig? (Siehe auch Kapitel 8.)

"Annulare" Moden

- Annulare Moden sind hemisphärische, räumliche Muster der Klimavariabilität, die durch Nord-Süd Verschiebung von Masse zwischen polaren und niedrigen Breiten charakterisiert sind (Thompson und Wallace, 2000).

Thompson, D.W.J., und J.M. Wallace, Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Clim.*, 13 (5), 1000-1016, 2000.

- Troposphärische Signaturen stratosphärischer Variabilität sind häufig durch Muster annularer Moden gut beschrieben (z.B. Baldwin und Dunkerton, 2001; Gillett und Thompson, 2003).

Baldwin, M.P., und T.J. Dunkerton, Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 244 (5542), 581-584, 2001.

Gillett, N.P., und D.W.J. Thompson, Simulation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science*, 302 (5643), 273-275, 2003.

"Annulare" Moden

- Sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre kann man mittels annularer Moden ein Großteil der Variabilität beschreiben.
- Auf Zeitskalen von einem zum anderen Monat, ist die Variabilität annularer Moden in der Troposphäre mit der Variabilität annularer Moden in der Stratosphäre eng gekoppelt (Baldwin und Dunkerton, 1999; Thompson und Wallace, 2000).

Baldwin, M.P., und T.J. Dunkerton, Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 104 (D24), 30937-30946, 1999.

- Mit Hilfe von Zeitreihen annularer Moden kann man auch Aspekten der Stratosphäre-Troposphärenkopplung beschreiben (siehe unten).

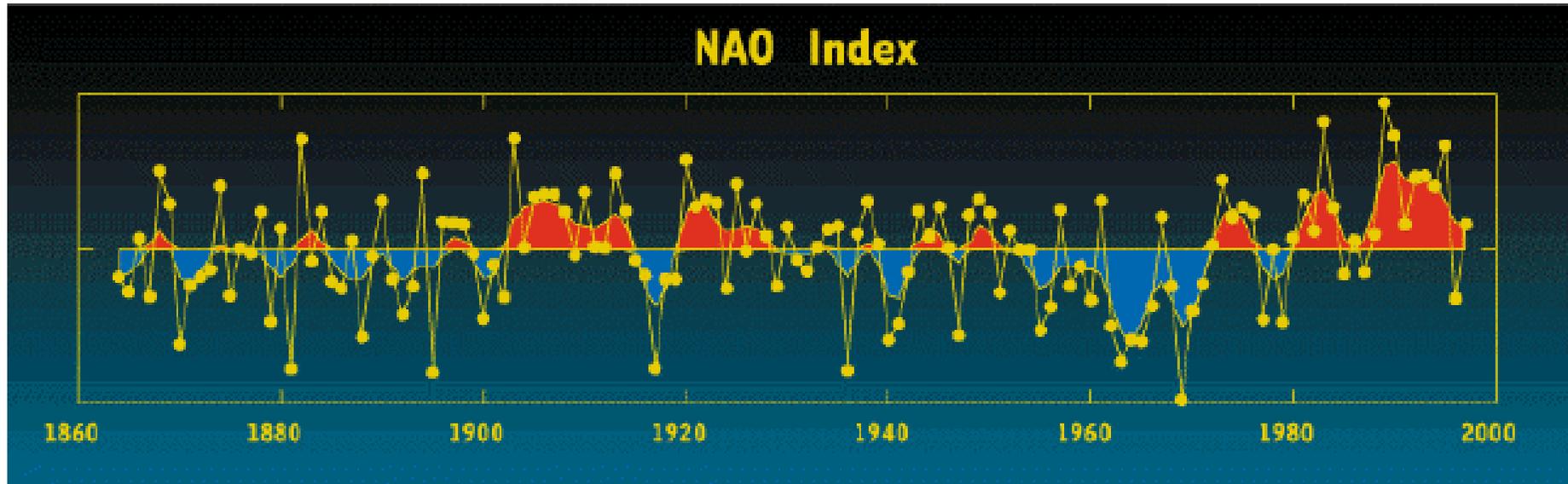
"Annulare" Moden

- Der "Northern Annular Mode" (**NAM**) nahe der Erdoberfläche ist auch bekannt als "Arctic Oscillation" (**AO**; Thompson und Wallace, 1998) oder die "North Atlantic Oscillation" (**NAO**; Hurrell, 1995).
- Der "Southern Annular Mode" (**SAM**) ist auch bekannt als die "Antarctic Oscillation" oder der "High Latitude Mode".

Thompson, D.W.J., und J.M. Wallace, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25 (9), 1297-1300, 1998.

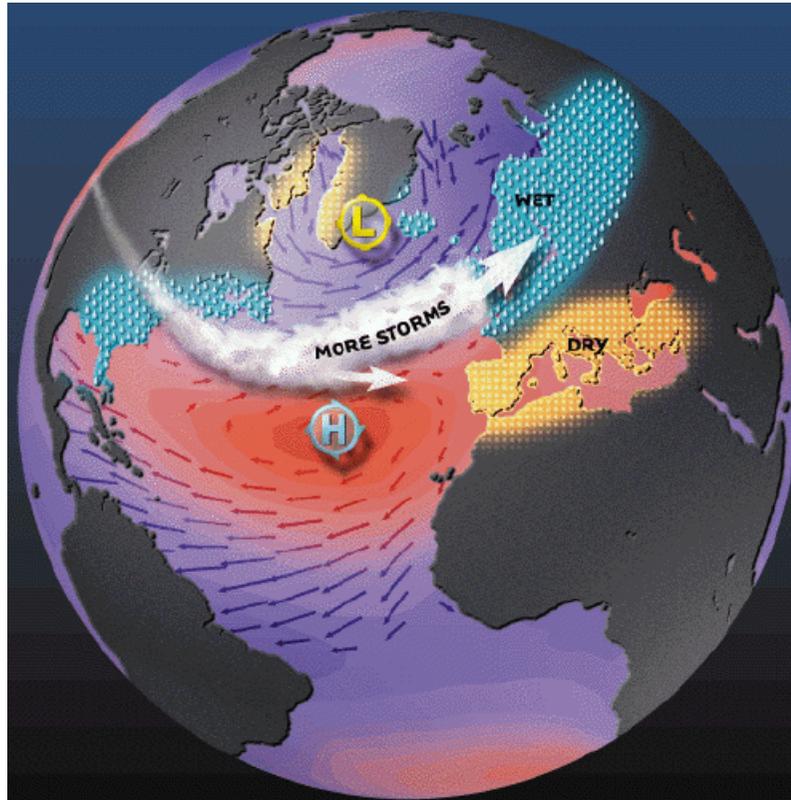
Hurrell, J.W., Decadal trend in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science*, 269 (5224), 676-679, 1995.

Beispiel: NAO



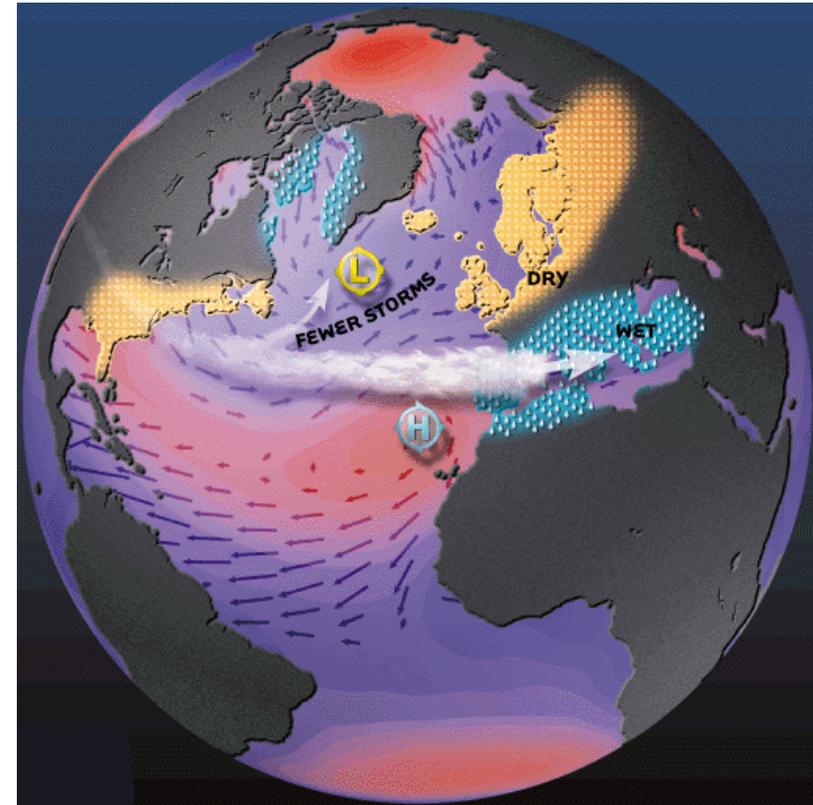
Der sogenannte **NAO Index** ist definiert als die Differenz der Druckanomalie zwischen dem Polartief und dem subtropischen Hoch während der (Nord-) Winter Saison (Dezember bis März).

Beispiel: NAO



Positive NAO Index

The positive NAO index phase shows a stronger than usual subtropical high pressure centre and a deeper than normal Icelandic low. The increased pressure difference results in more and stronger winter storms crossing the Atlantic Ocean on a more northerly track.



Negative NAO Index

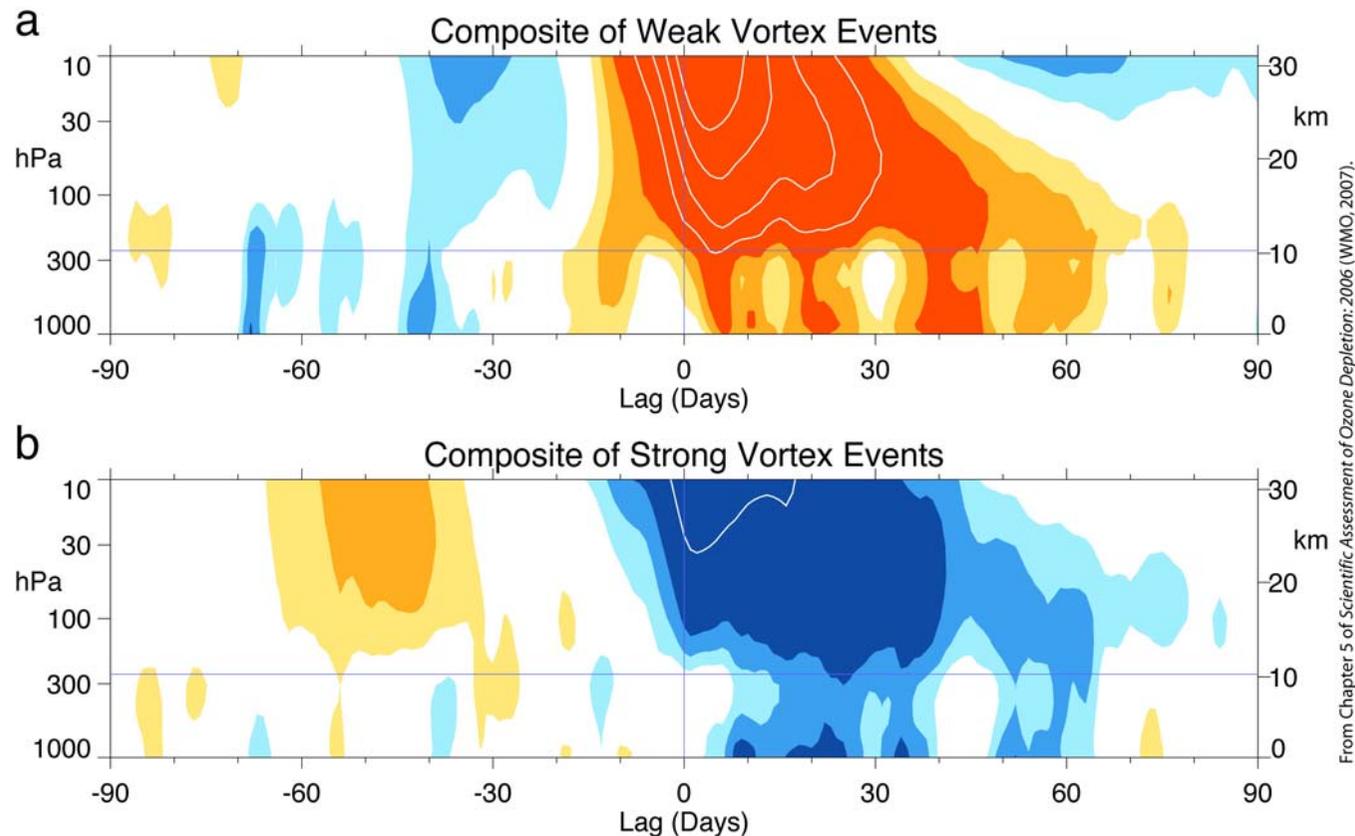
The negative NAO index phase shows a weak subtropical high and a weak Icelandic low. The reduced pressure gradient results in fewer and weaker winter storms crossing on a more west-east pathway.

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

- Analysen von Beobachtungen belegen, dass stratosphärische Prozesse Wetter und Klima beeinflussen (z.B. Scaife et al., 2005).

Scaife, A.A., J.R. Knight, G.K. Vallis, und C.K. Folland, A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18715, doi: 10.1029/2005GL023226, 2005.

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre



The figure shows composites of indices of the Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) during periods when the stratospheric vortex rapidly changes strength. It reveals that within the winter season when the stratospheric flow is westerly, changes to the strength of the northern polar vortex are, on average, accompanied by similarly signed and similarly persistent changes to the tropospheric flow (Baldwin and Dunkerton, 1999; 2001).

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

- Die gezeigte Abbildung würde entsprechend aussehen, wenn man anstelle des "Annular mode index" die Zonalwindgeschwindigkeit in höheren Breiten ($\sim 60^\circ\text{N}$) verwendet.
- Die Analyse deutet darauf hin, dass Änderungen in der Stärke des Polarwirbels, vor allem im Bereich der untersten ("lowermost") Stratosphäre, troposphärische Flüsse (Bewegungen) beeinflussen können.

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

- Trotz der offensichtlichen Zusammenhänge sind die prinzipiellen Mechanismen, die zur Übertragung der stratosphärischen Variabilität auf die troposphärische Zirkulation führen, nach wie vor unbekannt.
- Nach derzeitigem Kenntnisstand liegt die Erklärung für die beobachteten Kopplungen in einem oder mehreren der folgenden physikalischen Prozesse:

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

1. Geostrophische und hydrostatische Anpassung der troposphärischen Flüsse aufgrund anormaler Welleneffekte ("wave drag") (Haynes et al., 1991; Thompson et al., 2006) und anormaler diabatischer Heizung in der Stratosphäre (Thompson et al., 2006).

Haynes, P.H., C.J. Marks, M.E. McIntyre, T.G. Shepherd, und K.P. Shine, On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces, *J. Atmos. Sci.*, 48 (4), 651-678, 1991.

Thompson, D.W.J., J.C. Furtado, und T.G. Shepherd, On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating, *J. Atmos. Sci.*, 63, 2616-2629, 2006.

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

2. Der Einfluss von anormaler Scherung der zonalen Bewegung in der unteren Stratosphäre auf den Impulsfluss durch barokline Wirbel (Shepherd, 2002; Kushner and Polvani, 2004; Wittman et al., 2004).

Shepherd, T.G., Issues in stratosphere-troposphere coupling, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 80 (4B), 769-792, 2002.

Kushner, P.J., and L.M. Polvani, Stratosphere-troposphere coupling in a relatively simple AGCM: The role of eddies, *J. Clim.*, 17 (3), 629-639, 2004.

Wittman, M.A.H., L.M. Polvani, R.K. Scott, and A.J. Charlton, Stratospheric influence on baroclinic lifecycles: connection to the Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16113, doi: 10.1029/2004GL020503, 2004.

Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

3. Verstärkung durch interne troposphärische Dynamik (Song and Robinson, 2004).

Song, Y., und W.A. Robinson, Dynamical mechanisms for stratospheric influences on the troposphere, *J. Atmos. Sci.*, 61 (14), 1711-1725, 2004.

4. Einfluss anomaler Scherung im Tropopausenniveau auf die vertikale Ausbreitung von Wellen (Chen und Robinson, 1992; Shindell et al., 1999; Limpasuvan und Hartmann, 2000).

Chen, P., und W.A. Robinson, Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 49 (24), 2533-2545, 1992.

Shindell, D., D. Rind, N. Balachandran, J. Lean, und P. Lonergan, Solar cycle variability, ozone, and climate, *Science*, 284 (5412), 305-308, 1999.

Limpasuvan, V., und D.L. Hartmann, Wave-maintained annular modes of climate variability, *J. Clim.*, 13 (24), 4414-4429, 2000.

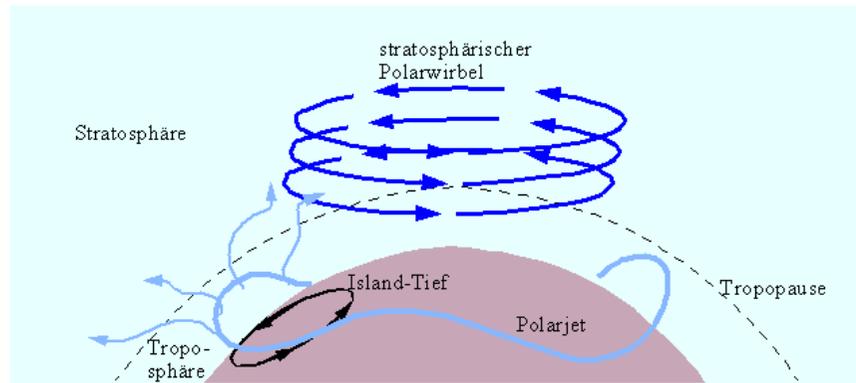
Effekte stratosphärischer Variabilität auf die Troposphäre

5. Reflektion von planetaren Wellen (Hartmann et al., 2000; Perlwitz und Harnik, 2004).

Hartmann, D.L., J.M. Wallace, V. Limpasuvan, D.W.J. Thompson, und J.R. Holton, Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change?, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 97 (4), 1412-1417, 2000.

Perlwitz, J., und N. Harnik, Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes, *J. Clim.*, 17 (24), 4902-4909, 2004.

- Durch Mechanismen dieser Art können langzeitliche Veränderungen in der Temperatur und Zirkulation der Stratosphäre möglicherweise Wettermuster nahe der Erdoberfläche beeinflussen (z.B. Anomalien der Strahlungsheizung durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen oder Änderungen in der Ozonverteilung).



Ende Kapitel 3