Climate Press

Hintergründe der Klima- und Global Change-Forschung Nr. 30 / November 2011

Wie gut sind Klimamodelle?

Klimamodelle sind eine wichtige Grundlage für das Verständnis der Vorgänge im Klimasystem, für die Suche nach Gründen für beobachtete Veränderungen und für die Abschätzung von zukünftigen Entwicklungen. Deshalb stellt sich oft die Frage, wie gut sie die Realität abbilden können.
Klimamodelle sind ein mathematisch-physikalisches Abbild des Klimasystems und beschreiben die Atmosphäre, die Ozeane, die Landoberfläche und die Eisbedeckung. Wie alle wissenschaftlichen Modelle und Theorien bilden sie nicht die exakte Realität ab, sondern sie helfen uns, wichtige Vorgänge zu verstehen und in gewissem Rahmen auch vorherzusagen. Die Klimamodelle können einzelne Aspekte wie die langfristige Entwicklung der globalen Temperatur und gewisse Veränderungen bei den Niederschlägen relativ gut abbilden, haben jedoch Mühe, den ganzen Wasserkreislauf oder Veränderungen von Strömungsmustern korrekt wiederzugeben. Es ist deshalb bei der Interpretation von Modellresultaten wichtig zu wissen, wo die Stärken und Schwächen der Modelle liegen. Die Überprüfung von Modellresultaten mit Messungen ist nicht einfach, weil auch Messungen viele Fehlerquellen haben und oft – vor allem für die Vergangenheit – ganz einfach fehlen. Während die Modellangaben für die zukünftige Entwicklung auf globaler und auch kontinentaler Ebene einigermassen verlässlich sind, gibt es vor allem für regionale Projektionen grosse Unsicherheiten. In den letzten Jahren wurden vor allem bei der Erfassung der Unsicherheiten grosse Fortschritte erzielt. Veränderungen in den atmosphärischen Strömungsmustern, die für Veränderungen des regionalen Klimas entscheidend sind, werden von Klimamodellen nur unzulänglich erfasst. Hier besteht noch ein grosses Verbesserungspotential.

In der Diskussion um die vom Menschen verursachte Klimaänderung und um Massnahmen zur Verminderung oder Anpassung spielen Klimamodelle eine grosse Rolle. Sie bieten die einzige Möglichkeit um abzuschätzen, wie das Klima auf der Erde in 30, 50 oder 100 Jahren aussehen könnte. Doch wie verlässlich sind Klimamodelle überhaupt? Kann man Klimamodelle anhand von Messungen überprüfen? Warum können Klimamodelle Aussagen über 100 Jahre machen, wenn wir das Wetter nicht einmal über zwei Wochen vorhersagen können? Im Folgenden sind einige wichtige Erklärungen, die für das Verständnis von Klimamodellen nötig sind, zusammengestellt.

Das Klimamodell: Physik und Mathematik in Gitternetzen

Es gibt sehr unterschiedliche Arten von Klimamodellen, die sich hauptsächlich durch ihre

sc | nat

Science and Policy
Platform of the Swiss Academy of Sciences

ProClim–
Forum for Climate and Global Change

Redaktion: Urs Neu, ProClim–, urs.neu@scnat.ch; **Layout:** Esther Volken, ProClim–; **Quellen Bildmaterial:** Foto gross: NASA; Foto klein: Christoph Ritz, ProClim–
Herausgeber: ProClim–, Forum für Klima und globale Umweltveränderungen und OcCC, Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Schwarztorstr. 9, 3007 Bern, www.proclim.ch
Tel. 031/328 23 23, Fax: 031/328 23 20

Verschiedene Arten von Klimamodellen

Globale Klimamodelle (AOGCMs)
Die den Klimaprojektionen zugrundeliegenden Modelle sind Globale Atmosphären-Ozean-Zirkulations-Modelle (AOGCMs). Diese Modelle verbinden ein Meteorologie-Modell für die Atmosphäre, ein Ozeanmodell, Schnee- und Eismodelle und ein Vegetationsmodell. In diesen Modellen werden viele Prozesse und Einflussfaktoren direkt berücksichtigt oder näherungsweise beschrieben. Die horizontalen Abstände der Gitterpunkte liegen im Bereich von rund hundert bis einige hundert Kilometer. Bekannte solche Modelle sind z. B. ECHAM5 (Max-Planck-Institut Hamburg), HadGEM1 (Hadley Centre UK), GISS-E (US-Behörde NASA) oder CESM (Community Erdsystem-Modell, NCAR, USA).

Regionale Klimamodelle (RCMs)
Regionale Klimamodelle berechnen das Klima für eine bestimmte Region (z. B. einen Kontinent) nach dem gleichen Prinzip wie die AOGCMs, aber mit viel feinerer Gitternetzauflösung (einige zehn Kilometer). Dadurch können gewisse Prozesse besser dargestellt werden, und auch die Einflüsse der Topographie, insbesondere der Gebirge, können besser erfasst werden. Die Bedingungen am Rand der Region werden aus einem AOGCM übernommen. Viele Aspekte der regionalen Klimamodelle werden jedoch von diesem globalen Modell recht stark beeinflusst.

Erdsystem-Modelle mittlerer Komplexität (EMICs)
Die so genannten EMICs sind Klimamodelle, welche meist die dynamischen Prozesse in der Atmosphäre und im Ozean etwas einfacher beschreiben als die AOGCMs, dafür aber häufig mehr Komponenten und Einflussfaktoren wie zum Beispiel den Kohlenstoffkreislauf berücksichtigen. EMICs weisen grosse Unterschiede bezüglich der Erfassung von Prozessen und dem Einbezug von Einflüssen auf und sind oft auf die Untersuchung bestimmter Fragestellungen zugeschnitten, wie zum Beispiel die Simulation von Eiszeitzyklen.

Einfache Klimamodelle
Einfache Klimamodelle beschreiben die Vorgänge in der Atmosphäre und im Ozean nur sehr grob und werden dazu verwendet, um bestimmte Eigenschaften des Klimasystems oder spezifische Vorgänge zu simulieren. Ein Beispiel dafür ist die Abschätzung der globalen mittleren Temperaturänderung als Folge der Veränderung der Treibhausgaskonzentrationen. Anstelle eines Gitternetzes werden die wichtigen Prozesse nur mit wenigen "Boxen" dargestellt, z. B. mit zwei Boxen für den Atlantischen und den Pazifischen Ozean und einer Box für die Atmosphäre.

Komplexität bzw. die Zahl und Genauigkeit der berücksichtigten Prozesse unterscheiden. Die einfacheren Modelle werden vor allem dazu verwendet, ganz bestimmte Vorgänge im Klimasystem zu analysieren. Im Folgenden werden die komplexen, so genannten Globalen Atmosphären-Ozean-Zirkulations-Modelle (AOGCMs) näher beschrieben, da deren Resultate die Basis für die Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung und die Analyse von Auswirkungen der Klimaveränderung bilden.

Ein Klimamodell ist wie auch ein Wettermodell eine Beschreibung der Atmosphäre oder des Erdsystems in Form von mathematischen Gleichungen. Die Grundgleichungen der Physik beschreiben die Tatsache, dass die jeweilige Summen von Energie, Masse oder Impuls im System erhalten bleiben. Das gilt auch für Stoffe wie Wasser: Wassertropfen können sich nur fortbewegen, gefrieren oder verdampfen, aber sich nicht "in Nichts auflösen" – die Gesamtsumme des Wassers bleibt immer gleich. In einem Klimamodell werden nun die Atmosphäre und die Ozeanbecken in ein Netz von Gitterpunkten unterteilt, mit horizontalen Abständen von meist über hundert Kilometern und vertikalen zwischen wenigen hundert Metern in Bodennähe und mehreren Kilometern in der oberen Atmosphäre (Abb. 1). Mit dem Modell werden an diesen Gitterpunkten die Werte für alle berücksichtigten Grössen (Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlung, Verdunstung, etc.) berechnet. In einer Klimasimulation wird – ausgehend von einem gegebenen Zustand – immer für einen nächsten Zeitschritt (z. B. nach einigen Sekunden oder Minuten) die Änderung dieser Grössen an jedem einzelnen Gitterpunkt bestimmt. So werden für die Änderung der Temperatur zahlreiche Prozesse berücksichtigt, wie zum Beispiel die Temperatur der Luft, die von einem benachbarten Gitterpunkt mit dem Wind herantransportiert wird oder die Strahlung von der Sonne und vom Erdboden. Zusätzlich müssen nach jedem Zeitschritt immer alle physikalischen Gesetze erfüllt sein. Daraus ergibt sich für jeden Zeitschritt ein System von zahlreichen Gleichungen, die gleichzeitig gelöst

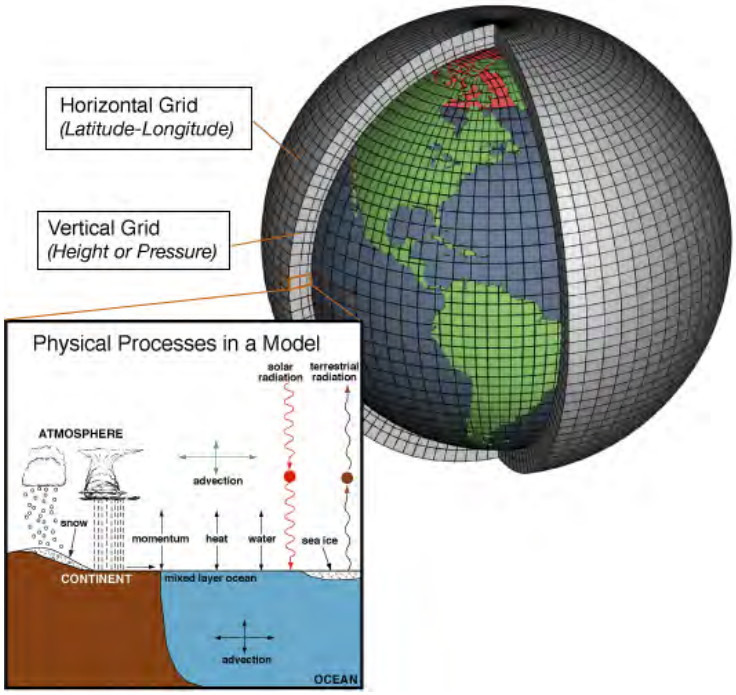

Abbildung 1:
Prinzip eines Klimamodells.
Quelle: NOAA

werden müssen. Diese Lösung wird mit aufwändigen mathematischen Verfahren berechnet. Danach wird auf gleiche Art der nächste Zeitschritt berechnet, usw.

Herausforderungen bei diesen Berechnungen sind einerseits kleinräumige Prozesse, die zwischen den Gitterpunkten ablaufen, wie z. B. Wolkenbildung und -auflösung oder kleine Luftwirbel, und anderseits Prozesse an der Erdoberfläche wie das Bremsen der Luftströmung durch die Bodenoberfläche oder die Feuchtigkeitsabgabe von Boden und Pflanzen. Da deren Komplexität keine direkte Simulation erlaubt, werden statistische Beziehungen zwischen diesen Prozessen und simulierten Durchschnittsgrössen verwendet. Diese Beziehungen beruhen oft auf Messungen. So gibt es zum Beispiel einen statistischen Zusammenhang zwischen der Verdunstung am Boden einerseits und dem Durchschnitt von Strahlung, Temperatur sowie Windgeschwindigkeit an den darüber liegenden Gitterpunkten anderseits. Da letztere im Modell berechnet werden, kann daraus die Verdunstung bestimmt und im Modell berücksichtigt werden.

Warum gibt es Klimaprognosen über 50 Jahre, aber Wetterprognosen nur über 5 Tage?

Klimamodelle unterscheiden sich grundsätzlich kaum von Wettermodellen, beide werden durch die Physik gesteuert. Weshalb kann man mit einem Klimamodell 50 oder 100 Jahre in die Zukunft "schauen", wenn man das Wetter nur über ein paar Tage voraussagen kann? Der Grund liegt darin, dass Klimamodelle ganz andere Fragen beantworten als eine Wetterprognose. Für die Wettervorhersage ist die genaue Situation am 2. Dezember 2011 die zentrale Frage. Der 2. Dezember 2091 ist aber für die Klimasimulation nicht relevant, sondern hier wollen wir vielmehr wissen, wie sich der langjährige Durchschnitt von Temperatur und Niederschlag in Europa im Jahrzehnt 2090–2099 verändert haben wird, wenn die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre dannzumal vielleicht doppelt so hoch sein sollte wie vor der Industrialisierung. Bei Klimaberechnungen geht es also um langjährige Durchschnittswerte, beim Wetter um den momentanen Zustand der lokalen Atmosphäre. Die jeweiligen Einflussfaktoren sind sehr unterschiedlich: Das globale langfristige Durchschnittsklima ist hauptsächlich von den Flüssen von Energie in die und aus der Atmosphäre abhängig, während das lokale, momentane Wetter eine Frage der Verteilung der Energie innerhalb der Atmosphäre ist. Die Einstrahlung – der Zufluss von aussen – ist primär abhängig von der Sonneneinstrahlung sowie von der Reflexion der Strahlung durch Wolken und Luftpartikel sowie am Boden. Die Abstrahlung – der Abfluss von Energie – wird von der Beschaffung der Erdoberfläche, den Wolken und von der Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere den Treibhausgaskonzentrationen, bestimmt. Sind Zufluss und Abfluss nicht gleich gross, so verändert sich der Energieinhalt der Atmosphäre so lange, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Diese Zu- und Abflüsse verändern sich nur langsam, oft über Jahrzehnte hinweg. Zudem gibt es Komponenten im Erdsystem wie die Ozeane, die

nur sehr langsam reagieren und die Anpassung der Klimagrössen verzögern. Aus diesen langsamen Veränderungen lassen sich die langjährigen, durchschnittlichen globalen Mitteltemperaturen gut berechnen.

Die kurzfristige, regionale Verteilung von warmen und kalten Luftmassen, von Wolken und Niederschlägen oder die Luftströmungen sind hingegen weitgehend chaotisch und sind deshalb nur über wenige Tage hinweg berechenbar. Die Schwankungen an einem bestimmten Ort über wenige Tage sind viel grösser als die langfristigen Trends und verlaufen viel schneller.

Nehmen wir als einfachen Vergleich einen Topf kochendes Wasser auf einer Herdplatte: Der Aufstieg der Luftblasen entspricht dem Wetter mit einer chaotischen Verteilung der Blasen, die Temperatur der Herdplatte entspricht dem Energiezufluss. Wir haben keine Möglichkeit das „Wetter“ vorauszusagen, das heisst wann und wo im nächsten Moment eine Blase aufsteigen wird und wie gross sie ist. Wenn wir aber den Schalter an der Herdplatte nach unten drehen, also den externen Einfluss verändern, können wir mit Bestimmtheit voraussagen, dass sich das „Klima“ verändern wird, d.h. im Durchschnitt weniger und auch weniger grosse Blasen aufsteigen werden. Drehen wir den Schalter nach oben, werden die Blasen grösser und zahlreicher. Wenn wir nun die Veränderung der durchschnittlichen Grösse beobachten, wenn wir den Schalter drehen, können wir ein einfaches Modell formulieren, das uns eine Vorhersage über die typische Blasengrösse als Folge der Herdplattentemperatur erlaubt (das Klima), ohne die genau Position der einzelnen Blasen zu kennen (das Wetter).

Ist die Klimaerwärmung in Modellen “eingebaut”?

Manchmal wird die Behauptung aufgestellt, die Klimamodelle seien so konstruiert, dass eine Erwärmung entstehen müsse. Das ist nicht der Fall. Die Klimamodelle folgen grundsätzlich den physikalischen Gesetzen und enthalten beobachtete Prozesse. Zusätzlich werden äussere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung und Treibhausgaskonzentrationen vorgegeben. In früheren Klimamodellen mussten gewisse Prozesse korrigiert werden (die so genannten “Fluss”-Korrekturen), weil sie mit der Zeit zu unrealistischen Entwicklungen führten. Diese Korrekturen sind in den meisten heute verwendeten Modellen nicht mehr nötig. Anpassungen im Modell, um möglichst gut mit den Messungen übereinstimmende Resultate zu erzielen, werden heute vor allem für einzelne Prozesse vorgenommen. Es ist jedoch kaum möglich, damit das Resultat des gesamten Modells und die resultierende Klimaentwicklung gezielt zu verändern. Die wichtigsten Resultate, welche den Modellen entnommen werden können und die in der Realität auch beobachtet werden, sind ein Resultat der Physik und der bekannten Prozesse und sind nicht vorgegeben: Dazu gehören die globale Erwärmung der Atmosphäre, die gleichbleibende relative Feuchtigkeit, die Zunahme des Wasserdampfes in der Atmosphäre, die räumliche und zeitliche Konzentration von Niederschlägen, das Eindringen von Wärme im Ozean, der Rückgang der arktischen Eisbedeckung oder der Anstieg des Meeresspiegels.

Wie kann man Klimamodelle überprüfen?

Klimamodelle sind eine Kombination einer grossen Vielfalt von sehr komplexen Prozessen. Einzelne dieser Prozesse – wie zum Beispiel die Strahlungseigenschaften von Gasen – können im Labor simuliert und gemessen werden. Die Veränderung des Treibhauseffekts kann hingegen im Labor nicht erfasst werden. Der atmosphärische Treibhauseffekt ist in der Realität viel komplexer als das stark vereinfachte Bild des “Treibhauses”. Es handelt sich dabei um ein ständiges Aufnehmen und Abgeben von Strahlung durch Gasmoleküle in Luftschichten, die gegen oben immer kälter und dünner werden. Solche Verhältnisse lassen sich im Labor kaum nachbilden und in der realen Atmosphäre mit aufwändigen Strahlungsmessgeräten nicht detailliert erfassen. Bereits beim Treibhauseffekt sind wir also auf komplizierte mathematisch-physikalische Berechnungen angewiesen. Und das ist nur einer von vielen Prozessen. Immerhin könnten wir die Resultate der Klimamodelle mit der gemessenen Realität, also z.B. der globalen Mitteltemperatur, vergleichen, wenn wir die Modelle die Vergangenheit nachrechnen lassen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn wir für die Vergangenheit auch genügend verlässliche Messungen haben. Das Problem ist, dass Messungen immer unzuverlässiger und spärlicher werden, je weiter wir in die Vergangenheit zurückblicken. Gleichzeitig haben sich die Messtechnik und die Geräte mit der Zeit verändert. Deshalb wissen wir oft nicht, ob Veränderungen in den Messungen klimatischer Werte reale Vorgänge in der Atmosphäre wiedergeben oder auf Veränderungen der Messtechnik oder Probleme in der Auswertetechnik (oder auf beides) zurückzuführen sind. Wenn man die gemessenen Werte mit denjenigen der Klimamodelle vergleicht und Abweichungen feststellt, ist deshalb nicht zum vornherein klar, ob das Modell “falsch”

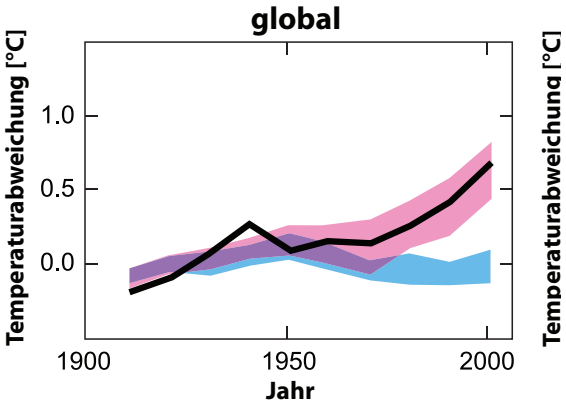

Abbildung 2:
Verlauf der globalen Erdoberflächentemperatur im 20. Jahrhundert, berechnet von Modellen (roter Balken) und gemessen (schwarzer Strich). Der blaue Balken zeigt die Modellrechnungen ohne Einfluss der Treibhausgaskonzentrationen.
(Quelle: IPCC 2007 AR4 WGI)

ist oder die Messung. Es gibt aber auch natürliche Schwankungen, anhand derer die Qualität von Klimamodellen überprüft werden kann. Der Vulkanausbruch des Mt. Pinatubo im Juni 1991 hat zu einer weltweiten Abkühlung von ca. 0.4 °C geführt. Klimamodelle haben diese Abkühlung kurz nach dem Ausbruch korrekt voraussagen können.

Können Modelle "besser" sein als Messungen?

Bei der Erdoberflächen-Temperatur mindestens auf globaler Ebene scheinen die gemessenen Werte ab Mitte des 19. Jahrhunderts einigermassen verlässlich zu sein. Einzelne lokale Messungen sind zwar fehlerbehaftet – sowohl positiv wie negativ –, doch gleichen sich diese Fehler bei einer globalen Mittelung meist weitgehend aus. Zudem wird für jede Messstation nur die Abweichung von der mittleren Temperatur verwendet, so dass systematische (konstante) Fehler in der Messung, wie sie z. B. durch falsche Geräteeinstellungen oder Umwelteinflüsse entstehen, kaum Einfluss haben. Weil Temperaturen über relativ grosse Distanzen ähnlich sind, können zusätzlich durch Vergleiche mit Nachbarstationen grobe Fehler eliminiert werden. Es zeigt sich auch, dass z. B. der städtische Wärmeinseleffekt keinen grossen Einfluss hat, da die Werte für die globale Erwärmung nicht nennenswert ändern, wenn nur ländliche Stationen für die Berechnung verwendet werden. Die globale Mitteltemperatur scheint also geeignet, um die Qualität der Klimamodelle zu überprüfen. Abbildung 2 zeigt den Vergleich verschiedener Modellresultate (dargestellt als rosa Balken, der den Bereich der verschiedenen Modellrechnungen umfasst) mit der gemessenen Temperatur (schwarze Linie). Blau dargestellt sind die Modellresultate ohne menschlichen Einfluss. Die Übereinstimmung ist recht gut – mit einer Ausnahme in den 1940er Jahren. Lange war unklar, woher diese Diskrepanz kommt. Man hat dann festgestellt, dass sich die Messtechnik für die Ozeantemperaturen, die zumeist von Schiffen erfasst wurde, während und nach dem zweiten Weltkrieg stark verändert hat. Vor kurzem wurde nun eine Arbeit [1] veröffentlicht, welche diese Unregelmässigkeit zu korrigieren versucht. Die daraus resultierende Korrektur der globalen Mitteltemperatur führt zu einer Annäherung der Messungen an die Modellresultate, wenn auch nicht zu einer vollständigen Deckung. Aber das Beispiel zeigt, dass Diskrepanzen mit Messungen nicht unbedingt auf Mängel in den Modellen zurückzuführen sind. Noch deutlicher trifft dies auf die Temperaturen in der unteren Atmosphäre zu, die aus Satellitendaten berechnet werden. Hier verzeichnete man jahrelang einen grossen Unterschied zwischen den Trends von Satelliten-Temperaturdaten und Klimamodellen, wobei die Satellitendaten eine viel geringere Erwärmung zeigten. Vor wenigen Jahren stellte sich dann heraus, dass das Programm für die Berechnung der Satellitendaten einen simplen Rechenfehler – ein falsches Vorzeichen – enthielt. Nachdem dieser Fehler korrigiert wurde, war der Unterschied zwischen Satellitendaten und Modellberechnungen praktisch verschwunden. In den letzten Jahren hat man bei Diskrepanzen zwischen Messungen und Modellen – sogar bei der relativ einfach messbaren Temperatur – die Fehler oft bei den Messungen und nicht bei den Modellen gefunden. Bei vielen anderen Messgrössen, wie z. B. dem Niederschlag, der räumlich viel inhomogener verteilt ist, oder der Feuchtigkeit, wo es für die Vergangenheit viel weniger gute Angaben gibt, ist eine Überprüfung der Modelle mit Messungen noch viel schwieriger.

Der Zufall erschwert Vergleiche

Ein weiteres Problem stellt die Tatsache dar, dass das Erdklima neben den äusseren Einflüssen auch viele zufällige Schwankungen aufweist, und zwar nicht nur über Tage, sondern über Jahre und für gewisse Aspekte sogar über Jahrzehnte

hinweg. Würde es viele identische Erden geben, deren Atmosphären in der Ausgangslage nur ganz geringe Unterschiede aufweisen, so ergäben sich – innerhalb einer durch die äusseren Einflüsse vorgegebenen Bandbreite – ebenso viele unterschiedliche Klimaverläufe. Die beobachtete Klimaentwicklung auf unserem Planeten ist also eine ganz bestimmte Variante aus vielen möglichen anderen. Es kann deshalb nicht davon ausgegangen werden, dass ein Klimamodell genau diesen Verlauf trifft, sondern nur einen von den vielen möglichen. Deshalb werden wenn möglich mit dem gleichen Modell eine Vielzahl von Rechnungen gemacht und dann die Ergebnisse gemittelt. Auch macht es deshalb für einen Vergleich nur Sinn, langjährige Durchschnittswerte über 20–30 Jahre aus den Modellen zu verwenden und nicht einzelne Jahre oder Jahrzehnte. Es hat sich auch gezeigt, dass der Mittelwert von verschiedenen Modellen oft näher an der Realität liegt als jedes einzelne Modell.

Vergleich unter Modellen

Eine Möglichkeit, die Unsicherheit der Modelle zu erfassen, ist der Vergleich der verschiedenen Modelle untereinander. Die Modelle sind unterschiedlich programmiert und erfassen zum Teil andere Prozesse, und dies auf unterschiedliche Art. Unterschiede bzw. Übereinstimmung zwischen den Modellen geben also Hinweise auf Unsicherheiten bezüglich verschiedenster Aspekte. Allerdings beruhen alle Modelle auf den mehr oder weniger gleichen Kenntnissen und Prozessen. Es wäre also theoretisch möglich, dass es wichtige unbekannte Prozesse gibt, die in allen Modellen fehlen. Dies ist jedoch deshalb unwahrscheinlich, weil die bestehenden Modelle mit den bekannten Prozessen die beobachtete Realität – soweit überprüfbar – in groben Zügen richtig wiedergeben. Ein unbekannter Prozess, der die Modellergebnisse wesentlich verändert, würde zu einer grösseren Abweichung mit der Realität führen. Es müsste also einen weiteren unbekannten Prozess geben, der diese Abweichung zufällig wieder ausgleicht, was unwahrscheinlich ist.

Welche Informationen liefern Klimamodelle, welche nicht?

Klimamodelle sind heute noch längst nicht perfekt. Viele Prozesse werden nur sehr rudimentär erfasst. Auch können die heutigen Modelle verschiedene Phänomene noch nicht richtig wiedergeben, wie z. B. das El Niño-Phänomen oder die Verteilung der Meeresoberflächentemperaturen in den Tropen. Die Simulation der Wolkenbildung und deren Veränderung ist seit Jahren eines der grössten Probleme in der Klimamodellierung und noch weitgehend ungelöst. Die Modelle können trotzdem die langfristigen und grossräumigen Klimaveränderungen in der Vergangenheit, soweit diese überhaupt bekannt sind, zumindest in den groben Zügen relativ gut wiedergeben. Auch konnte mit den Klimamodellen zum Beispiel die globale Abkühlung, die durch den Vulkanausbruch des Pinatubo hervorgerufen wurde, ziemlich gut vorausgesagt werden. Die Modelle scheinen also die Auswirkungen von Veränderungen im Strahlungshaushalt unter den heutigen Bedingungen zumindest einigermassen im Griff zu haben. Doch ist damit nicht von vornherein klar, ob dies auch für die Zukunft der Fall sein wird, denn die Schwankungen in der Vergangenheit, die mit Messungen oder Rekonstruktionen einigermassen erfasst werden können, bewegen sich im Vergleich zu dem, was wir in Zukunft erwarten, in relativ engem Rahmen. Die Frage ist, ob die Modelle immer noch einigermassen zuverlässig sind, wenn die Treibhausgaskonzentrationen viel höher sind, das arktische Meereis und die Gletscher verschwinden, die grossen Eisschilder abgebaut werden und die Vegetation sich verändert. Das sind Vorgänge und Verhältnisse, für die wir zwar in der fernen Vergangenheit Parallelen finden, doch haben wir aus diesen Zeiten zu wenige Daten und gesicherte Kenntnisse. Überdies laufen die Veränderungen heute viel schneller ab als damals, d. h. in 100 Jahren statt über Zehntausende oder Millionen von Jahren wie damals.

„Klimamodelle sind falsch, aber nützlich“

Klimamodelle können also für einige Aspekte wichtige und brauchbare Aussagen liefern, für andere hingegen nicht. Oder wie dies Klimaforschende manchmal ausdrücken: “Klimamodelle sind falsch, aber trotzdem nützlich.” Das heisst, Klimamodelle werden – wie übrigens alle wissenschaftlichen Modelle und Theorien – nie die vollständige Realität wiedergeben. Die Resultate einer Klimamodell-Rechnung sind in diesem Sinne also immer „falsch“, aber sie können trotzdem wichtige Erkenntnisse liefern und helfen, gewisse Aspekte und Vorgänge zu verstehen und zu simulieren. Ein Wetterprognose-Modell ist in dem Sinne auch „falsch“, denn es vernachlässigt viele Prozesse, aber es ist genügend „richtig“, um das Wetter für die nächste drei Tage vorauszusagen. Es ist aber bei der Interpretation von Modellresultaten sehr wichtig zu wissen, wo die Grenzen der Klimamodelle liegen, welche Resultate vertrauenswürdig sind und welche nicht.

Trotz der vielen Unsicherheiten können wir aus den Modellen viele nützliche Hinweise entnehmen. Wie wir gesehen haben, sind die Resultate für die langfristige Entwicklung der globalen und

wahrscheinlich auch kontinentalen Mitteltemperaturen relativ gut. Der weiterhin bestehende Unsicherheitsbereich ist etwa zur Hälfte auf Wissenslücken in Bezug auf die Entwicklung der Wolkenbedeckung und zu Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf der Erde (Veränderungen von Aufnahme und Abgabe von CO_2 durch Pflanzen und Ozeane) zurückzuführen, die andere Hälfte ist bedingt durch die Ungewissheit, wie gross die Emissionen von Treibhausgasen in Zukunft sein werden.

Obwohl die heutigen Modelle immer noch Mühe haben, den Wasserkreislauf korrekt wiederzugeben, sind auch für Prozesse, die den Niederschlag im Allgemeinen betreffen, einige Resultate vertrauenswürdig: In den meisten Modellen ist sichtbar, und physikalisch auch plausibel, dass sich in Zukunft die Niederschläge vermehrt dort konzentrieren werden, wo es heute schon viel regnet. Das heisst, in Gebieten, die heute schon niederschlagsreich sind wird es noch mehr und stärker regnen, und in Gebieten, wo es heute schon trocken ist, wird es noch trockener. Ebenfalls scheint klar zu sein, dass sich die Subtropen nach Norden ausdehnen. Somit werden Gebiete wie der Mittelmeerraum, die heute am polseitigen Rand der Subtropen liegen, vermehrt subtropisches Klima zu erwarten haben und im Sommer und Herbst stark austrocknen (Abb. 3).

Ein grosses Defizit in den Modellen besteht hingegen in der Simulation der atmosphärischen Strömungen bzw. Zirkulation. Veränderungen in der Zirkulation sowohl bei saisonalen Phänomenen – wie z.B. El Niño – wie auch bei kurzfristigen Mustern werden von den Modellen nur unzureichend erfasst bzw. je nach Modell sehr unterschiedlich simuliert. Ausgerechnet diese Veränderungen in der Zirkulation sind es jedoch, welche die regionalen Auswirkungen der globalen Klimaerwärmung weitgehend bestimmen. Und diese regionalen Veränderungen sind es, die uns Menschen tatsächlich betreffen und die z.B. für Anpassungsmassnahmen entscheidend sind. Hier herrscht also noch sehr viel Verbesserungsbedarf.

Wie können Klimamodelle weiter verbessert werden?

Es gibt verschiedene Bereiche, in denen an einer Verbesserung der Klimamodelle gearbeitet wird. Da ist einmal die räumliche Auflösung, d.h. der Abstand der Gitterpunkte. Je kleiner der Abstand, umso besser können kleinräumige Prozesse erfasst werden. Die Auflösung ist direkt abhängig von der Rechenkapazität der Computer. Sie muss so gewählt werden, dass sich Berechnungen über mehrere Hundert Jahre in vernünftiger Zeit (d.h. innerhalb von Wochen) berechnen lassen. Allenfalls können auch Verbesserungen in den mathematischen Rechenmethoden gefunden werden, welche die Rechenzeit verkürzen und so eine bessere Auflösung ermöglichen. Bei einer deutlich besseren Auflösung, d.h. mit Gitterpunktabständen von nur noch wenigen Kilometern, können dann wichtige Prozesse direkt vom Modell erfasst werden und müssen nicht mehr indirekt über Beziehungsrechnungen geschätzt werden.

Das Problem der räumlichen Auflösung kann heute zum Teil mit regionalen Klimamodellen gelöst werden. Regionale Klimamodelle simulieren die Atmosphäre einer Region, beispielsweise über Europa, mit viel kleineren Gitterpunktabständen. Sie übernehmen dabei an den Rändern der Region die Werte von globalen Klimamodellen und rechnen dann in der Region mit engmaschigeren Gitternetzen weiter. Damit bieten sie eine bessere Auflösung. Das Problem der grossräumigen Veränderungen der atmosphärischen Strömungen oder von El Niño ist damit jedoch nicht gelöst, da diese von den globalen Modellen übernommen

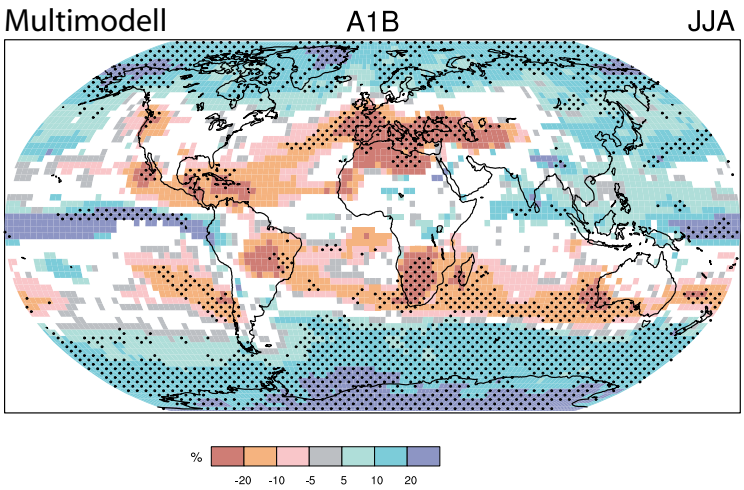

Abbildung 3:
Modell-Projektionen für die Veränderung der Niederschläge am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu Ende 20. Jahrhundert.
(Quelle: IPCC 2007 AR4 WGI)

Kontakt:
Prof. Martin Beniston
Institut des sciences de l'environnement (ISE)
Université de Genève, 1227 Carouge / Genève
martin.beniston@unige.ch

Prof. Reto Knutti
Institut für Atmosphäre und Klima (IAC)
ETH Zürich, 8092 Zürich
reto.knutti@env.ethz.ch

Prof. Thomas Stocker
Physikalisches Institut – Klima- und Umweltphysik
Universität Bern, 3012 Bern
stocker@climate.unibe.ch

werden. Es zeigt sich, dass die Resultate dieser Regionalmodelle in vielen Aspekten immer noch stark von den Eigenheiten des globalen Modells, das die Hintergrunddaten liefert, abhängig sind. Es bleibt abzuwarten, ob das Problem der Zirkulationsveränderungen mit verbesserter Auflösung und/oder anderweitigen Verbesserungen der globalen Modelle besser erfasst werden kann.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht bei der Simulation einzelner Prozesse, insbesondere bei denjenigen, die nur indirekt durch beobachtete Korrelationen zu bekannten Messgrössen beschrieben werden können. Hier werden auch immer wieder Fortschritte erzielt, allerdings sind das in der Gesamtsicht immer nur relativ kleine Schritte.

Fazit

Klimamodelle erfassen die realen, grossräumigen Vorgänge in der Atmosphäre und im Ozean und liefern quantitative Abschätzungen, wie sich das Klima verändern wird, wenn sich die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert, vor allem der Gehalt an Treibhausgasen und festen Partikeln. Obwohl wichtige Trends auch regional abgeschätzt werden können, bestehen noch erhebliche Unsicherheiten besonders in den Grössen, die durch den Wasserkreislauf beeinflusst sind. Trotzdem zeichnen sich klare Entwicklungen ab, wie zum Beispiel die Zunahme der Niederschläge in den hohen Breiten und in den Tropen oder die Austrocknung im Mittelmeerraum. Auch wenn bei den Modellen noch viele Verbesserungsmöglichkeiten bestehen, werden wir aufgrund der grossen Komplexität des Klimasystems, der unbekannten Entwicklung der Treibhausgasemissionen und einer Portion Zufälligkeit, die allen Entwicklungen überlagert ist, die zukünftigen Verhältnisse auf lokaler Ebene nie genau voraussagen können. Somit besteht, wie in allen Fragen, welche die Zukunft betreffen, eine gewisse Unsicherheit, unter welcher Entscheidungen gefällt werden müssen. Dank der Kenntnis physikalischer Gesetze und vieler Prozesse im Klimasystem stehen Modelle als objektive Unterstützung der Entscheidungsfindung zur Verfügung. Die Entscheide über den Umgang mit den möglichen Entwicklungen, welche die Modellrechnungen aufzeigen, müssen die Politik und die Gesellschaft treffen.

Literaturzitat:
[1] Kennedy et al., 2011, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, D14104 (download: ftp://ftp.astr.ucl.ac.be/publi/2011_08_03-08h24-hugues.goosse-13.pdf)

Weiterführende Literatur:
Knutti R., 2008: "Should we believe model predictions of future climate change?" Philos. Transactions Roy. Soc. A, Vol. 366: S. 4647–4664 (download: www.iac.ethz.ch/people/knuttir/papers/knutti08ptrs.pdf)