

schätzung der Vorhersagbarkeit und der Variabilität des Klimas im Zeitbereich von Monaten bis zu hundert Jahren, insbesondere sollen die quasi-zweijährigen Schwingungen und das El-Niño-Ereignis verstanden werden.

Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Klimamodellentwicklung

In der Klimaforschung gewinnen umfangreiche mathematische Modelle immer mehr an Bedeutung, denn im Klimasystem gibt es zahlreiche komplexe Rückkopplungsmechanismen und Wechselwirkungen auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen, die den externen Antrieb z. B. durch Treibhausgase verstärken oder abschwächen können. Ein sehr wichtiger Prozess ist beispielsweise der Strahlungseffekt von Wolken, der die Erdoberfläche und die untere Atmosphäre durch erhöhte Reflektion der Sonneneinstrahlung abkühlt, aber gleichzeitig durch ihre Absorption und die damit verbundene Rückstrahlung im infraroten Bereich zu einer Erwärmung führt. Satellitenmessungen haben ergeben, daß im heutigen Klima im globalen Mittel eine Abkühlung um etwa 20 W/m^2 überwiegt. Die Wolkenbildung unterliegt in hohem Maße dem Einfluß von Wettergeschehnissen, wie wandernde außertropische Zyklonen, die das Wetter und das Klima in weiten Teilen der Erde bestimmen. Aus diesem Grunde müssen solche Phänomene in den Klimamodellen korrekt simuliert werden.

Extreme Wetter- und Klimasituationen, wie außergewöhnlich warme oder kalte, stürmische, trockene oder feuchte Perioden, sind für Mensch und Gesellschaft weitaus bedrohlicher als die allmähliche Veränderung der globalen Temperatur. Es muß noch genauer untersucht werden, in welchem Ausmaß diese extremen Wettersituationen im zukünftigen Klima mehr oder weniger häufig auftreten und welche Gebiete davon besonders betroffen sein könnten. Im vergangenen Jahr hat die Abteilung für Theoretische Klimamodellierung an der Ent-

wicklung hochauflösender Klimamodelle und deren Verifizierung mit tatsächlichen Beobachtungen gearbeitet. Ziel dieser Arbeit ist es, das heutige Klima genauer zu simulieren, als dies bisher möglich war, und damit zu einem besseren Verständnis der Klimaprozesse auf Zeitskalen von einer Jahreszeit bis zu einem Jahrhundert zu gelangen, um zu erfahren, wie genau und für welchen Zeitraum Klimaprozesse vorhergesagt werden können.

1. Die Rolle der Wolken im Klimasystem. In dem in der Abteilung entwickelten globalen Atmosphärenmodell werden Wolkenschichten auf der Grundlage einer Gleichung für Wassertransport unter Einbeziehung von Quellen und Senken durch Kondensation, Verdunstung und Niederschlag berechnet, wobei Niederschlag das Verbinden von Tröpfchen und die Sedimentation von Eiskristallen beinhaltet. Optische Eigenschaften wie Emission und Strahlungsdichte werden aus der Vorhersage über das Wolkennasser berechnet. Mit Hilfe von Satellitendaten über den Strahlungshaushalt der Erde, die im „Earth Radiation Budget Experiment“ (ERBE) gewonnen wurden, soll gezeigt werden, ob mit dem Modell die Wechselwirkung von Strahlung und Wolken reproduziert werden kann. Der Strahlungsantrieb durch Wolken wird als Differenz zwischen dem Nettostrahlungsbeitrag aufgrund kurzweiliger Abkühlung und langweiliger Erwärmung bei klarem und bei bewölktem Himmel errechnet. Ein Vergleich zeigt, daß der im Modell simulierte Strahlungsantrieb durch Wolken in der Regel im Rahmen der Beobachtungsfehler liegt, d. h. für zonale Mittelwerte bei 10 W/m^2 , jedoch können für kleinere Raumskalen auch größere Fehler auftreten. Ein besonderes Problem ist die Unterschätzung des Strahlungsantriebs durch Wolken über den nördlichen Meeren im Sommer aufgrund zu geringer niedriger Bewölkung im Modell.

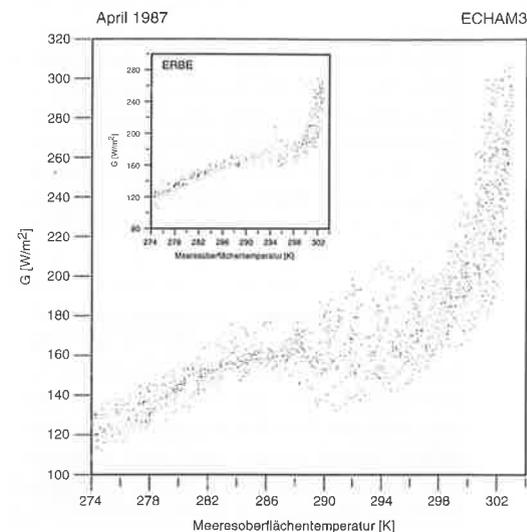
Über tropischen Meeren und in Gebieten, in denen die Lufttemperatur in Bodennähe vergleichsweise hoch ist (über 26°C), haben ERBE-Daten ergeben, daß sich die Absorption der Wärmeabstrahlung der Erde in

Abb. 1: Beobachteter (ERBE) und simulierter (ECHAM3) Treibhauseffekt G als Funktion der Meeresoberflächentemperatur. G ist die Differenz der von der Meeresoberfläche emittierten Schwarzkörperstrahlung und derjenigen am oberen Rand der Atmosphäre, also der von der Atmosphäre durch Treibhausgase (Wasserdampf, Kohlendioxid etc.) und Wolken absorbierte Anteil. Der steile Anstieg von G jenseits von etwa 300K ist auf eine positive Rückkopplung zwischen der Meeresoberflächentemperatur, der Konvektion, dem Wasserdampfgehalt und der von der Atmosphäre absorbierten langwelligen Strahlung zurückzuführen.

der Atmosphäre ab einer bestimmten Oberflächentemperatur schnell verstärkt. Der atmosphärische Wasserdampf nimmt exponentiell mit der Temperatur zu, und ab diesem Schwellenwert übertrifft die Zunahme der Erwärmung durch Absorption den Anstieg durch Schwarzkörperstrahlung (Super-Treibhauseffekt).

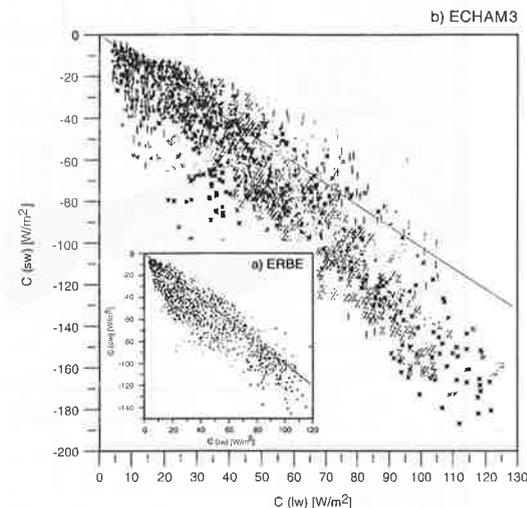
Die hochreichende konvektive Wolkenbildung verstärkt weiterhin die Absorption der Wärmeabstrahlung der Erde, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, in der die aus ERBE berechnete Absorption von langweiliger Strahlung als Funktion der Meeresoberflächentemperatur über dem Pazifischen Ozean dargestellt ist. Die gleichen Berechnungen wurden mit dem Klimamodell (ECHAM3) durchgeführt. Die Abbildung zeigt, daß die Übereinstimmung sehr gut ist. Die konvektiven Wolken dringen hoch in die Atmosphäre. Wenn sie die Tropopause erreichen, werden großflächige Cirrus-Wolken erzeugt, die verhindern, daß die Sonnenstrahlung bis zur Erdoberfläche durchdringt. Diese Decke aus Cirrus-Wolken verstärkt die Albedo und führt damit, wie aus den ERBE-Daten in Abbildung 2a ersichtlich ist, zu einer kompensierenden Abkühlung – die reflektierte Sonneneinstrahlung kompensiert die Erwärmung durch Absorption langweiliger Strahlung – de facto kommt es zu einem Thermostat-Effekt!

Dieser Thermostat-Effekt spielt eine wichtige Rolle bei der Regulierung der Oberflächentemperatur über großen Gebieten des tropischen Ozeans und ist ein Beispiel für



die vielen komplexen Rückkopplungsprozesse, die das Klima auf der Erde bestimmen. Abbildung 2b zeigt, wie gut das in der Abteilung entwickelte Klimamodell die

Abb. 2: Korrelation zwischen langweiliger Absorption (Treibhauseffekt) und kurzweiliger Reflektion (Albedo-Effekt). a) ERBE Beobachtungsdaten, b) Modellberechnungen.



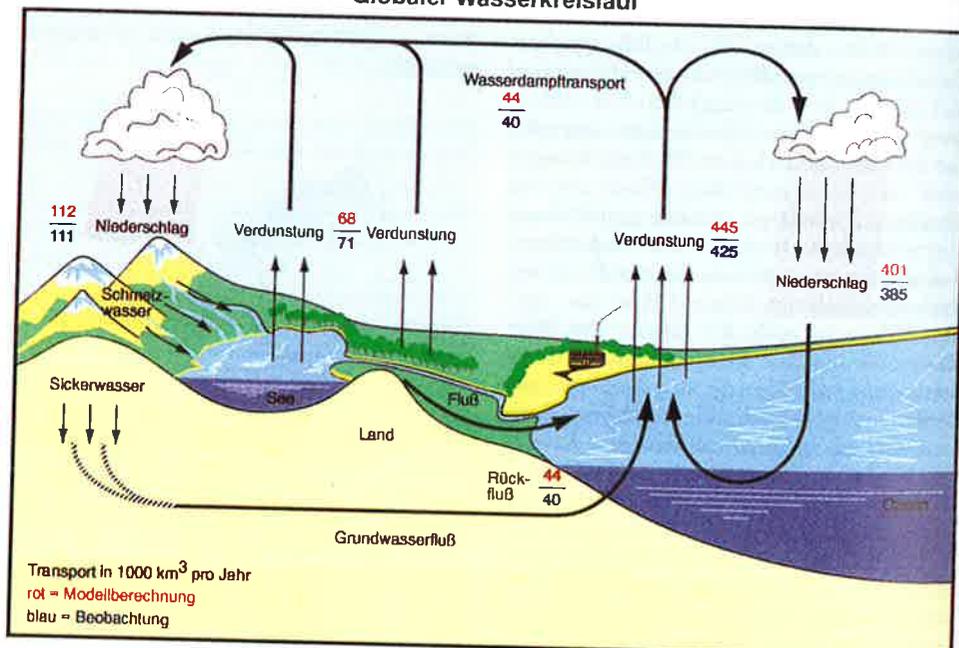
sen komplizierten Prozeß reproduzieren kann.

2. *Der Wasserkreislauf.* Wasser ist in vielen Teilen der Welt ein knappes Gut, und mit Bevölkerungswachstum und zunehmender Industrialisierung wird die Lage immer ernster. Natürliche kurz- und langfristige Klimavariationen haben dramatische Auswirkungen auf den Niederschlag. Die Veränderung des Niederschlags beim El-Niño-Phänomen ist ausreichend bekannt, ebenso wie die langfristigen Veränderungen über Jahrzehnte, wie zum Beispiel in der Sahelzone in Afrika. Untersuchungen der Klimaveränderungen durch erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre deuten darauf hin, daß systematische Veränderungen zu einem häufigeren Auftreten extremer Wettersituationen, wie etwa zu Dürre im Mittelmeerraum, führen können. Eine geeignete Simulation des Niederschlags setzt ein Modell mit großer horizontaler Auflösung voraus, um die Wettersysteme, einschließlich starker Wirbelstürme und Gebiete mit frontalem Niederschlag, befriedigend aufzulösen. Ebenso

wichtig ist es, orographische Hindernisse gut darzustellen, denn die Topographie einer Region hat einen wichtigen Einfluß auf den Niederschlag. Die heute zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten erlauben noch keinen umfassenden Modellversuch zur detaillierten Darstellung des Wasserkreislaufs, so daß zur Zeit nur die großskaligen Komponenten untersucht werden können. Abbildung 3 zeigt den globalen jährlichen Wasserkreislauf, wie er aus Beobachtungen abgeschätzt wird und im Klimamodell existiert. Niederschlag und Verdunstung über Land und Meer werden direkt mit dem Modell berechnet, während der Feuchtigkeitstransport zu den Kontinenten und der Wasserablauf durch Flüsse als Bilanzbetrachtungen erhalten werden. Die Einheit ist dabei 1000 km^3 pro Jahr. Die Übereinstimmung zwischen Schätzungen aus Beobachtungen und berechneten Werten liegt im Rahmen der zur Verfügung

Abb. 3: Globaler Wasserkreislauf in 1000 km^3 pro Jahr. Rot: Modellberechnungen. Blau: Beobachtungen.

Globaler Wasserkreislauf



stehenden Klimaabschätzungen und spiegelt möglicherweise eher den Stand hydrologischer Beobachtungen als die Genauigkeit des Modells wider. Angemessenere Beobachtungen sind erforderlich, um den Wasserkreislauf besser abschätzen zu können. Die Abteilung beteiligt sich daher aktiv an dem internationalen Forschungsprogramm GEWEX (Global Energy and Water Experiment) und unterstützt dieses Programm mit systematischen numerischen Experimenten.

Sulfat-Aerosol-Antrieb. Zusätzlich zu den Treibhausgasen in der Atmosphäre können auch atmosphärische Aerosole das Klima beeinflussen. So bilden zum Beispiel biogene und anthropogene Sulfate Sulfat-Aerosolpartikel, die über Rückstreuung der Sonneneinstrahlung einen direkten und über ihre Fähigkeit, den Kondensationskern für Wolkentropfen zu bilden, auch einen indirekten Einfluß auf das Klima haben. In beiden Fällen besteht die Tendenz einer Absenkung der globalen Temperatur, und damit wird der erwarteten globalen Erwärmung durch den anthropogenen Treibhauseffekt entgegengewirkt. Die Auswirkung der Aerosolpartikel unterscheidet sich jedoch von der durch Treibhausgasen und ist meist lokal und regional begrenzt. Der Grund dafür ist, daß die Verweildauer von Sulfatpartikeln in der Atmosphäre nur etwa eine Woche beträgt, während einige Treibhausgasen wie CO_2 und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe eine Verweildauer von mehr als einem Jahrhundert haben.

Ein Experiment, das in der Abteilung durchgeführt wurde und in das sowohl Treibhausgasen als auch Sulfataerosole einbezogen wurden, zeigt, daß der Antrieb durch Sulfataerosole die gegenwärtige Erwärmung durch Treibhausgasen über großen Teilen der nördlichen Hemisphäre ausgleichen könnte. Dieser Vorgang könnte dazu beigetragen haben, daß die beobachtete Erwärmung der Atmosphäre geringer gewesen ist als die aufgrund der Treibhausgasen berechnete Erwärmung. In dem in der Abteilung vorgenommenen Experiment wurde als Kontrollklima das Klima des vorindustriellen Zeitalters gewählt. Die Konzentra-

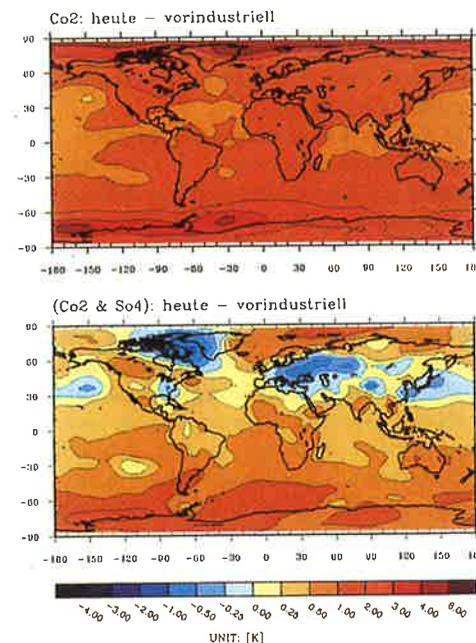


Abb. 4: Oben: Änderung der bodennahen Lufttemperatur [K] im langjährigen Jahresmittel auf Grund der Zunahme atmosphärischer Spurengase und Aerosole während der letzten 100 Jahre. a) Oben: Modellreaktion als Folge einer Zunahme der äquivalenten CO_2 -Konzentration von 40%. b) Unten: Wie oben mit zusätzlicher Berücksichtigung von anthropogenem Sulfataerosol.

tion an Treibhausgasen entspricht damit der vor etwa 250 Jahren. Im heutigen Klima ist die Konzentration an CO_2 und anderer Treibhausgasen etwa 40% höher. Abbildung 4a zeigt die Differenz zwischen dem gegenwärtigen Klima und dem vorindustriellen Klima aufgrund der Treibhausgasen, Abbildung 4b außerdem noch die zusätzlichen Auswirkungen von Sulfataerosolen. In dieser Untersuchung wurde nur die Rückstreuung der Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Die direkte Auswirkung der heute anthropogen entstandenen Sulfataerosole ist eine globale jährliche Abkühlung um etwa $0,5^\circ\text{C}$. Die Abkühlung ist mit $0,7^\circ\text{C}$ in der nördlichen Hemisphäre größer als mit $0,3^\circ\text{C}$ in der südlichen Hemisphäre. Wie Abbildung 4b zeigt, kann der Antrieb

durch Sulfataerosole die gegenwärtige Erwärmung durch Treibhausgase für Teile der nördlichen Hemisphäre besonders im Sommer ausgleichen.

Die Gleichgewichtsreaktion aufgrund des gegenwärtigen Antriebs durch Treibhausgase und durch anthropogene Sulfate ist $0,5^{\circ}\text{C}$ im globalen jährlichen Mittel. Dies stimmt größtenteils mit der berechneten Erwärmung aus Beobachtungsdaten der letzten 100 Jahre ($0,45^{\circ}\text{C} \pm 0,15^{\circ}\text{C}$) überein. Diese Übereinstimmung sollte jedoch nicht überbewertet werden, denn andere wichtige Prozesse, wie die Reaktion auf die

Zirkulation in den Tiefen der Ozeane oder der sukzessive Anstieg der Treibhausgase und der Sulfataerosole, sind in dieser Studie nicht berücksichtigt worden. Dennoch sind die Ergebnisse ermutigend und zeigen, wie wichtig und interessant das Thema Klimaveränderung sein kann.

Anschrift

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