

## Vortrag Alfred Wegner Symposium, 1999

# Klimamodellierung und ihre Grenzen

## Extended Abstract von Hans von Storch

### REALITÄTSNAHE KLIMAMODELLE

Wenn wir hier von Klimamodellierung sprechen, meinen wir "realitätsnahe" Computermodelle, die unter Darstellung möglichst vieler, fast ausschliesslich physikalischer Prozesse eine detaillierte Simulation der Abläufe in der Atmosphäre, im Ozean, Kryosphäre und vielleicht noch andere Klimakomponenten wie den biogeochemischen Zyklen auf räumlichen Skalen von wenigen hundert Kilometern und zeitlichen Skalen von Tagen bis hin zu hunderten und (demnächst) tausenden von Jahren erlauben. V meinen also nicht konzeptionelle Modelle, wie die der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre oder Energiebilanzmodell idealisierte Modelle von der Art des "Global Environment and Society"-Modells und auch nicht Prozessmodelle, die im Detail z.B. die Tag-Nacht Zirkulation in einem Alpental, den Eintrag von vulkanischem Aerosol in die Stratosphäre oder die Entstehung Fronten in der Nordsee beschreiben. Klimaforschung ist mehr als Meteorologie oder Ozeanographie; es ist eine Systemwissenschaft.

Realitätsnahe Modelle werden seit etwa 30 Jahren entwickelt; sie werden zusammengesetzt aus Teilmodellen der Atmosphäre, Ozeans, der Kryosphäre etc. Diese Teilmodelle stellen sowohl die Hydrodynamik - also im Wesentlichen Prinzipien wie Impuls und Massenerhaltung - als auch die Thermodynamik - im Wesentlichen Energieumwandlungen - dar. Im Falle der Hydrodynamik gelingt diese Darstellung weitgehend dadurch, dass Grundgleichungen diskretisiert werden und somit numerisch integrierbar werden. Bei der Thermodynamik aber spielen die Quellen und Senkenterme eine dominante Rolle, die oft bestimmt werden durch kleinräumige Prozesse, wie Konvektion, Bodenreibung, Eisbildung, Abfluss und dergleichen. Diese Prozesse, im sprachliche Code der Klimamodellure gern "Physik" genannt, können nicht explizit sondern nur implizit über deren Nettowirkungen dargestellt werden. Die Technik der Formulierung der Nettowirkungen als Funktion der aufgelösten Vorgänge wird Parameterisierung genannt. Diese Parameterisierungen sind in ihrer funktionalen Form in der Regel physikalisch motiviert, aber diverse nur Konstanten werden nach empirischen Befunden und günstiger Wirkung beim Einsatz in den Klimamodellen fixiert. P Umweltmodelle enthalten solche Parameterisierungen; für den Puristen ist ihre Existenz unbefriedigend; allerdings sind Sie wegen der Wechselwirkung aller Skalen miteinander ein unvermeidliches Element in Umweltmodellen.

### MODELLANWENDUNGEN

Realitätsnahe Modelle werden zu verschiedenen Zwecken eingesetzt.

Eine klassische Anwendung ist die als Ersatzlabor für den Klimaforscher, um die Sensitivität und die Dynamik des komplexen Systems Klima auf den genannten Zeit- und Raumskalen zu untersuchen. Auf diese Weise können Fragen etwa nach der Wirkung der Vegetation, dem Ausströmen riesiger Schmelzwasserreservoirs am Ende der letzten Eiszeit in den Atlantik oder der Wirkung des mittelamerikanischen Isthmus auf die ozeanische Zirkulation und dergleichen gestellt und beantwortet werden.

Auch die Vorhersagbarkeit des Klimas und seiner Teilsysteme kann untersucht werden, etwa indem zwei Simulationen mit geringfügig von einander abweichende Anfangszustände gerechnet werden. Nach einiger Zeit unterscheiden sich die zeitliche Zustände der beiden Simulationen statistisch wie zwei beliebig ausgewählte Zustände - das Ende der Vorhersagbarkeit ist dann erreicht. Im Zusammenhang mit dem El Niño Phänomen ist dies auch von grosser praktischer Bedeutung.

Neben diesen mehr akademischen Anwendungen gibt es eine Reihe von operationellen Anwendungen, zu allererst Vorhersagen von Wetter und Extremsituationen wie Sturmfuten. Routinemässig werden realitätsnahe Modelle, vor allem Wettervorhersagemodelle, zur Bestimmung des vollständigen synoptischen Zustandes der Atmosphäre und anderer Umweltsysteme auf der Basis begrenzter Beobachtungen eingesetzt. Auf diese Weise ist es möglich, den detaillierten 4-dimensionalen Zustand der Atmosphäre bzw. des Ozeans zu bestimmen und mithilfe dieser "Analysen" die Dynamik anderweitig nicht ausreichend beobachtbarer Klimaprozesse zu untersuchen. Beispiele betreffen Transporte von Energie und Feuchte in Ozean und Atmosphäre.

Die für die Öffentlichkeit derzeit wichtigste Anwendung von Klimamodellen betrifft die Entwicklung von Szenarien zukünftiger durch menschliche Aktivitäten veränderte Klimazustände. Die bekanntesten Szenarien heben ab auf die Akkumulation von Kohlendioxid und andere strahlungsaktive Gase; in den letzten Jahren sind Aerosole in der Tropo- und Stratosphäre hinzugekommen. Andere Themen betreffen bzw. betrafen grossflächige Entwaldungen, brennende Ölquellen in Kuwait, klimatische Folgen von nuklear geführten Kriegen oder Abwärme bei der Produktion von Elektrizität. Bei diesen Anwendungen ist

zu beachten, dass derartige Szenarien erstens keine Vorhersagen sind und zweitens in der Regel nicht bestätigt werden können, da die für möglich gehaltenen Veränderung meist entweder gar nicht oder erst in ferner Zukunft eintreten. Dennoch durch Modellszenarien bei ihrem Übergang zunächst in die Klimawirkungsforschung und dann, oder gleich, in der Meinungsbildungsprozess eine Metamorphose zu fast sicheren Vorhersagen. Bei diesem Hindurchreichen durch verschiedene Disziplinen gibt es dann auch noch das Phänomen der akkumulativen Konservativität: Jede Disziplin, seien es Volkswirtschaftler die Emissionszenarien bestimmen, Klimaforscher, die die klimatischen Veränderungen erforschen, oder Klimawirkungsforscher, die die ökologischen und gesellschaftlichen Reaktionen untersuchen, neigt wegen des Vorsorgeprinzips, "konservativ" zu sein. In der Summe entstehen so nicht die wahrscheinlichsten Szenarien sondern "worst case Szenarios".

## GRENZEN DER KLIMAMODELLIERUNG

Gerade weil Klimamodelle die einzigen Instrumente sind, Klimadynamik "experimentell" zu untersuchen, und detaillierte Szenarien zu entwickeln, ist es von grosser Bedeutung, eventuellen Anwendern ausserhalb der Community der Klimamodellierer die Grenzen der Klimamodellierung zu vermitteln.

Zu diesen "Grenzen" gehören:

a) Modelle können falsch sein. Auch wenn andere Modelle ähnliche Effekte zeigen, ist dies wegen der sozialen Verknüpfung von Klimamodellierer untereinander nur bedingt ein Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Modelle. Dabei ist auch zu sehen, dass gewisse Modelleigenschaften sozial "belohnt" werden. Journale wie "nature" und "science" haben eine klare Tendenz zu interessanten, d.h. beunruhigenden Resultaten. Auch Wiederhall in den allgemeinen Medien zählt sich in Förderung und Anerkennung aus - und dieser Wiederhall wird eher durch Alarmierung denn durch Relativierung erzielt. Andererseits kann geschickter Modeller Resultate in Grenzen durch die Spezifikation der Parametrisierungen selbst bestimmen.

b) Modelle beschreiben grundsätzlich nur einen Ausschnitt der Realität; in dem Sinne sind sie immer partiell "falsch". Klimamodelle können nicht verifiziert werden; es kann nur ihre Konsistenz mit bekannten physikalischen Vorgängen und bisherigen Beobachtungsrecord gezeigt werden. Inwieweit sie belastbare Resultate für bisher nicht beobachtete Phänomene geliebt bleibt eine Frage der Plausibilität und subjektiver Einschätzungen.

c) Neben diesen grundsätzlichen Vorbehalten gibt es noch eine Reihe technischer Einschränkungen, von denen das Skalenproblem vielleicht das gravierendste ist: Klimamodelle geben grossskalige Strukturen wieder aber keine kleinskaligen oder gar lokale Informationen, wie von der Impaktforschung verlangt. "Grossskalig" bedeutet "räumliche Strukturen mit Abmessungen von mehreren hundert und mehr Kilometern"; "Kleinräumig" in diesem Sinne sind Baden-Württemberg und Bayern zusammen ebenso wie die Alpen oder die Nordsee. Daher können Simulationsergebnisse von Klimamodellen in der Regel nicht unmittelbar zur Abschätzung von detaillierten wirtschaftlichen und ökologischen Klimafolgen eingesetzt werden.

d) Modelle beschreiben plausible Trajektorien, aber keine "Vorhersagen". Werden zwei gleichartige Modellrechnungen mit geringfügig verschiedenen Anfangsbedingungen integriert, so ergeben sich verschiedene Ergebnisse: die resultierenden Statistiken sind jedoch gleich. Das belastbare Ergebnis einer Klimarechnung ist also die Statistik des Geschehens, nicht die einzelne Trajektorie, die anzusehen ist als eine zufällig, plausible Realisierung der Statistik.

e) Bisweilen wird den Modellen von Kritikern vorgehalten, sie enthielten wichtige Prozesse nicht - etwa der Einfluss der Sonne - und sie enthielten künstliche Teile - die Flusskorrektur. Wenn wichtige Prozesse nicht enthalten sind, kann dies in der Zukunft in Klimamodelle selbst getestet werden; im Falle der Sonne ergab sich, dass die Wirkung der Variation der solaren Leistung auf das Klima gering ist. Die Diskussion über die Flusskorrektur ist überzogen; in Tests mit paläoklimatischen Bedingungen haben sich keine Hinweise ergeben, dass die Flusskorrektur wesentlichen Verfälschungen in das System bringt.

## HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ZUKUNFT

Für die Zukunft ergeben sich eine Reihe von Herausforderungen an die Community der Klimamodellierer: die Modelle vervollständigt werden im Hinblick auf Prozesse - insbesondere die Biogeochemie. Und sie müssen in den Stand gesetzt werden über noch längere Zeiten, etwa mit dem Ziel eines vollständigen Zyklus von Warm und Eiszeit, integriert werden zu können. Dazu wird die Anknüpfung realistischer Modelle der Eisschilde erforderlich. Klimamodelle werden in Zukunft auch genutzt werden historische und paläoklimatische Befunde systematisch in raum-zeitlich vollständige Analysen zu überführen. Für "Datenassimilation" müssen die Klimamodelle vervollständigt werden durch Prozessmodelle, die grossskalige klimatische Zustände in Proxydaten (z.B. Baumringdichten) überführen. Erste Ansätze dieser Art werden in einem [Strategieprojekt](#) der Helmholtz Gemeinschaft verfolgt.

## WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Eine für naturwissenschaftliche vorgebildete, interessierte Laien geschriebene Einführung ist die Monographie [Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung](#) von von Storch, Güss und Heimann. Sie wird im Herbst 1999 beim Springer-Verlag

erscheinen. Die in diesem Vortrag angeschnittenen Fragestellungen werden ausführlich in dem Buch erörtert.