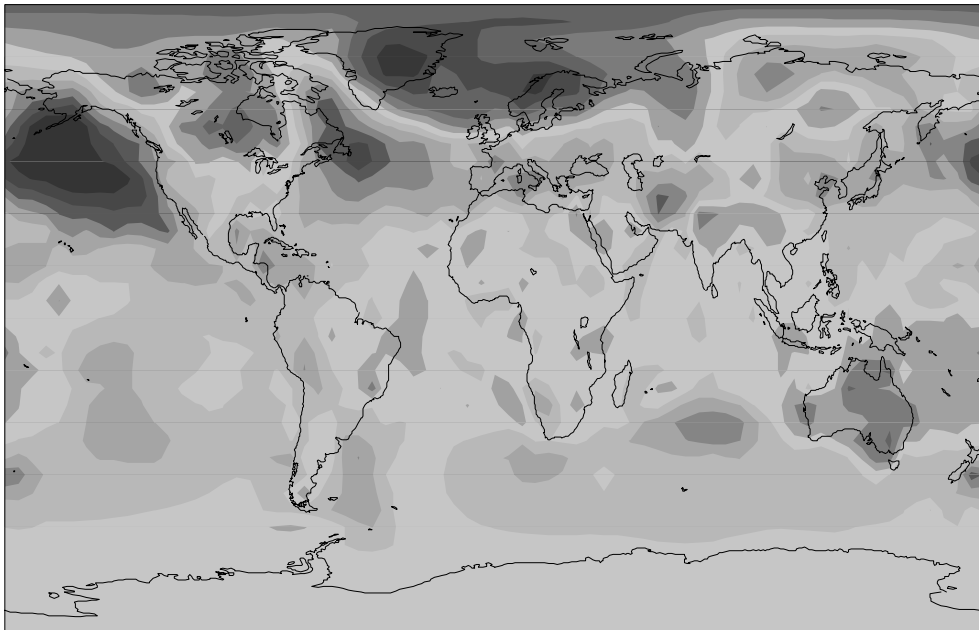


Grossräumige Klimaschwankungen

Vorlesungsskript

Prof. Dr. Stefan Brönnimann
Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich
Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich
Büro J70
Tel. 01 635 5216
E-mail: stefan.broennimann@env.ethz.ch



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Methoden	3
2.1. <i>Heutiges Klima</i>	3
2.1.1. Beobachtungsnetz	3
2.1.2. Datenassimilation	4
2.2. <i>Vergangene Klimata</i>	5
2.2.1. Frühinstrumentelle Messungen	6
2.2.2. Historische Daten und natürliche Archive	7
2.2.3. Klimarekonstruktion	10
2.3. <i>Auswertung</i>	11
2.4. <i>Klimamodellierung</i>	11
3. Prozesse	13
3.1. <i>Energetik des Klimasystems</i>	13
3.2. <i>Schwankungen der Zirkulation der nördlichen Aussertropen</i>	14
3.2.1. Planetare Wellen und Aktionszentren	14
3.2.2. Teleconnections und Variabilitätsmodi	16
3.2.3. Nordatlantische / Arktische Oszillation	16
3.2.4. Pacific North-American Pattern	21
3.2.5. Antarctic Oscillation oder Southern Hemispheric Annular Mode	22
3.3. <i>Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre</i>	23
3.3.1. Bedeutung der Stratosphäre	23
3.3.2. Vertikalstruktur planetarer Wellen	23
3.3.3. Die meridionale Residualzirkulation und das „Wavedriving“	24
3.3.4. Die Brewer-Dobson-Zirkulation und das stratosphärische Ozon	25
3.3.5. Major stratospheric warmings	27
3.3.6. Das Konzept der „Downward propagation“	28
3.3.7. Die Quasi-Biennial Oscillation (QBO)	29
3.4. <i>Kopplung von Ozean und Atmosphäre</i>	33
3.4.1. Einleitung	33
3.4.2. Prozesse an der Grenzfläche Ozean-Atmosphäre	34
3.4.3. Prozesse im Ozean	35
3.4.3.1. Windgetriebene Strömungen und Upwelling	35
3.4.3.2. Dichtegetriebene Strömungen	36
3.4.3.3. Mischung und „Resurgence“	37
3.4.4. Generelles zur Ozeanatmosphäreninteraktion (OAI)	38
3.4.5. Ozeanatmosphäreninteraktion in den Tropen	39
3.4.5.1. El Niño	39
3.4.5.2. Tropen-Aussertropen-Kopplung im Zusammenhang mit El Niño	41
3.4.5.3. Indischer Monsun	42
3.4.6. Ozeanatmosphäreninteraktion in den Aussertropen	43
3.4.6.1. Nordatlantik	43
3.4.6.2. Nordpazifik	43

3.5. Einfluss von Vulkanausbrüchen auf Klimaschwankungen	45
3.5.1. Einleitung	45
3.5.2. Vulkanische Partikel und Gase in der Atmosphäre	46
3.5.3. Wirkung auf die Atmosphäre	47
3.5.4. Masse für den vulkanischen Einfluss verschiedener Vulkanausbrüche	50
3.5.5. Troposphärische Aerosole	51
3.6. Einfluss der Sonnenaktivität auf Klimaschwankungen	53
3.6.1. Einleitung	53
3.6.2. Geschichte	53
3.6.3. Schwankungen der Sonne	54
3.6.4. Masse der Sonnenaktivität	55
3.6.5. Einfluss auf das Klima	57
3.6.5.1. Die 27-tägige Rotation der Sonne	57
3.6.5.2. Der 11-jähriger Sonnenzyklus	58
3.6.5.3. Interdekadale Schwankungen	59
3.6.6. Mechanismen	60
3.6.7. Ozon und Klima	61
4. Klimageschichte	62
4.1. Das Klima der letzten 1000 Jahre	62
4.1.1. Methoden	62
4.1.2. Der Temperaturverlauf der Nordhemisphäre	63
4.1.3. Dürren in Nordamerika	66
4.1.4. Vulkanismus: Der Ausbruch des Huaynaputina 1601	68
4.1.5. Klimaschwankungen in Mitteleuropa: Die Abkühlung im späten 16. Jahrhundert	69
4.2. Das Klima der letzten 350 Jahre	71
4.2.1. Methoden	71
4.2.2. Der Temperaturverlauf der Nord- und Südhemisphäre	72
4.2.3. Regionale Klimaschwankungen: NAO und ENSO	74
4.2.4. Solares Forcing: Maunder Minimum und Dalton Minimum	75
4.2.5. Vulkanismus: Laki 1783 und Tambora 1815	76
4.2.6. Letzte Phase der Kleinen Eiszeit: Der Gletscherhochstand um 1850	78
4.3. Das Klima der letzten 150 Jahre	81
4.3.1. Methoden	81
4.3.2. Der Temperaturverlauf der Nord- und Südhemisphäre	81
4.3.3. Erwärmung der Arktis	83
4.3.4. „Dust Bowl“ Dürren in den USA	84
4.3.5. Dürren im Sahelraum 1970er und 1980er	86
4.3.6. El Niño und globale Klimaanomalien 1940-1942	87
4.4. Das Klima der letzten 25 Jahre	90
4.4.1. Methoden	90
4.4.2. Der Temperaturverlauf am Boden, in der freien Troposphäre und in der Stratosphäre	91
4.4.3. El Niño und La Niña	92
4.4.4. Die Nordatlantische Oszillation	94
4.4.5. Die Antarktische Oszillation	95
4.4.6. Die anhaltende Dürre 1998-2004	96

5. Das zukünftige Klima	99
5.1. <i>Der gegenwärtige Zustand: Nordatlantische Oszillation und El Niño</i>	99
5.2. <i>Klimaschwankungen im modellierten Klima der Zukunft</i>	100
5.2.1. Nordatlantische Oszillation	100
5.2.2. El Niño	101
Bibliographie	103

Bibliographie

Bücher

- Backhaus, N. & Steinemann, M. 2002. "Leitfaden für wissenschaftliches Arbeiten" (Schriftenreihe Anthropogeographie, Vol. 18). Zürich: Geographisches Institut der Universität Zürich, 100 S.
- Brönnimann, S. (2002): Ozon in der Atmosphäre. Verlag Paul Haupt AG, Bern. 184 S.
- Diaz, H. & Markgraf, V. (eds.) *El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts* (Cambridge University Press, 2000).
- Hartmann, D. L. (1994) *Global Physical Climatology*. Academic Press, 411 pp. ISBN 0-12-328530-5
- Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. (eds.) *An Overview of the North Atlantic Oscillation*, in Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. (eds.) *The North Atlantic Oscillation. Climatic Significance and Environmental Impact* (AGU, Washington DC, 2003).
- Philander, S. G. H. (1990): *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego.
- Wanner, H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz, (2000): *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich. 296 S.

Artikel – letzte 1000 Jahre

- Bradley, R.S., Briffa, K.R., Crowley, T.J., Hughes, M.K., Jones, P.D., Mann, M.E., Scope of Medieval Warming, *Science*, 292, 2011-2012, 2001.
- Jones, P.D., Mann, M.E., Climate Over Past Millennia, *Reviews of Geophysics*, 42, RG2002, doi: 10.1029/2003RG000143, 2004.
- Jones, P.D., Osborn, T.J. and Briffa, K.R., 2001 "The evolution of climate over the last Millennium." *Science* 292, 662-667
- Mann, M.E., Jones, P.D., Global surface temperature over the past two millennia, *Geophysical Research Letters*, 30 (15), 1820, doi: 10.1029/2003GL017814, 2003.

Artikel letzte 350 Jahre

- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., and H. Wanner, 2004: European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499-1503.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries, *Nature*, 392, 779-787, 1998.
- Shindell, D.T., Schmidt, G.A., Mann, M.E., Rind, D., Waple, A., Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum, *Science*, 7, 2149-2152, 2001.

Artikel – letzte 150 Jahre

- Brönnimann, S., Luterbacher, J., Staehelin, J., Svendby, T.M., Hansen, G., and Svenoe, T., 2004: Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940-42 related to El Niño, *Nature*, in press.
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S. and Rigor, I.G., 1999 "Surface air temperature and its changes over the past 150 years." *Reviews of Geophysics* 37(2), 173-199
- Schubert, S. D., M. J. Suarez, P. J. Pegion, R. D. Koster, and J. T. Bacmeister (2004), On the causes of the 1930s Dust Bowl, *Science*, 303, 1855-1859.

Ozone and climate change

- Gillett, N, and D. W. J. Thompson, 2003: Simulation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 302, 273-275.
- Thompson, D. W. J., and S. Solomon, 2002: Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296, 895-899.

Solar variability, stratosphere

- Haigh J D 1996 The impact of solar variability on climate. *Science*, **272**, 981-984.
- Haigh, J D 2001 Climate variability and the role of the Sun. *Science*, **294**, 2109-2111.
- Labitzke, K. G. & van Loon, H. *The stratosphere. Phenomena, History, and Relevance* (Springer, Berlin, 1999).
- Robock, Alan, 1996: Stratospheric control of climate, *Science*, **272**, 972-973.
- Shindell, DT, D. Rind, N. Balachandran, J. Lean, and P. Lonergan 1999. Solar cycle variability, ozone and climate. Science 284, 305-308.**

Methods

Mann, M.E., The Value of Multiple Proxies, *Science*, 297, 1481-1482, 2002.

Mann, M.E., Hughes, M.K., Tree-Ring Chronologies and Climate Variability, *Science*, 296, 848, 2002.

Von Storch

Perspective on von Storch

Volcanoes and climate

Adams J. B., M. E. Mann, C. M. Ammann, 2003: Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing. *Nature*, **426**, 274-278.

Robock, Alan, 2000: Volcanic eruptions and climate. *Rev. Geophys.*, **38**, 191-219.

Robock, Alan, 2002: Pinatubo eruption: The climatic aftermath, *Science*, **295**, 1242-1244.

NAO

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

Wallace, J. M., and D. W. J. Thompson, 2001: Annular Modes and Climate Prediction. *Physics Today*, **55**, 28-33.

Wanner, H., S. Brönnimann, C. Casty, Gyalistras, D., J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, 2001: North Atlantic Oscillation - Concepts and Studies. *Surveys in Geophysics*, **22** (4): 321-381.

Read, W. G., L. Froidevaux, and J. W. Waters, Microwave Limb Sounder measurement of stratospheric SO₂ from the Mt. Pinatubo volcano, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1299-1302, 1993.

Hoerling, M. und A. Kumar (2003) The perfect ocean for drought. *Science*, **299**, 691-694.

Wiles, G., D'Arrigo, R., and Jacoby, G.C., 1999, Spring/Summer Gulf of Alaska Temperature Reconstructions. International Tree-Ring Data Bank. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series #1999-045.
NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

Luterbacher, J., E. Xoplaki, D. Dietrich, R. Rickli, J. Jacobeit, C. Beck, D. Gyalistras, C. Schmutz and H. Wanner, 2002: Reconstruction of Sea-Level Pressure Fields over the Eastern North Atlantic and Europe Back to 1500. *Clim. Dyn.*, **18**, 545-561.

Wanner, H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz, (2000): Klimawandel im Schweizer Alpenraum. vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich. 296 S.

Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. (eds.) An Overview of the North Atlantic Oscillation, in Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. (eds.) *The North Atlantic Oscillation. Climatic Significance and Environmental Impact* (AGU, Washington DC, 2003).

Wanner, H., S. Brönnimann, C. Casty, Gyalistras, D., J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, 2001: North Atlantic Oscillation - Concepts and Studies. *Surveys in Geophysics*, **22** (4): 321-381.

Kerr, R. A., 1999: A New Force in High-Latitude Climate. *Science*, **284**, 241-242.

Brönnimann, S. 2002. Ozon in der Atmosphäre. Verlag Paul Haupt AG, Bern.

Newman, P. A., E. R. Nash, J. E. Rosenfeld, 2001. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? *J. Geophys. Res.*, **106**, 19,999-20,010

Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood und L. Pfister, 1995. Stratosphere-troposphere exchange, *Revs. Geophys.*, **33**, 403-439.

Limpasuvan, V., Thompson, D. W. J. & Hartmann, D. L. The life cycle of the Northern Hemisphere stratospheric sudden warmings. *J. Clim.* **17**, 2584-2597 (2004)

- Baldwin M, Dunkerton TJ (2001) Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science* **294**, 581–584.
- Coughlin, K.; Tung, K.-K.: QBO Signal found at the Extratropical Surface through Northern Annular Modes; *Geophys. Research Letts.*, 28, 4563-4566, 2001.
- 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. Kinnersley, C. Marquardt, K. Sato, and M. Takahashi, 2001: The Quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, 39(2), 179-229.
- Alexander, M. A. et al. The atmospheric bridge: Influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J. Clim.* 15, 2205–2231 (2002)
- Wang, C., 2002: Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 15:399-419.
- Robock, Alan, 2000: Volcanic eruptions and climate. *Rev. Geophys.*, **38**, 191-219.
- Lean, J., The sun's variable radiation and its relevance for Earth, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 35, 33-67, 1997.
- Labitzke, K., 2003. The global signal of the 11-Year Sunspot Cycle in the atmosphere: When do we need the QBO? *Met. Z. N. F.* 12, 209-216.
- Svensmark, H. und E. Friis-Christensen, 1997: Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, Vol. 59, 1225-1232.
- Carslaw, KS, Harrison, RG, Kirkby, J. Cosmic rays, clouds and climate. *Science* 298, 1732–1737, 2002.
- Thejll, P. und K. Lassen, 2000. Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 1207-1213.
- Langematz U, Kunze M, Krüger K, Labitzke K, Roff GL (2003) Thermal and dynamical changes of the stratosphere since 1979 and their link to ozone and CO₂ changes. *J. Geophys. Res.* **108**, 4027, doi:10.1029/2002JD002069.
- Glaser, R. 2001. *Klimageschichte Mitteleuropas*, Primus-Verlag, Darmstadt, 227 pp
- Mann, M.E., Jones, P.D., Global surface temperature over the past two millennia, *Geophysical Research Letters*, 30 (15), 1820, doi: 10.1029/2003GL017814, 2003.
- Crowley, T. 2000. **Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years.** *Science* 289, 270-277.
- Cook E. R., Woodhouse C., Eakin C. M., Meko D. M. and Stahle D. W., 2004, Long-term aridity changes in the western United States. *Science* 306, 1015-1018.
- Acuna-Soto, R., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, and M. D. Therrell, 2002: Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infect. Dis.* 4, 360–362
- Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., and Osborn T.J. 1998. "Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years." *Nature* 450-454
- Mann, M. E., Bradley, R., Hughes, M. 1998. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries, *Nature*, 392, 779-787.
- Mann et al. 2000 ENSO
- Luterbacher et al., ASL

Reid 1997

Widmann und Tett 2003

Highwood und Stevenson 1783 ACP2

Shindell et al., 2003

Delworth TL, Knutson TR (2000) Simulation of early 20th century global warming. *Science* **287**, 2246–2250.

Polyakov IV *et al.* (2003) Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2000. *J. Clim.* **16**, 2067–2077.

Weather

Nature

Seidel et al. 2003

Gillett et al.

Timmermann et al.