

## Das Klima des 20. und 21. Jahrhunderts

Mojib Latif\*

Nach dem kürzlich erschienenen Bericht des "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC), einem Gremium des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP), hat sich die globale Mitteltemperatur der Erdoberfläche im 20. Jahrhundert um etwa 0.6 Grad erhöht, wobei die 90er Jahre die wärmsten seit Beginn der instrumentellen Temperaturmessungen waren. Für diesen Erwärmungstrend kann es mehrere Gründe geben, und es gehört zu den Aufgaben der Klimamodellierung, die Ursachen zu identifizieren. In Frage kommen natürliche Prozesse durch interne Wechselwirkungen, Änderungen von Sonneneinstrahlung und Vulkanausbrüchen sowie anthropogene Einflüsse wie geänderte Landnutzung und Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre durch Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle und Öl. Hierdurch werden Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) freigesetzt, die die Wärmeabstrahlung in den Weltraum blockieren und damit zu einer Erwärmung beitragen, aber auch Aerosole (kleine Partikel wie Staub und andere Stoffe), die einen Abkühlungseffekt haben, da sie einen Teil der Sonnenstrahlung zurückstreuen und auch die Wolkenbildung begünstigen.

Eine quantitative Abschätzung des menschlichen Einflusses auf das Klima ist nur mit Hilfe von Computermodellen des gesamten Klimasystems möglich. Dazu gehört der physikalische Teil, also die dynamischen und thermodynamischen Prozesse in Atmosphäre und Ozean inklusive der Landoberflächen und Eisgebiete, ebenso wie diverse biogeochemische Kreisläufe (Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff, Methan, Ozon usw.). Die Kopplung von physikalischen Klimamodellen mit biogeochemischen Kreislaufmodellen ist bisher nur ansatzweise realisiert worden. Ein Modell des Gesamtsystems, das alle wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten beschreibt, existiert noch nicht. Daher wird die Zusammensetzung der Atmosphäre, die durch diese Prozesse gesteuert wird, in Klimamodellen nicht berechnet, sondern vorgegeben (gemäß Beobachtungen oder extern berechnet mit Hilfe biogeochemischer Modelle).

Klimamodelle werden insbesondere für die Simulation zukünftiger Klimazustände genutzt, um Risiken anthropogener Emissionen abzuschätzen. Allerdings müssen Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Emissionen gemacht werden (abhängig von Weltbevölkerung, Energieverbrauch usw.). Die erwarteten Emissionen werden in biogeochemische Modelle eingegeben und die zeitliche Entwicklung der

---

\* Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr. 55, D-20146 Hamburg, Tel. +49 (40) 41173-0, Fax: -173; email: latif@dkrz.de

atmosphärischen Konzentrationen von CO<sub>2</sub> und anderen Spurenstoffen berechnet. Auf der Basis dieser Daten können Klimamodelle die zukünftige Klimaentwicklung hochrechnen. Die Glaubwürdigkeit der Prognosen hängt von der Qualität der Modelle ab. Die Qualitätskontrolle ist daher ein wichtiger Bestandteil der Modellentwicklung. So kann z.B. untersucht werden, bis zu welchem Grad Klimamodelle in der Lage sind, beobachtete Trends zu reproduzieren, z.B. die Klimaentwicklung der vergangenen 100 Jahre. Dieser Zeitraum bietet sich an, weil sowohl die Zusammensetzung der Atmosphäre als auch das Klima relativ gut bekannt sind.

Mit einem am Institut entwickelten Modell wurde die Klimaentwicklung von 1860 bis zum Jahre 2100 berechnet. Das Modell enthält folgende Komponenten, die synchron miteinander gekoppelt sind:

- Atmosphäre (Wind, Temperatur, Wasserdampf, Wolken)
- Ozean (Strömung, Temperatur, Salzgehalt)
- Meereis (Eisdicke, eisbedeckte Fläche)
- Landoberflächen (Temperatur, Wassergehalt, Schnee)
- Flüsse (an den Flussmündungen wird der kontinentale Abfluss in den Ozean geleitet)
- Schwefelkreislauf (Schwefeldioxid und Sulfataerosole)

Unverändert bleiben im Modell die Vegetation (abgesehen vom Jahresgang) sowie das Inlandeis (Grönland, Antarktis). Die horizontale Gitterauflösung beträgt etwa 300 km. Allerdings wird zur Erfassung von El Niño Ereignissen, eine der Hauptquellen natürlicher Klimavariabilität, das ozeanische Gitter in niederen geographischen Breiten verfeinert (etwa 50 km in Äquatornähe). Der vertikale Gitterabstand in der Atmosphäre variiert zwischen 60 m nahe der Erdoberfläche und 7 km in der obersten Modellschicht in etwa 30 km Höhe. Im folgenden werden drei Modellexperimente diskutiert:

(1) "Referenzexperiment": Die Zusammensetzung der Atmosphäre sowie alle anderen externen Einflussgrößen werden zeitlich konstant vorgegeben (abgesehen von täglichen und jährlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung). Damit können Klimaschwankungen allein durch interne Wechselwirkungen erzeugt werden.

(2) "Treibhausgase": Die atmosphärische Konzentration von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen (Methan, Lachgas und diverse FCKWs) werden als Funktion der Zeit vorgegeben (von 1860 bis 1990 wie beobachtet, von 1990 bis 2100 nach einem "business-as-usual" IPCC Szenarium). Die Aerosolkonzentrationen ändern sich nicht.

(3) "Treibhausgase + Aerosole": Zusätzlich zu den Treibhausgasen nehmen hier auch die Aerosole mit der Zeit zu. Sulfataerosole werden auf der Basis vorgegebener Emissionen innerhalb des Klimamodells berechnet. Für den Zeitraum 1860 bis 1990 basieren die Emissionsdaten auf Schätzungen von Energieverbrauch, Schwefelgehalt der verwendeten Brennstoffe usw., während für den Zeitraum 1990 bis 2050 die

verwendeten Emissionen auf einem IPCC Szenarium beruhen. Zusätzlich wird die zeitliche Entwicklung der troposphärischen Ozonverteilung vorgegeben. Diese wurde nicht innerhalb des Klimamodells berechnet, sondern "extern" mit Hilfe eines Chemie-Transport-Modells, wobei die Emissionen der Vorläufersubstanzen von Ozon (Stickoxide u.a.) in zeitlicher Entwicklung vorgegeben wurden, der Klimazustand aber unverändert blieb.

Anders als in (1) sind in den Experimenten (2) und (3) auch extern angeregte Klimaschwankungen und insbesondere längerfristige Trends zu erwarten. Durch Vergleich von (2) und (3) kann auch die gemeinsame Wirkung von Sulfataerosolen und troposphärischem Ozon auf die vergangene und zukünftige Klimaentwicklung abgeschätzt werden. Auf diese Weise ist es möglich, Mechanismen zu identifizieren,

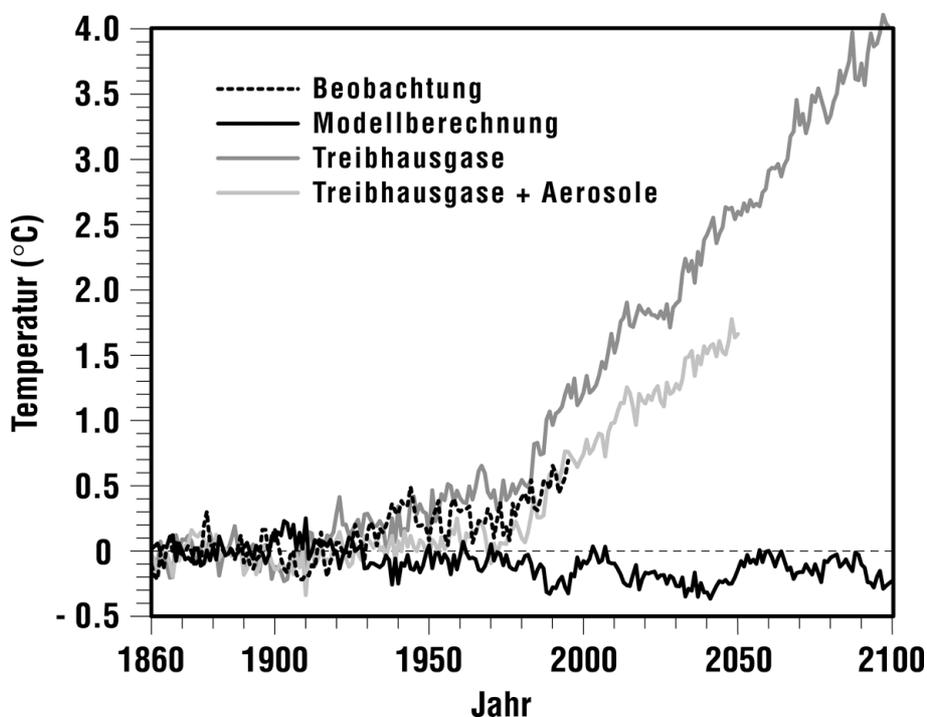


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf von simulierter und beobachteter globaler Jahresmitteltemperatur in Erdbodennähe (2m über Grund) als Abweichung von den jeweiligen Mittelwerten der Jahre 1860 bis 1890.

die für die Klimaentwicklung seit 1860 eine Rolle gespielt haben. Ein Beispiel zeigt Abb. 1, in der die simulierten zeitlichen Entwicklungen der globalen Mitteltemperatur in Oberflächennähe sowie die entsprechenden Beobachtungen (bis 1995) dargestellt sind. Wie erwartet treten im Referenzexperiment (1) zwar jährliche und längerfristige Variationen der Temperatur in der Größenordnung von einigen Zehntel Grad auf, es wird aber kein nennenswerter langfristiger Trend simuliert. Zu beachten ist, dass die Jahreszahlen für dieses Experiment keine Bedeutung haben, da die atmosphärische Zusammensetzung zeitlich konstant ist. Die Wirkung ansteigender Treibhausgaskonzentrationen seit Beginn der Industrialisierung äußert sich im Experiment (2) als allmähliche globale Erwärmung, die jedoch früher als beobachtet einsetzt und insgesamt auch zu stark ausfällt. Der beobachtete Trend der vergangenen 30 Jahre wird in Experiment (3) am besten simuliert, während die beobachtete Erwärmung zwischen 1910 und 1940 nicht reproduziert wird. In diesem Zeitraum ist allerdings der CO<sub>2</sub> Anstieg noch vergleichsweise gering, so dass vermutet werden kann, dass es sich hier um eine zufällige natürliche Klimaschwankung handelt, zumal Temperaturänderungen in dieser Größenordnung auch im Referenzexperiment (1) vorkommen. Nicht auszuschließen ist ein Zusammenwirken mit natürlichen externen Faktoren wie Änderungen von Sonnenstrahlung und Vulkanismus (tatsächlich war in den 30er Jahren die vulkanische Aktivität relativ gering).

Diese Ergebnisse sind im Einklang mit dem kürzlich erschienenen IPCC Bericht, der den beobachteten Erwärmungstrend der vergangenen 30 Jahre mit hoher Wahrscheinlichkeit auf anthropogene Aktivitäten zurückführt, die zu einem Anstieg von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre sowie von Sulfataerosolen geführt haben.

Aufgrund der Hochrechnungen bis zum Jahre 2100 in Experiment (2) bzw. bis zum Jahre 2050 in Experiment (3) wird ein weiterer Temperaturanstieg erwartet, der deutlich über dem im 20. Jahrhundert beobachteten bzw. simulierten liegt. Danach wird sich der Erwärmungstrend der vergangenen Jahrzehnte bei unveränderter Zuwachsrate der Treibhausgase linear fortsetzen.

Neben der Temperatur als einem der wichtigsten Umweltparameter liefern Klimamodelle auch Informationen über Niederschlag, Wolken, Wind und viele andere messbare Größen. Von großer Bedeutung für die Risikoabschätzung zukünftiger anthropogener Emissionen ist vor allem auch die Frage nach möglichen Änderungen von Extremereignissen (Dürren, Überschwemmungen, Stürme usw.). In Abb. 2a wird die Häufigkeit von ausgeprägten Tiefdrucksystemen (Zyklonen) im Nordatlantik in Experiment (2) zum "heutigen" Zeitpunkt (Dekade 1980-90) gezeigt. Prozesse dieser Intensität werden in Klimamodellen wegen ihrer groben Gitterstruktur systematisch unterschätzt. Tatsächlich ist die beobachtete Zahl von Extremzyklonen in den Wintermonaten etwa doppelt so hoch. Andererseits wird die räumliche Verteilung mit einem Maximum südöstlich von Grönland in der Modellsimulation relativ gut getroffen. Zum Zeitpunkt der CO<sub>2</sub>-Verdoppelung in diesem Experiment, in den Jahren 2060-2070, nimmt die Zahl dieser Ereignisse gemäß Abb. 2b systematisch zu, mit

den stärksten Änderungen in der Labradorsee, der Dänemarkstraße zwischen Grönland und Island sowie im Europäischen Nordmeer. Die Zunahme dieser Ereignisse hat Konsequenzen für die Starkwindverteilung über Kanada, Europa und dem Atlantik. (Abb. 2c) Während in den nördlichen Gebieten eine Zunahme simuliert wird, nehmen in den südlichen Regionen wie dem Mittelmeerraum die Starkwindereignisse ab. Eine Zunahme von Extremzyklonen und Windgeschwindigkeiten wurde in den letzten 30 Jahren über dem Nordatlantik tatsächlich beobachtet. Ob diese Änderungen schon ein Indiz für einen zunehmenden Treibhauseffekt sind, ist allerdings umstritten. In den Modellrechnungen ist dieser Effekt erst in einem stärker gestörten Klima erkennbar.

Die hier diskutierten Ergebnisse zeigen, dass das am Institut entwickelte Modell in der Lage ist, den beobachteten Klimatrend im 20. Jahrhundert in guter Näherung zu reproduzieren, wenn die wichtigsten anthropogenen Einflussgrößen wie Treibhausgase und Sulfataerosole berücksichtigt werden. Dies gilt nicht nur für die globale Mitteltemperatur, sondern auch für die arktische Eisausdehnung sowie für den Wärmeinhalt der großen Ozeanbecken. Hochrechnungen zukünftiger Klimazustände (Szenarienexperimente) zeigen, dass die in den letzten 30 Jahren beobachteten und simulierten Klimatrends praktisch linear in die Zukunft extrapoliert werden können, wenn unverminderte Zuwachsraten für die Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen sowie Aerosolen angenommen werden. Dies hat nicht nur Konsequenzen für die Änderung der Temperatur und anderer Klimaparameter, sondern möglicherweise auch für die Häufigkeit von Extremereignissen.

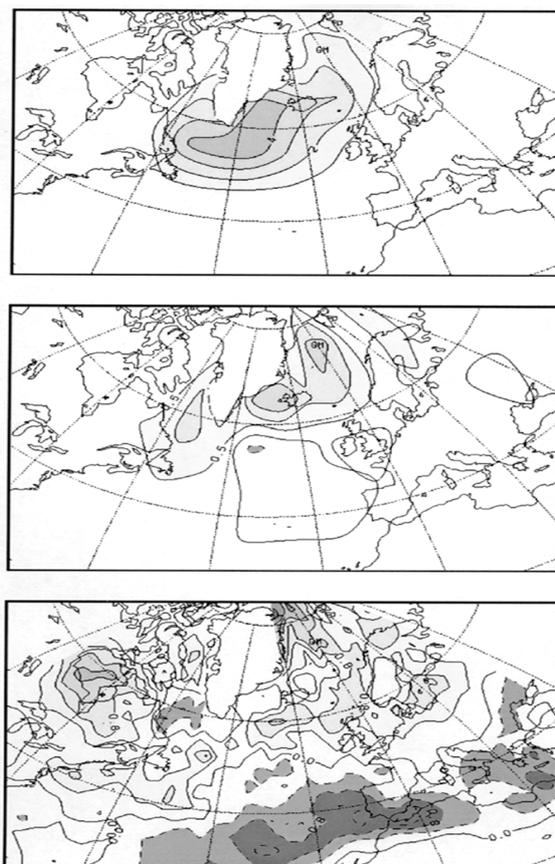


Abb. 2: a) Zahl von extremen Zyklonen mit einem Kerndruck  $< 970$  hPa in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) als Mittelwert über die Jahre 1980 bis 1990 im "Treibhausgasexperiment", in dem  $\text{CO}_2$  und andere Treibhausgase als Funktion der Zeit vorgegeben wurden. Die Zahlen charakterisieren die Häufigkeit des Auftretens von Extremzyklonen in Flächenelementen von jeweils  $10^\circ \times 10^\circ$ . Der Abstand der Isolinien beträgt 1.

b) Änderung in der Häufigkeit von Extremzyklonen im gleichen Experiment zum Zeitpunkt der  $\text{CO}_2$ -Verdoppelung (2060-2070). Der Abstand der Isolinien beträgt 0.5.

c) Änderung von Extremwindgeschwindigkeiten in 10 m Höhe in den Wintermonaten 2060-2070 bezogen auf 1980-1990 im "Treibhausgasexperiment". Dargestellt sind Änderungen der oberen 10% der Häufigkeitsverteilung. Der Isolinienabstand beträgt 0.4 m/s, wobei Gebiete mit Windzunahmen im Starkwindbereich von mehr als 0.4 m/s hellgrau und Gebiete mit Windabnahmen von mehr als 0.4 m/s dunkelgrau gekennzeichnet sind. Die Änderungen über Norddeutschland z.B. entsprechend einer Zunahme im Starkwindbereich von etwa 5-10%.