

# Modellierung natürlicher und anthropogener Klimaänderungen

K. Hasselmann

Wie bei jedem Wissenschaftler, ist der Grundantrieb des Klimaforschers die Neugierde: Er möchte das Klimasystem verstehen. Prüfstein des Verständnisses ist, wie in jeder Wissenschaft, die Vorhersage, an die sich allerdings in der Klimaforschung außerdem eine große öffentliche Erwartung richtet: sowohl hinsichtlich der natürlichen Klimaänderungen, wie zum Beispiel des El Niño, als auch hinsichtlich der vom Menschen verursachten Änderungen, wie der globalen Treibhausenerwärmung oder des stratosphärischen Ozonabbaus.

## 1. Klimavorhersagen

Das Klimasystem ist bekanntlich chaotisch. Dies erschwert die Vorhersage, macht sie aber keineswegs, wie gelegentlich behauptet, unmöglich. Der Begründer der Chaosforschung, der Meteorologe Edward Lorenz, unterscheidet zwei Arten der Vorhersage: Vorhersagen erster Art, als Anfangswertprobleme, und Vorhersagen zweiter Art, als Randwertprobleme [1].

Die Vorhersage des Wetters oder kurzfristiger natürlicher Klimaänderungen wie des El Niño sind Vorhersageprobleme erster Art. Die instabile Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Zirkulation vom nur ungenau erfaßbaren Anfangszustand der Atmosphäre beschränkt die normale Wettervorhersage auf wenige, maximal etwa zehn Tage. Dagegen läßt sich das wesentlich gröberskalige El Niño-Phänomen, das in unregelmäßigen Abständen von drei bis fünf Jahren auftritt, etwa anderthalb Jahre anhält und den gesamten Tropengürtel sowie größere Regionen in höheren Breiten umfaßt, mit modernen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodellen heute über etwa ein halbes Jahr voraussagen. Obwohl die zeitliche Grenze der deterministischen Vorhersagbarkeit in diesem Fall durch Wechselwirkungen der Atmosphäre mit dem wesentlich trägeren Ozean bestimmt und daher wesentlich länger ist, wird sie letztlich wieder durch die instabile Abhängigkeit vom nie exakt ermittelbaren Anfangszustand des Systems Ozean-Atmosphäre limitiert.

Prognosen der zukünftigen Änderung des Klimas durch menschliche Einwirkungen sind dagegen typische Beispiele von Klimavorhersagen zweiter Art. Bei Vorgabe des zeitlichen Verlaufs der äußeren Einwirkungen (z. B. der Emissionen von Treibhausgas-

sen) läßt sich die Reaktion des Klimas wieder mit Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen (in diesem Falle ergänzt durch Treibhausgas-Kreislaufmodelle) berechnen. Zwar hängen die Lösungen weiterhin auch von den Anfangsbedingungen ab, bei den relevanten Integrationszeiten über Jahrzehnte oder Jahrhunderte sind diese jedoch im Vergleich zum Einfluß der geänderten Randbedingungen von untergeordneter Bedeutung. Infolge des chaotischen Verhaltens des Klimas wird allerdings die Änderung des mittleren Klimas, die durch die veränderten Randbedingungen aufgezwungen wird, stets von deterministisch nicht vorhersagbaren, statistischen Fluktuationen überlagert [2].

Dieses einfache Bild bricht jedoch zusammen, wenn das veränderte mittlere Klima an einen Bifurkationspunkt gelangt, der zum Umkippen des Klimas in einen neuen Gleichgewichtszustand führt. Einige solche Phasenübergänge (zum Beispiel ein Zusammenbruch der ozeanischen Tiefenströmung) wurden bereits in Modellen simuliert [3] und scheinen nach paläoklimatischen Befunden auch in vergangenen Klimaepochen aufgetreten zu sein.

Bei Klimaänderungen über längere Zeitskalen von mehreren hundert, tausend oder sogar Millionen Jahren lassen sich Klimavorhersagen nur im „hindcasting mode“, d. h. auf die Wiedergabe vergangener Beobachtungen beschränkt, anwenden. Aber auch unter dieser Einschränkung bleiben sie ein wichtiges Werkzeug zur Hypothesenprüfung. Obwohl unser Verständnis der natürlichen Klimaschwankungen auf diesen paläoklimatischen Zeitskalen noch sehr lückenhaft ist, kann man durch gezielte Simulationsexperimente klären, ob die Schwankungen durch instabile Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subkomponenten des Klimasystems entste-

Prof. Dr. Klaus Hasselmann, Deutsches Klimarechenzentrum, Bundesstraße 55, D-20146 Hamburg

hen (und somit durch Vorhersageexperimente der ersten Art wiedergegeben werden können) oder von außen aufgeprägt werden, z. B. durch Vulkanausbrüche, Schwankungen der Erdbahn um die Sonne, Änderungen der solaren Strahlung oder tektonische Veränderungen (in welchem Falle Vorhersageexperimente der zweiten Art erforderlich wären). Bisher konnten lediglich für die Milankowitsche Theorie der Klimaänderungen durch die astronomisch exakt berechenbaren Schwankungen der Erdbahn um die Sonne eindeutige quantitative Wirkungszusammenhänge nachgewiesen werden, die sich aber auf die schmalen Periodenbänder der Orbital-schwankungen bei 20000, 40000 und (mit Fragezeichen) 100000 Jahren beschränken [4].

Zu den inhärenten systembedingten Grenzen und unserem beschränkten derzeitigen Verständnis des Klimasystems kommt schließlich als weitere wichtige Limitierung der Klimavorhersage die endliche Leistung von Rechnern hinzu. Dies sei im folgenden näher erläutert.

## 2. Klimamodelle

Das Klimasystem ist eines der komplexesten Systeme, das wir kennen. Im Unterschied zur kurzfristigen Wettervorhersage müssen zum Verständnis längerperiodischer Klimaänderungen nicht nur die Atmosphäre, sondern als ebenso wichtige Subsysteme die Ozeane, die Kryosphäre (d. h. die Schnee- und Eismassen), die Biosphäre und die vielfältigen

Stoffkreisläufe, die alle Subsysteme durchziehen, berücksichtigt werden. Für die kurzen Integrationszeiten der Wettervorhersage können diese wesentlich trägeren Subsysteme als konstant vorgegeben werden, für die Entwicklung des Klimas sind ihre dynamischen Wechselwirkungen aber entscheidend.

Die strömungs- und strahlungsphysikalischen sowie die thermodynamischen Prozesse, die in diesen Subsystemen ablaufen, sind grundsätzlich bekannt. Die Hauptschwierigkeit in der Darstellung dieser physikalischen Prozesse in Modellen liegt in ihrem immens breiten, von keinem Rechner auch nur annähernd erfassbaren Skalenspektrum – von Millimetern bis 40000 Kilometern. So lassen sich mit heutigen Höchstleistungsrechnern hundertjährige Szenarienrechnungen der künftigen anthropogenen globalen Erwärmung mit realistischen Klimamodellen nur bei einer horizontalen Auflösung bis etwa 200 km berechnen. Bei einjährigen El Niño-Vorhersagen liegt die Auflösungsgrenze bei etwa 50 km. Vertikal werden die Atmosphäre und der Ozean gewöhnlich in jeweils 20 bis 40 und 10 bis 20 Schichten aufgelöst. Prozesse, die auf kleineren Skalen ablaufen – wie die Wolkenbildung oder die Entstehung von Tiefenwasser durch Konvektion im Ozean – müssen „parametrisiert“, d. h. durch die noch aufgelösten gröberskalierten Zustandsvariablen des Klimasystems beschrieben werden. Dasselbe gilt für die vielfältigen biologischen und chemischen Umwandlungsprozesse, die nicht nur subskalig ablaufen, sondern in vielen Fällen auch noch unzureichend verstanden sind.

Trotz der vielen Unsicherheiten der Parametrisierungen lassen sich die wichtigsten Eigenschaften des heutigen Klimas – Passat- und Westwindregime, Sturmbahnen, Niederschlagsverteilungen, Monsune, die großen ozeanischen Strömungssysteme, Meeresverteilungen sowie der Jahresgang und die interannuelle Variabilität all dieser Größen – mit modernen Klimamodellen befriedigend wiedergeben. Das Vertrauen in die Brauchbarkeit dieser Modelle für kurz- bis mittelfristige Klimavorhersagen beruht letztlich auf detaillierten Vergleichen der Modellsimulationen mit Beobachtungen des heutigen Klimas – begleitet von ausführlichen Sensitivitätstests, Modellvergleichen, Meßkampagnen zur Überprüfung der Parametrisierungen, usw.

Hingegen wurden paläoklimatische Daten, die aus Bohrungen in der Tiefsee und im Eis, aus Korallen, Baumringen oder anderen klimatisch beeinflussten Befunden gewonnen wurden, bisher weniger zur detaillierten Verifikation komplexer dreidimensionaler Klimamodelle als zur Entwicklung und qualitativen Prüfung allgemeiner theoretischer Hypothesen verwendet. Obwohl äußerst anregend und aufschlußreich, unterliegen paläoklimatische Daten nämlich größeren Interpretationsunsicherheiten. Hinzu kommt, daß im Bereich langzeitlicher Klimaänderungen noch so viele Fragen bezüglich der schwachen, aber über lange Zeiten dennoch potentiell wirksamen biogeochemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Klimasubsystemen offen sind, daß es fraglich erscheint, ob die heute primär

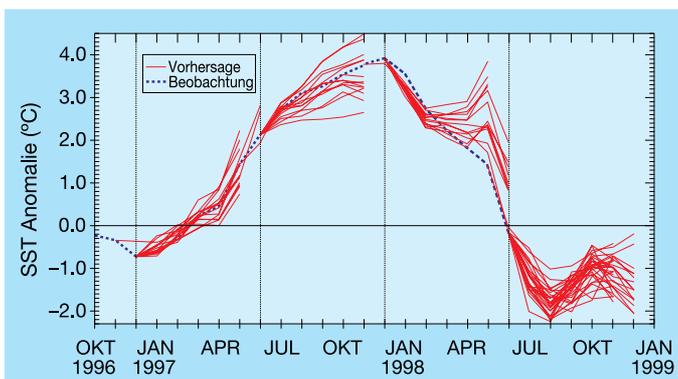


Abb. 1: Sechsmontatige Monte-Carlo-Vorhersagen des „El Niño Grande“, 1997 vom Europäischen Zentrum für die Mittelfristige Vorhersage. Vorhersagegröße ist die Anomalie (d. h. Abweichung vom langjährigen mittleren Jahresgang) der Oberflächentemperaturen (SST = Sea Surface Temperature) des östlichen äquatorialen Pazifiks. Die Daten sind zusammengestellt aus dem vollständigen Satz der monatlich gerechneten, im Internet erhältlichen, saisonalen Vorhersagen des ECMWF (<http://www.ecmwf.int/html/seasonal/forecast/index.html>). Die einzelnen Vorhersagen eines Monte-Carlo-Ensembles unterscheiden sich lediglich durch kleine Modifikationen der Anfangsbedingungen.

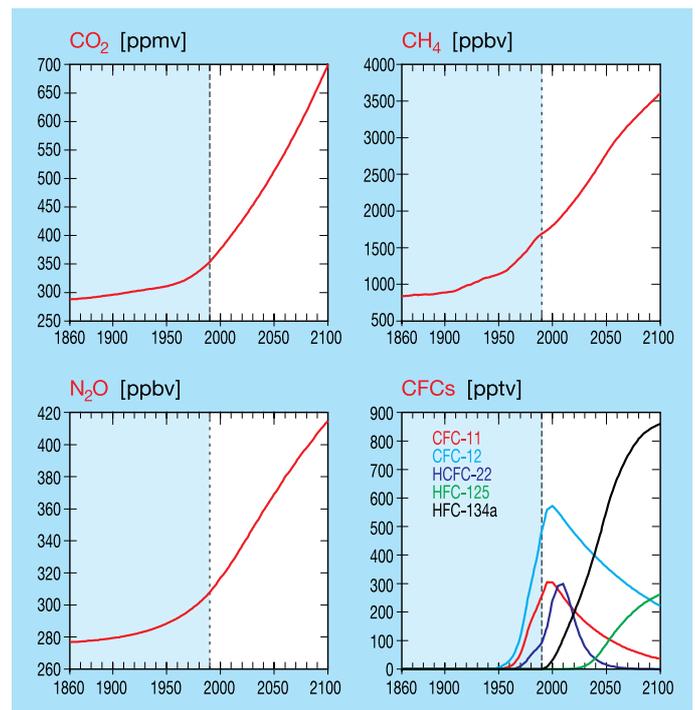


Abb. 2: Gemessene und prognostizierter Anstieg der Treibhausgase (nach IPCC, 1995).

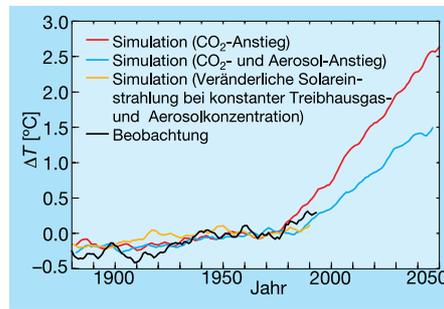
für kurz- bis mittelfristige Klimaänderungen konzipierten Klimamodelle bereits alle paläoklimatisch relevanten Prozesse enthalten. In den folgenden beiden Beispielen wird daher nur die Anwendung von Klimamodellen für Vorhersagen von natürlichen oder anthropogenen Klimaänderungen im Zeitskalenbereich von Monaten bis einigen hundert Jahren vorgestellt.

### 3. Zwei Vorhersagebeispiele

Im Jahre 1997 ereignete sich das größte El Niño dieses Jahrhunderts. Abbildung 1 zeigt eine Serie von 6-monatigen Vorhersagen dieses „El Niño Grande“ durch das Europäische Zentrum für die Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW). Das EZMW führt jeden Monat eine Monte-Carlo-Serie von Vorhersagen durch, die sich lediglich durch etwas unterschiedliche Anfangsbedingungen unterscheiden. Der Übersicht halber sind in Abb. 1 nur die Vorhersageensembles für die Anfangsmonate Dezember 1996, Juni 1997, Dezember 1997 und Juni 1998 wiedergegeben (der vollständige Vorhersagesatz ist im Internet einsehbar). Die Streuung der Vorhersagen zeigt die empfindliche Abhängigkeit der berechneten Lösungen vom Anfangszustand. Trotz der Streuung sind aber wohldefinierte mittlere Vorhersagen für jeden Monat erkennbar. Die ersten Prognosen vom Dezember 1996 sagen bereits die Entwicklung eines El Niños voraus, unterschätzen aber die Amplitude. Ab etwa März 1997 (nicht gezeigt) wurde auch die Amplitude richtig vorhergesagt, wie in den Vorhersagen vom Juni 1997 ersichtlich. Im Herbst 1997 überschritt das El Niño seinen Höhepunkt und entwickelte sich weiter zu einer negativen Anomalie (La Niña), die ebenfalls richtig vorhergesagt wurde.

Für eine erfolgreiche Vorhersage war in diesem Falle die realistische Erfassung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre durch das Modell entscheidend. Zur Zeit wird untersucht, ob mit ähnlichen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen auch längerfristige, dekadische Klimaschwankungen, wie z. B. Dürren in der Sahelzone oder die sogenannte Nord-Atlantische Oszillation (eine Schwankung des Nord-Süd-Luftdruckgefälles im Nordatlantik, verbunden mit einer Verstärkung oder Schwächung der vorherrschenden Westwinde), vorhergesagt werden können [5]. Sofern der Zeitablauf dieser Schwankungen, ebenso wie beim El Niño, überwiegend vom trägen Ozean gesteuert werden, besteht hierzu berechnete Hoffnung.

Über längere Zeitskalen von mehreren Dekaden bis einigen hundert Jahren wurden ähnliche gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle bereits für Szenarienrechnungen zur Prognose der zukünftigen globalen Erwärmung ein-



**Abb. 3: Simulierte Entwicklung der mittleren oberflächennahen Temperatur für drei Szenarien: Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen mit und ohne gleichzeitigem Anstieg der Aerosolkonzentrationen [14], und Variationen der solaren Einstrahlung [6]. Ebenfalls gezeigt sind die beobachteten Temperaturänderungen [15]. Alle Temperaturänderungen beziehen sich auf gemittelte Referenztemperaturen in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts.**

gesetzt [6–8]. Zur Berechnung der Bilanz der ein- und ausgestrahlten Energie benötigen solche Modelle die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase, welche aus den vorgegebenen Treibhausgasemissionen mit Hilfe vorgeschalteter biogeochemischen Kreislaufmodelle erst berechnet werden müssen. (Gelegentlich werden die Kreislaufmodelle mit den Klimamodellen gleich zu einem Gesamtmodell zusammengekoppelt; sofern die Klimaänderungen nicht allzu groß werden, kann die hiermit erfaßte Rückwirkung der Klimaänderung auf die biogeochemischen Kreisläufe aber in erster Näherung vernachlässigt werden.)

Abbildung 2 zeigt die beobachteten und prognostizierten Änderungen der zukünftigen Konzentrationen der wichtigsten anthropogen beeinflussten Treibhausgaskonzentrationen (nach dem IPCC Bericht 1995, [8]). Die Prognosen wurden mit Kreislaufmodellen berechnet aus dem von Energieexperten geschätzten künftigen Verlauf der Emissionen unter der Annahme, daß keine Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen ergriffen werden (Business as Usual). Sie sind somit als nur eines von vielen möglichen Szenarien anzusehen. Mit Ausnahme der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), deren Produktion durch das Montreal-Abkommen unterbunden bzw. stark reduziert wurde, zeigen alle Gase einen weiteren deutlichen Anstieg in den nächsten 100 Jahren über den bereits heute erhöhten Pegel. Mit 60 % Anteil liefert CO<sub>2</sub> den größten Beitrag zur anthropogenen Treibhausenerwärmung, gefolgt von Methan mit etwa 15 % und Lachgas mit wenigen Prozent. Der Treibhausbeitrag der FCKWs, der heute noch mit Methan vergleichbar ist, klingt allmählich ab, die Reduktion wird aber zum Teil durch den Anstieg der nicht vollständig halogenisierten Ersatzgase wieder aufgehoben, die zwar das stratosphärische Ozon nicht mehr angreifen,

aber nach wie vor wirksame Treibhausgase sind.

Die im nächsten Jahrhundert prognostizierte globale Erwärmung infolge der in Abb. 2 gezeigten Treibhausgaszunahme beträgt nach unabhängigen Rechnungen mehrerer Gruppen etwa  $3 \pm 1,5$  Grad Celsius (erster IPCC-Bericht 1990, [7]). Nach Berücksichtigung des abkühlenden Einflusses von Sulphataerosolen, die durch Hydrolysierung des bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern – vorwiegend Kohle – freigesetzten SO<sub>2</sub> entstehen, wurden die Prognosen um etwa ein Grad reduziert (zweiter IPCC-Bericht 1995, [8]). Abbildung 3 zeigt neuere Prognosen der globalen Erwärmung für ein Business-as-Usual-Szenarium (nach IPCC-90), mit und ohne Berücksichtigung der Aerosole [9]. Zum Vergleich werden die beobachteten Temperaturänderungen sowie die berechneten Temperaturänderungen infolge möglicher Schwankungen der solaren Einstrahlung ebenfalls gezeigt.

Sowohl in den Beobachtungen als auch in den Simulationen zur anthropogenen Treibhausenerwärmung erkennt man einen schwachen, aber kontinuierlichen Anstieg seit Beginn dieses Jahrhunderts, mit zunehmendem Trend in den letzten dreißig Jahren. Den Trends sind sowohl in den Beobachtungen wie in den Simulationen statistische Schwankungen überlagert, die dem chaotischen Charakter des Klimasystems entsprechen. Sie entstehen, ähnlich der Brownschen Bewegung, durch kurzzeitige Wetterschwankungen in der Atmosphäre [10] sowie durch El Niño-ähnliche großskalige Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und dem Ozean. In den Beobachtungen kommen zu diesen internen Variationen noch die externen Einwirkungen von Vulkanen und Schwankungen der solaren Einstrahlung hinzu.

Aus Abb. 3 ergibt sich die Frage, ob der beobachtete Temperaturanstieg, insbesondere in den letzten 30 Jahren, bereits den Anfang des für das folgende Jahrhundert prognostizierten stark ansteigenden anthropogenen Klimasignals darstellt oder als natürliche Klimaschwankung interpretiert werden kann. Die Frage läßt sich heute nicht eindeutig beantworten und wird noch wissenschaftlich kontrovers diskutiert. Eine Mehrheit der Wissenschaftler neigt zwar heute zur Meinung, daß eine Erklärung des beobachteten Temperaturanstiegs als natürliche Variabilität nur noch mit geringer Wahrscheinlichkeit möglich ist, die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsschätzungen sind aber mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (IPCC, 1995, [11,12]). Eine Erklärung der beobachteten Temperaturänderung allein aus Schwankungen der solaren Einstrahlung, wie gelegentlich spekuliert, erscheint jedoch – zumindest nach den bisher vorliegenden Simulationen, siehe Abb. 3 – kaum möglich.

#### 4. Ausblick

In den Beschlüssen von Kioto vom Dezember 1997 haben die Industrieländer zum ersten Mal konkrete, verbindliche Maßnahmen zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen vereinbart. Die Bemühungen um Realisierung der in Rio de Janeiro 1992 vereinbarten Klimakonvention sind somit in eine wichtige neue Phase getreten. Diese stellt auch die Klimaforschung vor neue Aufgaben. Zur Vermeidung einer gefährlichen zukünftigen globalen Erwärmung werden langfristig wesentlich stärkere Reduktionen als in Kioto angestrebt erforderlich. Soll die langfristige Klimaschutzstrategie aber auf eine rationale Basis gestellt werden, ist ein wesentlich besseres Verständnis der Wechselbeziehungen zwischen dem Klima und den anderen Komponenten des Systems Erde, insbesondere der Ökologie und der Wirtschaft, erforderlich [13]. Dieses kann nur durch eine enge Zusammenarbeit von Klimaforschern mit Biologen, Ökonomen, Sozialwissenschaftlern, Politologen und Wissenschaftlern anderer Disziplinen erarbeitet werden. Die durch die Einbeziehung der biogeochemischen Kreisläufe in Klimamodelle bereits eingeleitete Erweiterung der Klimamodellierung in Richtung auf die Global-Change-Forschung dürfte sich hierdurch in Zukunft deutlich beschleunigen. Es wäre zu begrüßen, wenn auch Physiker sich an dieser interessanten und wichtigen Herausforderung beteiligen würden.

#### Literatur

- [1] *E. N. Lorenz*, GARP Publ. **16**, WMO, 132 (1975)
- [2] *U. Cubasch, B. D. Santer, A. Hellbach, G. C. Hegerl, H. Häck, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, A. Stässel, R. Voss*, Climate Dynamics **10**, 1 (1994)
- [3] *U. Mikolajewicz, T. J. Crowley, A. Schiller, R. Voss*, Nature **387**, 384 (1997)
- [4] *J. Imbrie, A. Berger, N. J. Shackelton*, Role of orbital forcing: a two-million-year perspective, in „Global change in the perspective of the past“, *J. A. Eddy, H. Oeschger* (Hrsg.), John Wiley, S. 263 (1993)
- [5] *M. Latif, T. P. Barnett*, Science **266**, 634 (1994).
- [6] *U. Cubasch, G. C. Hegerl, R. Voss, J. Waszkewitz, T. C. Crowley*, Climate Dynamics **13**, 757 (1997)
- [7] *J. T. Houghton, G. L. Jenkins, J. J. Ephraums* (Hrsg.), Climate change. The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge (1990)
- [8] *J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell* (Hrsg.), Climate change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge (1996)
- [9] *G. C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch, J. F. B. Mitchell, E. Roeckner, R. Voss, J. Waszkewitz*, Climate Dynamics **13**, 613 (1997)
- [10] *K. Hasselmann*, Theory. Tellus **28**, 473 (1976)
- [11] *K. Hasselmann*, Science **276**, 914 (1997)
- [12] *K. Hasselmann*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (im Druck) (1998)
- [13] *K. Hasselmann*, Nature **390**, 225 (1997)
- [14] *E. Roeckner, L. Bengtsson, J. Feichter, J. Lelieveld, H. Rodhe*, MPI Report **266**, (eingereicht bei J. Climate) (1998)
- [15] *P. D. Jones, K. R. Briffa*, The Holocene **2**, 165 (1992)