

Max-Planck-Institut für Meteorologie

Hamburg

Gegründet 1974 zur Erforschung der physikalischen Grundlagen des Klimas. Das Institut besteht aus drei Arbeitsbereichen. Ein Arbeitsbereich (Hasselmann) befaßt sich mit allgemeinen Fragen der Klimadynamik, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen im System Atmosphäre-Ozean-Eis; der zweite (Graßl) untersucht vorwiegend Prozesse in der Atmosphäre und beim Austausch Ozean-Atmosphäre mit Schwerpunkt bei der Fernerkundung mit Satelliten; der dritte (Bengtsson) widmet sich überwiegend der verbesserten Modellierung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre mit Schwerpunkten bei der Wechselwirkung Biosphäre-Atmosphäre und der Darstellung von Wolkenprozessen.

Geschäftsführender Direktor:
Prof. Dr. Klaus Hasselmann (bis
31. 12. 1995)

Prof. Dr. Lennart Bengtsson (seit 1. 1. 1996)

Kollegium, Wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Dr. Lennart Bengtsson

Prof. Dr. Hartmut Graßl (beurlaubt)

Prof. Dr. Klaus Hasselmann

Em. Wissenschaftliches Mitglied:

Prof. Dr. Hans G. T. Hinzpeter

Gast: Prof. Dr. Reimar Lüst, Em. Wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik

46 Mitarbeiter, davon 17 Wissenschaftler; 63 Drittmittelbeschäftigte, davon 46 Wissenschaftler; dazu 41 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler.

Fachbeirat: Prof. Dr. W. S. Broecker, Palisades, New York/USA; Prof. Dr. A. Chedin, Paris; Prof. Dr. J. Egger, München; Prof. Dr. W. L. Gates, Livermore, Californien/USA; Prof. Dr. B. J. Hoskins, Reading/UK; Prof. Dr. R. Sadourny, Paris; Dr. G. Schmitz, Kühlungsborn.

Kuratorium: Prof. Dr. P. J. Crutzen, Mainz; Prof. Dr. L. Hajen, Hamburg; Dr. E. Lübbert, Bonn; Dr. J. Lüthje, Hamburg; Dr. J.-B. Mennicken, Bonn; Dr. G. von Sengbusch, Geesthacht.

Klimadynamik (K. Hasselmann)

Arbeitsgebiete

Gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle, Wechselwirkungen Atmosphäre-Ozean-Eis-Biosphäre. Entwicklung und Anwendung statistischer Methoden zur Erkennung von Klimaänderungen. Assimilation von Satellitendaten in Klimamodelle. See-gang.

Aktueller Forschungsschwerpunkt

Klimavariabilität und Nachweis einer anthropogenen Klimaänderung

Einleitung. - Die extremen Wettergeschehnisse in den letzten Jahren lassen die Klimaproblematik immer mehr in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses rücken. Im Vordergrund steht dabei die Frage, inwieweit der Mensch durch den vermehrten Ausstoß klimarelevanter Spurengase, vor allem von Kohlendioxid (CO₂), das Klima beeinflusst. Das CO₂ wirkt, vereinfacht ausgedrückt, wie das Glas in einem Treibhaus: Es ist durchlässig für die Sonnenstrahlung, verhindert aber teilweise die Wärmeausstrahlung der Erde in den Welt-raum, wodurch die Gefahr einer globalen Erwärmung der Erde gegeben ist. Weitere Einflußfaktoren sind Sulfat-Aerosole und Ruß. Sulfat-Aerosolpartikel entstehen durch industrielle Schwefelemissionen in die Atmosphäre, sie reflektieren einen Teil der

Sonneneinstrahlung und bewirken dadurch regional eine Abkühlung. Neueste Simulationen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen und verbesserten Signalerkennungsverfahren zeigen, daß der Mensch mit hoher Wahrscheinlichkeit für die in den letzten Jahrzehnten beobachtete Erderwärmung verantwortlich ist.

Natürliche und anthropogene Klimaschwankungen. – Die Erkennung „anthropogener“ (durch den Menschen verursachter) Klimaänderungen wird durch die Überlagerung natürlicher Klimaschwankungen erschwert. Klimaschwankungen beobachtet man auf einer Vielfalt von Zeitskalen, von Monaten bis hin zu Jahrtausenden. Prinzipiell unterscheidet man zwei Arten von Klimaschwankungen: externe und interne. Während externe Klimaschwankungen durch Störungen von „außen“ angeregt werden, entstehen interne Klimaschwankungen durch Wechselwirkungen in bzw. zwischen den verschiedenen Klima-Subsystemen (Atmosphäre, Ozean, Eis, Landoberfläche, usw.). Die bekanntesten Beispiele für externe Klimaschwankungen sind die Eiszeiten. Dies sind Kälteperioden, begleitet von anomal großer Eisausdehnung, welche u. a. in Variationen der Erdbahnparameter begründet sind. Den anthropogenen sogenannten Treibhauseffekt zählen wir ebenfalls zu den externen Klimaschwankungen, wie auch Klimaänderungen, hervorgerufen durch Vulkanausbrüche.

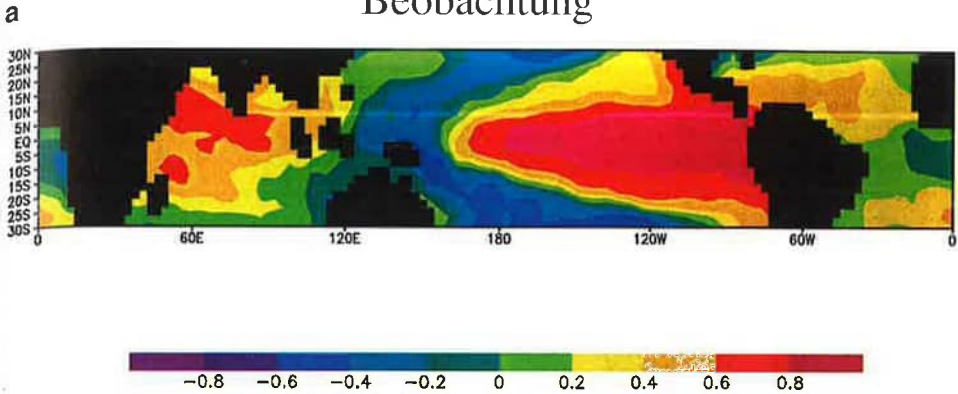
Es sind aber vor allem die internen Klimaschwankungen, welche die Erkennung des anthropogenen Treibhauseffekts erschweren. Hierbei spielt die großskalige Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre eine wichtige Rolle. Verlässliche Klimamodelle, die für die Simulation und Erkennung des anthropogenen Treibhauseffekts Anwendung finden, müssen daher in der Lage sein, die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre korrekt darzustellen und die aus ihr resultierenden Klimaschwankungen realistisch zu simulieren.

Die stärkste kurzfristige interne Klimaschwankung ist das „El Niño/Southern Oscillation (ENSO)“-Phänomen. ENSO

ist ein klassisches Beispiel für die großskalige Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und äußert sich in Anomalien der Meeresoberflächentemperatur des tropischen Pazifiks (Abb. 1a), die im Mittel etwa alle vier Jahre wiederkehren. Obwohl ENSO seinen Ursprung im tropischen Pazifik besitzt, beeinflusst es nicht nur das Regional- sondern auch das Globalklima. Die Warmphasen von ENSO, die El Niños, führen u. a. zu Dürren in Südostasien und Australien; sie verursachen starke Niederschläge über weiten Teilen Südamerikas und rufen signifikante Klimaanomalien über Nordamerika und während besonders starker El Niños sogar über Europa hervor. ENSO wirkt sich aber nicht nur auf das Globalklima aus, sondern beeinflusst auch die Ökosysteme im asiatisch-pazifischen Raum und die Volkswirtschaften verschiedener Staaten, wie z. B. Australien und Peru. ENSO ist daher ein geeignetes Testfeld für gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle. Die neuesten Ozean-Atmosphäre-Modelle simulieren ENSO realistisch (Abb. 1b) und sind auch in der Lage, die mit ENSO einhergehenden Klimaanomalien etwa ein Jahr im voraus vorherzusagen. Eine mögliche Konsequenz des Treibhauseffekts könnte in einer Änderung der ENSO-Statistik bestehen. Die realistische Simulation von ENSO ist daher auch unter diesem Gesichtspunkt äußerst wichtig.

ENSO-ähnliche Phänomene gibt es aber auch in den mittleren Breiten. Allerdings spielen sich diese auf der Zeitskala von Dekaden ab, wegen der langen Anpassungszeit der Ozeane in den mittleren Breiten. Es sind insbesondere die dekadischen Klimaschwankungen, welche die Erkennung des Treibhauseffekts erschweren. Wegen der kurzen zur Verfügung stehenden Meßreihen ist die Schwankungsbreite des Klimas nur sehr schwer aus Beobachtungen zu bestimmen. Um so wichtiger ist es, daß gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle die wenigen bekannten Aspekte dekadischer Klimaschwankungen realistisch simulieren, um eine verlässliche Abschätzung des „Rauschpegels“ des Klimas zu erhalten. Klimazeitreihen über dem Nordpazifik und

Beobachtung



Gekoppeltes Model

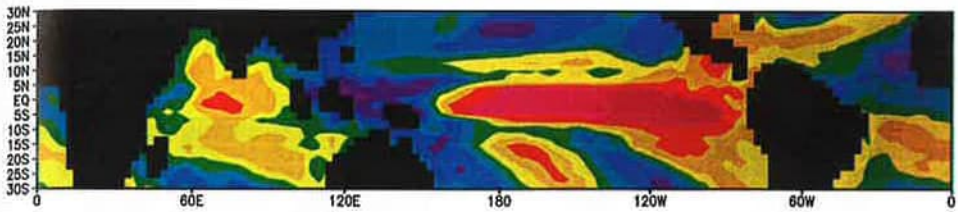


Abb. 1: (a) Korrelationen tropischer Meeresoberflächentemperaturanomalien mit dem Niño-3-Index, d. h. dem Mittelwert der Temperaturanomalien in der Region 5°N–5°S, 150°W–90°W. Der Niño-3-Index wurde aus Beobachtungen für die Periode 1949–1991 ermittelt. (b) Korrelationen tropischer Meeresoberflächentemperaturanomalien mit dem Niño-3-Index, ermittelt aus einer Simulation mit einem gekoppelten Ozean–Atmosphäre-Modell.

über Nordamerika zeigen ausgeprägte Variabilität auf der Zeitskala von etwa zwanzig Jahren (Abb. 2 a, 2 b). Neueste Untersuchungen zeigen, daß Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre auch diese Art von dekadischer Klimavariabilität hervorrufen und daß ähnliche Prozesse ebenfalls im atlantisch-europäischen Raum ablaufen. Die gekoppelten Ozean–Atmosphäre-Modelle sind in der Lage, die dekadischen Klimaschwankungen zu simulieren (Abb. 2 c, 2 d), was für die **Erkennung** des Treibhauseffekts einen **wichtigen** Schritt darstellt.

Mittlerweile wurden mehrere Simulationen mit konstanten Treibhausgaskonzentrationen (Kontrollsimulationen) über 1000 Jahre und mehr mit gekoppelten Modellen durchgeführt, eines davon in Hamburg. Die Fluktuationen in derartigen Simulationen erlauben es, die interne Variabilität des Klimasystems auf dekadischen und Jahrhundertzeitskalen abzuschätzen, und sind damit ein wichtiges Werkzeug zum statistischen Nachweis des Treibhauseffekts.

Simulation einer vom Menschen verursachten Klimaänderung. – Um abzuschätzen, wie das Klimasystem auf die Änderung der atmosphärischen Zusammensetzung reagiert, wurden Simulationen des Zeitraums von 1880 bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts mit globalen gekoppelten Ozean–Atmosphäre-Modellen durchgeführt. Bis zur Gegenwart wurden die beobachteten Änderungen der Konzentration von CO₂ (und weiteren Treibhausgasen, deren Beitrag durch einen CO₂-Äquivalenzwert ab-

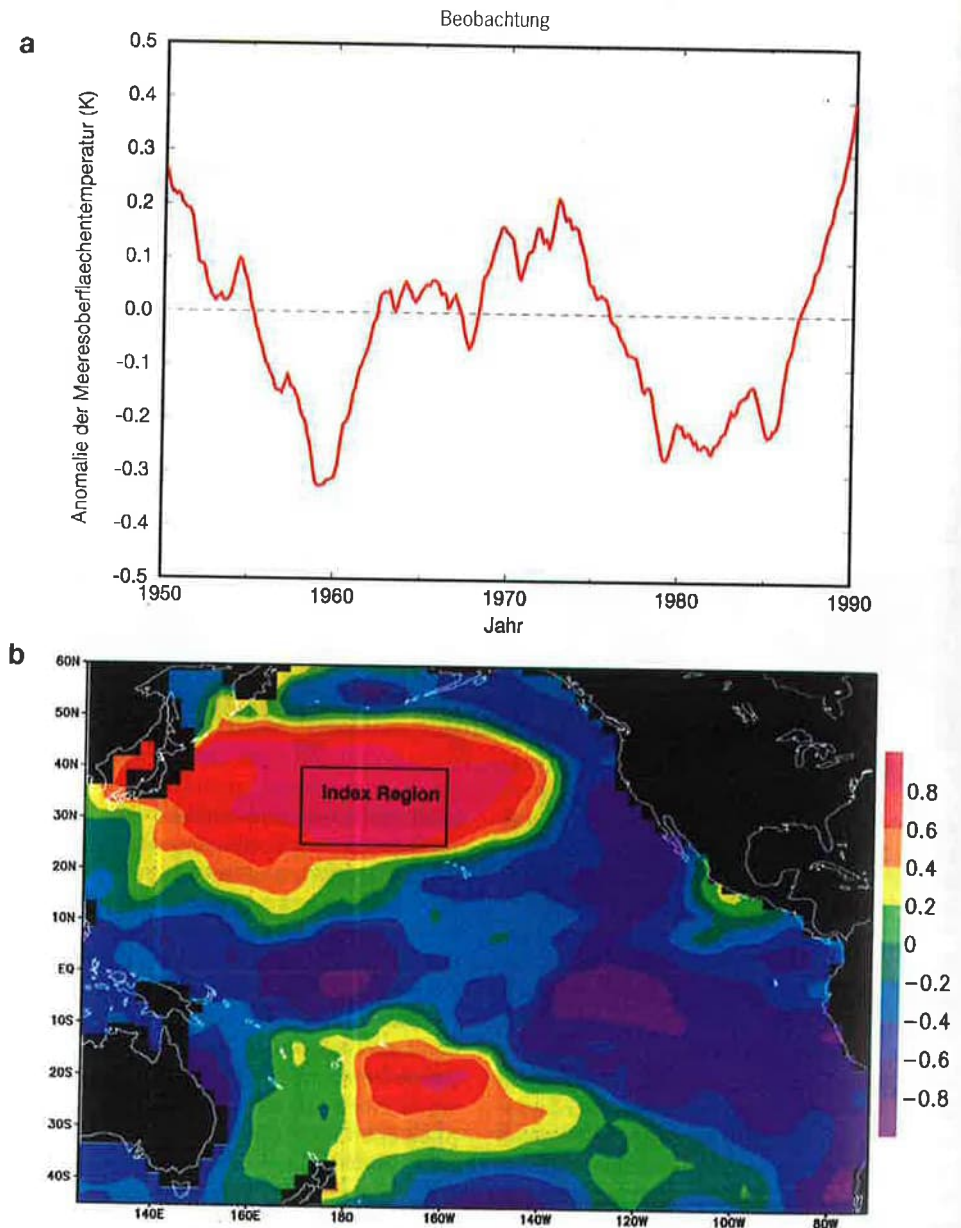


Abb. 2: (a) Variationen der nordpazifischen Meeresoberflächentemperatur für die Periode 1950–1990.

(b) Korrelationen pazifischer Meeresoberflächentemperaturanomalien mit dem Index gezeigt in (a).

geschätzt wird) sowie mit Hilfe von historischen Emissionen geschätzte Konzentrationen von Sulfat-Aerosolen vorgeschrieben. Für die Zukunft wurden bis 2050 die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen

gemäß einem Szenarium der Entwicklung der anthropogenen Emissionen in der Zukunft vorgeschrieben. In den Modellsimulationen steigt die mittlere bodennahe Temperatur der Erde, überlagert von natürli-

Gekoppeltes Modell

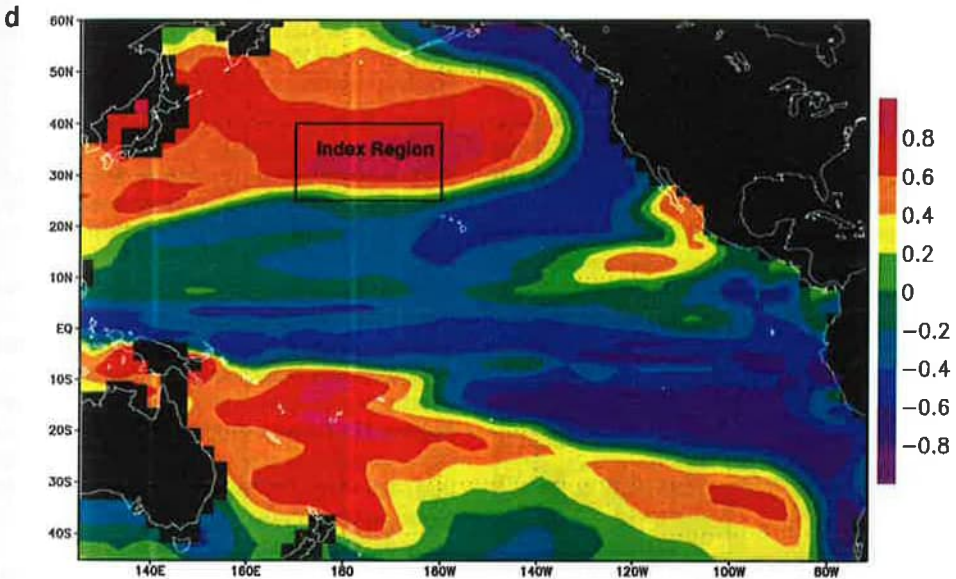
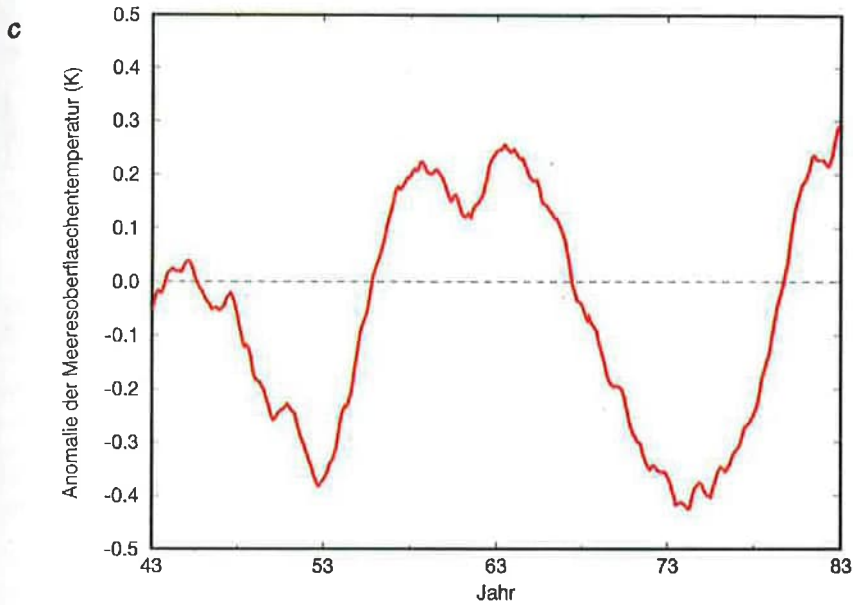


Abb. 2: (c) Variationen der nordpazifischen Meeresoberflächentemperatur, simuliert mit einem gekoppel-

ten Ozean-Atmosphäre-Modell. (d) Entsprechendes Korrelationsmuster.

chen Schwankungen, bis ca. 1980 oder 1990 langsam an; anschließend beginnt eine starke Erwärmungsphase. Letztlich steigt die mittlere Temperatur bis zum Jahr 2050 um ca. 1,8 K. Das räumliche Muster der

Klimaänderung zeigt stärkere Erwärmung über Land als über den Ozeanen. In den nördlichen mittleren Breiten wird die Erwärmung aufgrund des lokalen Aerosoleffekts abgeschwächt, über Gebieten mit

sehr starkem Aerosoleintrag, z. B. China, überwiegt sogar der abkühlende Effekt (Abb. 3 a).

Zum Nachweis der vom Menschen verursachten Klimaänderung. – Mit den zeitabhängigen Klimaänderungssimulationen auf der einen Seite und den langjährigen Kontrollsimulationen auf der anderen Seite stehen wertvolle neue Informationen zum statistischen Nachweis des Treibhauseffekts zur Verfügung. Sie liefern eine Voraussage der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Klimaänderungsmusters, und sie erlauben es, die statistischen Eigenschaften der internen Klimavariabilität (des „Klimarauschens“) abzuschätzen. Die Fragestellung dabei ist, inwieweit die beobachtete Erwärmung der letzten Jahre mit natürlichen Klimaschwankungen vereinbar ist. Wenn die beobachtete Erwärmung außerhalb eines festgelegten Konfidenzintervalls liegt, in dem sich z. B. 95% der internen Klimaschwankungen abspielen, schließen wir mit einem statistischen Risiko von 5% aus, daß es sich bei der Erwärmung um eine interne Klimaschwankung handelt.

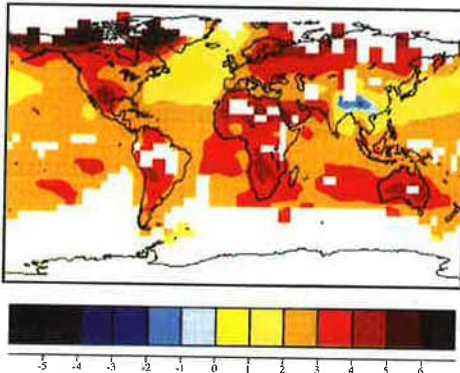
Man könnte z. B. die mittlere globale Temperatur für den statistischen Nachweis des Treibhauseffekts verwenden. Allerdings

kann man ein Treibhausgassignal in den Beobachtungen früher und verlässlicher vom Klimarauschen trennen, wenn man zusätzlich die räumliche Struktur der Klimaänderung (deren „Fingerabdruck“, Abb. 3a) berücksichtigt. Dabei reduzieren wir durch einen Vergleich der beobachteten Temperaturänderung mit dem Fingerabdruck die Muster auf eine skalare Nachweisgröße („detection variable“).

Die Chancen, eine Klimaänderung nachzuweisen, erhöhen sich weiter, wenn der Fingerabdruck derart verändert wird, daß er natürliche Klimaschwankungen unterdrückt (optimaler Fingerabdruck). Dabei werden die Komponenten der Klimaänderung, die starkes Rauschen aufweisen, schwächer gewichtet werden als solche, die mit geringen natürlichen Klimaschwankungen in Verbindung gebracht werden.

Diese Methode haben wir auf das räumliche Muster von Trends (Steigungen von an die lokalen Zeitreihen angepaßten Geraden) der bodennahen Lufttemperatur im Verlauf von 30 Jahren angewendet. Langjährige, homogenisierte Temperaturmessungen beschreiben die beobachtete Klimaänderung. Die Analyse wird nur in Gebieten durchgeführt, in denen seit ca. 45 Jahren zuverlässige Temperaturtrends berechnet werden können; sie sind in Abbildung 3a farblich abgebildet. Abbildung 3b zeigt die zeitliche Entwicklung der Nachweisgröße. Der Wert, der bei 1994 angetragen ist, entspricht dabei z. B. dem Produkt des optimalen Fingerabdrucks mit den Temperaturtrends von 1965–1994. Der graue Balken bezeichnet die Obergrenze aus den verschiedenen Kontrollsimulationen und den Beobachtungen gewonnenen 95% Konfidenzintervalle für die natürliche Klimavariabilität. Das Kontrollexperiment eines Modells wird dabei dazu benutzt, den Fingerabdruck zu optimieren, die anderen dazu, um die Schwankungen der Nachweisgröße aufgrund von Klimarauschen abzuschätzen. Die Abbildung zeigt, daß die Nachweisgröße seit kurzem vom natürlichen Rauschen abweicht. Damit können wir die Hypothese, daß der in den letzten 30 Jahren (1965–1994) beobachtete Anstieg

Abb. 3: (a) Fingerabdruck der Änderungen der oberflächennahen Temperatur durch den vom Menschen verursachten Treibhausgas- und Sulfat-Aerosoleintrag in die Atmosphäre [K]. Der Fingerabdruck gibt das normierte dominante Muster in der Klimasimulation an. Der Fingerabdruck berücksichtigt nur Gegenden, die hinreichend durch Beobachtungsdaten abgedeckt sind. Die restlichen Gebiete sind weiß gezeichnet.



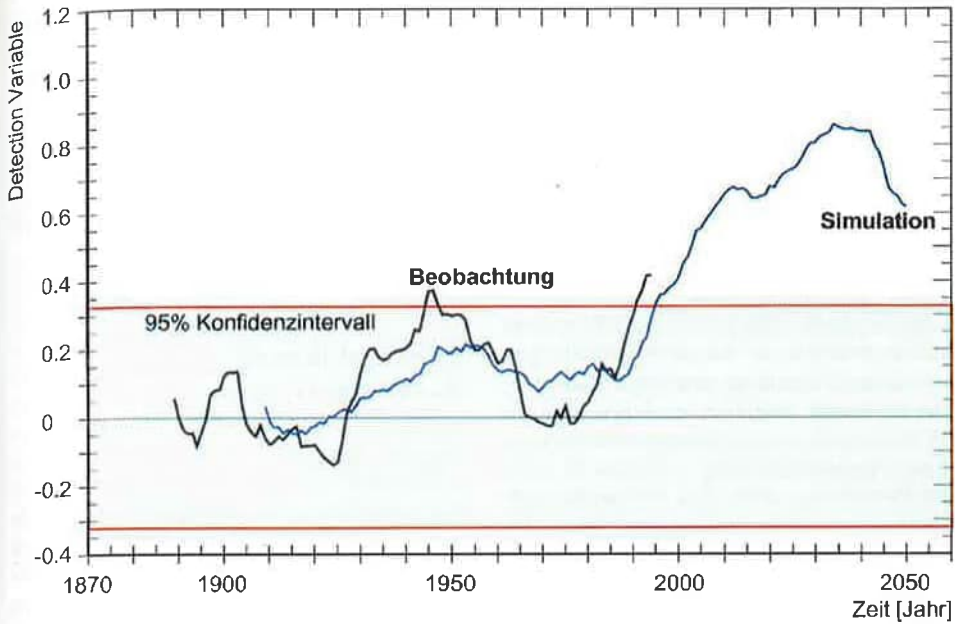


Abb. 3: (b) Entwicklung der Nachweisgröße (detection variable) in 30jährigen Temperaturrends in den Beobachtungen (schwarz) und in der Modellwelt (blau, Mittel zweier Simulationen). Die Nachweisgröße ist proportional zur Amplitude des Fingerabdrucks, sie ist gegen das letzte Jahr des Trends angetragen (so bezeichnet „1994“ die Nachweisgröße für die Periode 1965–1994). Der graue Balken bezeichnet das 95% Konfidenzintervall für Schwankungen der Nachweisgröße aufgrund der Klimavariabilität.

der bodennahen Lufttemperatur ein Teil der natürlichen Variabilität ist, mit einem Risiko von weniger als 5% zurückweisen (formal sogar nur 2,5%, weil ein einseitiger Test nach positiven Ausschlägen der Nachweisgröße durchgeführt wurde). Die blaue Kurve in Abbildung 3 b zeigt den Verlauf der Nachweisgröße, wie er vom Klimamodell vorhergesagt wird (die Schwankungen sind hier durch Mitteln von zwei Experimenten reduziert). Die derzeitige anomale Höhe der Nachweisgröße in den Beobachtungen stimmt mit der Modellvorhersage überein.

Allerdings ist dieses Resultat abhängig von der Annahme, daß die Abschätzung der natürlichen Variabilität durch die Modell- und Beobachtungsdaten ausreichend sei. Generell ist das Klimarasuchen aus den

Kontrollsimulationen in den meisten Modellen schwächer als in den Beobachtungen (die vor dem Vergleich um den modellgeschätzten Temperaturanstieg aufgrund der anthropogenen Emissionen korrigiert wurden). Dies spiegelt allerdings zum Teil auch die extern angetriebene Variabilität in den Beobachtungsdaten (z. B. durch Vulkanausbrüche) wider. Der signifikante Temperaturentrend in der ersten Hälfte des Jahrhunderts (Abb.3 b, bei 1945) ist wohl zum Teil durch das sich damals schon entwickelnde Treibhausgassignal, zum größeren Teil durch ein extremes Ereignis der natürlichen Variabilität erklärbar. Paläoklimatische Daten deuten an, daß dies der stärkste 30jährige Trend der letzten 500 Jahre auf der Nordhalbkugel gewesen sein könnte. Die Tatsache, daß die Abschätzung der Variabilität auch für die verschiedenen Klimamodelle unterschiedlich ausfiel, zeigt allerdings, daß die Abschätzung der internen Klimavariabilität noch gewissen Unsicherheiten unterliegt.

Allerdings läßt sich durch den Nachweis einer statistisch signifikanten Klimaänderung kein kausaler Zusammenhang zwischen dieser Änderung und Änderungen in der Treibhausgaskonzentration herstellen.

Um die Klimaänderung mit der Änderung der Treibhausgaskonzentration in Verbindung zu bringen, müssen wir alle anderen Ursachen einer extern angetriebenen Klimavariation ausschließen können. Trotz der hohen Unsicherheit in unserer Kenntnis der Geschichte der solaren Schwankungen, der Vulkaneruptionen und anderer Ereignisse samt ihrer Auswirkungen auf das Klima, erscheint eine Erklärung der derzeitigen Erwärmung durch diese Faktoren unwahrscheinlich. Die gute Übereinstimmung der Beobachtungen mit dem Modellergebnis sowie Ergebnisse weiterer Studien in den USA und England, in denen z. B. die vertikale Struktur der Temperaturverteilung in der Atmosphäre untersucht wurde, legen die Vermutung nahe, daß die beobachtete signifikante Erwärmung tatsächlich mit dem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in Verbindung steht (*Hegerl, Latif, Venzke*).

Anschrift

Bundesstraße 55
20146 Hamburg
Tel. 0 40/41 17 30
Telefax 0 40/41 17 32 98