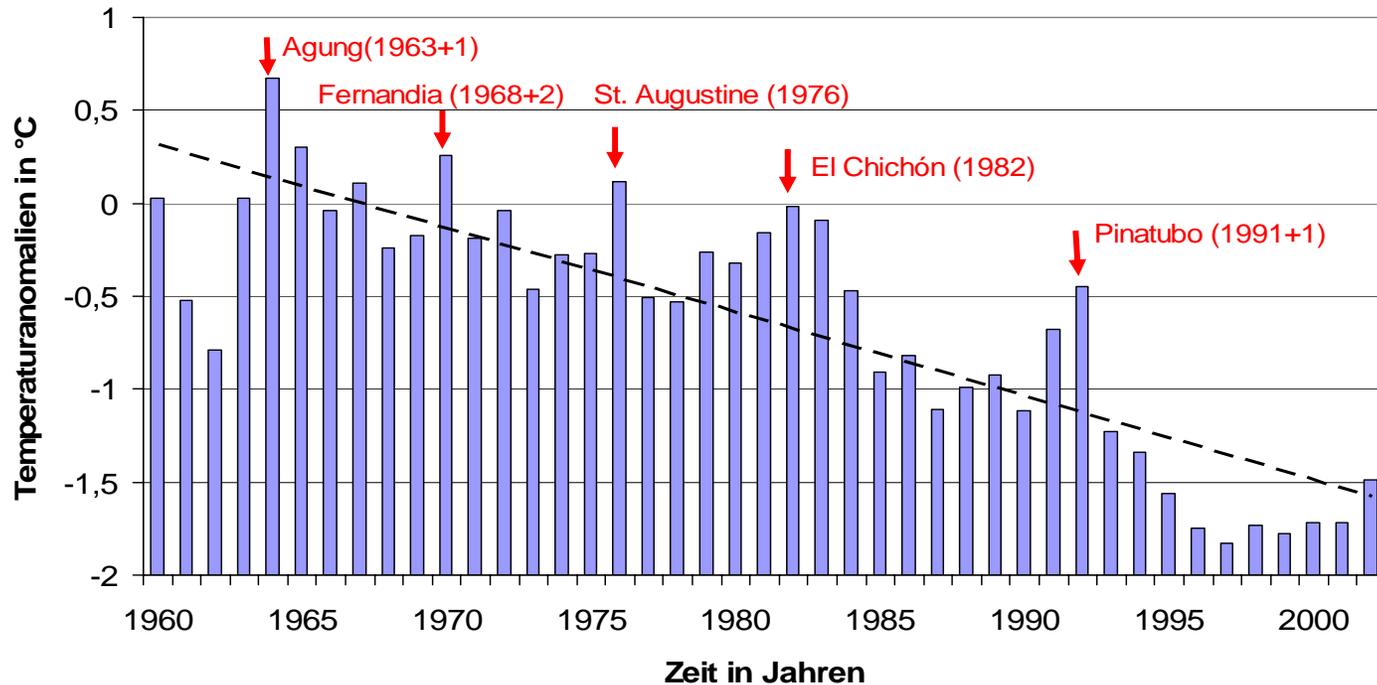


Kapitel 6

Stratosphärische Temperaturen in der Vergangenheit

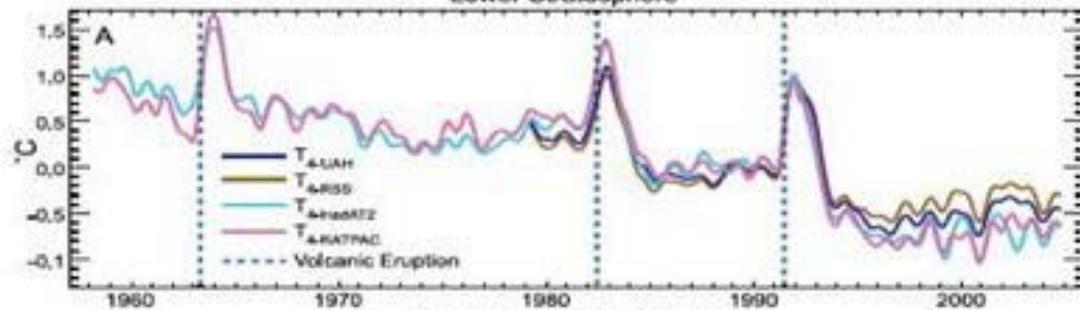


Kapitel 6: Gliederung

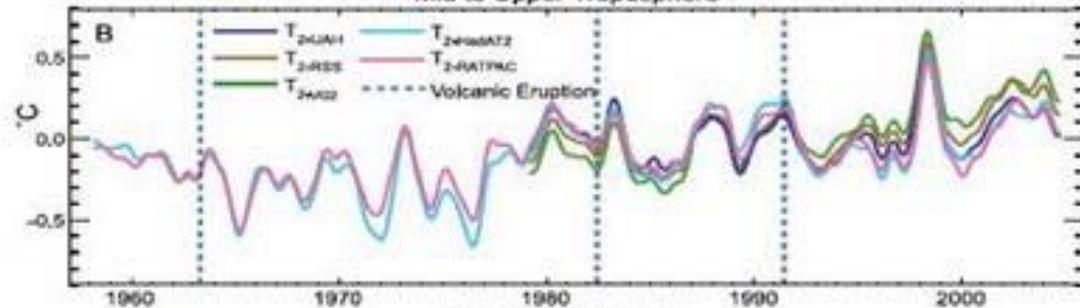
- Einleitung, Beobachtungen
- Temperatur und Ozon
- Temperaturtrend

Global Anomalies

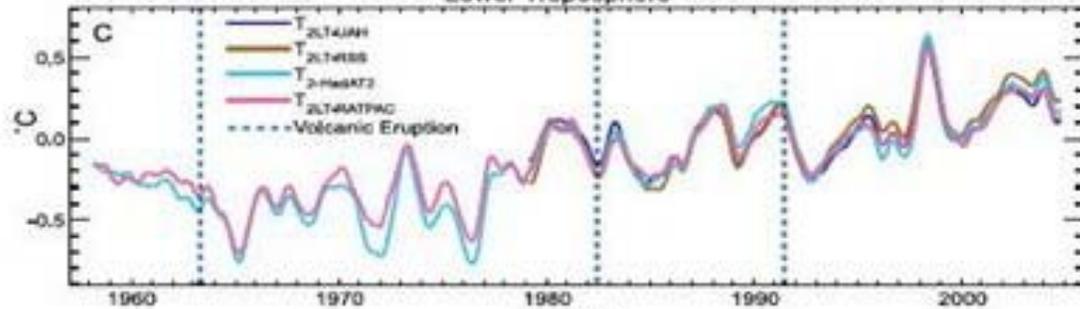
Lower Stratosphere



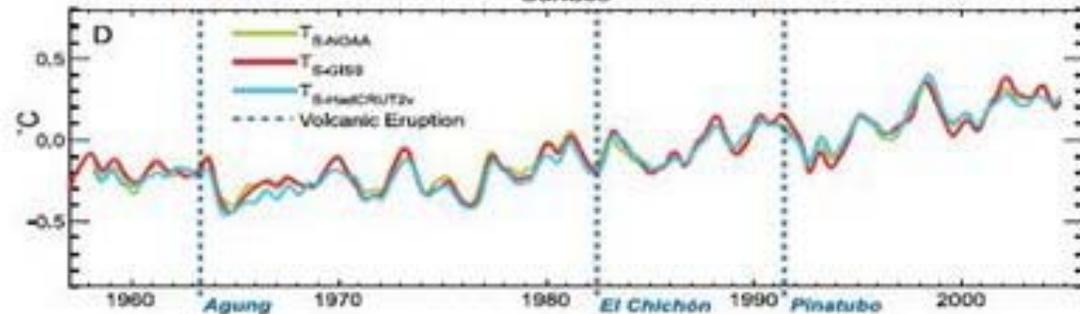
Mid to Upper Troposphere



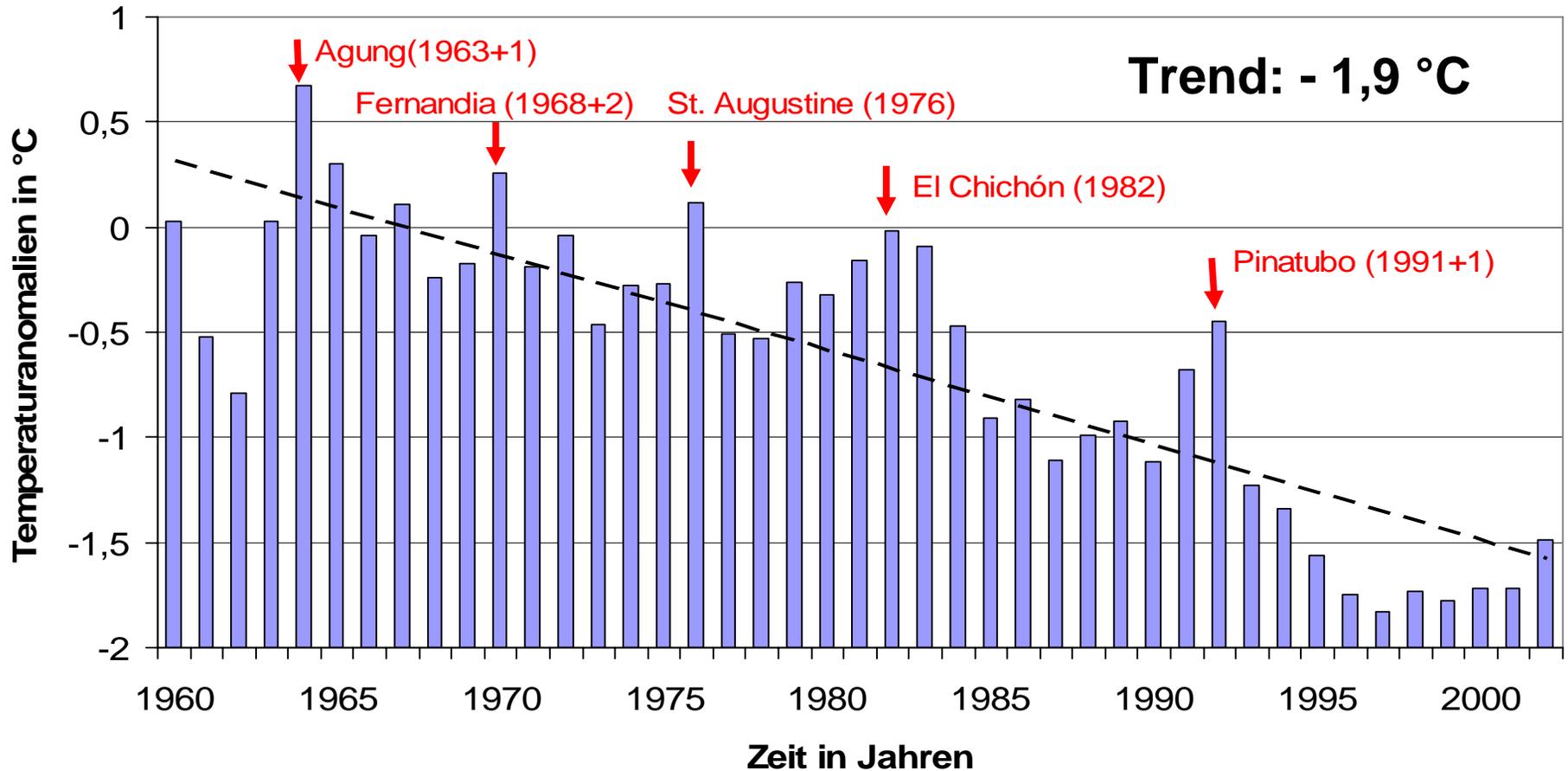
Lower Troposphere



Surface



Global gemittelte Temperatur der Stratosphäre (16 - 24 km) Anomalien 1960-2002 (relativ zu 1958-1977) und einige explosive Vulkanausbrüche



Temperatur- entwicklung in der Stratosphäre:

Ursachen:

Ozonrückgang

Wasserdampf-
zunahme

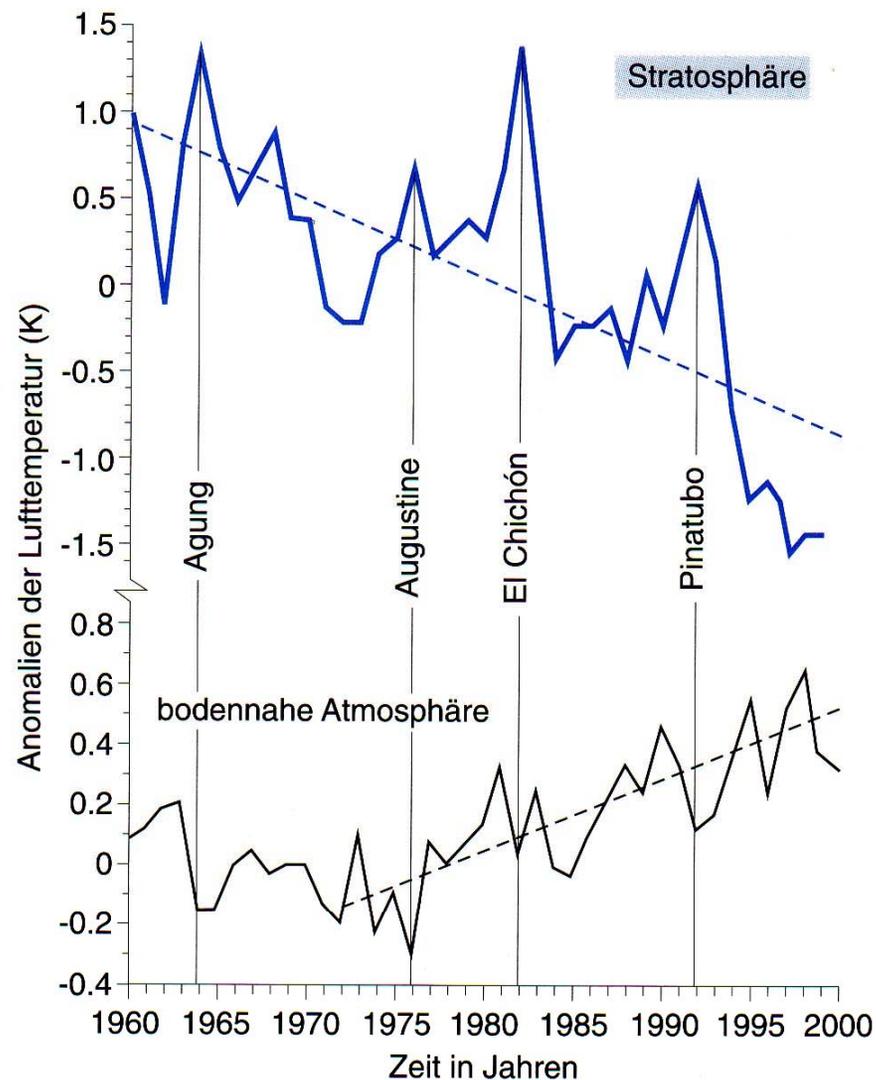
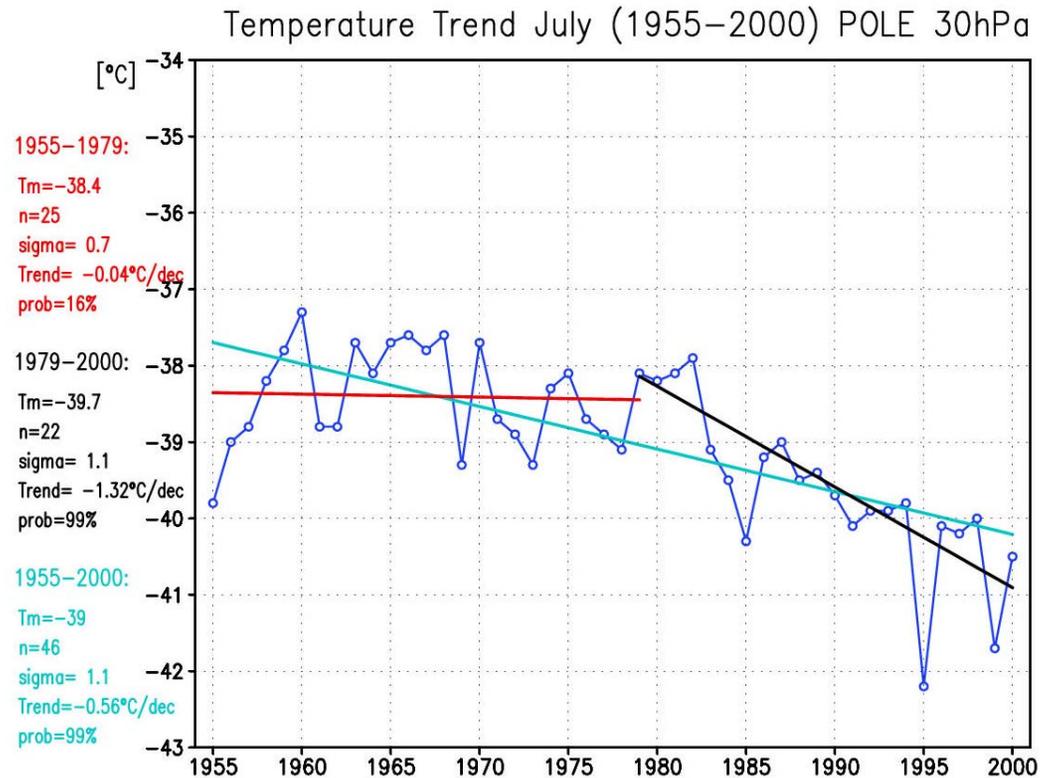


Abb. 150

Jahresanomalien 1960–2000 der nordhemisphärischen Mittelwerte der Temperatur in der Stratosphäre (30 hPa, entsprechend 24 km Höhe), oben, und bodennah, unten, mit Trends (gestrichelt; Stratosphäre: -1.8 K, bodennah ab 1972: $+0.7$ K); einige explosive Vulkanausbrüche (Agung 1963, Augustine, 1974, El Chichón 1982, Pinatubo 1991) haben sich (zum Teil im Folgejahr) insbesondere in stratosphärischen Erwärmungen, aber auch simultan in bodennahen Abkühlungen ausgewirkt (Datenquellen: LABITZKE et al. 1986, 1999, ANGELL 1999, sowie JONES et al., 1999, jeweils ergänzt, Vulkanausbrüche siehe nach Anhang A.5).

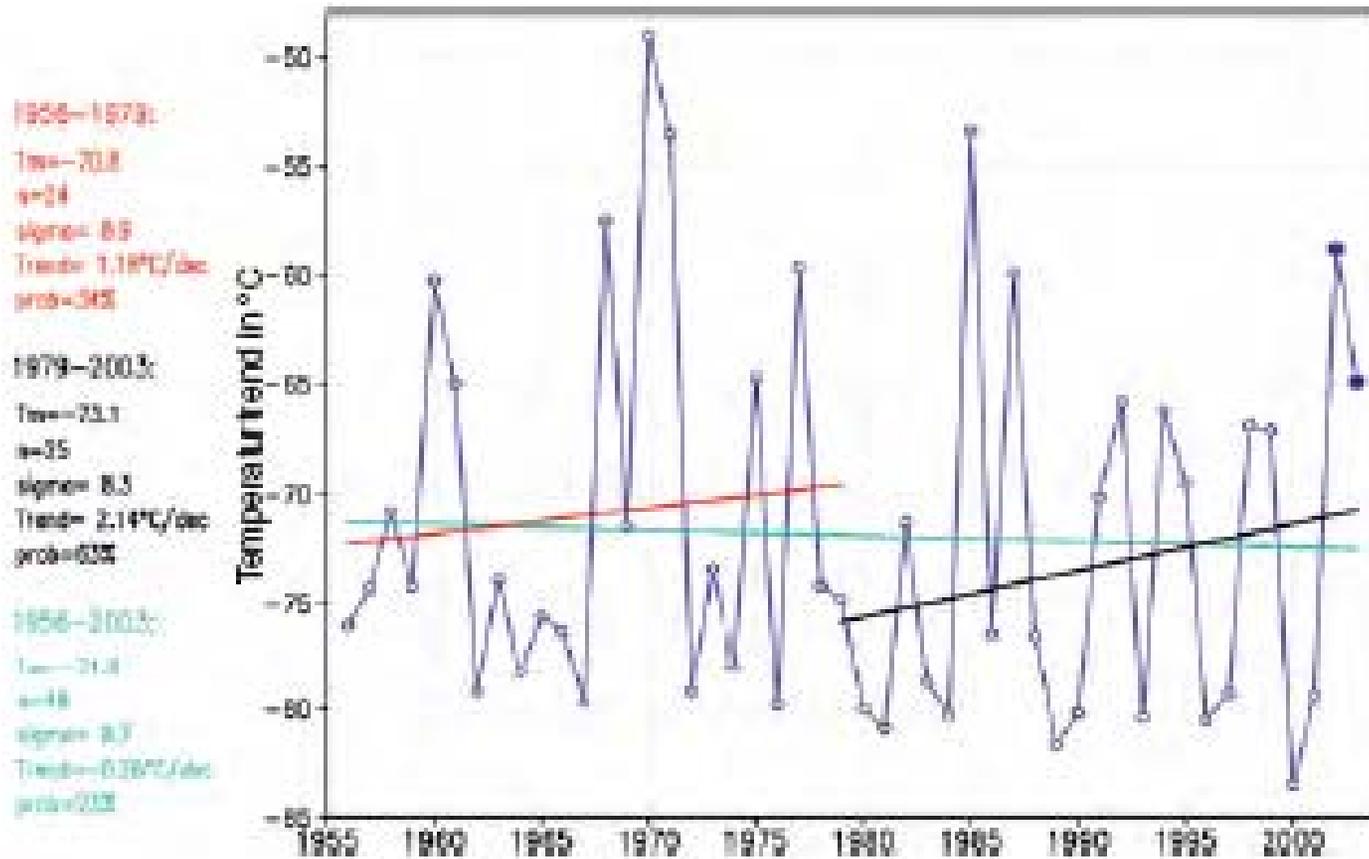
[Schönwiese, 2003]

Temperaturtrend in der Stratosphäre



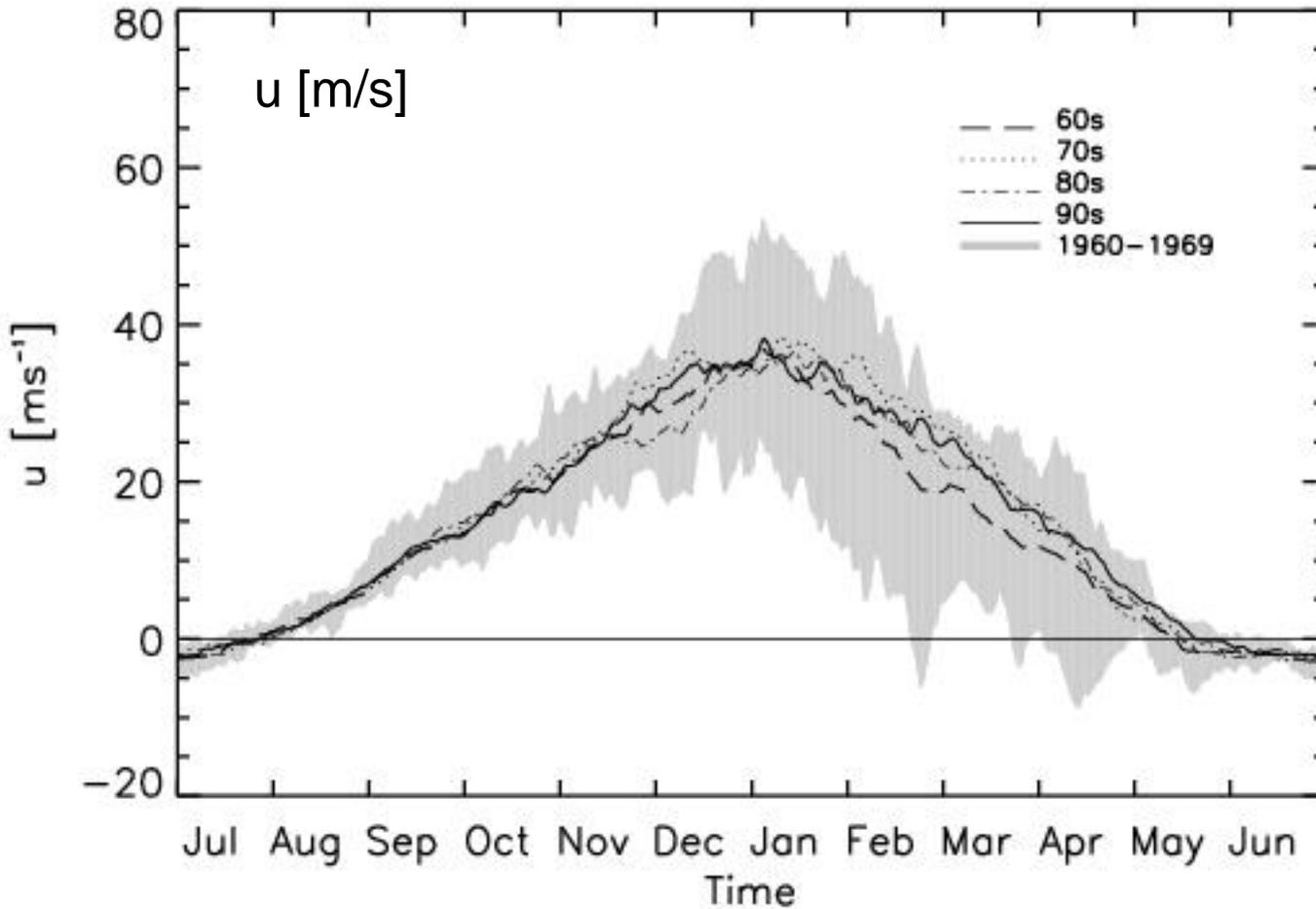
Monatsmittel der Temperatur im Juli über dem Nordpol in etwa 24 km Höhe (30 hPa Luftdruck) von 1955 bis 2000. Deutlich zu erkennen ist der Abkühlungstrend, der sich seit dem Beginn der 80er Jahre deutlich verstärkt hat (Quelle: K. LABITZKE, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin). Am linken Bildrand sind für die Zeitspannen 1955–1979 (rot), 1979–2000 (schwarz) sowie 1955–2000 (blau) die folgenden Kennzahlen angegeben: T_m : Mitteltemperatur, n : Anzahl der Jahre, σ : Streuung, Trend, prob: Wahrscheinlichkeit.

Temperaturtrend in der Stratosphäre

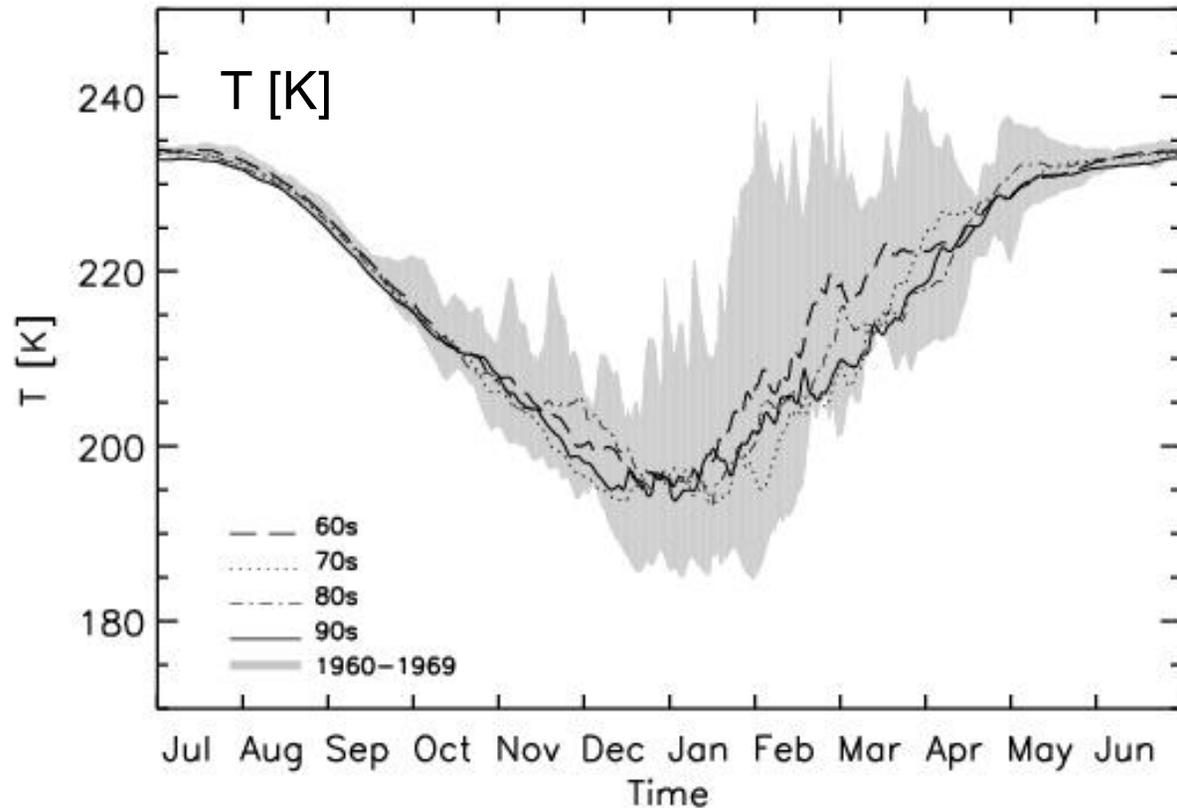
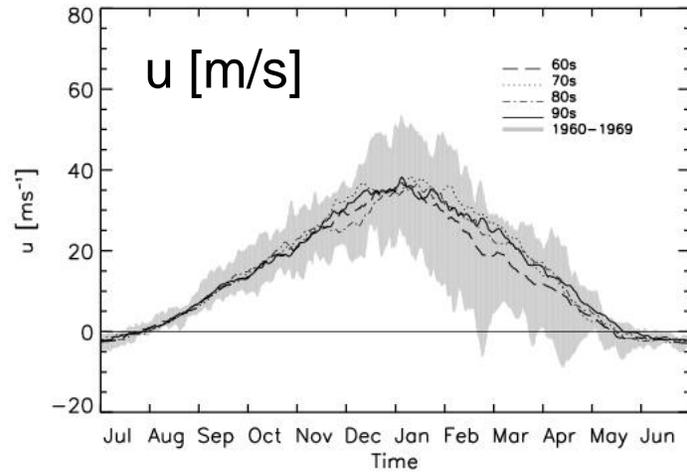


30 hPa Monatsmitteltemperaturen für den Januar über dem Nordpol von 1956 bis 2003 (in °C).

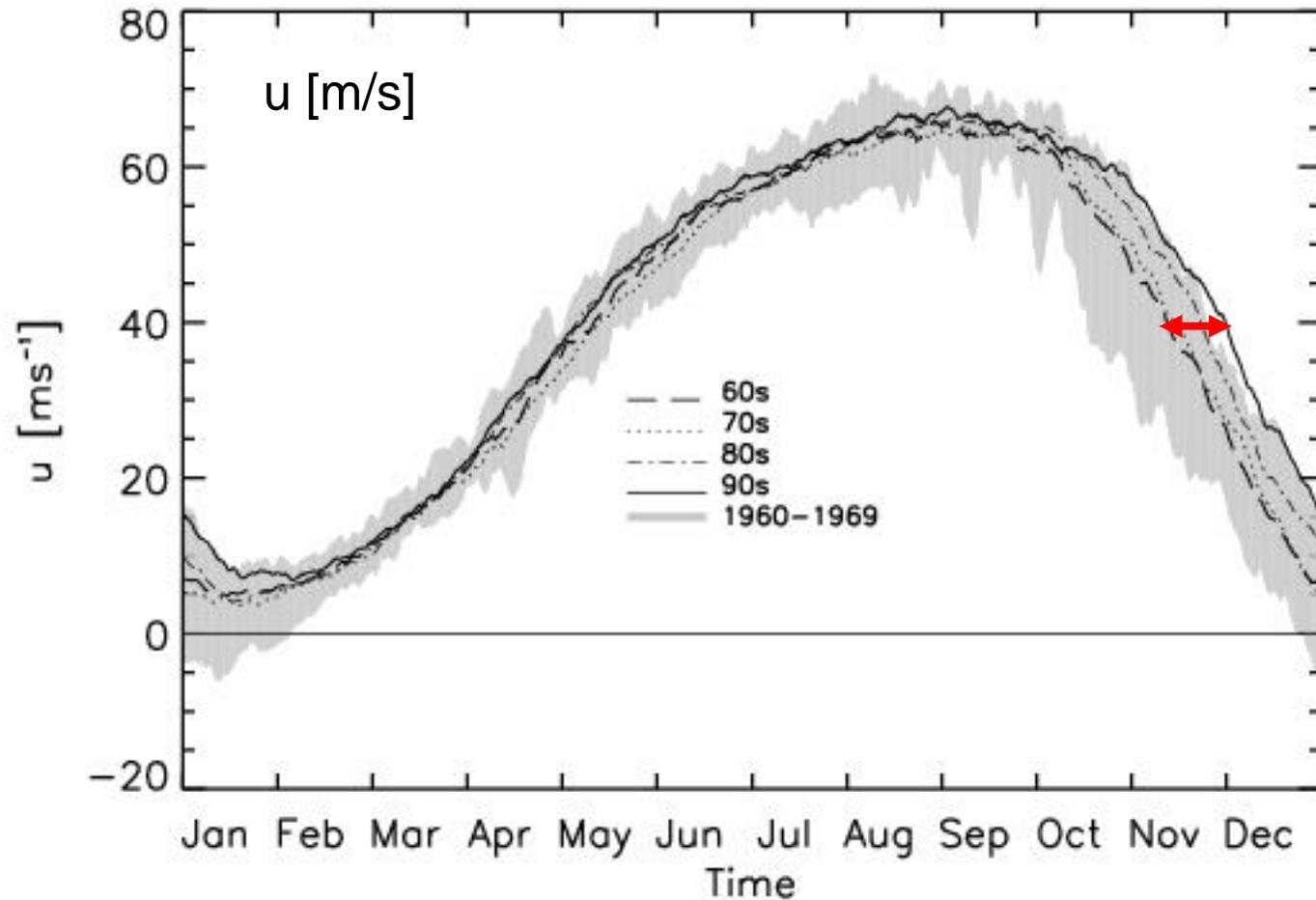
Zonalwind (60°N), 30 hPa (Modelldaten)



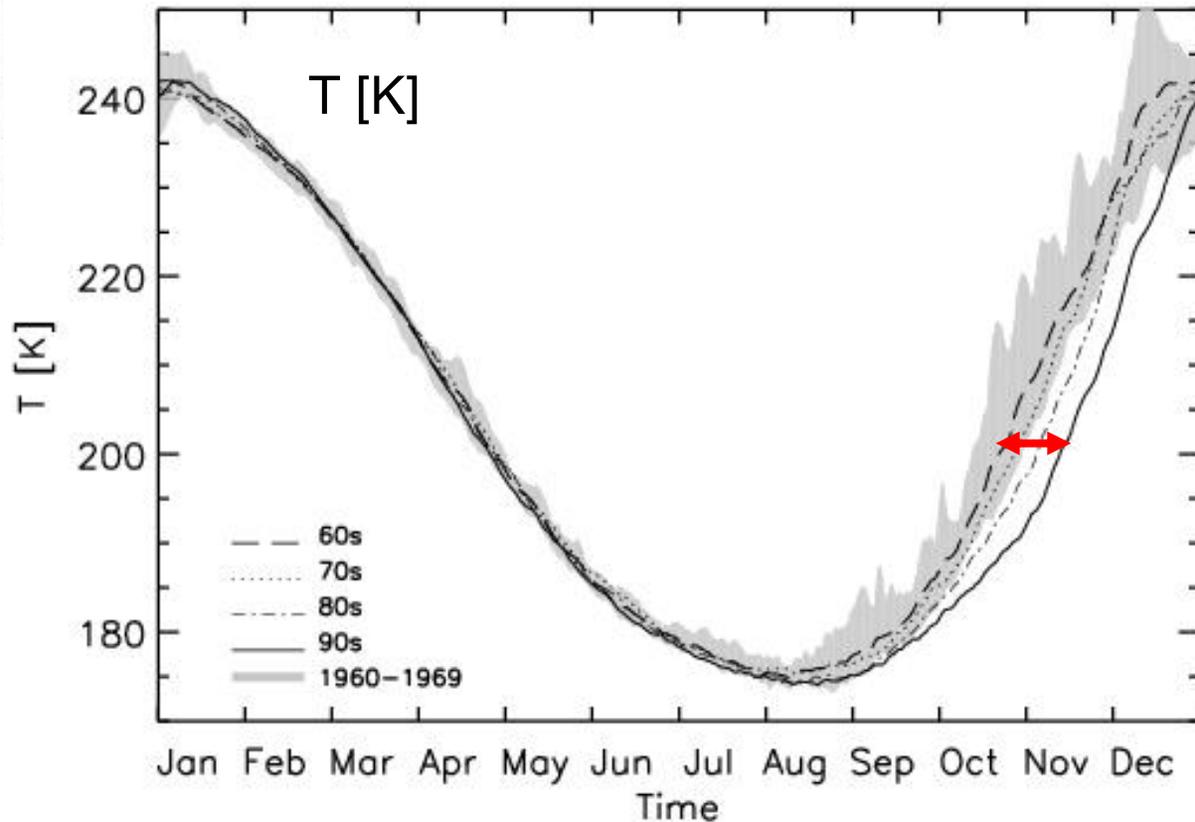
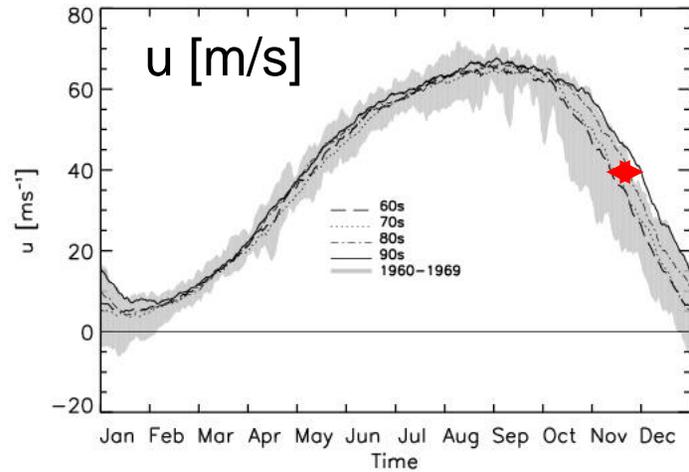
Zonalwind (60°N) und Temperatur (80°N), 30 hPa (Modelldaten)



Zonalwind (60°S), 30 hPa (Modelldaten)



Zonalwind (60°N) und Temperatur (80°N), 30 hPa (Modelldaten)



Temperatur und Ozon

- Stratosphärische Temperaturänderungen sind eng mit Änderungen des Ozongehalts verknüpft.
- Ozon ist eine entscheidende strahlungsaktive Substanz in der Stratosphäre und es ist sehr wichtig die Konsistenz zwischen beobachteten Ozon- und Temperaturänderungen zu bestimmen.
- Ferner ist zu beachten, dass die Ozonzerstörungsrate durch Halogene bei niedrigeren Temperaturen in der oberen Stratosphäre (global) reduziert ist, sich aber bei niedrigeren Temperaturen in der unteren (polaren) Stratosphäre erhöht.

Temperaturtrend

- Abschätzungen vergangener Temperaturänderungen in der Stratosphäre wurden auf der Grundlage von einigen verschiedenen Datensätzen durchgeführt.
- Die meisten dieser Datensätze wurden aber nicht für das "Klimamonitoring" erstellt; jede Datenreihe hat ihre Stärken und Schwächen, was eine sorgfältige Überprüfung erforderlich macht.
- Ein bedeutender Fortschritt der in den letzten Jahren erzielt wurde ist, dass man sich verstärkt um die Quantifizierung der Unsicherheiten der Trendbestimmungen gekümmert hat, begleitet von Vergleichen unabhängiger Datensätze und Analysen.

Temperatortrend

- Temperatortrends können von meteorologischen Analysen und Reanalysedaten abgeleitet werden, allerdings gibt es Hinweise, dass diese durch "künstliche" Änderungen verursacht werden, die aus der Inhomogenitäten der Datenreihen selbst stammen (z.B. Santer et al., 2004; Randel et al., 2004a; Birner et al., 2006) und daher nicht für jede Anwendung belastbar sind.

Santer, B.D., et al., Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis, *J. Geophys. Res.*, 109, D21104, doi: 10.1029/2004JD005075, 2004.

Birner, T., D. Sankey, und T.G. Shepherd, The tropopause inversion layer in models and analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14804, doi: 10.1029/2006GL026549, 2006.

Temperaturtrend

- Optimale Erkennungs- und Zuordnungstechniken wurden in der Vergangenheit vielfältig verwendet, um beobachtete Änderungen der Boden- und Troposphärentemperatur bestimmten externen Klimaeinflüssen zuzuordnen.
- Während jedoch einige Erkennungs- und Zuordnungsstudien den anthropogenen Einfluss auf bestimmte Variable unter Einschluss der Stratosphäre identifiziert haben, wie zum Beispiel die Tropopausenhöhe (Santer et al., 2003; 2004), hat sich bislang keine Studie ausschließlich mit der Stratosphärentemperatur beschäftigt.

Santer, B.D., M.F. Wehner, T.M.L. Wigley, R. Sausen, G.A. Meehl, K.E. Taylor, C. Ammann, J. Arblaster, W.M. Washington, J.S. Boyle, and W. Brüggemann, Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes, *Science*, 301 (5632), 479-483, doi: 10.1126/science.1084123, 2003.

Temperaturtrend

- Ein Grund dafür ist möglicherweise, dass für solche Studien Klimamodelle (GCM mit Ozean) erforderlich sind, die allerdings meistens nur eine sehr begrenzte Auflösung der Stratosphäre aufweisen und die stratosphärische Variabilität stark unterschätzen (Tett et al., 2002).
- Allerdings ist eine realistische Abschätzung der internen Variabilität der Atmosphäre erforderlich, um die Reaktion der Atmosphäre auf externe Antriebe zu unterscheiden.

Tett, S.F.B., G.S. Jones, P.A. Stott, D.C. Hill, J.F.B. Mitchell, M.R. Allen, W.J. Ingram, T.C. Johns, C.E. Johnson, A. Jones, D.L. Roberts, D.M.H. Sexton, and M.J. Woodage, Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change, *J. Geophys. Res.*, 107 (D16), 4306, doi: 10.1029/2000JD000028, 2002.

Temperatortrend

- Auf der Grundlage einer Serie von operationellen NOAA Satelliten ist seit 1979 eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung von stratosphärischen Temperaturmessungen verfügbar.
- Diese basieren auf den "Microwave Sounding Unit" (MSU) und den "Stratospheric Sounding Unit" (SSU) Instrumenten, welche auf insgesamt 10 individuellen Satelliten zwischen 1979 und 2005 eingesetzt wurden.
- Diese Daten repräsentieren jeweils mittlere Temperaturen für 10 bis 15 km dicke Schichten, die die untere bis obere Stratosphäre abdecken (siehe spätere Abbildung).

Temperaturtrend

- Aufzeichnungen stratosphärischer Temperaturen für den Zeitraum von 1979 bis 2005 werden zusammengestellt indem man die Daten individueller Instrumente kombiniert; diese werden "justiert" (Kalibration) indem man die Überlappungsperioden von aufeinander folgenden Instrumenten verwendet.
- Effekte durch Driften in der Umlaufbahn oder Einflüsse durch atmosphärische Gezeiten müssen ebenfalls berücksichtigt werden, wenn langzeitliche stratosphärische Zeitreihen konstruiert werden.
- Es gibt eine Reihe unabhängiger Analysen, die die Qualität dieser Zeitreihen der Stratosphärentemperatur sichern.

Temperatortrend

- Zur Zeit gibt es zwei detaillierte Analysen des kombinierten SSU Datensatzes (Scaife et al., 2000; Ramaswamy et al., 2001).

Scaife, A.A., J. Austin, N. Butchart, S. Pawson, M. Keil, J. Nash, und I.N. James, Seasonal and interannual variability of the stratosphere diagnosed from UKMO TOVS analyses, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 126 (568), 2585-2604, 2000.

Ramaswamy, V., M.-L. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Koshelkov, K. Labitzke, J.-J. R. Lin, A. O'Neill, J. Nash, W. Randel, R. Rood, K. Shine, M. Shiotani, und R. Swinbank, Stratospheric temperature trends: observations and model simulations, *Rev. Geophys.*, 39 (1), 71-122, 2001.

Temperatortrend

- Langzeitliche Temperaturänderungen können auch mittels historischer Radiosondendaten überprüft werden; hierzu sind stratosphärische Messungen (bis in Höhen von 30 km) seit ungefähr 1960 verfügbar.
- Unsicherheiten aus den Radiosonden-Temperaturmessungen sind gegeben durch die räumlich inhomogen verteilten Messungen (die meisten Messungen wurden in mittleren Breiten der Nordhemisphäre durchgeführt); wichtiger noch sind aber sind die im Laufe der Zeit vorgenommenen Veränderungen (Verbesserungen) an der Instrumentierung, was die Zeitreihen beeinflussen kann und die "Trends" verändert.

Temperatortrend

- Temperatortrends, die auf der Grundlage von verschiedenen Radiosondendatensätzen berechnet wurden, zeigen eine starke Abkühlung in der unteren Stratosphäre (Lanzante et al., 2003b; Thompson und Solomon, 2005; Free et al., 2005).

Lanzante, J.R., S.A. Klein, und D.J. Seidel, Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Part II: Trends, sensitivities, and MSU comparisons, *J. Clim.*, 16 (2), 241-262, 2003b.

Thompson, D.W.J., und S. Solomon, Recent stratospheric climate trends as evidenced in radiosonde data: Global structure and tropospheric linkages, *J. Clim.*, 18 (22), 4785-4795, 2005.

Free, M., D.J. Seidel, J.K. Angell, J. Lanzante, I. Dure, und T.C. Peterson, Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (RATPAC): A new data set of large-area anomaly time series, *J. Geophys. Res.*, 110, D22101, doi: 10.1029/2005JD006169, 2005.

Temperatortrend

- Diese Trends sind allerdings deutlich größer als die aus Satellitendaten abgeleiteten Trends (Seidel et al., 2004) oder Abschätzungen von derzeit verfügbaren Modellsimulationen (Santer et al., 2005; siehe spätere Abbildung).

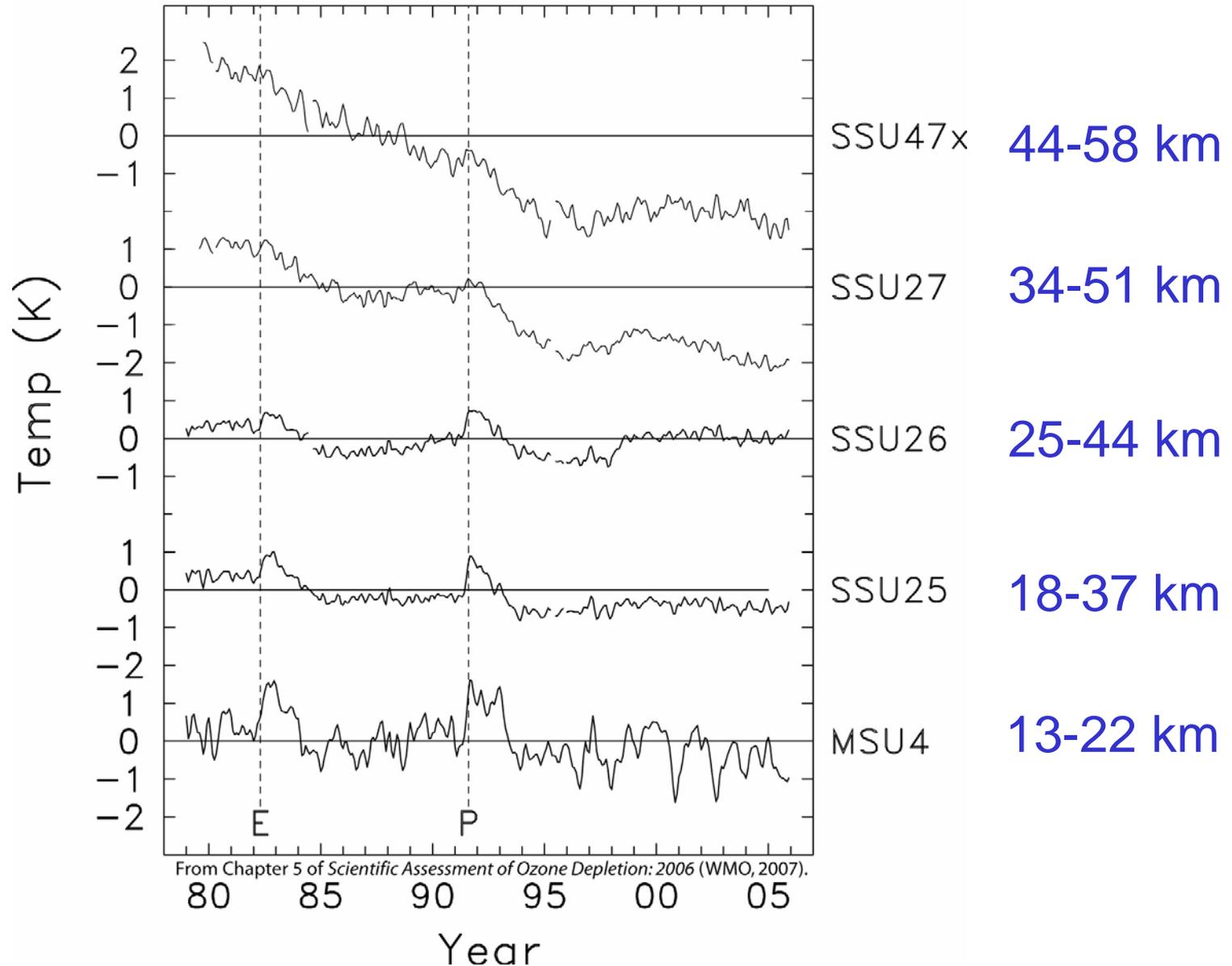
Seidel, D.J., J.K. Angell, J. Christy, M. Free, S.A. Klein, J.R. Lanzante, C. Mears, D. Parker, M. Schabel, R. Spencer, A. Sterin, P. Thorne, und F. Wentz, Uncertainty in signals of large-scale climate variations in radiosonde and satellite upper-air temperature datasets, *J. Clim.*, 17 (11), 2225-2240, 2004.

Santer, B.D., et al., Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere, *Science*, 309 (5740), 1551-1556, doi: 10.1126/science.1114867, 2005.

Temperaturtrend

- Es gibt deutliche Hinweise für eine starke und signifikante Abkühlung für den Großteil der Stratosphäre seit 1980.
- Die nachfolgende Abbildung zeigt die Anomalien der zwischen 60°S und 60°N gemittelten Stratosphären-temperaturen (von der unteren bis in die obere Stratosphäre) abgeleitet aus Satellitendaten zwischen 1979 und 2004.

Temperaturanomalien 60°S - 60°N

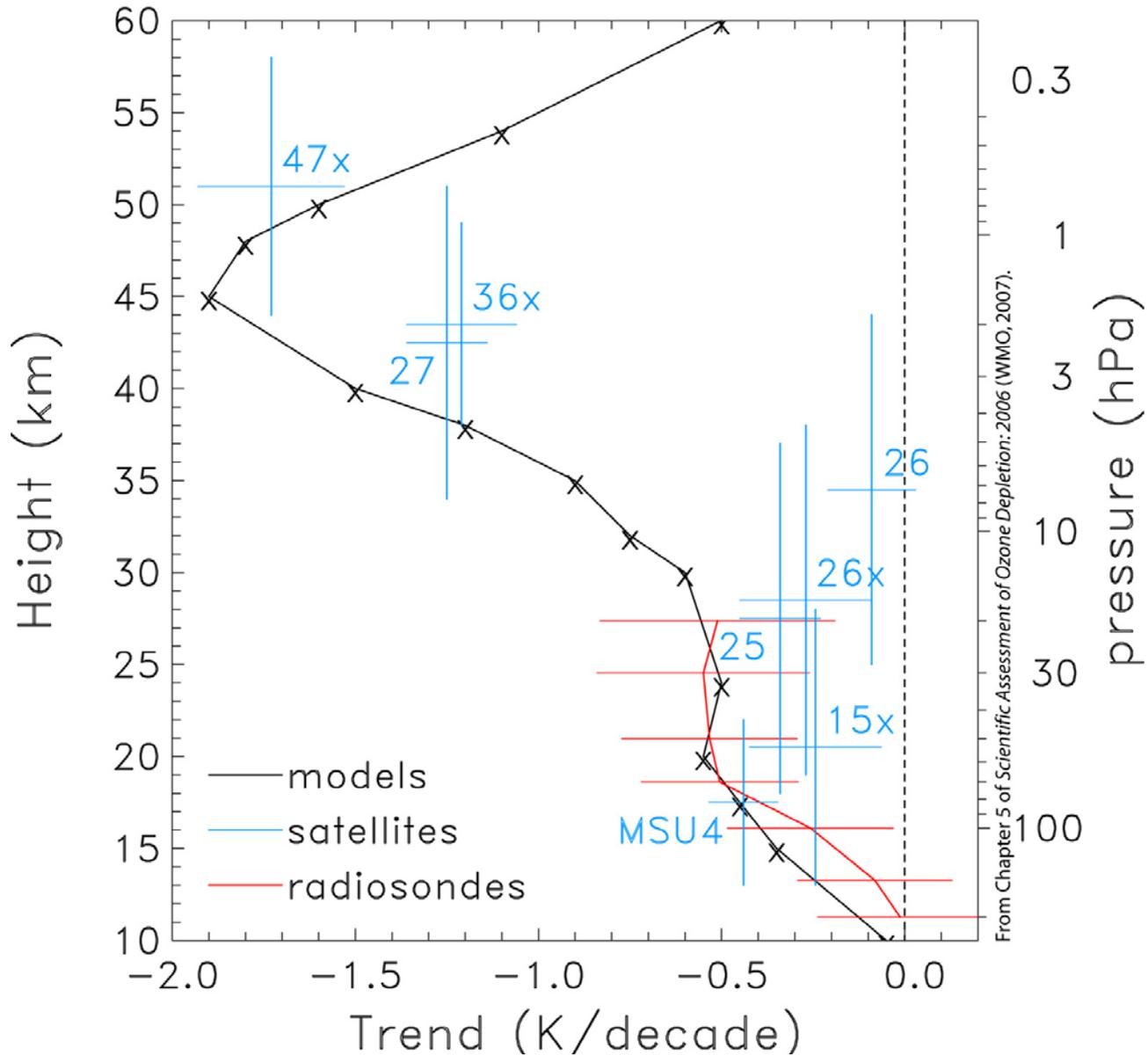


Temperaturtrend

- Das Vertikalprofil dieser nahezu globalen Temperaturtrends zwischen 1979 und 2004 wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.
- Zusätzlich werden hier auch die aus Radiosondmessungen abgeleiteten Trends und eine Synthese von Modellergebnissen abgebildet (aus Shine et al., 2003).

Shine, K.P., M.S. Bourqui, P.M.F. Forster, S.H.E. Hare, U. Langematz, P. Braesicke, V. Grewe, M. Ponater, C. Schnadt, C.A. Smith, J.D. Haigh, J. Austin, N. Butchart, D.T. Shindell, W.J. Randel, T. Nagashima, R.W. Portmann, S. Solomon, D.J. Seidel, J. Lanzante, S. Klein, V. Ramaswamy, und M.D. Schwarzkopf, A comparison of model-simulated trends in stratospheric temperatures, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 129 (590), 1565-1588, 2003.

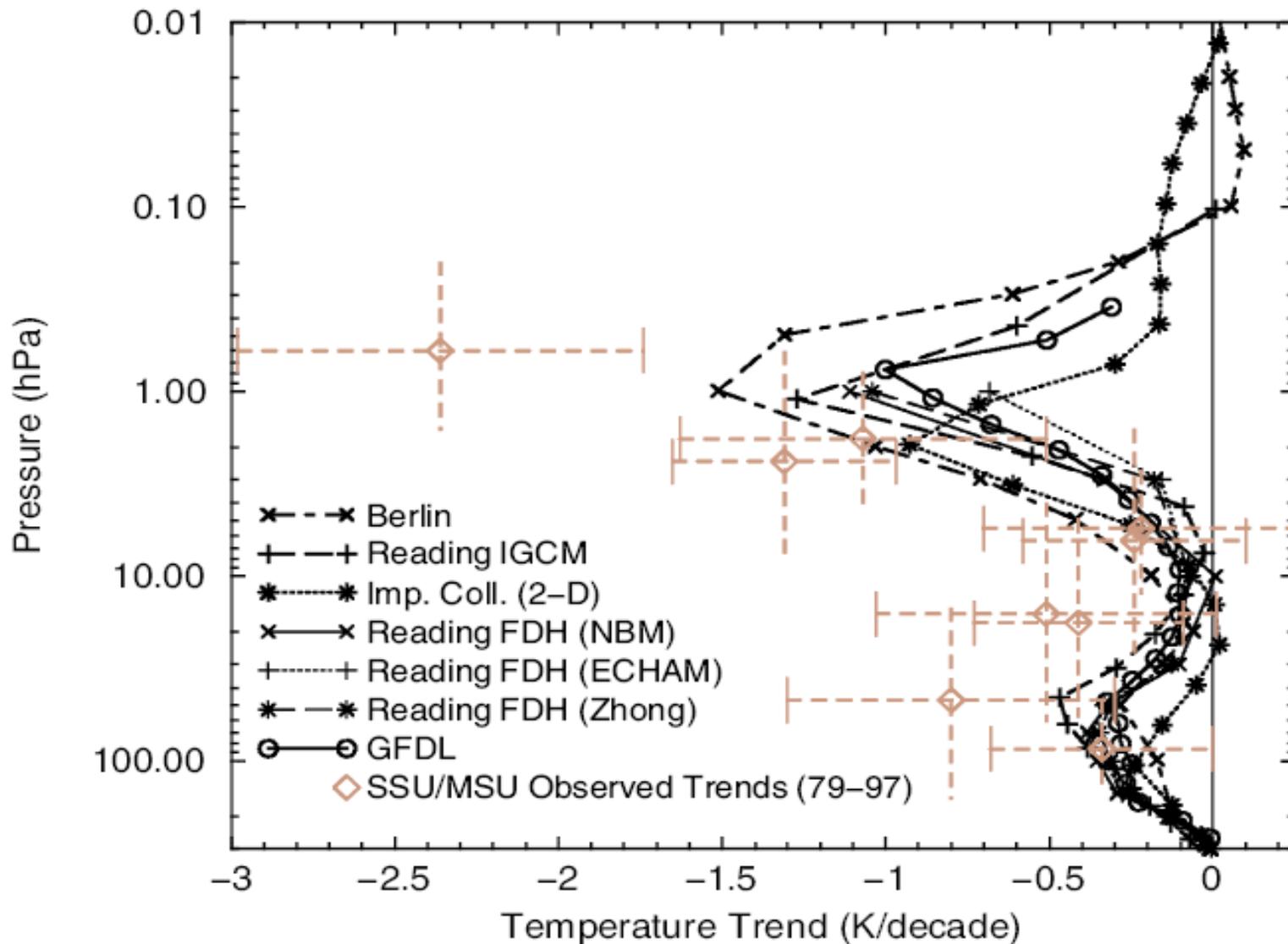
Temperatortrend 1979-2005: 60°S - 60°N



Temperatortrend

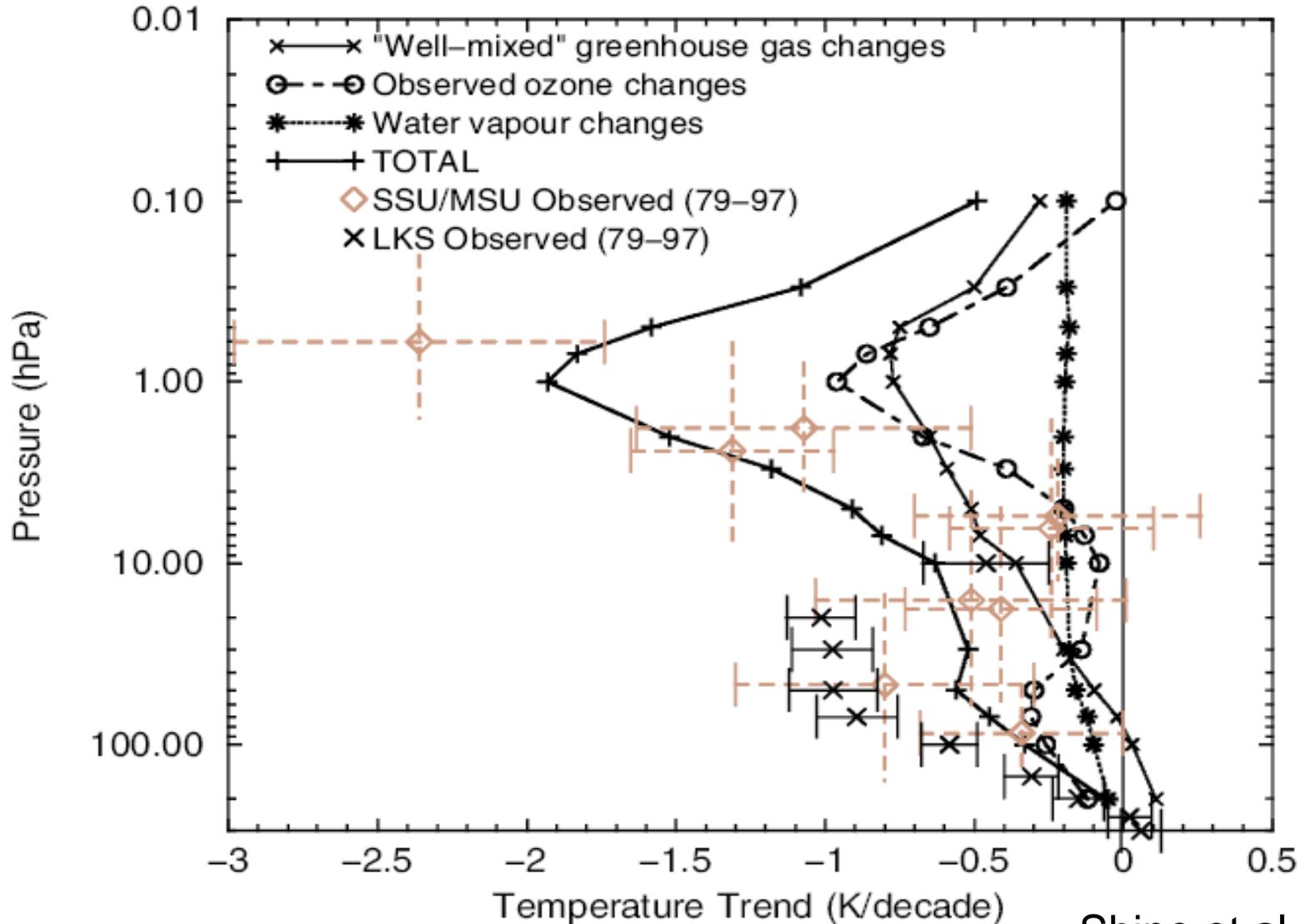
- Sowohl die Satelliten- als auch die Radiosondendaten zeigen eine generelle Abkühlung der Stratosphäre, mit Trendwerten von etwa 0.5 K/Dekade in der unteren Stratosphäre (< 20 km). Modellwerte sind entsprechend.
- In der oberen Stratosphäre (> 40 km) steigen die aus Satelliten- und Modelldaten abgeleiteten Werte auf 1 bis 2 K/Dekade an.
- Die Radiosondendaten zwischen 1979 und 2004 zeigen, dass es eine signifikante Abkühlung auch in stratosphärischen Höhen bis 30 hPa (etwa 26 km) für die meisten geographischen Regionen, einschließlich der Tropen, gegeben hat.

Temperaturtrend 1979-1997: 90°S - 90°N

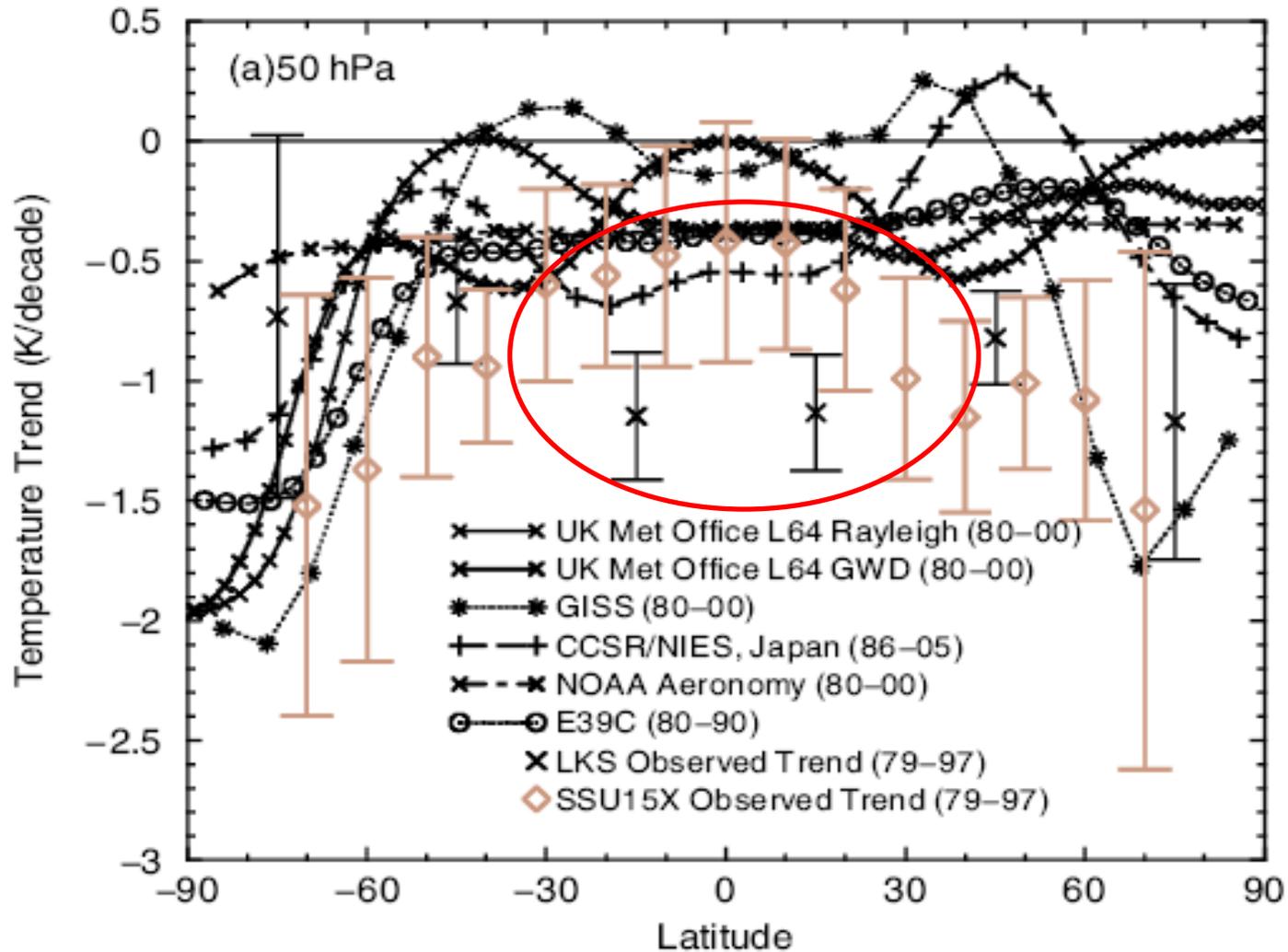


Temperaturtrend 1980-2000: 90°S - 90°N

Beobachtungen und "mittleres" Modellergebnis



Temperaturtrend 1980-2000: Beobachtungen und Ergebnisse von CCMs



Temperaturtrend

- Sowohl die aus MSU4 (Randel und Wu, 2006) als auch die aus Radiosondenaufstiegen abgeleiteten Temperaturtrends (Thompson und Solomon, 2005, Free et al., 2005, Randel und Wu, 2006) deuten auf eine Abkühlung der tropischen und extra-tropischen unteren Stratosphäre hin.

Randel, W.J., und F. Wu, Biases in stratospheric and tropospheric temperature trends derived from historical radiosonde data, *J. Clim.*, 19, 2094-2104, 2006.

- Die aus den SSU-Daten abgeleiteten Temperaturtrends zeigen dagegen eine signifikante Abkühlung in der unteren Stratosphäre, die lediglich auf die extra-tropischen Breiten begrenzt ist.
- Die unterschiedlichen Ergebnisse für die untere Stratosphäre sind derzeit nicht erklärbar.

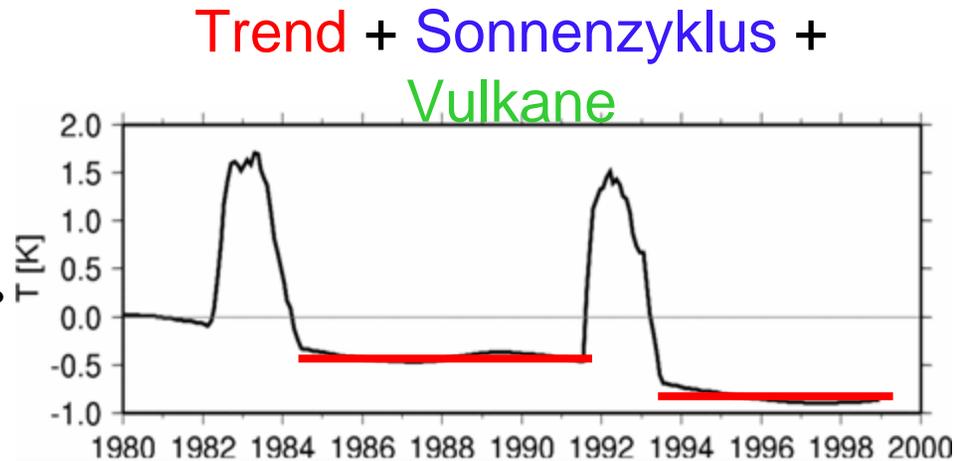
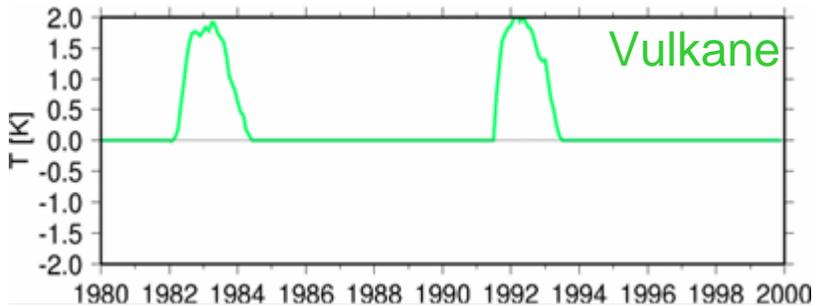
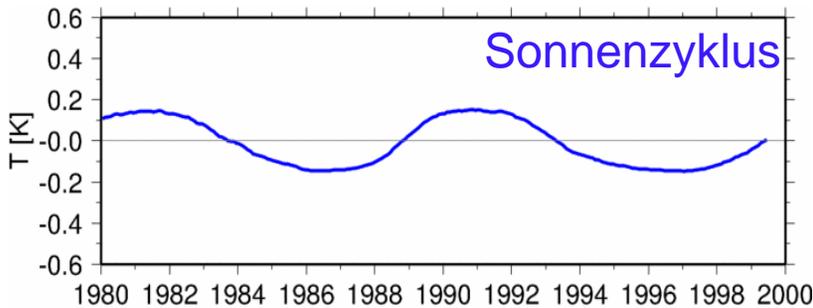
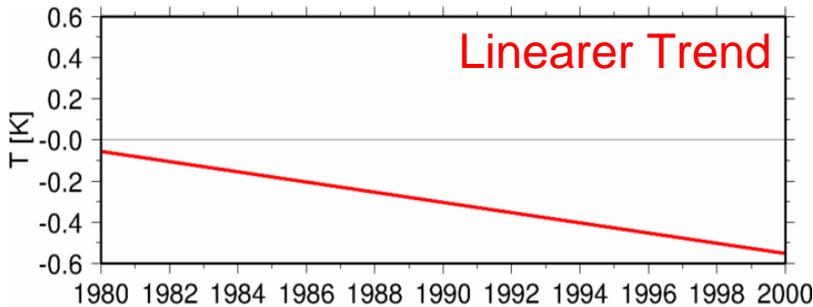
Temperaturtrend

- Die oben gezeigten Zeitreihen der Temperaturanomalien zeigen, dass es sich bei der beobachteten Abkühlung keineswegs um einen einfachen linearen Trend handelt.
- So werden zum Beispiel nach den großen Vulkanausbrüchen vorübergehend (1 bis 2 Jahre) Erwärmungen der unteren und mittleren Stratosphäre beobachtet.
- In der unteren Stratosphäre manifestiert sich die langzeitliche Abkühlung stufenweise (Pawson et al., 1998; Seidel und Lanzante, 2004).

Pawson, S., K. Labitzke, und S. Leder, Stepwise changes in stratospheric temperature, *Geophys. Res. Lett.*, 25 (12), 2157-2160, 1998.

Seidel, D.J., und J.R. Lanzante, An assessment of three alternatives to linear trends for characterizing global atmospheric temperature changes, *J. Geophys. Res.*, 109, D14108, doi: 10.1029/2003JD004414, 2004.

Variabilität und Trends in der US: Temperatur



⇒ "stufenweise"
Abkühlung der
unteren
Stratosphäre

Siehe auch Ramaswamy et al. (2006).

Temperatortrend

- Die generelle starke Abkühlung der unteren Stratosphäre ist vor allem eine Reaktion auf die gleichzeitig voranschreitende Ozonzerstörung in diesen Jahren (1980 bis 2000) (Shine et al., 2003; Langematz et al., 2003), möglicherweise verbunden mit einem allerdings sehr viel kleineren Beitrag durch die Änderungen in der stratosphärischen Wasserdampfkonzentration.

Langematz, U., M. Kunze, K. Krüger, K. Labitzke, und G.L. Roff, Thermal and dynamical changes of the stratosphere since 1979 and their link to ozone and CO₂ changes, *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 4027, doi: 10.1029/2002JD002069, 2003.

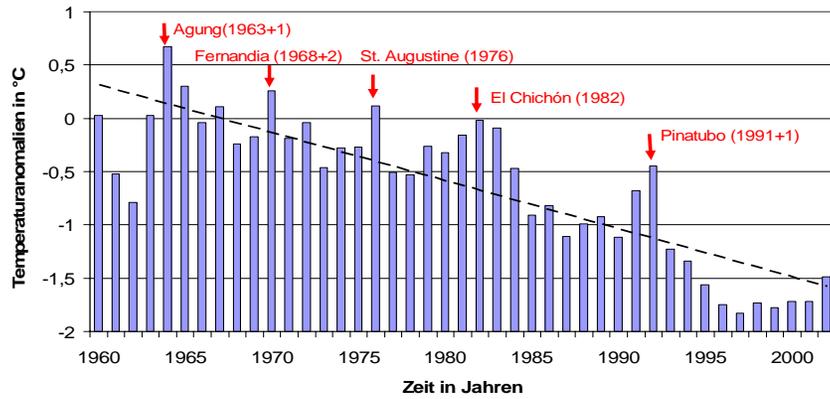
Temperaturtrend

- Nach 1995 wird eine Abflachung der Temperaturabnahme beobachtet (siehe auch vorherige Erklärung), allerdings ist zu beachten, dass nach 1995 auch in der oberen Stratosphäre und der unteren Mesosphäre ein deutlich schwächerer Trend beobachtet wird (siehe Abbildung oben), was durch die aus HALOE-Messungen abgeleiteten Trends für den Zeitraum zwischen 1992 und 2004 bestätigt wird (Remsberg und Deaver, 2005).

Remsberg, E.E., und L.E. Deaver, Interannual, solar cycle, and trend terms in middle atmospheric temperature time series from HALOE, *J. Geophys. Res.*, 110, D06106, doi: 10.1029/2004JD004905, 2005.

Temperaturtrend

- Obwohl man diese Abflachung aufgrund der Änderungen in den Ozontrends erwarten könnte, ist die Deutlichkeit dieses Verhaltens überraschend in anbetracht der Tatsache, dass die Treibhausgaskonzentrationen während dieser Dekade (1995 bis 2004) weiter zugenommen haben.



Ende Kapitel 6