

# Perspektiven der Klimamodellierung

*Ulrich Cubasch und Irina Fast*

Institut für Meteorologie  
Fachrichtung Wechselwirkung im Klimasystem der Erde  
Prof. Dr. Ulrich Cubasch  
Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10  
12165 Berlin  
+ 49 - 30 - 838 71217  
cubasch@zedat.fu-berlin.de

Aktuelle Klimamodelle sind weit davon entfernt, das Klimasystem in all seinen Komponenten und Teilprozessen abzubilden. Ihre numerischen Experimente ermöglichen dennoch wertvolle Einsichten in das Wechselspiel natürlicher und menschlicher Ursachen von Klimaänderungen. Mittlerweile gelingt es, ein halbes Jahrtausend Klimageschichte im Rechner realistisch zu simulieren. Ulrich Cubasch, der daran maßgeblich beteiligt war, zeigt im folgenden auch, wie sich Klimamodelle auf die Zukunft anwenden lassen, und weshalb Klimaforscher in Zukunft noch größere und schnellere Supercomputer benötigen.

Klimamodelle beschreiben das Klimasystem der Erde in physikalisch-mathematischen Gleichungen, die von einem Computer numerisch gelöst werden können. Diese Gleichungen bilden, so weit möglich, das Zusammenwirken der einzelnen Teile des komplexen Klimasystems und deren interne Veränderungsprozesse ab. Daraus „errechnet“ der Computer das Klima: die für einen geographischen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum charakteristische Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Wetterzustände und Witterungsvorgänge.

Die Komponente des Systems, die den Kern jedes Klimamodells bildet und in der sich das Wetter abspielt, ist die Atmosphäre, die mit der Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf) und der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) sowie der Pedosphäre (Bo-

den) und der Lithosphäre (Erdkruste) in Wechselwirkung steht (Abb. 1). Die unterschiedlichen Zeitskalen, in denen diese Teilsysteme sich verändern, bestimmen das zeitliche Verhalten, die Dynamik des Klimasystems. Die Schwankungen des Teilsystems Atmosphäre, gemeinhin als „Wetter“ bekannt, also z.B. der Wolken und Luftdruckgebiete, verändern sich in Stunden und Tagen; die Tiefenströmungen der Ozeane oder die großen Eismassen wandeln sich in Zeitskalen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden.

Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, dass im Klimasystem kleine interne Störungen durch sog. nichtlineare Wechselwirkungen potenziell große Wirkungen hervorrufen können. Außerdem sind externe Anregungsfaktoren – „Antriebe“ – zu berücksichtigen. Dazu gehören Veränderungen in der Sonneneinstrahlung, bedingt etwa dadurch, dass sich die Bahn der Erde um die Sonne sowie die Lage der Erdachse zur Erdbahn mit der Zeit ändern. Auch die Strahlung der Sonne, des energetischen Motors des Klimasystems, ist zeitlich nicht konstant, sondern unterliegt Schwankungen. Und schließlich zählt der Vulkanismus zu den externen Antrieben. Gesondert betrachtet wird in der aktuellen Klimadebatte der Faktor Mensch, also vor allem der Antrieb durch den zusätzlichen Treibhauseffekt, der aus der Schadstoffbelastung der Atmosphäre rührt.

Aktuelle Modelle bilden Atmosphäre und Ozean als Einzelsysteme und in ihrem Zusammenwirken physikalisch ab; die anderen Teilsysteme des Klimas binden sie nur in pauschalierter Form ein. Um diese Gleichungssysteme nun im Computer zu lösen, werden die Erdatmosphäre sowie der Ozean zunächst in Gitterzellen zerlegt. Diese Gitterzellen haben heutzutage eine Kantenlänge von

typischerweise 250 bis 500 km in der Horizontalen und 9 bis 20 Schichten in der Vertikalen. Physikalisch-chemische Vorgänge, die innerhalb einer Gitterzelle ablaufen, wie z.B. die Wolkenbildung, werden nicht als Prozesse direkt modelliert, sondern „parametrisiert“, d.h. aus den an den Rändern der Gitterzelle bekannten Werten über bekannte meteorologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet.

Die heutigen Klimamodelle haben sich aus Wettervorhersagemodellen entwickelt, was den Vorteil hat, dass sie routinemäßig erprobt sind. Sie werden an der Realität „geeicht“, indem man mit ihnen das heutige Klima nachrechnet und die Ergebnisse mit dem tatsächlich beobachteten Klima vergleicht.

### Simulation des historischen Klimas

Mittlerweile sind die Rechanlagen so schnell geworden, dass man die Modelle auch für eine Simulation des Klimageschehens der letzten Jahrhunderte einsetzen kann. Damit werden numerische Experimente möglich, in denen die Modelle gewissermaßen anhand der Klimageschichte überprüft werden können.

In einer kürzlich in Zusammenarbeit mit dem Hamburger Max Planck Institut für Meteorologie und der GKSS durchgeführten

Klimasimulation wurden die letzten 1000 Jahre am Computer nachgerechnet. Man geht dabei davon aus, dass zu Beginn dieses Zeitraums der Einfluss des Menschen, jedenfalls global gesehen, gering war; als äußere Antriebe werden Sonnenaktivität, Vulkanismus sowie die Treibhausgase vorgeschrieben, die bis zum Beginn der Industrialisierung überwiegend natürlichen Ursprungs waren. Wert und Verlauf dieser Antriebe leitet man aus sogenannten „Stellvertreter“-Daten („Proxies“) her, da sie, ebenso wie die Temperaturen und andere Klimaelemente, damals nicht direkt gemessen wurden. Aus Proxy-Daten wie Baumringen und Sedimentbohrkernen und einer Vielfalt von historischen Aufzeichnungen (Wetterbeobachtungen, Ernteerträge, Deichreparaturkosten, Segelzeiten von Schiffen) kann man aber auch den Verlauf des historischen Klimas rekonstruieren. Das numerische Experiment zeigt, dass das Klimamodell die so rekonstruierte globale Klimaentwicklung (Abb. 2) und insbesondere das Phänomen der sogenannten „Kleinen Eiszeit“ in Europa realistisch zu simulieren vermag.

Die Klimaberechnung zeigt, dass besonders während des „Späten Maunder Minimums“ (1675 – 1715), einer Zeit verringerter Sonnenaktivität und nahezu verschwindender Sonnenfleckenaktivität, das Klima global kälter war als

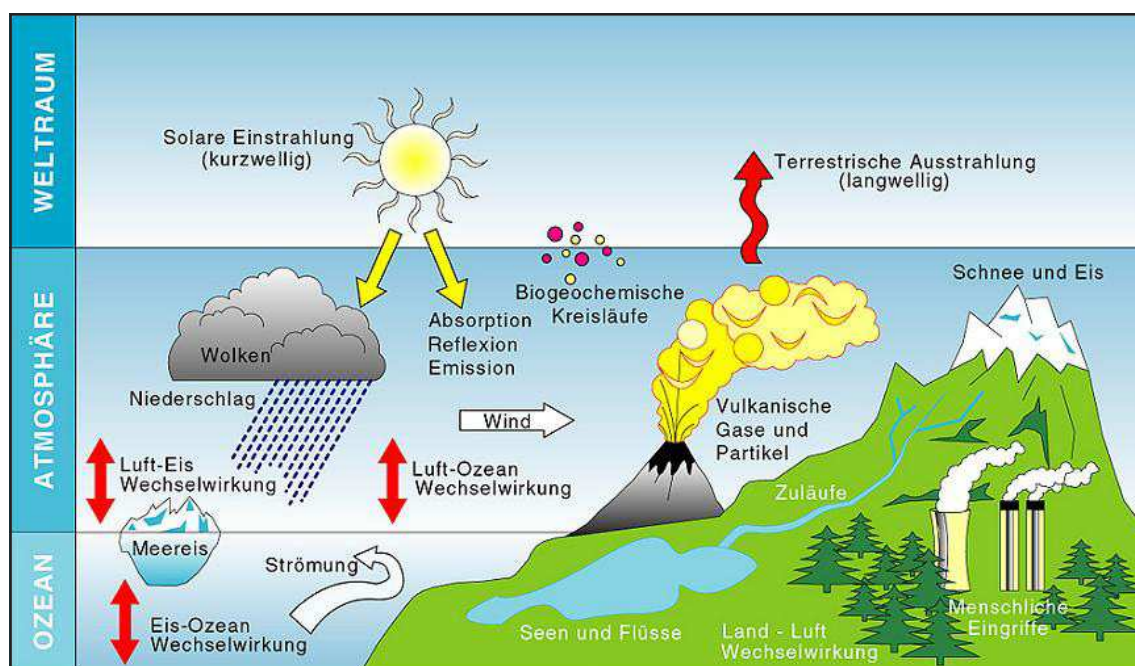


Abb. 1: Das Klimasystem und seine Komponenten (Cubasch und Kasang, 2000)

heute. Diese Kältephase – ein Höhepunkt der Kleinen Eiszeit – ist durch historische Aufzeichnungen für Europa dokumentiert; wir kennen sie z.B. aus den berühmten Winterlandschaften zeitgenössischer holländischer Meister. Ein Vergleich der Klimarekonstruktion mit der Modellsimulation zeigt für Mitteleuropa eine gute Übereinstimmung (Abb. 3), während man in Nordeuropa deutliche Unterschiede

sieht; sie könnten aber auch auf die schlechte Datenlage in diesen Gebieten zurückzuführen sein. Die Simulation zeigt deutlich, dass eine wesentliche Ursache der „Kleinen Eiszeit“ im Wechselspiel zwischen veränderter Sonnenaktivität, Vulkanismus und einer Kopplung von Atmosphäre, Ozean und Meereis liegen muss, so wie es in dem Klimamodell angesetzt wurde.

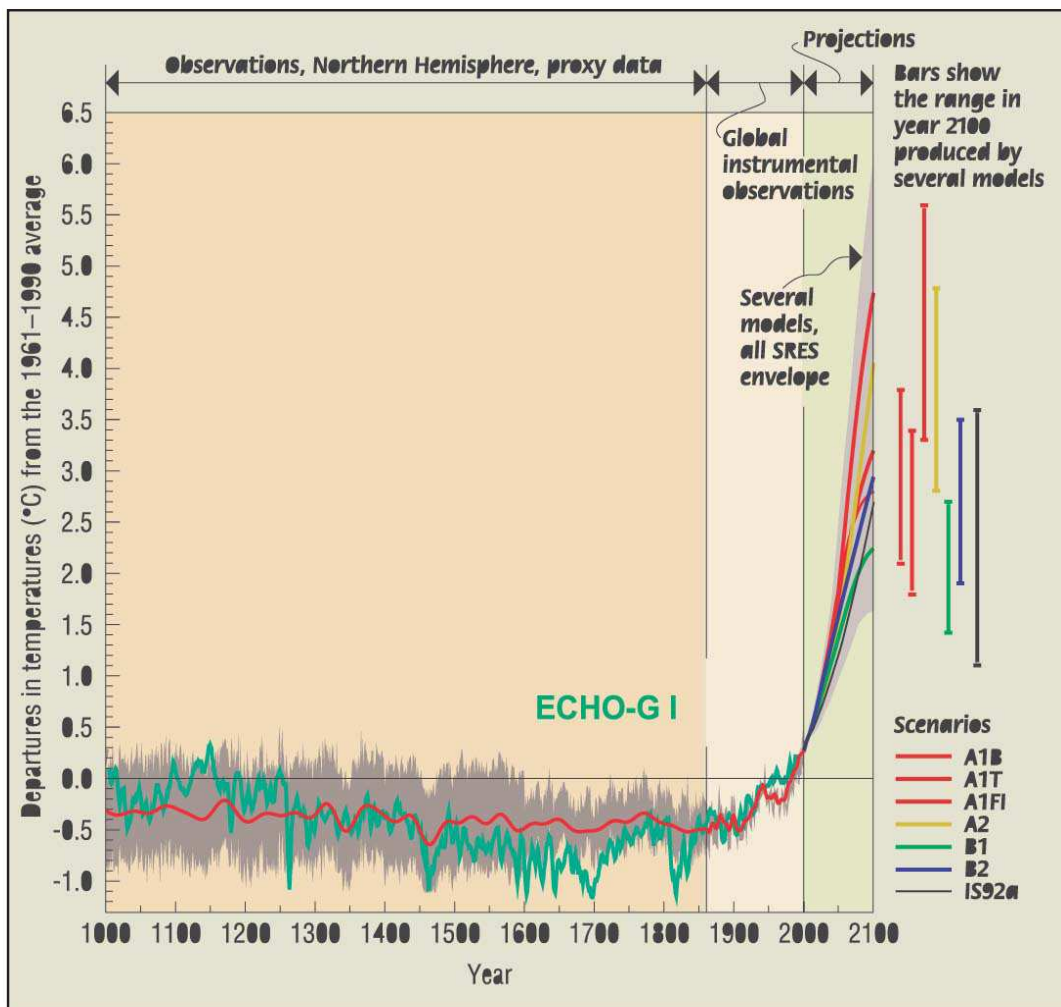


Abb. 2:

Die Änderung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in bezug auf den Durchschnitt der Jahre 1961 – 1990. Vom Jahr 1000 bis zum Jahr 1860 wurde nur für die Nordhalbkugel gemittelt, da für die Südhalbkugel keine Daten vorliegen. In diesem Zeitraum wurden die Werte aus Baumringen, Korallen, Eisbohrkernen und historischen Überlieferungen hergeleitet. Die rote Linie zeigt das 50-Jahresmittel, das graue Band das 95%-Vertrauensintervall der Jahresdaten. Von 1860 bis 2000 beruht die Kurve auf den mit Instrumenten gemessenen Werten, die rote Linie zeigt hier das 10-Jahresmittel. Diese Kurve wird häufig als „Hockeyschläger“ bezeichnet.

Vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2100 sind Temperaturhochrechnungen für die sechs Standard-SRES-Szenarien sowie das „business as usual“ Szenario des vorletzten IPCC-Berichts (IS92a) eingetragen, die mit einem Modell mittlerer Klimasensitivität berechnet wurden. Das graue Band mit der Bezeichnung „several models – all SRES envelope“ zeigt die Ergebnisbandbreite, wenn man alle 35 SRES-Szenarien und verschiedene Modelle weltweit in Betracht zieht.

Ebenfalls eingezeichnet ist das Ergebnis einer Simulation der letzten 1000 Jahre (türkise Kurve). Das Modell berücksichtigt die Veränderlichkeit der Sonne, den Vulkanismus sowie Veränderungen in den Konzentrationen der Treibhausgase. Man sieht deutlich das „Späte Maunder-Minimum“ um 1675 – 1715 als auch das Dalton-Minimum um ca. 1810 – 1830 (kombiniert aus IPCC, 2001 und Zorita et al, 2004).



## Das Klima im Zeitalter der Industrialisierung

Eine häufig in der Öffentlichkeit gestellte Frage ist, inwieweit die Sonne und die Vulkane an den in den letzten 150 Jahren beobachteten Klimaveränderungen beteiligt sind, oder ob diese primär durch den Menschen bzw. die Industrialisierung hervorgerufen wurden. Klimamodelle können helfen, die vielfach umstrittenen Ursachen für diese Klimaveränderungen zu identifizieren. Hierzu wurden mehrere Klimaexperimente durchgeführt: In einem ersten Experiment berücksichtigte man im Modell nur die Schwankungen der Sonnenintensität (S), in einem zweiten nur den Vulkanismus (V), in einem dritten die anthropogenen Treibhausgase (G), und in den weiteren Experimenten die Kombinationen der verschiedenen Klimaantriebe. Wie man aus Abb. 4 erkennen kann, muss man alle ursächlichen Anteile berücksichtigen, um eine Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung zu erhalten. Nicht Natur oder Mensch, sondern Natur und Mensch sind offensichtlich für den jüngsten Klimawandel verantwortlich.

### Blick in die Zukunft:

#### a) Szenarien

Um realistisch abschätzen zu können, wie sich das Klima in der Zukunft entwickeln wird, muss man nicht nur die innere Dynamik des Klimasystems kennen, sondern auch die zukünftige Entwicklung der Antriebe. Sie ist für die natürlichen Antriebe, etwa die Sonne, un-

gewiss. Für den immer stärker werdenden Faktor Mensch hat man verschiedene „Szenarien“ entwickelt. Jedes Szenario beschreibt einen plausiblen, auf bestimmten Annahmen beruhenden Entwicklungspfad der Menschheit, der sich auf die zu erwartenden Emissionen (insbesondere an Kohlendioxid) und Umweltveränderungen auswirkt.

In diese Szenarien fließt ein, wie sich die Weltbevölkerung verändern wird, welchen Lebensstandard sie erreichen wird, wie viel Energie sie verbrauchen wird und welche Energieträger man dafür einsetzen wird. Eine Expertengruppe des International Panel on Climate Change (IPCC) hat sich auf etwa 35 Emissionsszenarien, sogenannte „SRES-Szenarien“ geeinigt, denen verschiedene „story lines“ zugrunde liegen. Diese Vielfalt an Szenarien ist in vier Familien (Abb. 5) unterteilt, und sie werden durch sechs Standardszenarien repräsentiert:

Die A1-Szenarienfamilie beschreibt eine Welt mit sehr schnellem Wirtschaftswachstum, einer Weltbevölkerung, die in der Mitte des nächsten Jahrhunderts ihr Maximum erreichen und danach abnehmen wird, und die schnelle Einführung neuer und effizienterer Technologien. Regionale Unterschiede in Lebensstandard und Einkommen werden ausgeglichen. Diese Familie kann in drei Gruppen unterteilt werden, welche verschiedene technologische Pfade der Energiegewinnung berücksichtigen: A1-FI legt das Schwergewicht auf fossile Brennstoffe (Kohle, Öl, Erdgas), A1-T auf massivem

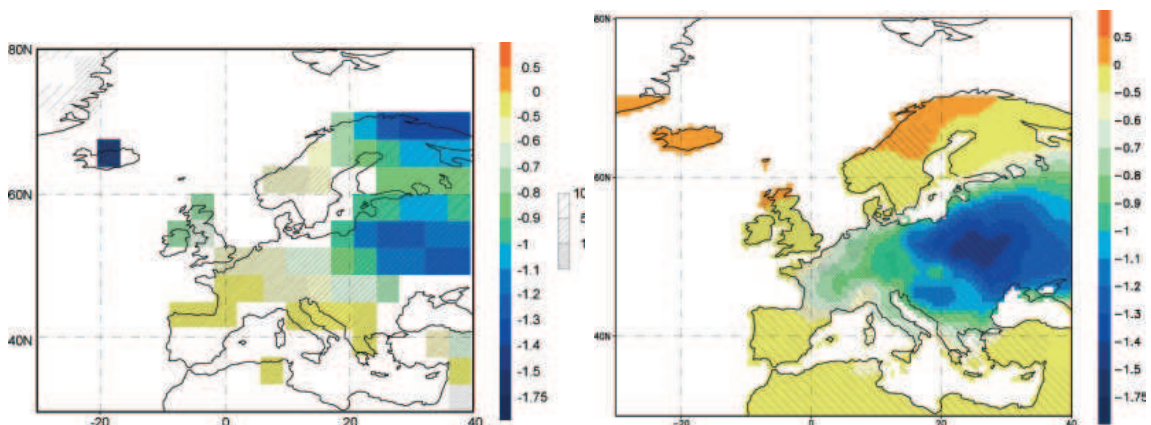


Abb. 3: Die Temperaturabweichung während des „Späten Maunder Minimums“: links das errechnete Ergebnis der Modellsimulation, rechts die aus historischen Überlieferungen rekonstruierten Werte. Die Straffierung gibt die Signifikanz wieder – je dichter die Schraffur, desto besser ist der Wert abgesichert (Zorita et al, 2004).

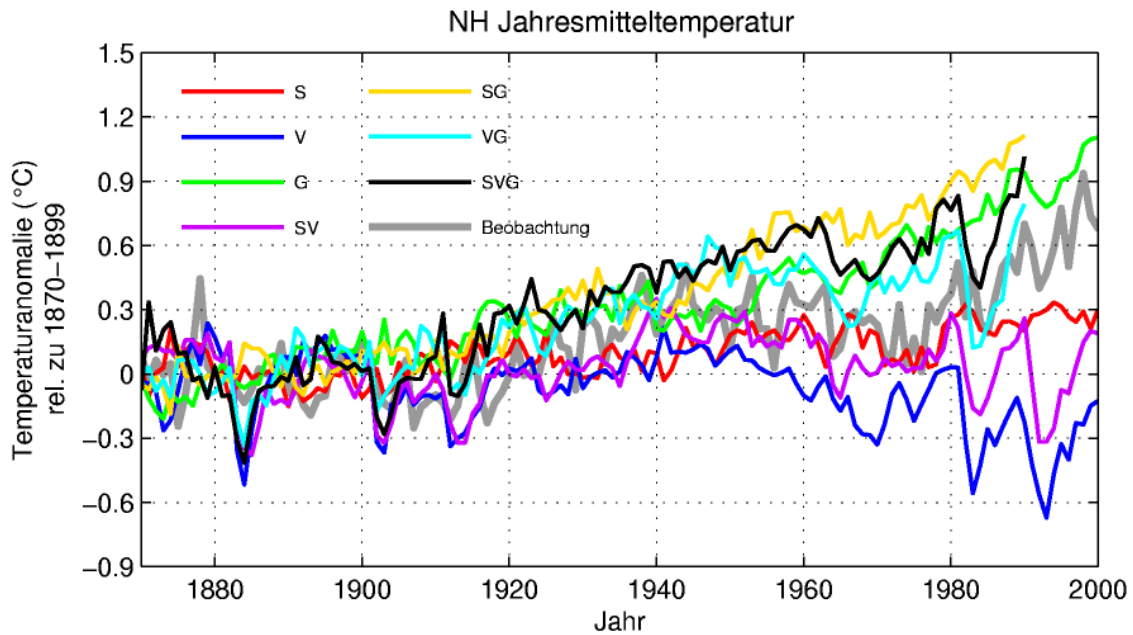


Abb. 4: Man kann Klimamodelle nutzen, um getrennt die Temperaturänderungen zu berechnen, die jeweils durch verschiedene Faktoren hervorgerufen werden (S: solar; V: vulkanisch; G: anthropogene Treibhausgase; SV: solar und vulkanisch; usw.). Man bekommt die beste Simulation der Beobachtungskurve, wenn man sowohl anthropogene als auch natürliche Antriebsfaktoren berücksichtigt (Cubasch et al, 2005).

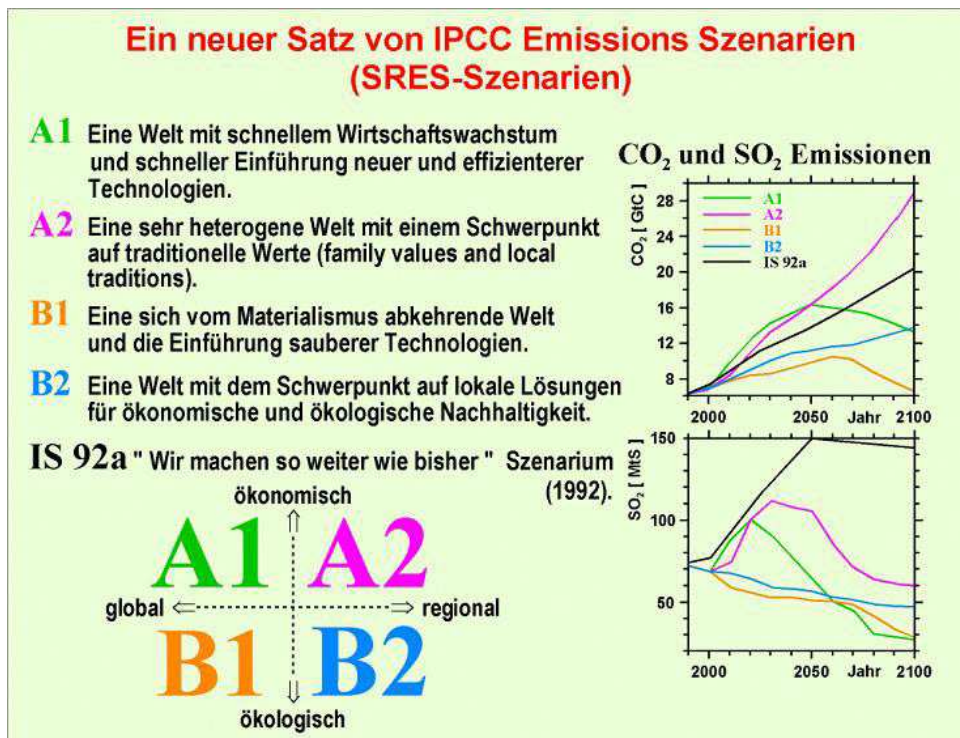


Abb. 5: Die vier Leitszenarien des jüngsten IPCC-Berichts im Überblick zusammen mit dem älteren „business as usual“ Szenarium des Berichts von 1992. Die beiden Diagramme zeigen den für diese Szenarien jeweils prognostizierten Verlauf der globalen Kohlendioxid- (rechts oben) und Schwefeldioxidemissionen (rechts unten) bis zum Jahr 2100. Diese Emissionen bestimmen maßgeblich den Einfluss des Menschen auf das Klima und gehen direkt in die Hochrechnungen der Klimamodelle ein (IPCC, 2001).

Einsatz nicht-fossiler Energieträger und A1-B beruht auf einer Mischung von verschiedenen Energieträgern.

Die A2-Szenarienfamilie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Man geht von einer gewissen regionalen Autarkie und dem Erhalt lokaler Unterschiede aus. Die Weltbevölkerung nimmt kontinuierlich zu. Die ökonomische Entwicklung, der Lebensstandard und die Einkommen sind regional sehr unterschiedlich, der technologische Wandel geht nur langsam voran.

Die B1-Szenarienfamilie geht wie A1 von einer Weltbevölkerung aus, die nur bis Mitte des nächsten Jahrhunderts anwächst. Die ökonomische Entwicklung geht jedoch mehr in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft mit weniger Materialverbrauch und der Einführung von sauberen und effizienten Technologien. Das Gewicht liegt auf globalen, nachhaltigen Lösungen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Probleme.

Die B2-Szenarienfamilie unterstellt eine Entwicklung, in der lokale, nachhaltige Lösungen für ökonomische, ökologische und soziale Probleme gefunden werden. Die Bevölkerung steigt kontinuierlich an, aber langsamer als in A2. Es gibt eine weniger schnelle ökonomische Entwicklung und eine mehr diverse technologische Entwicklung als in den anderen Szenarien. Der Schwerpunkt liegt auf Umweltschutz und sozialer Gerechtigkeit, aber eher auf lokaler und regionaler Ebene.

### **b) Klimahochrechnungen**

Auf der Grundlage dieser Szenarien errechnet sich, dass die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur, ausgehend vom Jahr 1990, um mindestens 1,4 bis maximal 5,8 Grad bis zum Jahr 2100 ansteigen sollte. Dieses Resultat umspannt alle 35 SRES Szenarien und basiert auf mehreren Klimamodellen (Abb. 2). Die enorme Bandbreite der Temperaturprognosen erklärt sich daher zum einen Teil aus der Unsicherheit der Klimamodellrechnungen, zum anderen Teil aus den Unterschieden zwischen den ihnen zugrundegelegten SRES-Emissions-szenarien.

Dennoch sind einige allgemeine Aussagen über das Klima des 21. Jahrhunderts möglich.

Die zu erwartende Erwärmung ist größer als die, die man im 20. Jahrhundert beobachtet hat, und sie ist sehr wahrscheinlich die stärkste der letzten zehntausend Jahre. Der globale Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wird zunehmen, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auch der Niederschlag in den mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre. Dort ist auch mit stärkeren Schwankungen der Niederschläge zu rechnen.

Die Schnee- und Eisbedeckung wird auf der Nordhalbkugel weiter abnehmen, Gletscher und Eiskappen werden sich weiter zurückziehen. Die südpolare Eiskappe wird wegen des dort höheren Niederschlages leicht an Masse gewinnen, während das Grönland-Eis an Masse verlieren wird; dort werden die vermehrten Niederschläge durch das beschleunigte Abschmelzen des Eises überkompensiert. Der Meeresspiegel wird in den nächsten 100 Jahren um 9 bis 88 cm ansteigen. Dies ist in erster Linie auf die Wärmeausdehnung des Wassers in den Ozeanen und das Schmelzwasser der Gletscher zurückzuführen.

Wie sich die Wetterextreme und witterungsbedingte Katastrophen entwickeln, ist für die Menschheit zwar besonders folgenreich, aber nur schwer vorherzusagen. Tab. 1 zeigt, welche Extremereignisse voraussichtlich zunehmen werden, und inwieweit man schon jetzt derartige Trends in den Beobachtungen findet. Viele sehr kleinräumige Wetterphänomene (wie z.B. Tornados und Gewitter) können wegen der groben Auflösung der Modelle aber nicht berechnet werden.

### **Die Zukunft der Klimamodellierung**

Heutige Klimamodelle sind noch weit davon entfernt, die physikalische Komplexität des Klimasystems im Rechner auch nur annähernd abzubilden. Die Modelle, die heute noch hauptsächlich die Strömungsprozesse in Atmosphäre und Ozean abbilden, müssen in Zukunft durch Teil-Modelle für die Chemie der Atmosphäre, für die Biosphäre, die Spurenstoffkreisläufe sowie die Stratosphäre erweitert werden, so dass man zu einem Modell des „Systems Erde“ kommt (Abb. 6). Derartige Modelle sind sehr rechenzeitintensiv.

Um ideale Modellexperimente durchzuführen und um deren Aussagen besser abzusichern, müsste man die Rechnungen mit den komplexen Erdsystem-Modellen auch vielfach wiederholen können – ähnlich wie auch man ein Laborexperiment vielfach variiert und wiederholt. Die Klimaforschung erfordert insgesamt also massive Rechnerkapazitäten. In Japan wurde mittlerweile eine Rechneranlage gebaut, mit der man derartige Aufgaben rechnen kann: den „Earth Simulator“. Mit diesem

zur Zeit leistungsstärksten Supercomputer der Welt wird man das Netz der Gitterzellen viel feiner über die Erde legen können, und damit zukünftig auch Prozesse wie Wolkenbildung in die Modelle einbauen können. Die Japaner gehen davon aus, dass sich die Investition rechnen wird: Schließlich geht es bei der Klimafrage um Energiepolitik, also um eine Kernfrage unserer industriellen Infrastruktur und damit um viele Milliarden Euros.

Wahrscheinlichkeitsstufe beobachteter Veränderungen (2. Hälfte 20. Jahrhundert)	Phänomen	Wahrscheinlichkeitsstufe prognostizierter Veränderungen (im 21. Jahrhundert)
Wahrscheinlich	Höhere Maximum-Temperaturen und mehr heiße Tage in nahezu allen Landgebieten	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	Höhere Minimum-Temperaturen, weniger kalte Tage und Frosttage in nahezu allen Landgebieten	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	Reduzierter Unterschied zwischen Tagesmaxima und -minima in den meisten Landgebieten	Sehr wahrscheinlich
Wahrscheinlich, in vielen Gebieten	Höherer Hitze-Index in Landgebieten	Sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Wahrscheinlich, in vielen Landgebieten der mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel	Häufigere Starkregen	Sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Wahrscheinlich, in wenigen Gebieten	Zunahme kontinentaler Trockenheit und Dürreerisiken im Sommer	Wahrscheinlich, in den meisten kontinentalen Gebieten der mittleren Breiten (Fehlen konsistenter Prognosen über andere Gebiete)
In den wenigen vorliegenden Analysen nicht beobachtet	Zunahme der Windgeschwindigkeitsspitzen in Hurrikanen	Wahrscheinlich, in einigen Gebieten
Zu wenige Daten für eine Beurteilung	Zunahme der mittleren und extremen Niederschlagsstärken bei Hurrikanen	Wahrscheinlich, in einigen Gebieten

Tab. 1: Wahrscheinlichkeitslevel beobachteter und prognostizierter Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse.



## Das Erdsystem-Modell

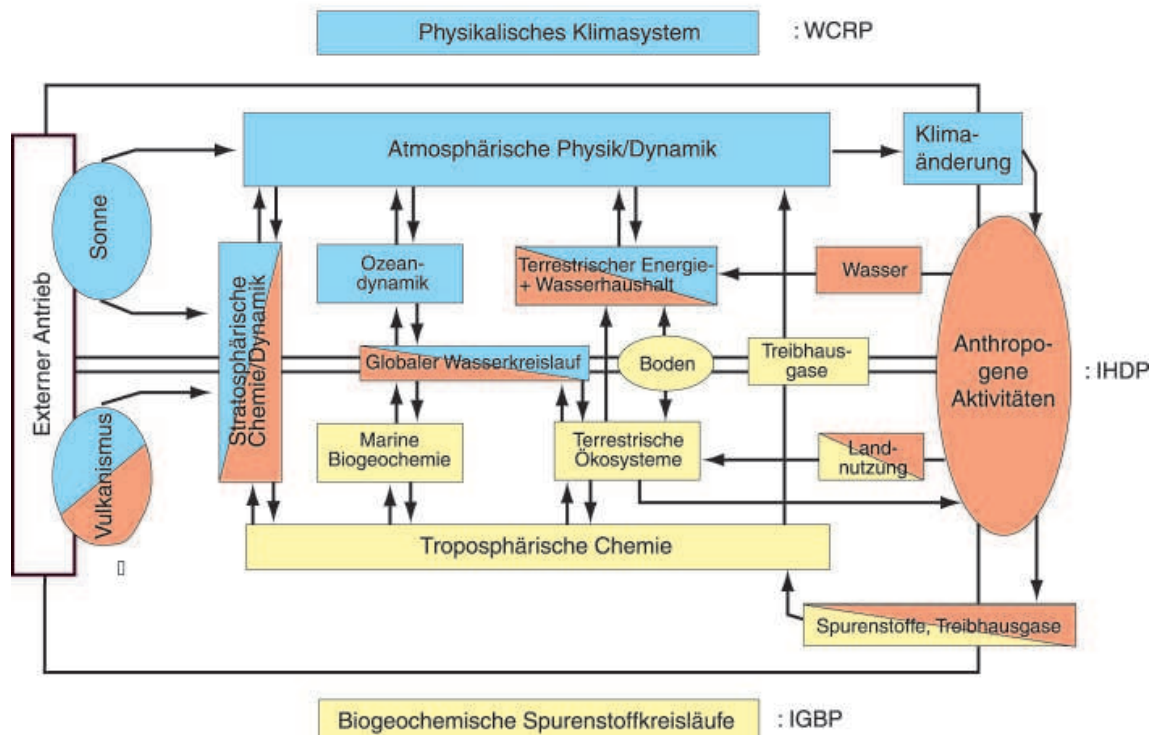


Abb. 6: Schematische Darstellung eines Erdsystemmodells und der dazugehörigen Komponenten. Im Idealfall sollte ein Klimamodell das gesamte System abbilden. Blau: Das physikalische Klimasystem (koordiniert durch das World Climate Research Project (WCRP)); gelb: Das biologische-chemische Klimasystem (koordiniert durch das International Geosphere-Biosphere Program (IGBP)); braun: Der anthropogene Anteil am Klimasystem (koordiniert durch das International Human Dimensions Program (IHDP)) (MPI für Meteorologie).

### Literatur:

- Cubasch, U. und D. Kasang, 2000: Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes-Verlag, Stuttgart, ISBN 3-623-00856-7, 128 S.
- Cubasch, U., G. Bürger, I. Fast, T. Spanghel und S. Wagner, 2005: The Direct Solar Influence on Climate: Modeling the Lower Atmosphere, Mem. S. A. It. Im Druck
- von Storch, H., S. Güss und M. Heimann, 1999: Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung. Springer Verlag ISBN 3-540-65830-0, 255 pp
- IPCC 2001: Projections of future climate change. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. I. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, ISBN 0521 01495 6 – siehe auch [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- [www.es.jamstec.go.jp](http://www.es.jamstec.go.jp)
- Zorita, E., H. von Storch, F. Gonzalez-Rouco, U. Cubasch, J. Luterbacher, S. Legutke, I. Fischer-Bruns und U. Schlese. 2004: Climate evolution in the last five centuries simulated by an atmosphere-ocean model: global temperatures, the North Atlantic Oscillation and the Late Maunder Minimum. Meteorologische Zeitschrift, Meteor. Z. 13, 271-289