

Ulrich Cubasch

## Die Rolle der Sonne im Klimasystem

### Das Wechselspiel Sonne – Klima – Mensch

Das Klima ist laut Lehrbuch die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraums – gekennzeichnet durch eine charakteristische Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte.

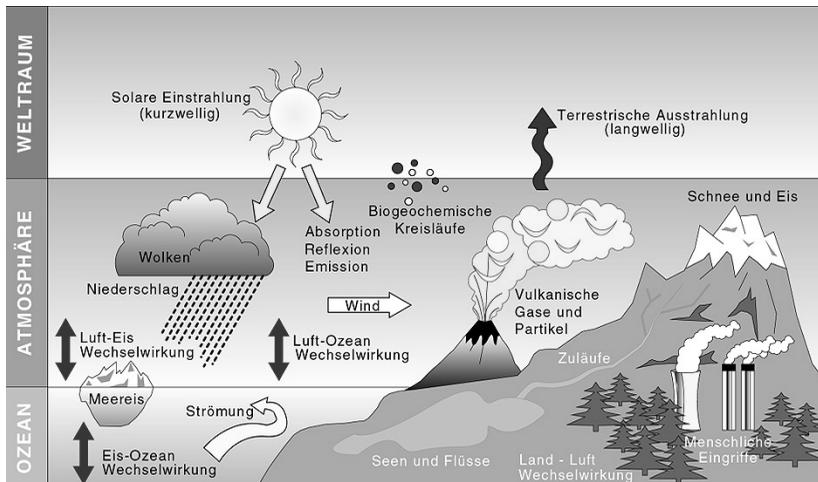


Bild 1: Das Klimasystem und seine Komponenten

Das Klima entsteht durch die Wechselwirkung der Komponenten des Klimasystems (Bild 1). Eine Komponente ist die Atmosphäre, die mit der Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Pflanzen und Tiere), der Pedosphäre (Boden) und der Lithosphäre (Gestein) in Wechselwirkung steht. Die unterschiedlichen Zeitskalen, in de-

nen die Klimasubsysteme schwanken, bestimmen die Dynamik des Klimasystems. Die Schwankungen des Untersystems Atmosphäre beispielsweise sind gemeinhin als „Wetter“ bekannt: Wolken und Luftdruckgebiete verändern sich innerhalb weniger Stunden und Tage. Die Tiefenströmungssysteme der Ozeane oder die Zustände großer Eismassen dagegen wandeln sich in Zeitskalen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden. Die Schwankungen innerhalb der Sphären sowie die gegenseitige Beeinflussung der Klimasubsysteme bezeichnet man als „Klimarauschen“.

Im Klimasystem können kleine interne Störungen und externe Anregungen durch nichtlineare Wechselwirkungen potenziell große Wirkungen hervorrufen. Zu den externen Anregungen gehören Veränderungen in der Sonneneinstrahlung, bedingt dadurch, dass sich die Bahn der Erde um die Sonne sowie die Neigung der Erdachse mit der Zeit ändern. Nach der Theorie von Milankovic (1941) ist dieser Effekt für das Wechselspiel von Warm- und Eiszeiten auf der Erde verantwortlich. Auch die Strahlungsenergie, die die Sonne liefert, ist nicht zeitlich konstant, sondern unterliegt Schwankungen. Am bekanntesten sind hier wohl der ca. 11-jährige Schwabe-Zyklus und der ca. 80-jährige Gleißberg-Zyklus. Vulkanismus zählt man ebenfalls zu den externen Antrieben.

In der aktuellen Klimadebatte werden die anthropogenen Faktoren, also der zusätzliche Treibhauseffekt und die Schadstoffbelastung der Atmosphäre, separat betrachtet und den externen Antrieben gegenüber gestellt. Es treten dabei drei grundsätzliche Fragen auf:

1. Wie groß war die Klimavariabilität, bevor der Mensch sie beeinflusst hat?
2. Welcher Anteil der derzeitig beobachteten Klimaschwankungen ist natürlichen, welcher anthropogenen Ursprungs?
3. Inwieweit beeinflusst die dekadische Sonnenvariabilität das heutige Wetter und Klima, und über welche Mechanismen?

Einen Teil dieser Fragen kann man über Proxy-Daten beantworten. Einen Überblick über die dreidimensionalen Zusammenhänge gewinnt man jedoch nur mit Hilfe von komplexen Klimamodellen.

## **Klimamodelle**

Klimamodelle beschreiben das Klimasystem mit Hilfe physikalisch-mathematischer Gleichungen, die dann mit Hilfe eines Computers gelöst werden. Hierzu werden die Erdatmosphäre sowie der Ozean in Gitterzellen zerlegt. Diese Gitterzellen haben heutzutage eine Kantenlänge von typischerweise 250 bis 500 km in der Horizontalen und 9–40 Schichten in der Vertikalen.

Vorgänge, die innerhalb einer Gitterzelle ablaufen, wie z. B. Wolkenbildung, werden parametrisiert, d. h. aus den an den Rändern der Gitterzelle bekannten Werten hergeleitet.

Die heutigen Klimamodelle sind häufig Weiterentwicklungen von Wettervorhersagemodellen, was den Vorteil hat, dass sie schon routinemäßig erprobt worden sind. Die Klimamodelle werden „geeicht“, indem man mit ihnen das heutige Klima nachrechnet und mit den Beobachtungen vergleicht. Um den Effekt der 11-jährigen Sonnenschwankung zu analysieren, muss man die Stratosphäre berücksichtigen und die chemisch-physikalischen Wechselwirkungen in der hohen Atmosphäre mit berechnen.

Mittlerweile sind die Rechenanlagen so schnell geworden, dass man die Modelle auch für die Simulation des Klimageschehens für Zeiträume von mehreren Tausend Jahren einsetzen kann.

## Klimasimulationen

Um die erste Frage zu beantworten „Wie groß war die Klimavariabilität, bevor der Mensch sie beeinflusst hat?“ werden zwei Beispiele vorgestellt, die den Einfluss der Orbitalparameter und den der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung vor der Zeit der Industrialisierung wiedergeben:

### Der Einfluss der Orbitalparameter

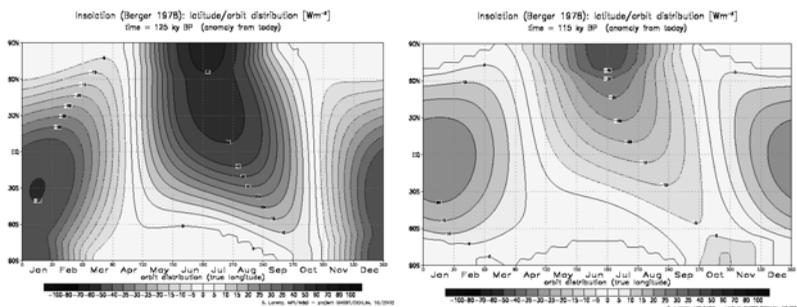


Bild 2. Die Anomalie der Sonneneinstrahlung von 125 000 Jahren vor heute (Eem, links) und vor 115 000 Jahren vor heute (Übergang in letzte Eiszeit, rechts). (nach Berger, 1978)

Vor ca. 125 000 Jahren vor heute wurde das Maximum der letzten Warmzeit (das sogenannte Eem) erreicht. Zu dieser Zeit lag die Sonneneinstrahlung nach den Berechnungen von Berger (1978) auf der Nordhemisphäre der Erde

im Sommer ca. 10–20 % höher als heute, in den Tropen dagegen war die Einstrahlung vermindert (Bild 2 links). Die veränderte Verteilung der Sonneneinstrahlung führte dazu, dass es in unseren Breiten deutlich wärmer war als zu Beginn der Industrialisierung (Bild 3). Die Arktis war weitgehend abgeschmolzen. Das Ergebnis der Klimasimulationen deckt sich mit Klimarekonstruktionen aus Pollen (Velischko et al. 2005; Kaspar et al. 2005). Vor 115 000 Jahren gab es dann umgekehrte Einstrahlungsbedingungen: Die hohen Breiten der Nordhalbkugel empfangen im Sommer ca. 10% weniger Einstrahlung als heute, die Tropen dafür deutlich mehr. Die hohen und mittleren Breiten der Nordhemisphäre kühlten sich ab, die Sahara sowie Indien dagegen erwärmten sich (Bild 3). Schnee, der im Winter auf den Landmassen abgelagert wurde, wurde im Sommer nicht mehr abgeschmolzen, so dass es zur Ausbildung eines Eispanzers über dem Nordamerikanischen Kontinent und Skandinavien kam (Kaspar und Cubasch, 2007).

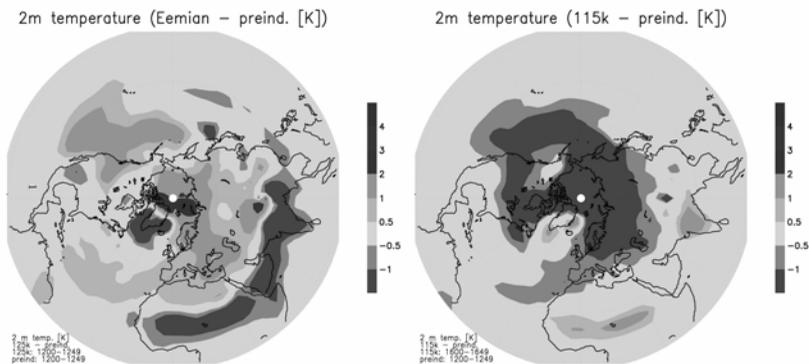


Bild 3: Die Veränderung der bodennahen Lufttemperatur im Vergleich zu vorindustriellen Bedingungen. 125 000 Jahre vor heute (links); 115 000 Jahre vor heute (rechts). (nach Kaspar et al. 2007)

### **Der Einfluss der langperiodischen Sonnenintensitätsschwankungen**

Man geht davon aus, dass während der letzten 1200 Jahre die Orbitalparameter sich nicht nennenswert verändert haben und dass vor Beginn der Industrialisierung der Einfluss des Menschen auf das globale Klima gering war. Für diesen Zeitraum gibt es keine direkten Temperaturmessungen, doch eine Vielfalt von historischen Dokumenten (Ernteerträge, Deichreparaturkosten, Segelzeiten von Schiffen) sowie Proxy-Daten (also etwa Baumringe oder Sedimentbohrkerne), aus denen man das historische Klima rekonstruieren kann. In Klimasimulationen der letzten 1200 Jahre (IPCC, 2007) wurden die Son-

nenaktivität, der Vulkanismus (beide aus Proxy-Daten hergeleitet), sowie die Treibhausgase (die bis zu Beginn der Industrialisierung überwiegend natürlichen Ursprungs waren), als Antrieb vorgeschrieben (Bild 4). Die Herleitung der Antriebsdaten aus Proxy-Informationen hat erhebliche Unsicherheiten in der Abschätzung der Sonnenintensität zur Folge (Bild 4b). Die unterschiedlichen Klimamodelle sowie die Unsicherheiten in den Antriebsdaten führen zu beträchtlichen Streuungen des simulierten Klimas. Insgesamt kann man jedoch im simulierten Temperaturverlauf die „Mittelalterliche Warmzeit“ (ca. 900–1350), die „Kleine Eiszeit“ (1400–1850) sowie die anthropogene Klimaerwärmung der Neuzeit erkennen (Bild 4d).

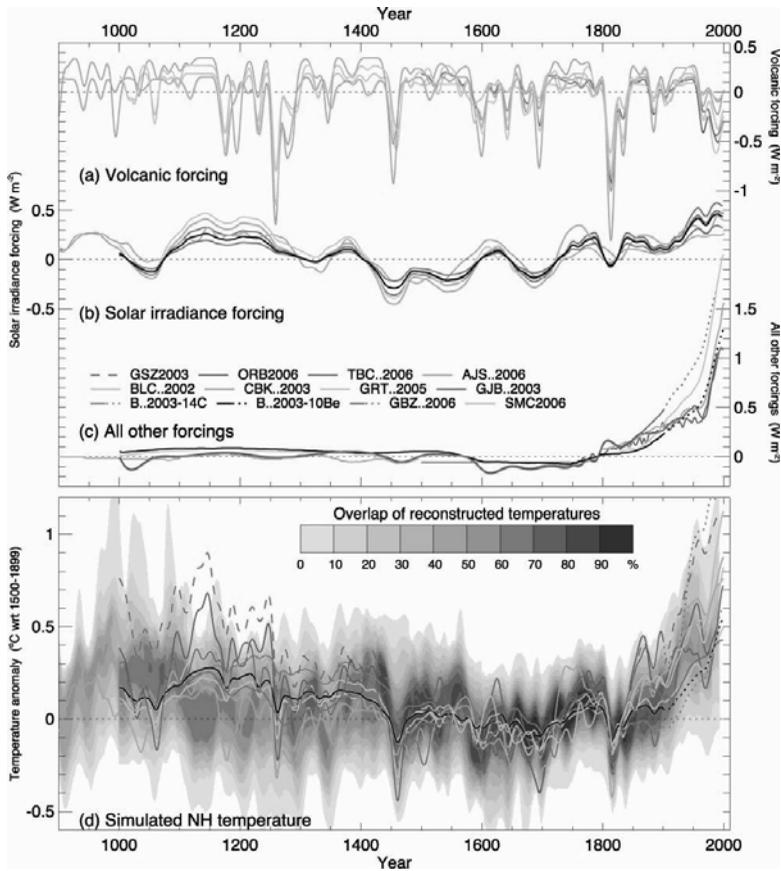


Bild 4: Bild Modell-Simulationen der letzten 1200 Jahre. (nach IPCC, 2007)

Die Modellsimulationen erlauben es auch, die zweite Frage zu beantworten: „Welcher Anteil der Klimavariabilität ist natürlichen, welcher anthropogenen Ursprungs?“

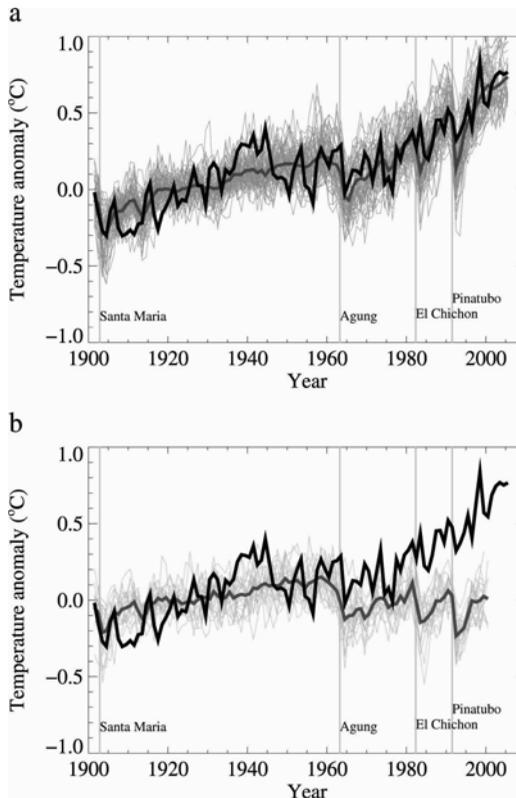


Bild 5: Änderungen der globalen Mitteltemperatur durch natürliche oder anthropogene Ursachen. a) natürliche und anthropogene Faktoren, b) nur die natürlichen Antriebe, d. h. solare Variabilität und Vulkanismus. Das blaue Band gibt die Modellhochrechnungen einschließlich einer Abschätzung ihrer Unsicherheiten wieder, die schwarze Kurve den beobachteten Klimaverlauf. (nach IPCC, 2007)

Hierzu hat man mit einer Vielzahl von Modellen Klimaexperimente durchgeführt (IPCC, 2007), in denen: a) nur die natürlichen und b) die natürlichen und die anthropogenen Klimaantriebe berücksichtigt werden. Wie man aus Bild 5 erkennen kann, muss man den natürlichen und anthropogenen Antrieb benutzen, um mit der Beobachtung eine optimale Übereinstimmung zu erhalten.

### Der Einfluss des 11-jährigen Sonnenzyklusses

Für die langfristige Wetterprognose ist es wichtig zu wissen, „Inwieweit die dekadische Sonnenvariabilität das heutige Wetter und Klima beeinflusst, und über welche Mechanismen“.

Schon seit Beginn der regelmäßigen Beobachtung der Sonnenflecken Anfang des 17. Jahrhunderts haben sich die Forscher Gedanken gemacht, ob der 11-jährige Schwabe-Zyklus das Wetter und somit das Klima beeinflusst. Mit Hilfe von Satellitenbeobachtungen seit den 70er Jahren hat man festgestellt, dass die Sonnenflecken mit einer vermehrten Ausstrahlung von solarer Energie verbunden sind, wobei sich das Spektrum in Richtung UV verschiebt. Die Amplitude der 11-jährigen Schwankung beträgt ca. 1 W/m<sup>2</sup>, d.h. nur etwa 0.1 % der gesamten Sonnenstrahlung. Eine Übersicht über die möglichen Mechanismen bietet Bild 6.

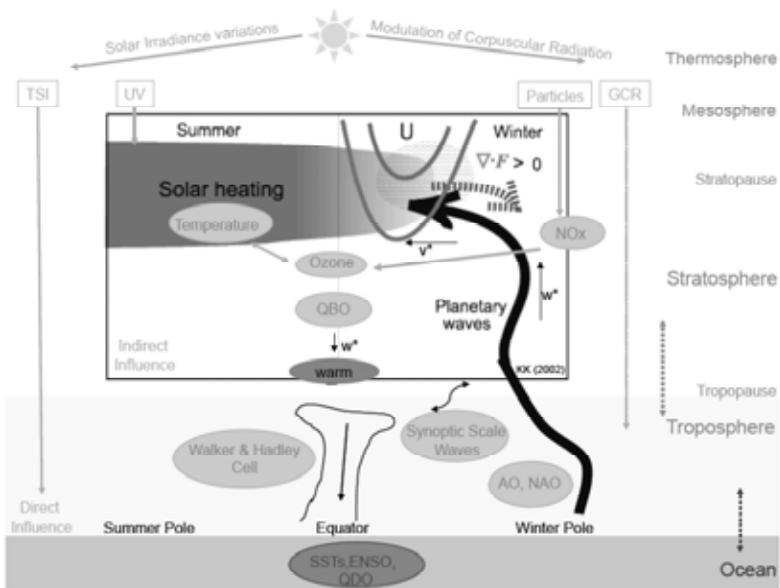


Bild 6: Die verschiedenen Auswirkungen der Sonne auf die Zirkulation der Erdatmosphäre (ohne die Orbitaleffekte). (nach Matthes et al. 2006)

Analysen von Beobachtungsdaten sowie Studien mit Klimamodellen (Cubasch et al. 1977; Meehl et al. 2008) zeigen, dass eine vermehrte Sonneneinstrahlung die Regionen mit geringer Bewölkung am Boden erwärmt, so dass

sich die Passatwindzirkulation verändert. Dieser direkte Effekt scheint die Anregung von El-Nino Ereignissen zu beeinflussen (White et al. 2003, White and Liu, 2008). Da El-Nino Ereignisse schon jetzt für Langfristwettervorhersagen in den Tropen und im Westen Nordamerikas eingesetzt werden, ergibt sich ein Potential, aus Sonnenintensitätsveränderungen langfristig Witterungsveränderungen vorherzusagen.

Labitzke et al (2002) weisen darauf hin, dass eine vermehrte Sonneneinstrahlung die Zirkulation in der Stratosphäre beeinflusst. Zwei zusätzliche Effekte treten neben der direkten thermischen Erwärmung der Stratosphäre auf: Zum einen wird die vermehrte UV-Strahlung vom Ozon absorbiert und führt damit zu einer verstärkten Erwärmung. Darüber hinaus führt die angestiegene UV-Strahlung durch photochemische Reaktionen zur Bildung von mehr stratosphärischem Ozon. Die Folge dieser indirekten Effekte ist eine Veränderung der Vertikalstruktur der Atmosphäre, die sich auch auf das Wettergeschehen auswirken kann (Matthes et al. 2006).

Ein weiterer Effekt, der diskutiert wird, ist der Einfluss interstellarer Teilchen auf die Wolkenentwicklung und somit auf das Klima (Svensmark und Friis-Christensen, 1997). Dieser Teilchenfluss wird durch die Sonnenaktivität moduliert, so dass die Sonne über diesen Umweg ebenfalls einen Einfluss auf das Klima hat. Dieser Effekt ist in Fachkreisen jedoch sehr umstritten.

## **Zusammenfassung**

Die Sonne beeinflusst das Klimageschehen auf langen Zeitskalen über die Orbitalparameter, die für den Wechsel von Warm- und Eiszeiten verantwortlich scheinen. Die multidekadischen Sonnenintensitätsschwankungen (im Zusammenwirken mit dem Vulkanismus) sorgen für kleinere, aber doch deutlich spürbare Klimaschwankungen wie z. B. die „Mittelalterliche Warmzeit“ oder die „Kleine Eiszeit“. Sie sind jedoch nicht groß genug, um die globale Erwärmung, die seit Beginn der Industrialisierung beobachtet wird, alleine verursacht zu haben. Die 11-jährigen Sonnenschwankungen beeinflussen nachweisbar die Zirkulation in der Stratosphäre. Ihre Auswirkungen auf die Troposphäre und den Ozean konnten bisher nur ansatzweise nachgewiesen werden. Wegen ihrer mutmaßlichen Bedeutung für Langfristwettervorhersagen stehen sie im Fokus aktueller Forschungsprojekte.

## Literatur

- Berger, A. L., 1978: Long-term variations of daily insolation and Quaternary climate changes. *J. Atmos. Sci.*, 35, 2362–2367
- Gray, L.J., J. Beer, M. Geller, J.D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G. A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, W. White, 2009: Solar Influences on Climate, *Reviews in Geophysics*, submitted
- Cubasch, U., G. C. Hegerl, R. Voss, J. Waszkewitz und T. C. Crowley, 1997: Simulation with an O-AGCM of the influence of variations of the solar constant on the global climate. *Climate Dynamics*, 13, 757–767
- IPCC 2007: Climate Change – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Kaspar, F., N. Kühl, U. Cubasch, T. Litt, 2005: A model-data-comparison of European temperatures in the Eemian interglacial. *Geophysical Research Letters*, 32, L11703, doi:10.1029/2005GL022456
- Kaspar, F. and U. Cubasch, 2007: Simulations of the Eemian interglacial and the subsequent glacial inception with a coupled ocean-atmosphere general circulation model. In: *The climate of the past*. Eds. F. Sirocko, M. Claussen, M.F. Sanchez-Goni and T. Litt. *Development in Quaternary Science*, 7, The Climate of Past Interglacials, Elsevier
- Labitzke, K., J. Austin, N. Butchart, J. Knight, M. Takahashi, M. Nakamoto, T. Nagashima, J. Haigh, and V. Williams, 2002: The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: Observations and model results, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 64, 203–210
- Matthes, K., Y. Kuroda, K. Kodera and U. Langematz, 2006: Transfer of the solar signal from the stratosphere to the troposphere: Northern winter, *J. Geophys. Res.*, 111, 10.1029/2005JD006283
- Meehl, G.A., J.M. Arblaster, G. Branstator, and H. van Loon, 2008: A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region, *J. Climate*, 21, 2883–2897
- Milankovic, M, 1941: Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Académie royale serbe. Éditions speciales*; 132: XX, 633, Belgrad
- Svensmark, H. und E. Friis-Christensen, 1997: Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – A missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 1225–1232
- Velichko, A.A., E.J. Novenko, V.V. Pisareva, E.M. Zelikson, T. Böttger, und F.W. Junge, 2005: Vegetation and climate changes during the Eemian Interglacial in

- Central and Eastern Europe: comparative analysis of pollen data. – *Boreas* vol. 34, 207–219
- White, W.B., M.D. Dettinger and D.R. Cayan, 2003: Sources of global warming in the upper-ocean on decadal period scales, *J. Geophys. Res.*, 108 (C8), 3248, doi:10.1029/2002JC001396
- White, W.B. und Z. Liu, 2008: Resonant response of the quasi-decadal oscillation to the 11-yr period signal in the Sun's irradiance, *J. Geophys. Res.*, 113, C01002, doi:10.1029/2006JC004057