

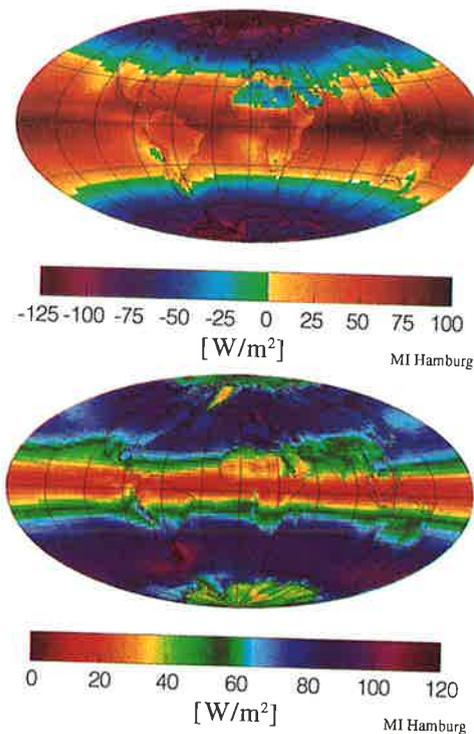
Monaten bis zu hundert Jahren, insbesondere sollen die quasi-zweijährigen Schwingungen und das El Niño-Ereignis verstanden werden.

Aktueller Forschungsschwerpunkt

Gütestest für Klimamodelle

Die Diskussion über zukünftige Klimaänderungen wird überwiegend mit den Ergebnissen der numerischen Modelle der allgemeinen Zirkulation in Ozean und Atmosphäre geführt. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe: Erstens kann eine Klimaänderung als Folge veränderter Zusammensetzung der Atmosphäre nur um Jahrzehnte verzögert in Klimameßreihen zuverlässig erkannt werden, und zweitens können Kli-

Abb. 1: Die von Satelliten aus gemessene Strahlungsbilanz der Erde, angegeben als mittlere Nettostrahlungsflußdichte am Oberrand der Atmosphäre für die Zeit von Februar 1985 bis Januar 1989 (oben) und als Standardabweichung davon (unten).



maänderungen bei unterschiedlichem Verhalten der Menschen nur mit Modellen in sogenannten Szenarienrechnungen abgeschätzt werden.

Die Komplexität der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre, Ozean, Eisgebieten und Landoberflächen mit Vegetation bedeutet aber gleichzeitig, daß die Modelle nur eine grobe Nachbildung der Realität sind. Im folgenden soll deshalb nicht mehr gezeigt werden, daß gegenwärtige Modelle die breitenabhängige Temperaturverteilung oder die mittleren Strömungen für gegenwärtiges Klima richtig wiedergeben, sondern fähig sind, sich auf schwierigerem Terrain zu bewähren. Zeigen sie z.B. die korrekte geographische Verteilung und Größe der Abschirmung vor Wärmeverlust durch die Wolken? Kann die Frage mit Ja beantwortet werden, wären Häufigkeit, Höhe und optische Eigenschaften von Wolken regional richtig im Modell nachgebildet, wäre erheblich mehr Vertrauen als bisher in Klimamodellrechnungen gerechtfertigt. Die Modellabschätzungen zukünftigen Klimas könnten nicht nur mit intelligenteren politischen Maßnahmen verbunden werden, sondern wegen der Überzeugungskraft vielmehr erst dazu Anlaß sein.

Die globalen Vergleichsdaten

Zu einem so verschärften Gütestest der Klimamodelle sind zuverlässige globale Datensätze notwendig. Diese werden in zunehmendem Maße von Satelliten, also aus dem Weltraum, geliefert. Durch die Kombination von drei amerikanischen Satelliten ist das für die Strahlungsbilanz der Erde, für ihre Variabilität sowie den Wolkeneinfluß auf den Sonnenstrahlungs- und den Wärmestrahlungsbereich der Fall. Abbildung 1 zeigt für ein vier-Jahresmittel vom Februar 1985 bis zum Januar 1989 die geographische Verteilung der Strahlungsbilanz der Erde. Neben Erwartetem, nämlich der stark negativen Bilanz (also Energieverlust) an den geographischen Polen und dem starken Gewinn in den Tropen, sticht allerdings auch hervor, daß das System Atmosphäre-Oberfläche über den großen Wü-

sten der Subtropen, vor allem der Sahara, ein Gebiet negativer Strahlungsbilanz ist. Diese Gebiete müssen über die Atmosphäre Energie von angrenzenden (Ozean-)Gebieten zugeführt bekommen, um sich nicht abzukühlen. Der untere Teil der Abbildung gibt Auskunft über die Variabilität. Da als Ausgangswerte Monatsmittel gewählt wurden, ist die gezeigte Standardabweichung hauptsächlich ein Maß für den Jahresgang, denn Wetterereignisse sind durch die Mittelung über einen Monat bereits entfernt worden.

Der Jahresgang ist demnach – mit etwas über 100 Wm^{-2} Standardabweichung – bei uns und um die Antarktis besonders ausgeprägt und erstaunlicherweise geringer in den Polargebieten. Der Grund dafür ist die hohe Rückstreuung von Sonnenenergie durch die Schnee- und Eisflächen. Bleibt die Schneefläche, wie im Inneren Grönlands auch im Sommer eine hochliegende kalte Pulverschneefläche, ist die Variabilität so klein wie die in tropischen Regionen. Global gemittelt erhält man aus Daten wie denen im oberen Teil von Abbildung 1 sogar ein Maß für die Genauigkeit des Datensatzes. 5 Wm^{-2} im globalen vier-Jahresmittel zeigen genau den mittleren Fehler, denn im langfristigen Mittel muß die Strahlungsbilanz der Erde ausgeglichen sein.

Modellgütestest für die Abschirmung der Abstrahlung durch Wolken

Wolken gehören neben Wasserdampf und Kohlendioxid zu den wichtigsten Größen für den Strahlungshaushalt der Erde. Eine detaillierte Wolkensimulation ist in heutigen globalen Klimamodellen mit Rechengittern von 200–500 km in der Horizontalen und wenigen Kilometern in der Vertikalen nicht möglich. So wird der Bedeckungsgrad in einem Gittervolumen als Funktion der relativen Feuchte dargestellt, wobei die optischen Eigenschaften der Wolken in Anlehnung an Feldmessungen als Funktion der Höhe und des Wassergehaltes vorgeschrieben werden.

Im Hamburger Zirkulationsmodell ECHAM, das aus dem Wettervorhersage-

modell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage hervorgegangen ist, entstehen und vergehen Wolken als Teil des Wasserkreislaufs. Eine Weiterentwicklung der physikalisch begründeten Ansätze zur Bildung von Wolken ist weiterhin geboten, weil Rückkopplungen zwischen Wolken und Klima zur Modifikation des anthropogenen Treibhauseffektes beitragen können.

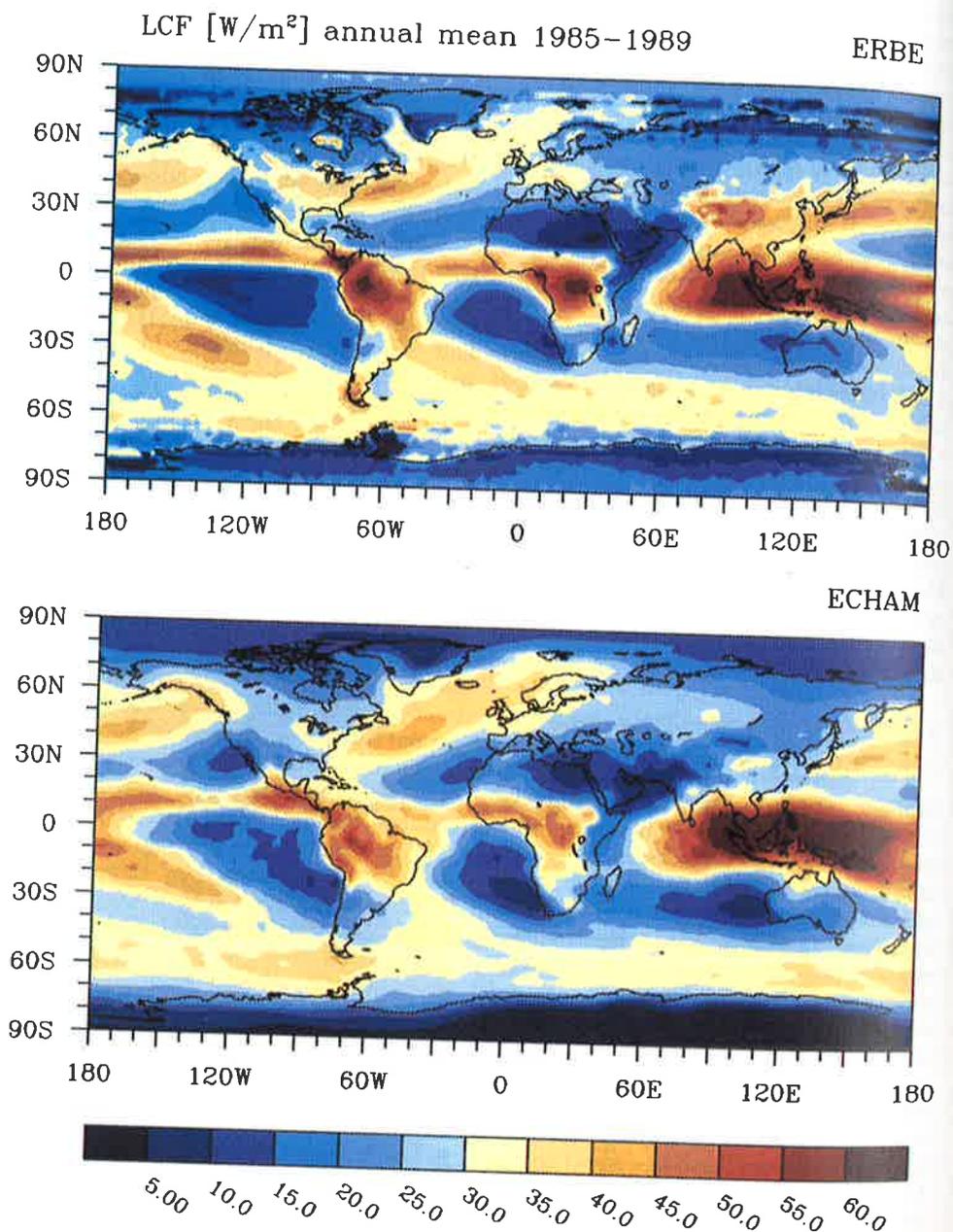
Trotz der Fortschritte in der Satellitenfernerkundung ist die dreidimensionale Verteilung von Wolkenparametern wie Bedeckungsgrad, Wassergehalt oder optische Dicke noch nicht ausreichend bekannt. Eine Alternative besteht darin, nur den Einfluß der Wolken auf die Strahlungsbilanz der Erde zu analysieren, so daß der Umweg über Wolkenerkennungsverfahren entfällt. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, daß sie den integralen Effekt aller Wolkenparameter auf die Strahlungsbilanz und damit auf das Klima der Erde liefert. Ein Nachteil liegt darin, daß die vertikale Verteilung des Wolken-Strahlungseffektes nicht getestet werden kann, so daß sich die Validierung von Klimasimulationen auf den vertikal integrierten Effekt, also die Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre, beschränken muß.

Wolken beeinflussen die planetare Strahlungsbilanz in zweifacher Hinsicht: Im globalen Jahresmittel werden etwa 15 Prozent der am Außenrand der Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung (dies entspricht einer Energieflußdichte von etwa 50 W/m^2) von den Wolken in den Weltraum zurückgestreut. Andererseits verringern Wolken aber die Wärmeabgabe der Erde an den Weltraum durch Absorption eines Teiles der von der Erdoberfläche und der Atmosphäre emittierten Infrarotstrahlung (etwa 30 W/m^2 im globalen Jahresmittel). Im Mittel kühlen Wolken also die Erde, weil die zurückgestreute Sonnenenergie (der sogenannte Albedoeffekt der Wolken) um etwa 20 W/m^2 größer ist als die absorbierte Infrarotstrahlung der Wolken.

Regional und auch jahreszeitlich gibt es jedoch große Unterschiede. In Gebieten mit geringer Sonneneinstrahlung überwiegt die

Abschirmung von Wärmestrahlung, also in hohen Breiten im Winter. Umgekehrt überwiegt der Wolken-Albedoeffekt in niederen Breiten und erreicht Maximalwerte von bis zu 150 W/m^2 im Monatsmittel in Gebieten mit hoher Sonneneinstrahlung und dunkler

Abb. 2: Reduktion der Wärmeabstrahlung durch Wolken, vom Satelliten gemessen (ERBE) und vom Klimamodell berechnet (ECHAM) in W/m^2 . Man beachte die besonders abschirmende Wirkung der Wolken in den inneren Tropen.



Erdoberfläche, also in stark bewölkten Gebieten über Ozeanen und Subtropen sowie der mittleren Breiten in den Sommermonaten.

Die Abbildung 2 zeigt als Beispiel einen Vergleich von gemessenem (oben) und simuliertem Wolkeneinfluß auf die Wärmeabstrahlung (longwave cloud forcing, LCF) über einen Zeitraum von etwa 5 Jahren. Bei den Messungen handelt es sich, wie oben schon berichtet, um Analysen von Satellitendaten, die während des „Earth Radiation Budget Experiment“ von Februar 1985 bis einschließlich Januar 1990 gewonnen wurden. Die Modellsimulation mit dem ECHAM-Modell bezieht sich auf diesen Zeitraum nur insoweit, als die Temperatur der Meeresoberfläche gemäß Beobachtungen als untere Randbedingung vorgeschrieben war. Meßdaten und Modellsimulation zeigen qualitativ fast überall und sogar quantitativ in weiten Teilen gute Übereinstimmung. Der Wolkeneffekt ist besonders groß (bis 80 W/m^2 Abschirmung im Jahresmittel) in Gebieten mit hochreichender Konvektion entlang der äquatornahen tropischen Konvergenzzone, über tropischen Kontinenten und insbesondere im Gebiet mit Wassertemperaturen ganzjährig über 28°C im indonesischen Raum). Die abstrahlende Wolktoberfläche ist hier besonders hoch (bis 17 km) und besonders kalt (bis -90°C), so daß die Wärmeabstrahlung in den Weltraum trotz der hohen Wassertemperaturen gering bleibt. Relativ groß ist der Wolkeneffekt auch in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung, also über den Ozeanen der mittleren Breiten. Dagegen ist der Effekt klein in den Wüstengebieten sowie in Gebieten mit überwiegend niedrigen Wolken (trotz hohen Bedeckungsgrades), weil sich dort die Temperatur der Wolkoberfläche nur unwesentlich von derjenigen der Erdoberfläche unterscheidet.

Systematische Abweichungen zwischen Messung und Modellsimulation sind insbesondere über den Kontinenten der niederen Breiten erkennbar (Südamerika, Afrika und asiatisches Monsungebiet). Hier neigt das Modell zu einer Unterschätzung des Wolkeneffektes. Auch der Jahresgang des Wolkeneffektes auf die Wärmeabstrahlung (hier nicht gezeigt) wird gut vom Modell wiedergegeben, so daß die bisher wesentlichste Unsicherheit des Wolkeneffektes bei globaler Erwärmung, ob bei globaler Erwärmung Verstärkung oder Abschwächung der bisherigen Kühlung durch Wolken auftritt, als zum Teil vorgeklärt gelten kann. Denn die korrekte Simulation des Jahresganges, einer starken systematischen Änderung, ist ein erster Hinweis auf korrekte Behandlung von anderen systematischen Änderungen. Ein weiteres Problem der Wolkenmodellierung (hier nicht gezeigt) besteht darin, daß Schichtwolken geringer Mächtigkeit, wie sie häufig über den subtropischen Ozeanen auftreten, wegen der zu groben vertikalen Modellauflösung nur unzureichend erfaßt werden können.

Die nächste Bewährungsprobe der Modelle steht bevor, wenn es gelingt, aus Satellitenbeobachtungen globale Datensätze der Energiebilanz an der Erdoberfläche bereitzustellen.

Der vorgestellte Gütetest ist ein gemeinsamer Erfolg der Abteilungen Klimamodellierung und Klimaprozesse des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, die bei den Satellitendaten vom meteorologischen Institut der Universität Hamburg und dem GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht unterstützt wurden.

Anschrift

Bundesstraße 55, 20146 Hamburg
Tel. 0 40/41 17 39
Telefax 0 40/41 17 32 98