



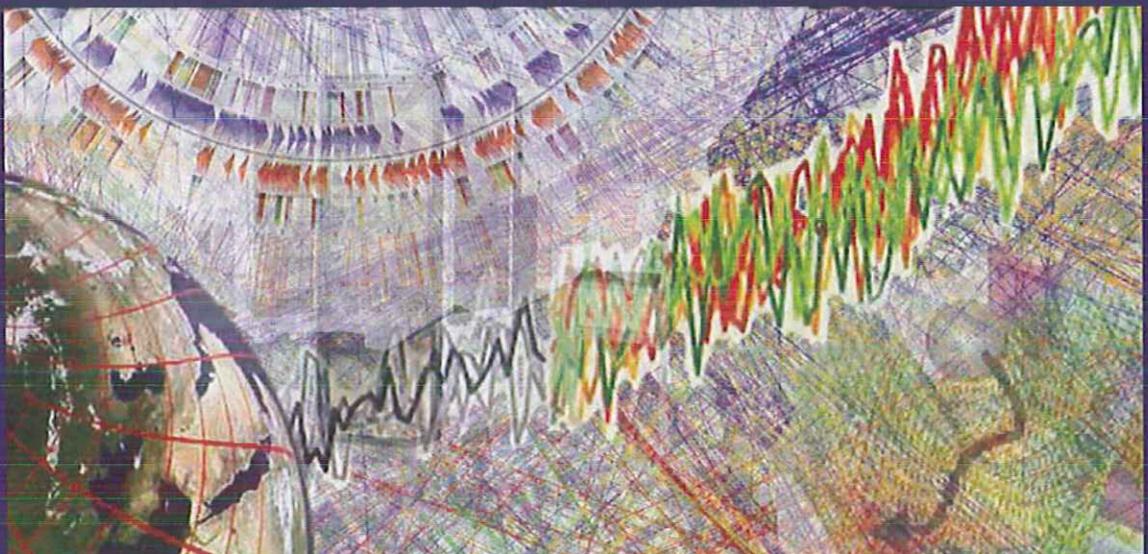
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Neue Folge | Band 110 | Nummer 377

Computermodelle in der Wissenschaft – zwischen Analyse, Vorhersage und Suggestion

Herausgegeben von **Thomas Lengauer**



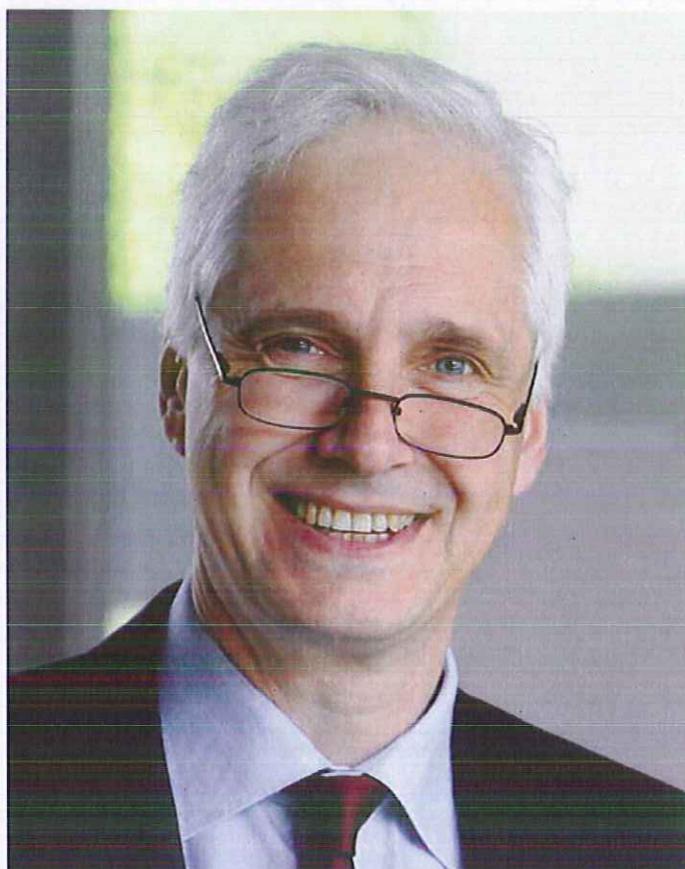
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2011

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart

Von der Arrheniusschen Energiebilanz zum Erdsystemmodell – Gedankenmodelle und quasi-realistische numerische Klimalabore¹

Martin CLAUSSEN ML (Hamburg)

Mit 4 Abbildungen



¹ Da Martin CLAUSSEN kurzfristig verhindert war, an der Konferenz teilzunehmen, hat dankenswerterweise Jochem MAROTZKE ML (Hamburg) den Vortrag für ihn übernommen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Begriffe Klima, Klima- und Erdsystem sowie Klimavorhersage erläutert. Dabei wird auf die in der Klimaphysik übliche Definition des Klimas über Zustand und Statistik des Klimasystems oder Erdsystems eingegangen. Die Begriffe Klimasystem und Erdsystem werden oft synonym gebraucht, wobei der Begriff Erdsystem die Wechselwirkung zwischen unbelebter und belebter Welt, einschließlich des Menschen, betont. Die Werkzeuge der Klima- und Erdsystemanalyse werden vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf den mathematischen Modellen liegt, deren Entwicklung ohne den Einsatz von Höchstleistungsrechnern undenkbar ist.

Komplexe Klimamodelle werden oft als quasi-realistische numerische Labore genutzt. Deswegen wird hier insbesondere auf die Herausforderung der Validierung solcher Modelle eingegangen. Die realitätsnahe Beschreibung des gegenwärtigen Klimas reicht als Kriterium nicht aus, wenn mögliche Klimaentwicklungen berechnet werden sollen, die das Spektrum gegenwärtiger Klimaschwankungen verlassen oder die durch relativ langsam ablaufende interne Prozesse bestimmt werden. Hier gelingt mit zunehmendem Erfolg die qualitative Überprüfung der Modelle anhand einer Vielzahl paläoklimatologischer Archive aus verschiedenen Klimaepochen.

Abstract

In this contribution, the terms "climate", "climate system", "Earth system" and "climate prediction" are explained. This includes the definition of climate in a wider sense in terms of state and statistics of the climate system or Earth system. The latter terms are often used synonymously where the term Earth system is used to highlight the interaction between the abiotic, physical and the living world including humankind. The tools of climate system and Earth system analysis are presented with a focus on mathematical models which could not have been developed without the use of supercomputers.

Comprehensive climate system models are often used as quasi-realistic numerical laboratories. Therefore, the challenge of validating such models is discussed. The realistic description of contemporary climate will not suffice as a determining criterion if possible climate developments which go beyond the actual climate range, or which are caused by relatively slow-running internal processes are to be calculated. In this case, the qualitative comparison of models with an increasing number of data from palaeo-climate archives seems to be a promising approach.

1. Einleitende Bemerkung

„Klimakatastrophe“, „Klimachaos“, „der Nordpol ist weg“, ... solche oder ähnliche Schlagzeilen sind aus manchen Medien nur allzu bekannt. Sie reflektieren letztlich – teils ins Skurrile übersteigert – Ergebnisse der Klimaforschung über mögliche künftige Entwicklungen des vom Menschen beeinflussten Klimas. Die moderne Klimaforschung stützt sich bei der Analyse des gegenwärtigen Klimas und der Abschätzung möglicher Klimaänderungen auf ein Spektrum von Klimamodellen verschiedener Komplexität. Gerade die Entwicklung hoch komplexer Klimamodelle als computergestützte, quasi-realistische Klimamodelle hat die Klimaforschung sehr weit vorangebracht, sodass Aussagen über mögliche künftige Klimaänderungen heute so vertrauenswürdig erscheinen, dass sie die Grundlage für globale politische Entscheidungen bilden. Daher werden in diesem Beitrag die wissenschaftlichen Grundlagen der Klimasimulationen skizziert und diskutiert.

Zunächst wird der Gegenstand der Forschung, das Klima, definiert. Sodann werden die Werkzeuge zur Untersuchung des Klimas vorgestellt, wobei sich dieser Beitrag auf die computergestützte, mathematisch-physikalische Klimamodellierung beschränkt. Nach einer kurzen Vorstellung verschiedener Anwendungen komplexer Klimasimulationen, wird abschließend das Problem der Klimavorhersage kritisch analysiert.

2. Was ist Klima?

In der älteren Literatur wird Klima als „die Gesamtheit aller meteorologischen Erscheinungen“ definiert, „die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche charakterisieren“ (HANN 1883). Wenn der Zustand der Atmosphäre im Verlauf weniger Stunden oder eines Tages an einem Ort als Wetter bezeichnet wird, dann ist Klima nach dieser Definition gleichbedeutend mit mittlerem Wetter. Die *World Meteorological Organization* (WMO) hat für die Zeitspanne, über die der Mittelwert des Wetters berechnet werden sollte, auf 30 Jahre festgelegt. Daher werden für Klimavergleiche häufig die Zeiträume 1931–1960 bzw. 1961–1990 gewählt. Man findet in der Literatur aber auch andere Mittelungszeiträume.

Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurde der Klimabegriff dahingehend erweitert, dass neben dem Mittelwert auch die höheren statistischen Momente in die Klimadefinition einbezogen werden. Nach der neueren Definition beschreibt Klima das „statistische Verhalten der Atmosphäre, das für eine relativ große zeitliche Größenordnung charakteristisch ist“ (HANTEL et al. 1987). Die Klimavariablen, manchmal auch Klimaelemente genannt, werden als statistische Kenngrößen angegeben wie z. B. Jahres- oder Monatsmittel (Jahresmitteltemperatur, mittlere Jahresniederschlagssumme, ...) oder als Eintrittswahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Ereignissen (mittlere Andauer von Dürren, Sturmhäufigkeit, Häufigkeit von Starkniederschlägen, ...). Da Klima sich sowohl räumlich wie auch zeitlich ändert, gehören zur Angabe der Klimaelemente auch Ort und Mittelungszeitraum, für welche die statistischen Kenngrößen gelten.

Die meteorologische Klimadefinition – „meteorologisch“, weil sie sich auf meteorologische Kenngrößen bezieht – hat sich in der Klimatologie, der eher beschreibenden Wissenschaft des Klimas, bewährt. Zum Verständnis der Klimadynamik, also der Prozesse, die den mittleren Zustand und die Variabilität der Atmosphäre über längere Zeiträume bestimmen, reicht die meteorologische Definition nicht aus, denn die längerfristigen Veränderungen der Atmosphäre

werden wesentlich durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit dem Ozean, der Vegetation und den Eismassen geprägt. Aus diesem Grunde wird in der Klimadynamik, wie in den modernen Lehrbüchern der Meteorologie und der Klimaphysik nachzulesen ist (z. B. KRAUS 2000, PEIXOTO und OORT 1992), das Klima über den Zustand und das statistische Verhalten des Klimasystems definiert.

Das Klimasystem (Abb. 1) besteht aus verschiedenen Untersystemen: der Atmosphäre, der Hydrosphäre (dazu gehören Ozean, Flüsse, Seen, Regen, Grundwasser), der Kryosphäre (Inlandeismassen, Meereis, Schnee, Permafrost), der marinen und terrestrischen Biosphäre, dem Erdreich, und, wenn die Klimaentwicklung über viele Jahrtausende betrachtet wird, der Erdkruste und dem oberen Erdmantel. Diese Unterteilung erfolgt im Wesentlichen aufgrund der beteiligten Medien (gasförmig, flüssig, fest) und der Zeitskalen, die für typische Änderungen in den Untersystemen beobachtet werden können. Die Untersysteme sind über Energie-, Impuls- und Stoffflüsse miteinander gekoppelt. Zu den Stoffflüssen muss auch der Transport chemischer Substanzen und deren Umwandlungsprozesse hinzugerechnet werden, soweit diese Substanzen – wie z. B. Treibhausgase oder Nährstoffe der Biosphäre – direkt oder indirekt mit dem Energiekreislauf in Verbindung stehen.

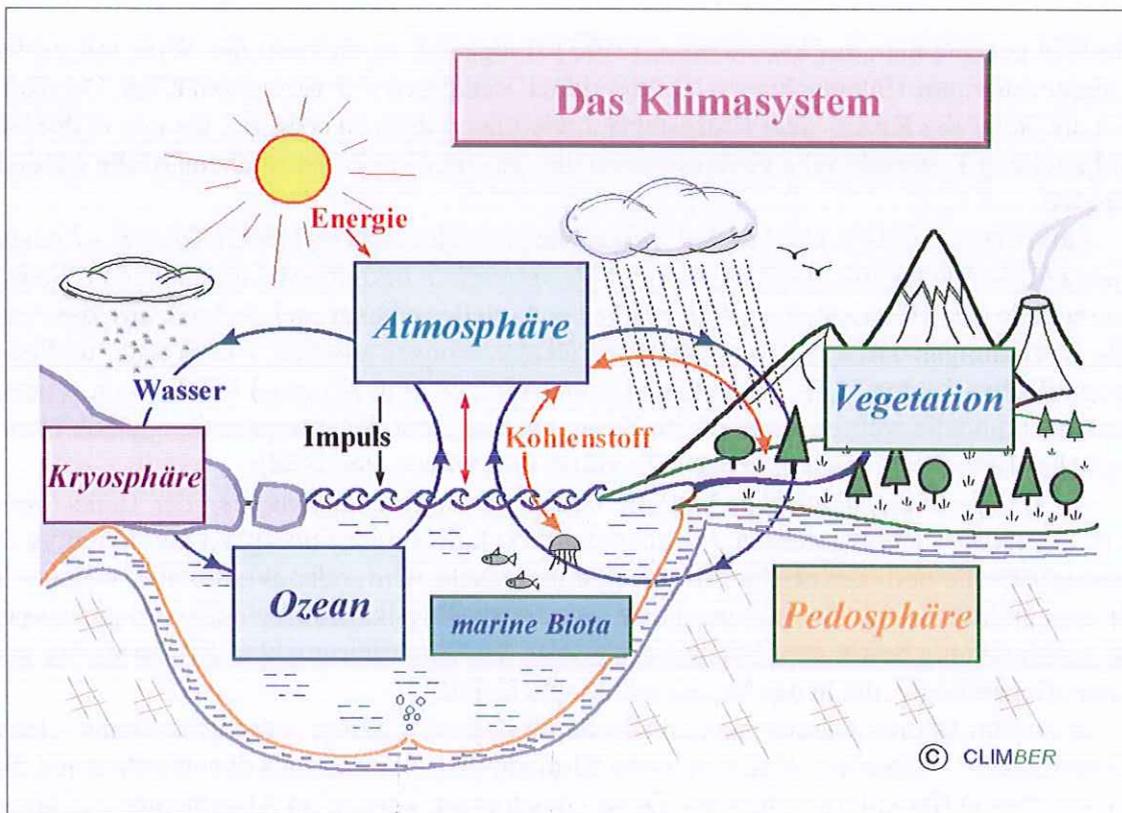


Abb. 1 Schematische Darstellung des Klimasystems und seiner Untersysteme sowie der die Untersysteme verbindenden Flüsse nach GANOPOLSKI und CLAUSSEN in CLAUSSEN (2003). (Nachdruck mit Genehmigung des Springer-Verlags, Heidelberg.)

In anderen Definitionen wird das Klimasystem in die Komponenten Atmosphäre, Ozean und Land eingeteilt (siehe z. B. SALTZMAN 2002). Eine solche Einteilung spiegelt den technischen

Aufbau von Modellen des Klimasystems wider, die eher aus teils sogar separat entwickelten Modulen der atmosphärischen Zirkulation, der ozeanischen Zirkulation und der Landoberflächenprozesse und Vegetationsdynamik bestehen.

In der neueren Literatur wird neben dem Begriff des Klimasystems auch der Begriff des Erdsystems verwendet, um die Wechselwirkung der unbelebten, physischen Welt mit der belebten Welt zu betonen. Dies schließt insbesondere den Einfluss des Menschen auf das Klima und die Wechselwirkung des Menschen mit seiner Umwelt ein (SCHELLNHUBER 1999, CLAUSSEN 1998, 2001). In der älteren russischen Literatur wird das belebte Klima- oder Erdsystem auch als Biosphäre, als mit Leben erfüllter Raum der Erde bezeichnet (VERNADSKY 1926, 1997). Oft werden die Begriffe Klimasystem und Erdsystem synonym benutzt. In der Tat wird die Definition des Klimasystems oder des Erdsystems nicht aus übergeordneten Prinzipien abgeleitet, sondern ist als eine vorempirische Relevanzentscheidung zu interpretieren. Im Folgenden werden Modelle des Klima- oder Erdsystems einfach als Klimamodelle bezeichnet.

3. Klimamodelle – eine kleine Typologie

Modelle beschreiben, um STACHOWIAK (1973) sinngemäß zu zitieren, die Natur mit *ad hoc* vorgegebener, am Untersuchungsziel orientierter Reduktion der Komplexität des Originals. Um die Natur des Klima- oder Erdsystems modelltheoretisch zu erfassen, werden in der Klimaforschung konzeptionelle Gedankenmodelle, physikalische und mathematische Modelle genutzt.

ARISTOTELES' (350 v. Chr.) *Meteorologia* oder VON HUMBOLDTS (1845) *Kosmos – Entwurf einer physischen Weltbeschreibung* können als vermutlich bekannteste, umfassendste Gedankenmodelle des Klimasystems gelten. Gedankenmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass kausale Beziehungen zwischen verschiedenen Beobachtungen qualitativ in Worten und/oder geografischen Karten (z. B. die Berghausschen Atlanten zum Kosmos) beschrieben werden. Gedankenmodelle werden heute oft im Zusammenhang mit der Interpretation paläoklimatologischer Befunde verwendet (siehe z. B. HAUG und TIEDEMANN 1998).

Als Beispiele physikalischer Modelle lassen sich rotierende Bassins oder Tanks (siehe z. B. GREENSPAN 1969) anführen, in denen die Zirkulation einer Flüssigkeit als Näherung für atmosphärische und ozeanische Strömungen untersucht wird, oder Windtunnel, welche die Grenzschichtströmung in der Atmosphäre simulieren. Physikalische Modelle erlauben unter Berücksichtigung bestimmter Skalierungsgesetze die Durchführung klar definierter, kontrollierter Experimente, die in der Natur nicht möglich sind.

In diesem Beitrag werden mathematische Modelle des Klima- oder Erdsystems – kurz: Klimamodelle – diskutiert. Mathematische Klimamodelle bestehen aus dynamischen und diagnostischen Differentialgleichungen. Diese Gleichungen können im Allgemeinen aus physikalischen Gesetzen der Erhaltung von Energie, Impuls und Masse gasförmiger, flüssiger und zäher, fließbarer Medien abgeleitet werden (z. B. PEIXOTO und OORT 1992). Neben den deduktiven Gleichungen gibt es auch induktive Elemente, z. B. in den ökosystemaren Komponenten der Klimamodelle, die aus empirischen Beziehungen hergeleitet werden.

Aufgrund der Komplexität der mathematischen Gleichungen werden die Modellgleichungen numerisch gelöst. Dazu werden die Gleichungen diskretisiert, d. h., die kontinuierlichen Räume des Klima- oder Erdsystems (wie Atmosphäre, Ozeane, Vegetationsdecke, ...) werden

durch abzählbar viele Unterräume oder Volumina oder vernetzte Gitterpunkte ersetzt. Dies ermöglicht das kompakte System in endlicher Zeit und mit endlichem Speicherplatz im Computer bearbeiten zu können.

Doch die Diskretisierung der Gleichungen in den Klimamodellen birgt Probleme in sich: Der Zustand und die dynamischen Prozesse des Klimasystems sind, je nach Verfahren, nur auf den Punkten des numerischen Gitternetzes oder nur als Mittelwert über diskrete Flächen oder Volumina definiert. Kleinräumigere Prozesse, die sogenannten subskaligen Prozesse, können nicht explizit dargestellt werden, sondern müssen als Funktion der explizit darstellbaren oder skaligen Variablen „parameterisiert“ werden.

Komplexität und Approximationsgrad von Klimamodellen werden unterschiedlich klassifiziert. So wählen z. B. MCGUFFIE und HENDERSSON-SELLERS (1997) das Bild einer Pyramide, in dem die Seitenstücke der Pyramide hauptsächlich atmosphärische Teilmodule (Modelle des Strahlungstransfers, der Energiebilanz und der atmosphärischen Strömung) darstellen, die dann miteinander gekoppelt werden, um als Spitze der Pyramide zu einem komplexen Modell atmosphärischer und ozeanischer Zirkulation zusammenzuwachsen. Eine ähnliche Modellpyramide entwerfen die Autoren für Modelle menschlichen Handelns (Ökonomiemodelle, Modelle des Bevölkerungswachstums usw.). Die Kopplung beider Modellwelten wird als Verknüpfung beider Pyramiden an deren Spitzen in der Form eines Stundenglases symbolisiert. CLAUSSEN et al. (2002) schlagen eine alternative, weniger symbolhafte Betrachtung der „klassischen“ Modellhierarchie vor, indem sie ein „Spektrum von Klimamodellen“ einführen. Dieses Spektrum schließt explizit einen Indikator ein, der die Anzahl miteinander wechselwirkender Komponenten des Klimasystems charakterisiert, die als Module im Klimamodell explizit beschrieben werden.

An dem einen Ende des Spektrums (siehe Abb. 2) befinden sich die konzeptionellen oder stark aggregierten Modelle, in denen bei stärkster Reduktion der Komplexität das gesamte Klima- oder Erdsystem oder bei weniger reduzierten Modellen jeweils die einzelnen Komponenten des Systems als ein Gitterpunkt dargestellt werden. Solche Modelle können zum einen rein induktive Modelle sein, welche lediglich die Plausibilität von Prozessen demonstrieren, ohne dass physikalische Gesetze wie Massen-, Energie- und Impulserhaltung explizit in die Modelle einfließen. Das Modell von PAILLARD (1998), das den Wechsel zwischen Warmphasen und Eiszeiten der letzten 2 Millionen Jahre als abrupte Sprünge zwischen verschiedenen *ad hoc* definierten Klimazuständen beschreibt, mag als typisches Beispiel dienen. Zu den in ihrer Komplexität stark reduzierten Modellen gehören auch die Energiebilanzmodelle, die aus der Forderung einer geschlossenen Energiebilanz des Erdsystems zwischen solarer Einstrahlung und der Abgabe von Wärmestrahlung der Erde abgeleitet werden. Das Arrheniussche Energiebilanzmodell (ARRHENIUS 1896) ist vermutlich das erste Modell dieser Art überhaupt. ARRHENIUS nutzte dieses Modell, um die Frage zu klären, ob Eiszeiten durch eine Reduktion von Treibhausgasen verursacht werden könnten. Gleichsam als Randnotiz bemerkte ARRHENIUS, dass bei einem durch menschliche Aktivität verdoppelten Gehalt des Kohlendioxids in der Atmosphäre sich die globale Mitteltemperatur um 5–6 K erwärmen könnte. (Heutige Klimamodelle geben als beste Schätzung etwa 3 K an, mit einer Spannweite von etwa 2,1 bis 4,4 K, RANDALL et al. 2007.)

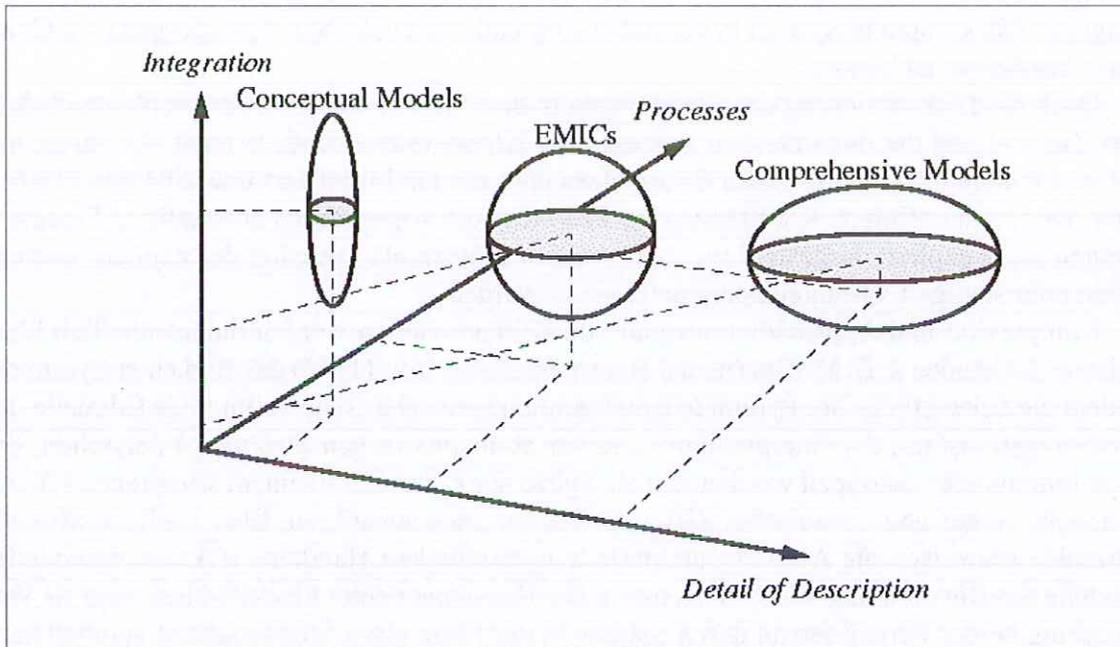


Abb. 2 Schematische Darstellung des Komplexitätsspektrums der Klimamodelle aus CLAUSSEN in EHLERS und KRAFFT (2001). (Nachdruck mit Genehmigung des Springer Verlags, Heidelberg.)

An die von ihrem Rechenaufwand her einfachen, hochaggregierten Modelle schließen sich die Modelle mittlerer Komplexität oder EMICs (*Earth system Models of Intermediate Complexity*) an. Diese Modelle sind meist im Hinblick auf die Einbindung möglichst vieler Komponenten des Erdsystems und für Simulationen sehr langer paläoklimatischer Änderungen konzipiert. Als Beispiel sei hier die Simulation des Beginns der quartären Eiszeit erwähnt (HAUG et al. 2005), die den Zeitabschnitt von 3,1 bis 2,5 Millionen Jahren vor heute überdeckt. Die geografische Darstellung der Erdoberfläche wird in EMICs stark vereinfacht, sodass viele Prozesse als subskalige Phänomene parameterisiert werden müssen.

Am anderen Ende des Modellspektrums befinden sich die komplexen Klimamodelle (Abb. 3), welche die atmosphärische und ozeanische Zirkulation zusammen mit der Migration der Vegetationszonen sowie die sämtliche Klimasystemkomponenten verbindenden Energie-, Impuls- und Stoffkreisläufe beschreiben. Diese sogenannten „state-of-the-art“-Modelle gelten als quasi-realistische numerische Klimamodelle mit technisch höchstmöglicher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Solche Modelle arbeiten mit einer Anzahl von der Größenordnung nach 10^5 bis 10^7 Gitterpunkten jeweils in der Atmosphäre und im Ozean (ROECKNER et al. 2006a, b, JUNGCLAUS et al. 2006). Die Bewegungsgleichungen werden an diesen Gitterpunkten mit einer Taktfrequenz von wenigen Minuten berechnet; also wird für eine Simulation des Klimas der letzten etwa 1000 Jahre (PONGRATZ et al. 2009) das System sämtlicher Bewegungsgleichungen etwa 10^{14} -mal gelöst. Ohne den Einsatz von Höchstleistungsrechnern ist der Einsatz komplexer Klimamodelle daher nicht denkbar.

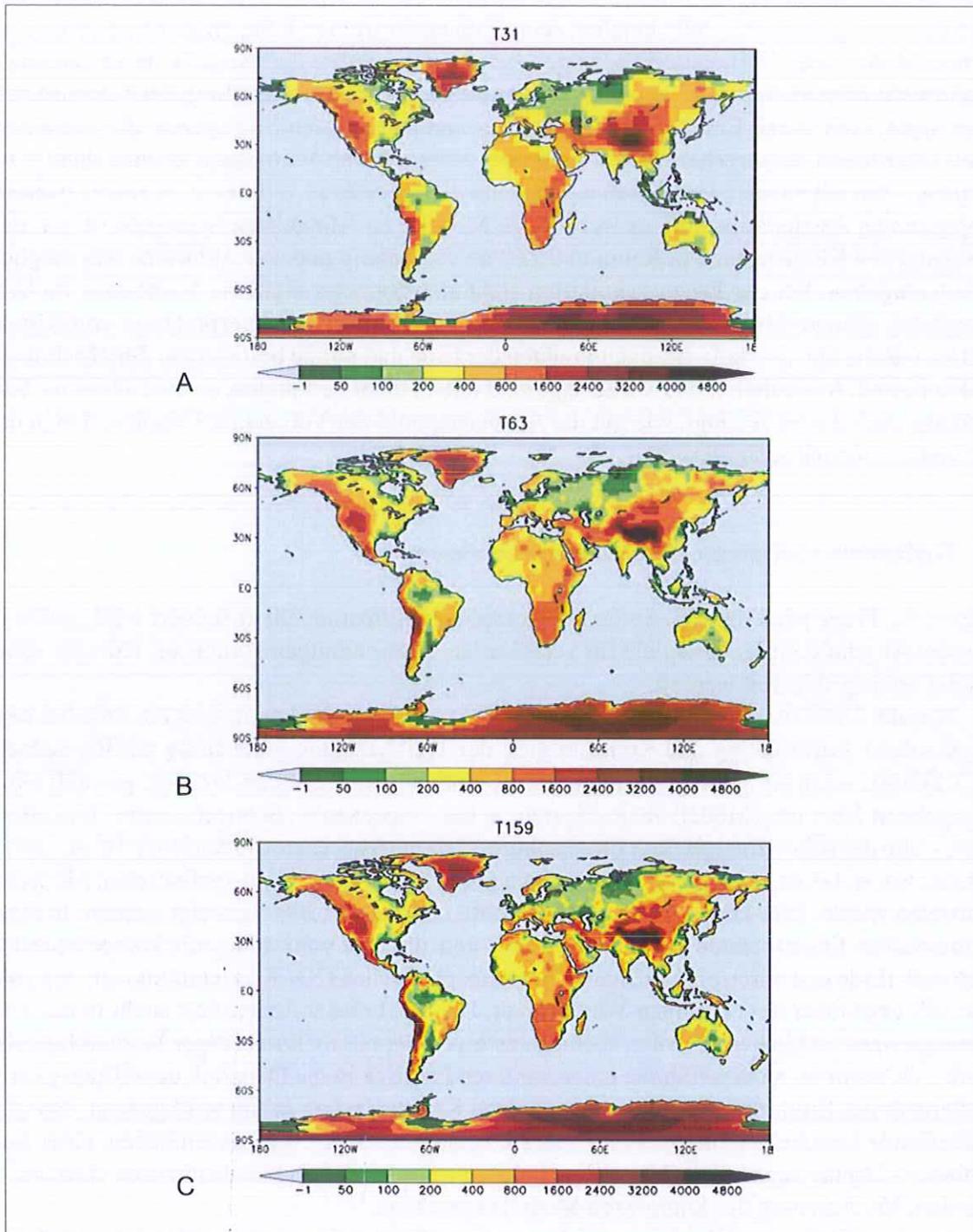


Abb. 3 Darstellung der Orographie der Kontinente in einem komplexen Klimamodell. Die Angaben „T31“ (A), „T63“ (B), „T159“ (C) beziehen sich auf den Approximationsgrad von Kugelflächenfunktionen, in denen die großräumige Zirkulation der Atmosphäre dargestellt ist. Auf ein geografisches Gitternetz übertragen, bedeutet T31 eine räumliche Auflösung von $3,75^\circ \times 3,75^\circ$ in Länge und Breite, entsprechend einer Kantenlänge von $416 \text{ km} \times 416 \text{ km}$ am Äquator. T63: $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ entsprechend $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ und T159: $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ entsprechend $83 \text{ km} \times 83 \text{ km}$.

Eine weitere Einteilung der Klimamodelle hinsichtlich der Wiedergabe von Klimadaten mag zur Bewertung dieser Modelle nützlich sein. Zum einen werden Klimamodelle im prognostischen Modus oder Vorhersagemodus genutzt. Dabei werden die Modelle durch ändernde Randwerte angetrieben (z. B. durch sich ändernde geografische Verteilung des solaren Energieflusses, oder durch Eintrag von chemischen und partikulären Substanzen, die mit einem Vulkanausbruch einhergehen). Die Ergebnisse einer solchen Vorhersage können dann – im Prinzip – mit Klimadaten verglichen werden, um die Modelle zu validieren. In einem zweiten, sogenannten Assimilationsmodus werden die Modelle an Klimadaten herangeführt, um den vergangenen Klimazustand in Raum und Zeit so vollständig und so realitätsnah wie möglich wiederzugeben. Bei der Datenassimilation steht also zunächst nicht die Vorhersage im Vordergrund, sondern die physikalisch konsistente Interpolation und Interpretation von Klimadaten, welche nur an relativ wenigen Punkten der Erde und nur zu bestimmten Zeitabschnitten bekannt sind. Assimilation und Vorhersage sind miteinander verbunden, da die Güte einer Vorhersage auch davon abhängt, wie gut der Ausgangspunkt der Vorhersage bekannt, also in das Vorhersagemodell assimiliert ist.

4. Gedankenexperimente und Klimavorhersagen

Bevor die Frage nach der Validierbarkeit komplexer Klimamodelle diskutiert wird, sollen in diesem Abschnitt einige Beispiele für verschiedene Anwendungen komplexer Klimamodelle stichwortartig skizziert werden.

Aus der Untersuchung einfacher Energiebilanzmodelle ist bekannt, dass die Erde bei heutiger solarer Einstrahlung und Konzentration der Treibhausgase vollständig mit Eis bedeckt sein könnte, wenn als Anfangsbedingung der Simulation eine eisbedeckte Erde gewählt wird. Umgekehrt kann das (Modell-)Klimasystem in eine sogenannte „Schneeballerde“ hineinkippen, wenn der solare Energiefluss für eine kurze Zeit unterbrochen würde (NORTH et al. 1981). Bisher war unbekannt, ob dieses Phänomen auch in komplexen, quasi-realistischen Modellen auftreten würde. Dies konnte erst von MAROTZKE und BOZET (2007) gezeigt werden. In ihren numerischen Experimenten entdeckten die Autoren, dass die vollständig mit Schnee bedeckte (Modell-)Erde erst durch eine Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration um den Faktor 100 gegenüber dem heutigen Wert auftaut. Der Wert dieser Arbeit liegt nicht in der Vorhersage einer möglichen globalen Klimakatastrophe bei relativ kurzzeitiger Verdunklung der Erde. Vielmehr bietet diese Studie einen weiteren Einblick in die Dynamik des Klimasystems außerhalb des Erfahrungsbereiches des rezenten Klimas. Insbesondere wird gezeigt, dass das betreffende komplexe Klimamodell Prozesse nachbilden kann, die aus einfachen, einer analytischen Lösung zugänglichen Modellen bekannt waren. Insofern könnte man von einer strukturellen Verifizierung des komplexen Modells sprechen.

Große Vulkanausbrüche führen nicht nur zu regionalen bis kontinentalen katastrophalen Umbrüchen der Landoberfläche, sie beeinflussen auch das regionale und globale Klima über mehrere Jahre. Während die Effekte jüngerer Vulkanausbrüche, wie z. B. der des Pinatubo im Jahre 1991 oder des Mt. St. Helens im Jahre 1982, gut dokumentiert sind, ist relativ wenig über die sehr viel stärkeren Ausbrüche in der Yellowstone-Region vor etwa 600 000 und 2 200 000 Jahren oder des Toba vor 73 000 Jahren bekannt. Letzterer übertraf die geschätzte Auswurfmenge des Mt. St. Helens um den Faktor 2800. Während Klimamodelle hinsichtlich ihrer Antwort auf heutige Vulkanausbrüche validiert werden können, bleiben nur Plausibili-

tätsabschätzungen für die großen Ausbrüche der Vergangenheit. Dennoch sind solche Abschätzungen nützlich. Zum einen kann die numerische Stabilität eines Klimamodells hinsichtlich starker Störungen geprüft werden. Zweitens können Hypothesen hinsichtlich der Skalierbarkeit des Effektes von Vulkanausbrüchen aufgestellt werden (TIMMRECK et al. 2009).

Klimavorhersagen (der Begriff der Klimavorhersage wird im Abschnitt 5.1 erläutert) werden prominent für das rezente Klima der letzten gut 100 Jahre und mögliche Klimaentwicklungen der nächsten 100 Jahre durchgeführt. Als Beispiel werden hier die numerischen Abschätzungen der globalen Mitteltemperatur von ROECKNER et al. (2006a) vorgestellt. In der Abbildung 4 sind globale Mitteltemperaturen, berechnet aus Ensemblesimulationen des Klimas in der Zeitspanne von 1860 bis 2000, abgebildet. Zu erkennen ist, dass die Beobachtung innerhalb der Variationsbreite des Ensembles der Simulationen liegt und einen ähnlichen Verlauf aufweist. Nachgewiesen werden kann sogar, dass die Erwärmung der letzten Dekaden des vergangenen Jahrhunderts mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch Änderungen der natürlichen Klimaantriebe oder durch interne Variabilität des (Modell-)Klimasystems hervorgerufen wird, sondern im Wesentlichen durch die anthropogene Emission von Treibhausgasen. Die Ensemblesimulationen für drei verschiedene Szenarien der Treibhausgasemissionen, die auf verschiedenen Annahmen globaler wirtschaftlicher Entwicklung beruhen, zeigen deutlich, dass die möglichen künftigen Klimaentwicklungen der nächsten Jahrzehnte nahezu unabhängig von der Wahl der Emissionsszenarien sind. Erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts wirkt sich die spezifische Ausprägung der Treibhausgasemission auf die Klimaentwicklung aus.

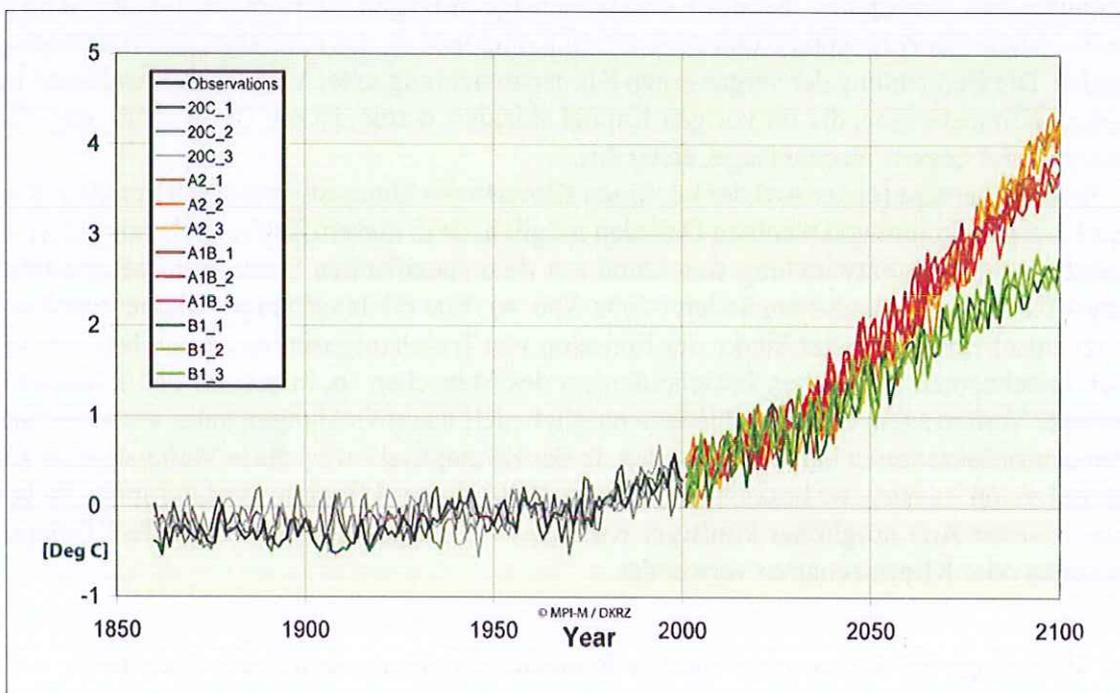


Abb. 4 Globale Jahresmitteltemperatur berechnet mit dem Modell ECHAM5/MPIOM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Die schwarze Kurve kennzeichnet die rekonstruierte globale Jahresmitteltemperatur der letzten etwa 140 Jahre. Grau eingezeichnet sind Berechnungen des vergangenen Klimas. Die farbigen Kurven zeigen die Ergebnisse möglicher künftiger Klimaentwicklungen für verschiedene Szenarien der Treibhausgas- und Schwefeldioxidemissionen (nach ROECKNER et al. 2006a).

5. Konzeptionelle Probleme der Klimavorhersagen

Die Frage, warum wir der Wettervorhersage „glauben“, beantwortete Bjorn STEVENS (Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg) in einem Vortrag am 23. 11. 2008 mit: „10708“. Dies ist die Zahl der Vorhersagen, die das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage bis dato herausgegeben hatte. Damit bringt Bjorn STEVENS folgendes zum Ausdruck: Wettervorhersagemodelle haben den Zweck, den aktuellen Zustand der Atmosphäre und die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens für einige Tage im Voraus zu berechnen. Die Erfüllung dieser Aufgabe lässt sich wohl definiert prüfen. Unter Vorgabe ausgewählter meteorologischer Parameter wird der Abstand der Wettervorhersage von dem tatsächlich eingetretenen Wetter bestimmt und damit die Güte der Vorhersage und letztlich des Modells quantifiziert. Bei Klimamodellen ist das Vorhersage- und Validierungsproblem erheblich komplexer.

5.1 Klimavorhersagen erster und zweiter Art

Zum einen muss der Begriff der Klimavorhersage im Vergleich zur Wettervorhersage weiter gefasst werden. Dazu unterscheidet die Klimaphysik zwei Arten der Klimavorhersage. Nach LORENZ (1979) wird als *Klimavorhersage erster Art* eine Vorhersage des Klimasystems in Abhängigkeit von verschiedenen Anfangsbedingungen bei bekannten Randbedingungen bzw. Klimaantrieben verstanden. Klimavorhersage erster Art und Wettervorhersage sind ähnlich – sie unterscheiden sich dadurch, dass bei der Wettervorhersage die Entwicklung des aktuellen Zustandes der Atmosphäre, bei der Klimavorhersage hingegen die Entwicklung der Statistik des Zustandes der Atmosphäre und der anderen Komponenten des Klimasystems vorhergesagt werden. Die Berechnung der vergangenen Klimaentwicklung unter Vorgabe der Änderung bekannter Klimaantriebe, die im vorigen Kapitel skizziert wurde, ist ein Beispiel für eine Vorhersage, oder besser: Nachhersage, erster Art.

Eine Vorhersage (erster Art) der künftigen Klimaentwicklung ist vermutlich nur über einen sehr kurzen Zeitraum von wenigen Dekaden möglich, da in diesem Zeitbereich zumindest die globale Temperaturentwicklung sich kaum mit dem spezifischen Szenarium menschlichen Eingriffes in das Klimasystem ändert (siehe Abb. 4). Erst die langfristige Klimaentwicklung hängt entscheidend von der Stärke der Emission von Treibhausgasen und damit letztlich von noch unbekanntem politischen Entscheidungen des Menschen ab. In diesem Fall können nur bedingte Vorhersagen, also verschiedene mögliche Klimaentwicklungen unter verschiedenen Klimaantriebsszenarien berechnet werden. In der Klimaphysik wird diese Vorhersage als *Klimavorhersage zweiter Art* bezeichnet (LORENZ 1979). In der Literatur werden für die Vorhersage (zweiter Art) möglicher künftiger Klimaentwicklungen auch die Begriffe Klimaprojektionen oder Klimaszenarien verwendet.

5.2 Vorhersage des Klimas als einmalige Realisation eines stochastischen Prozesses

Ähnlich wie bei der Wettervorhersage, lässt sich die Güte von Klimamodellen hinsichtlich der Beschreibung des gegenwärtigen Klimas quantitativ überprüfen (REICHLER und KIM 2008). Dies zeigt nur, dass viele der schnellen Klimaprozesse (z. B. Treibhauseffekt, ...) hinreichend gut verstanden sind. Die Modellierung langsamer Prozesse, wie etwa der Aufbau oder das Abschmelzen kontinentaler Eismassen oder die Migration von Vegetationszonen, kann nur anhand paläoklimatologischer Daten geprüft werden.

Paläoklimatologische Daten liegen im Allgemeinen nur in indirekter Form als sogenannte Stellvertreter- oder Proxydaten vor, also etwa in Form verschiedener Isotope des Sauerstoffs oder als variierende Weite der Jahrringe des Stammholzes von Bäumen, aus denen unter bestimmten Annahmen die Variation der Lufttemperatur abgeleitet werden kann. Zudem ist es oft schwierig zu beurteilen, wie repräsentativ ein Klimaarchiv ist, ob ein regionales oder nur ein lokales Klimasignal gespeichert ist. Doch auch wenn die paläoklimatologische Information vollständig wäre, bleibt ein prinzipielles Problem der Validierung von Klimamodellen.

Klima muss modelltheoretisch als stochastischer Prozess interpretiert werden. Die Bewegung im Klimasystem umfasst einen weiten räumlichen Skalenbereich von der Bildung von Wolkentröpfchen, Windböen, Drift der Pflanzenpollen bis hin zu Ozeanwirbeln und -strömungen und dem Vordringen und Abschmelzen großer Eisschilde. Daher ist es technisch nicht möglich, sämtliche Bewegungen deterministisch zu beschreiben. Stattdessen wird die Komplexität des Problems dadurch reduziert, dass die meteorologischen Variablen, die den Zustand des Systems charakterisieren (wie z. B. Windgeschwindigkeit, Temperatur, Konzentration des Kohlenstoffs in Böden, den Ozeanen und der Luft, ...), räumlich und zeitlich gemittelt werden. Die Unterteilung der Zustandsvariablen in raum-zeitliche Mittelwerte und Abweichungen vom Mittelwert werden im Klimamodell im Allgemeinen durch die im Kapitel 2 erwähnte Diskretisierung der kontinuierlichen Gleichungen in skalige und subskalige Anteile vorgenommen. Die subskaligen Variablen und Prozesse werden als unbekannte, zufällige Größen betrachtet, deren Effekt auf die skaligen Prozesse parameterisiert wird.

Die skaligen Variablen des Klimasystems könnten im Prinzip deterministisch berechnet werden, wenn die Anfangs- und Randbedingungen in beliebig hoher zeitlicher und räumlicher Genauigkeit bekannt wären. Doch dies ist selbst im heutigen Klima nicht möglich. Um der Unsicherheit der Messdaten Rechnung zu tragen, wird ein Ensemble von Simulationen mit geringfügig unterschiedlichen, aber gleich wahrscheinlichen Anfangs- und Randwerten erstellt. Modelltheoretisch betrachtet ist Klima also durch die statistischen Momente des Ensembles der Zustandsvariablen des Klimasystems definiert.

Die Natur liefert kein Ensemble von Klimaentwicklungen, sondern nur eine Realisation. Dies wäre kein Problem, wenn diese Realisation stationär wäre. Dann könnten die statistischen Momente des Ensembles durch die zeitlichen statistischen Momente (Mittelwert über eine Zeitperiode, Varianz innerhalb dieser Periode, ...) berechnet werden. Tatsächlich ändern sich die Klimaantriebe und Randbedingungen, wie z. B. die Lage der Kontinente oder die Häufigkeit der Vulkanausbrüche, fortwährend, sodass sich Klima unter stets anderen Bedingungen entwickelt.

Streng genommen, lässt sich also ein Klimamodell nicht validieren, da aus der einen Realisation des Klimas, welche die Natur bietet, keine Ensemblestatistik abgeleitet werden kann, die mit der vom Klimamodell berechneten verglichen werden könnte. Ferner folgt für die Praxis der Klimamodellierung, dass eine exakte Übereinstimmung zwischen Klimadaten einer bestimmten Klimaperiode und den Ergebnissen einer einzelnen Klimasimulation nicht erwartet werden kann.

Ein Ausweg aus diesem grundsätzlichen Dilemma bietet die Konstruktion von Paläoensembles. Schließlich finden sich in der Klimageschichte Abschnitte mit durchaus ähnlichen Randbedingungen. Als anschauliches Beispiel für ein Paläoensemble seien die sogenannten Dansgaard-Oeschger-Ereignisse genannt. Als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse werden abrupte Erwärmungen während einer Eiszeit bezeichnet. Diese Ereignisse traten während der letzten Eiszeit (und vermutlich ebenfalls in den älteren Eiszeiten) häufig auf und weisen eine ähnliche,

„typische“ räumliche und zeitliche Struktur auf, die sich modelltheoretisch interpretieren lässt (GANOPOLSKI und RAHMSTORF 2001). Gleiches gilt für die Interglaziale, die während der letzten 800 000 Jahre einen zumindest qualitativ ähnlichen Verlauf nahmen.

6. Können wir den Klimavorhersagen glauben? Eine zusammenfassende Antwort

Klimamodellierung dient dem Verständnis der Dynamik des Klima- oder Erdsystems und bietet damit letztlich die Grundlage für die Vorhersage von auf plausiblen wirtschaftlichen Entwicklungsszenarien basierenden, möglichen künftigen Klimaänderungen. Eine solche bedingte Vorhersage, auch Klimavorhersage zweiter Art genannt, unterscheidet sich deutlich von einer Wettervorhersage. Während bei der letzteren die Vorhersage mit der Erwartung einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit verknüpft ist, macht erstere *a priori* keine Aussage zur Eintrittswahrscheinlichkeit. Die ihrer Struktur nach den Wettervorhersagen ähnlichen Klimavorhersagen erster Art lassen sich daher nur für vergangene Klimaperioden, gleichsam als „Nachhersage“, und für wenige Dekaden in die Zukunft durchführen. Für die nähere Zukunft hängt die Klimaentwicklung nur marginal vom bisher noch nicht vorhersagbaren spezifischen Handeln der Menschen ab. Das anthropogene Antriebssignal der letzten Dekaden hat sich bereits dem Klima hinreichend stark aufgeprägt.

Klimamodellierung wird mit einem Spektrum verschieden komplexer Klimamodelle durchgeführt, wobei die komplexen Klimamodelle eine besondere Rolle spielen. Diese räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modelle geben die Bewegung der Atmosphäre und des Ozeans sowie die Änderung der Vegetationsdecke in quasi-realistischem Detail wieder und dienen daher als quasi-realistische Labore für Klimaexperimente.

Schnelle Klimaprozesse, wie z. B. die Wetterentwicklung und der Treibhauseffekt, sind bereits gut verstanden. Bei vielen Klimamodellen ist die Simulation der Entwicklung eines typischen Tiefdruckgebiets von der eines natürlichen Tiefs kaum zu unterscheiden. Insofern können die numerischen Simulationen für mögliche Klimaentwicklungen in der Nähe des gegenwärtigen Klimas als robust und gewissermaßen vertrauenswürdig eingestuft werden. Die Validierung langsamer Klimaprozesse stößt an prinzipielle Grenzen. Die Natur liefert nur eine Realisation des Klimas, und diese ist nur bruchstückhaft und zumeist nur indirekt rekonstruierbar. Andererseits gelingt mit zunehmendem Erfolg die qualitative Überprüfung der Modelle anhand einer Vielzahl paläoklimatologischer Archive aus verschiedenen Klimaepochen. Somit wird auch die Beschreibung möglicher Klimaentwicklungen, die sich von dem jetzigen Klimazustand deutlich entfernen, zunehmend belastbarer. Da der Mensch sein Handeln nicht an der aktuellen Klimaentwicklung ausrichtet, sondern sich durch die Vorstellung möglicher starker Klimaänderungen leiten lässt, erlangt die Simulation starker Klimaänderungen zunehmend an Bedeutung.

Dank

Der Autor dankt Barbara ZINECKER, Max-Planck-Institut für Meteorologie, für editorische Hilfe. Dank gebührt ebenfalls Thomas RADDATZ und Erich ROECKNER, Max-Planck-Institut für Meteorologie, für die Grundlagen und die Erstellung der Abbildungen 3 und 4.

Literatur

- ARISTOTELES: 350 BC: Meteorologia. In: GRUMACH, E., und FLASHAR, H.: *Aristoteles*, Werke, in deutscher Übersetzung. Band 12, Teil I. Berlin: Akademie-Verlag 1984
- ARRHENIUS, S.: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos. Mag. J. Sci.* 41, 237–276 (1896)
- CLAUSSEN, M.: Von der Klimamodellierung zur Erdsystemmodellierung: Konzepte und erste Versuche. *Ann. Meteorol. NF* 36, 119–130 (1998)
- CLAUSSEN, M.: Earth system models. In: EHLERS, E., and KRAFFT, T. (Eds.): *Understanding the Earth System: Compartments, Processes and Interactions*. Heidelberg: Springer 2001
- CLAUSSEN, M.: Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in der Vergangenheit und Zukunft. *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.* 15/1, 21–30 (2003)
- CLAUSSEN, M., MYSAK, L. A., WEAVER, A. J., CRUCIFIX, M., FICHEFET, T., LOUTRE, M.-F., WEBER, S. L., ALCAMO, J., ALEXEEV, V. A., BERGER, A., CALOV, R., GANOPOLSKI, A., GOOSSE, H., LOHMAN, G., LUNKEIT, F., MOKHOV, I. I., PETOUKHOV, V., STONE, P., and WANG, Z.: Earth System Models of Intermediate Complexity: Closing the Gap in the Spectrum of Climate System Models. *Climate Dyn.* 18, 579–586 (2002)
- GANOPOLSKI, A., and RAHMSTORF, S.: Simulation of rapid glacial climate changes in a coupled climate model. *Nature* 409, 153–158 (2001)
- GREENSPAN, H. P.: *The Theory of Rotating Fluids*. Paperback Edition 1980. Cambridge: University Press 1969
- HANN, J.: *Handbuch der Klimatologie*. Stuttgart: Engelhorn 1883
- HANTEL, M., KRAUS, H., and SCHÖNWIESE, C.-D.: Climate definition. In: FISCHER, G. (Ed.): *Climatology. Landolt-Börnstein, Functional Relationships in Science and Technology V/4/c1*. Berlin: Springer 1987
- HAUG, G. H., and TIEDEMANN, R.: Effect of the formation of the isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature* 393, 673–676 (1998)
- HAUG, G. H., GANOPOLSKI, A., SIGMAN, D. M., ROSELL-MELE, A., SWANN, G. E. A., TIEDEMANN, R., JACCARD, S. L., BOLLMANN, J., MASLIN, M. A., LENG, M. J., and EGLINTON, G.: North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago. *Nature* 433, 821–825 (2005)
- HUMBOLDT, A. VON: *Kosmos, Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Band I*. Stuttgart, Tübingen: J. G. Cotta 1845
- JUNGCLAUS, J. H., KEENLYSIDE, N., BOZET, M., HAAK, H., LUO, J.-J., LATIF, M., and MAROTZKE, J.: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate* 19/16, 3952–3972 (2006)
- KRAUS, H.: *Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 2000
- LORENZ, E. N.: Forced and free variations of weather and climate. *J. Atmos. Sci.* 36, 1367–1376 (1979)
- MAROTZKE, J., and BOZET, M.: Present-day and ice-covered equilibrium states in a comprehensive climate model. *Geophys. Res. Lett.* 34, L 16704 (2007)
- MCGUFFIE, K., and HENDERSON-SELLERS, A.: *A Climate Modelling Primer*. 2nd ed. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: J. Wiley & Sons 1997
- NORTH, G. R., CAHALAN, R. F., and COAKLEY, J. A. JR.: Energy balance climate models. *Rev. Geophys. Space Phys.* 19, 91–121 (1981)
- PAILLARD, D.: The timing of Pleistocene glaciations from a simple multiple-state climate model. *Nature* 391, 378–381 (1998)
- PEIXOTO, J. P., and OORT, A. H.: *Physics of Climate*. New York: American Institute of Physics 1992
- PONGRATZ, J., REICK, C. H., RADDATZ, T., and CLAUSSEN, M.: Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochem. Cycles* 23, GB4001, doi:10.1029/2009GB003488 (2009)
- RANDALL, D. A., WOOD, R. A., BONY, S., COLMAN, R., FICHEFET, T., FYFE, J., KATTSOV, V., PITMAN, A., SHUKLA, J., SRINIVASAN, J., STOUFFER, R. J., SUMI, A., and TAYLOR, K. E.: Climate models and their evaluation. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M., and MILLER, H. L. (Eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press 2007
- REICHLER, T., and KIM, J.: How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Met. Soc.* 89, 303–311. doi:10.1175/BAMS-89-3-303 (2008)
- ROECKNER, E., BRASSEUR, G. P., GIORGETTA, M., JACOB, D., JUNGCLAUS, J., REICK, C., and SILLMANN, J.: *Climate projections of the 21st century. MPI Internal Report, 28 pp.* Hamburg, Max Planck Institute for Meteorology, Germany. 2006a.
Available at <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/ClimateProjections2006.pdf>

Von der Arrheniusschen Energiebilanz zum Erdsystemmodell

- ROECKNER, E., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KORNBLUEH, L., and MANZINI, E.: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate* 19/16, 3771–3791 (2006)
- SALTZMAN, B.: *Dynamical Paleoclimatology: Generalized Theory of Global Climate Change*. International Geophysics Series, Vol. 80. San Diego: Academic Press 2002
- SCHELLNHUBER, H.-J.: Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402, C19–C26 (1999)
- STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer 1973
- TIMMRECK, C., LORENZ, S., NIEMEIER, U., and GROUP, S. V.: *The Climate Impact of a Yellowstone Super Eruption: An Earth System Model Approach*. Vienna: EGU General Assembly 2009
- VERNANDSKY, V. I.: *The Biosphere*. New York: Springer 1997 (Originalveröffentlichung: 1926 in Russisch)

Prof. Dr. Martin CLAUSSEN
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Meteorologisches Institut der Universität Hamburg
KlimaCampus Hamburg
Bundesstraße 53
20146 Hamburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 40 41173225
Fax: +49 40 41173350
E-Mail: martin.claussen@zmaw.de