

Die Erde im Treibhaus

Eine Herausforderung für das 21. Jahrhundert

Dass sich das Klima der Erde erwärmt, wird höchstens noch von Politikern oder der Presse infrage gestellt. Die Wissenschaftler sind sich einig: Die Verbrennung von Kohle und Erdöl, die Produktion von Zement sowie die intensive Landnutzung (Abholzung) erwärmte das Klima in den letzten 50 Jahren unnatürlich. Heute wird in der Forschung diskutiert, um wie viel Grad sich die Erde im laufenden Jahrhundert erwärmen wird: Sind es 2 °C, 4 °C oder mehr? Sollten sich zudem Meeresströmungen wie der Golfstrom verändern, hätte dies massive Folgen für Europa. Und wie die Luftbläschen im Eis von Bohrkernen aus der Antarktis zeigen, hatte sich der Golfstrom in der letzten Eiszeit, die vor 90 000 Jahren begann, mehrmals ein- und ausgeschaltet.

Der Energiefluss von der Sonne wird durch die Solarkonstante angegeben und beträgt im Mittel 1368 W/m². Etwa 70% davon steht der Erde zur Verfügung, der Rest wird durch Wolken und helle Oberflächen in den Weltraum zurückreflektiert. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt, verursacht durch Wasserdampf und verschiedene Treibhausgase (CO₂, CH₄ und N₂O), wäre die mittlere Jahrestemperatur der Erde nur gerade -18 °C. Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt

Thomas Stocker

eine Erwärmung auf eine mittlere Temperatur von fast 15 °C. Die geografischen Breiten äquatorwärts von 30° weisen über das Jahr gemittelt eine positive Energiebilanz aus, polwärts davon besteht aber ein Defizit [1]. Dies bedeutet, dass zum Ausgleich ein meridionaler Wärmefluss stattfinden muss, der Energie von den Tropen in die mittleren und hohen Breitengrade transportiert. Sowohl die Atmosphäre wie auch der Ozean beteiligen sich an diesem Wärmetransport fast in gleichem Ausmass (Bild 1).

In der Atmosphäre erfolgt der Wärmetransport hauptsächlich in Form von wandernden Hoch- und Tiefdruckgebieten, die mit Temperaturabweichungen korreliert sind, sowie durch den Transport von Wasserdampf als latente Wärme. Im Ozean wird die Wärme jedoch direkt durch meridionale Strömungen nordwärts transportiert (Bild 2). Im Atlantik fliesst warmes Wasser aus den Tropen als Golfstrom bis weit in das Nordmeer, wo sich das Wasser abkühlt und die Wärme an die Umgebung abgibt. Durch die Abkühlung wird das Meerwasser dichter und sinkt in die Tiefe ab. Wegen der Erdrotation bildet sich ein Randstrom auf etwa 2 bis 3 km Tiefe, der nach Süden fliesst. Der grosse Temperaturunterschied zwischen dem Oberflächen- und dem Tiefenwasser ermöglicht einen effizienten Wärmetransport: Im Atlantik erreicht dieser bei etwa 24 °N bis zu 10¹⁵ W. Dabei wird Wärme im Atlantik sogar aus der Südhemisphäre exportiert.

Golfstrom wärmt Europa

Bild 2 zeigt, dass die Strömung im Atlantik Teil eines weltumspannenden Zirkulationssystems ist. Der Atlantik ist ein spezielles Ozeanbecken, insofern als einzig in diesem Ozean der meridionale Wärmetransport nordwärts gerichtet ist. Die Konsequenz dieser «Wärmepumpe» ist seit Jahrhunderten bekannt: Das Klima im Nordatlantik, speziell in Westeuropa, zeichnet sich durch eine besondere Milde aus. Auf gleichen Breitengraden herrschen um den Nordpazifik um bis zu 10 °C kühlere Temperaturen. Dabei spielt jedoch nicht allein die Ozeanzirkulation eine Rolle, sondern die Luftströmungen tragen ebenfalls zur relativen Wärme in Europa bei. Durch die Lage der Rocky Mountains werden planetare Wellen der atmosphärischen Strömung erzeugt, die so geformt sind, dass über Westeuropa tendenziell Südwestströmung, also Warmluftadvektion, vorliegt.

Die in Bild 2 gezeigte Zirkulation wird vor allem durch Wärme- und Wasserflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean angetrieben. Erstere verändern die Temperatur, letztere den Salzgehalt von Meerwasser. Gemeinsam verändern sie die Dichte des Wassers an der Oberfläche. Bei genügender Zunahme der Dichte können Wassermassen in die Tiefe absin-

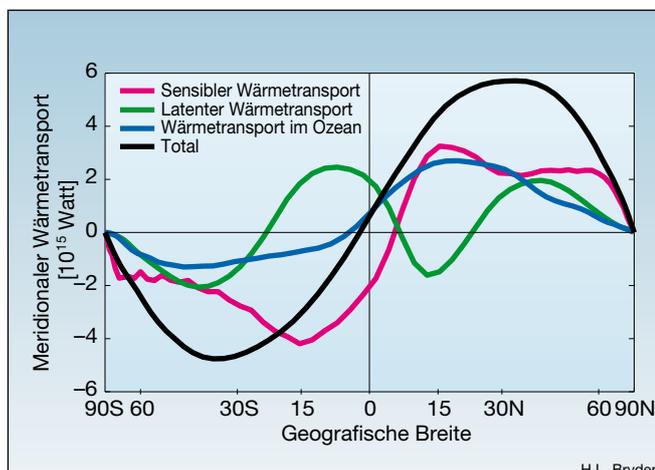


Bild 1 Meridionaler Wärmetransport im Klimasystem

Ozean und Atmosphäre tragen in der Nordhemisphäre etwa gleich viel zum Transport bei

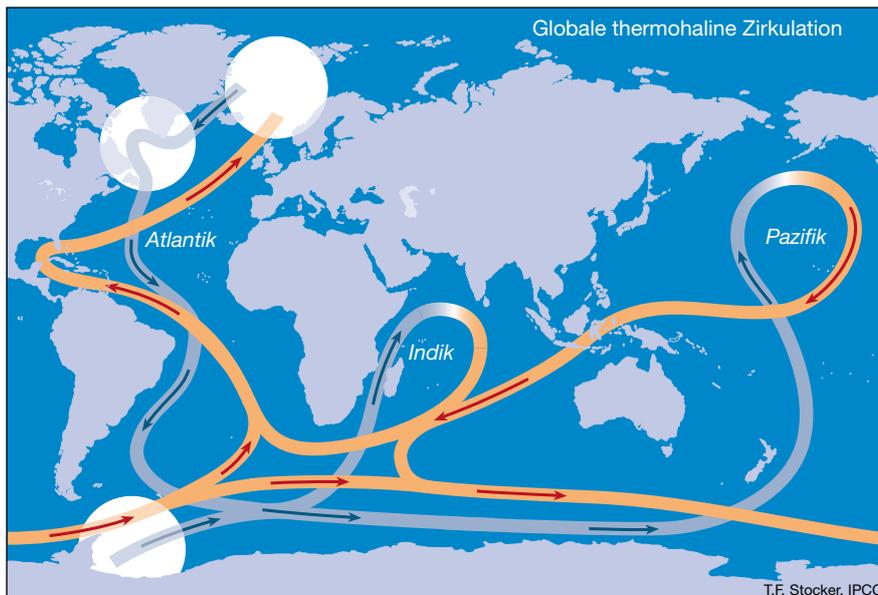


Bild 2 Globales thermohalines Stromsystem

Orte, wo Tiefenwasser gebildet wird, sind durch helle Kreisseiben dargestellt. Dort erfolgt ein Wärmeübertrag vom Ozean in die Atmosphäre, der das lokale Klima stark beeinflusst.

ken: Es wird neues Tiefenwasser gebildet. Diese Strömung wird als thermohaline Zirkulation bezeichnet.

Abrupte Klimaschwankungen: Stotternde Wärmepumpe?

Die Untersuchung von Klimaarchiven wie Meeressedimente und Eisbohrkerne aus Grönland zeigen deutlich, dass die Temperaturen im nordatlantischen Raum und in Grönland während der letzten Eiszeit nicht nur deutlich kälter waren, sondern auch massiv geschwankt haben [2, 3]. Diese Klimasprünge erfolgten zum Teil sehr schnell, innerhalb von Jahrzehnten. Während der letzten Eiszeit, ca. 90 000 bis 10 000 Jahre vor heute, hat man mindestens 25 dieser abrupten Erwärmungen, die heute Dansgaard/Oeschger-Ereignisse genannt werden, gezählt [4]. Abkühlungen erfolgten graduell, doch in einigen Fällen ebenfalls sehr schnell. Bild 3 zeigt den Verlauf der lokalen Temperatur, wie er aus Eisbohrkernen von Grönland und der Antarktis durch die Messung der Isotopenverhältnisse des Eises abgeschätzt wurde. Die Temperaturschwankungen in Grönland zeigen abrupte Erwärmungen, auf die Abkühlungen über mehrere 100 bis 1000 Jahre folgen.

In der Antarktis weist das Klima einen anderen Charakter auf: Schwankungen sind nicht abrupt, sondern Erwärmungen und Abkühlungen erstrecken sich über 1000 bis 3000 Jahre. Durch die Synchronisation von grönländischen und antarktischen Eisbohrkernen anhand der Treib-

hausgaskonzentrationen, die in den im Eis eingeschlossenen Luftbläschen gemessen werden, gelingt es, die Klimaschwankungen im Norden mit denjenigen im Süden zu korrelieren [5, 6]. Es scheint, dass jeder abrupten Erwärmung im Norden eine langsame Erwärmung im Süden

vorausgeht, deren Trend genau dann umkehrt, wenn die abrupte Erwärmung im Norden erfolgt. Dies ist, wie unten erläutert wird, ein wichtiger Hinweis auf den Mechanismus, der diesen abrupten Schwankungen zugrunde liegt.

Seit einigen Jahren vermutet man, dass der Ozean für diese schnellen Schwankungen verantwortlich ist [7]. Dies mag zunächst überraschen, da man im Allgemeinen vom Ozean wegen seiner hohen Wärmekapazität als träge Komponente im Klimasystem ausgeht. Theoretische Überlegungen und Simulationen mit Ozean- und Klimamodellen zeigen jedoch, dass die thermohaline Zirkulation Instabilitäten aufweisen kann, die der unterschiedlichen Wirkung von Wärmeflüssen und Niederschlag an der Ozeanoberfläche auf die Dichte von Meerwasser zuzuschreiben sind [8, 9]. So kann zur Störung der Wasserbilanz im Nordatlantik die thermohaline Zirkulation abgestellt bzw. angestellt werden. Solche Vorgänge können, wie dies Simulationen mit Modellen zeigen, äusserst schnell ablaufen. Wenn die Wärmepumpe im Atlantik aussetzt, führt dies zu einer massiven Abkühlung (ca. 15 °C in Grönland, mindestens 4 °C in Europa).

Es wird vermutet, dass die Störungen, die zum Abstellen der Zirkulation im Atlantik führen, von den kontinentalen

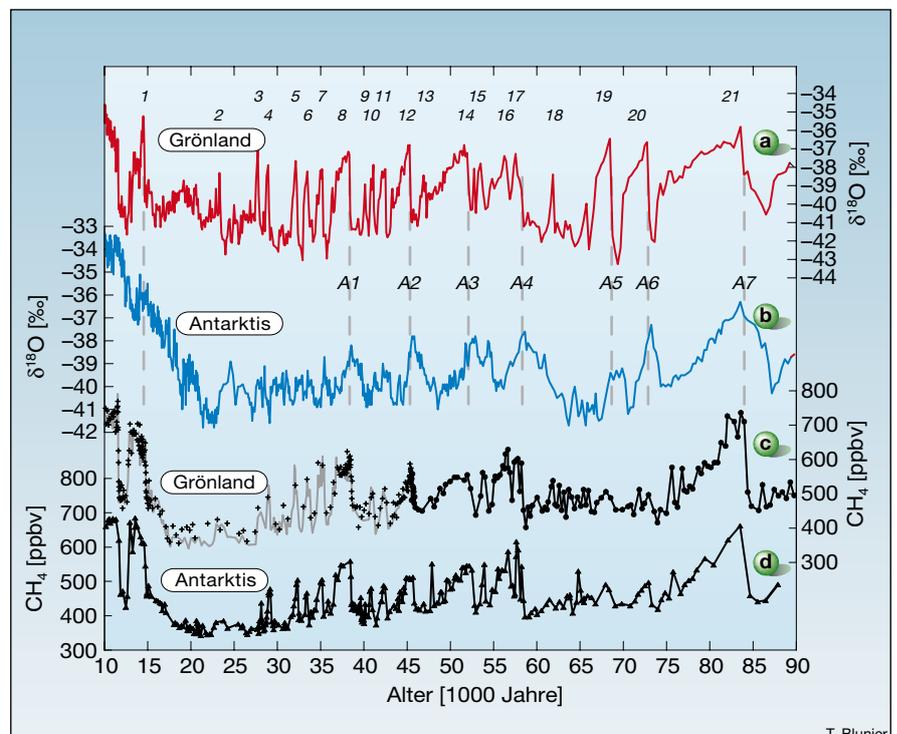


Bild 3 Klimageschichte der letzten Eiszeit aus Eisbohrkernen von Grönland (a) und der Antarktis (b)

Die Isotopenzusammensetzung des Eises ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) ist ein Mass für die lokale Temperatur und liefert eine Abschätzung der Temperaturänderungen. Die Kurven c und d zeigen die Messungen von CH_4 in den im Eis eingeschlossenen Luftbläschen. Schnelle Schwankungen in CH_4 werden global registriert und dienen als Fixpunkte bei der Korrelation der Zeitreihen von Grönland und der Antarktis.

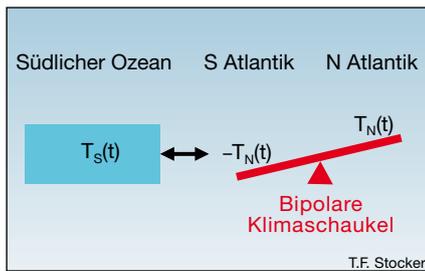


Bild 4 Bipolare Klimaschaukel, gekoppelt mit einem südlichen Wärmereservoir

Eisschildern ausgehen, die während der letzten Eiszeit vorhanden waren. Durch massive Ströme von Eismassen, die sich episodisch aus diesen Eisschildern in den Nordatlantik ergiessen und dann schmelzen, gelangt sehr viel Süswasser in die Bereiche, wo Tiefenwasser gebildet wird. Süswassereintrag reduziert die Dichte des Meerwassers, was schliesslich zu einem Abstellen der Tiefenwasserbildung im Atlantik führen kann. Es ist offensichtlich, dass bei diesem Vorgang Schwellenwerte bezüglich der Dichte des Wassers im Spiel sein müssen, die zeitweise überschritten werden.

Viele Klimaarchive unterstützen die Hypothese, dass der Ozean hauptverantwortlich für diese Schwankungen ist [3, 10]. Die Hypothese macht einige Voraussagen, die in den Klimaarchiven getestet werden können. Eine aktive Strömung im Atlantik bewirkt, dass Wärme aus dem Südatlantik gezogen wird, dieser also gekühlt wird. Ein Abstellen der Wärmepumpe muss also ein Erwärmen des Südatlantiks bewirken und sollte somit als Fernfeldwirkung beobachtbar sein. Dies hat zur Formulierung der sogenannten «bipolaren Klimaschaukel» (bipolar seesaw) als Paradigma zur Wechselwirkung von Nord- und Südhemisphäre während abrupten Klimaschwankungen geführt [11, 12].

Bipolare Klimaschaukel

Die bipolare Klimaschaukel sagt voraus, dass Nord und Süd sich zeitlich identisch, jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen ändern: Wird es im Norden warm, so kühlt sich der Süden ab. Bild 3 zeigt jedoch keine perfekte Synchronisation von Klimaschwankungen zwischen Grönland und der Antarktis. Temperaturänderungen in der Antarktis sind nicht abrupt wie in Grönland, sondern entwickeln sich über mehrere Jahrhunderte. Die einfache Klimaschaukel scheidet somit als Erklärung.

Eine offensichtliche Erweiterung ergibt sich aus der Erkenntnis, dass der südliche Ozean ein grosses Wärmereser-

voir darstellt [13]. Ein abrupter Unterbruch des meridionalen Wärmetransports aus dem südlichen Ozean durch ein Abstellen der Zirkulation verursacht somit eine Erwärmung, deren zeitliche Entwicklung im Wesentlichen durch die Wärmekapazität des südlichen Ozeans bestimmt wird. Wir betrachten also schematisch eine Klimaschaukel, die thermisch an den südlichen Ozean gekoppelt ist (Bild 4). Dies kann als einfaches Energiebilanzmodell wie folgt formuliert werden:

$$\frac{dT_S(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot (-T_N(t) - T_S(t)) \quad (1)$$

Die Temperaturänderung des Wärmereservoirs wird mit T_S bezeichnet, τ ist eine charakteristische Zeitskala, und T_N ist die zeitlich veränderliche Temperaturänderung im Norden, d.h. am nördlichen Ende der bipolaren Klimaschaukel. Somit ist $-T_N$ die entsprechende Temperatur-anomalie des südlichen Endes dieser Schaukel, und der Wärmefluss wurde proportional zur Temperaturdifferenz angenommen. Die Differenzialgleichung (1) kann durch eine Laplace-Transformation nach T_S aufgelöst werden:

$$T_S(t) = -\frac{1}{\tau} \cdot \int_0^t T_N(t-t') \cdot e^{-t'/\tau} dt' + T_S(0) \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Gleichung (2) besagt, dass die südliche Temperaturänderung eine Integration der nördlichen Temperaturänderung mit beschränktem «Erinnerungsvermögen» darstellt. Bei bekannter nördlicher Temperatur können wir somit eine Voraussage über die Änderungen der südlichen Temperatur machen. In diesem Sinne ist (1) ein Klimamodell, jedoch ein extrem vereinfachtes. Wir verwenden nun die Zeit-

reihe der Temperatur in Grönland (Kurve (a) in Bild 3) als Input in Gleichung (2) und berechnen $T_S(t)$, welches dann mit Kurve (b) in Bild 3 verglichen werden kann. Das Resultat ist in Bild 5 dargestellt. Es ist erstaunlich, dass mit diesem fast trivialen Ansatz über 60% der gemeinsamen Variabilität der Temperaturschwankungen in Grönland und der Antarktis während der letzten Eiszeit erklärt werden können.

Das Modell der bipolaren Klimaschaukel macht aber auch eine Voraussage, die mit den nun neu erbohrten Eiskernen der Antarktis überprüft werden kann. Gemäss (2) wird jede abrupte Temperaturänderung in T_N eine zeitlich integrierte Signatur in T_S hinterlassen, deren Amplitude von der Verweildauer von T_N auf einer bestimmten Temperatur abhängt. Jedes Dansgaard/Oeschger-Ereignis sollte also in den antarktischen Eisbohrkernen sichtbar sein. Bis vor Kurzem sind jedoch nur sieben solche Ereignisse (A1, A2, ... A7, siehe Bild 3) eindeutig identifiziert worden. Die neuesten Daten aus der Antarktis, gemessen an einem Kern von Dronning Maud Land im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica, bestätigen die Modellvoraussage [14].

Das Klima ändert sich

Heute ist die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre über 28% höher als je zuvor in den letzten 650000 Jahren [15]. Dies ist in Bild 6 deutlich erkennbar. Die Ursache für diesen dramatischen Anstieg ist zweifelsfrei belegt: Die Verbrennung von Kohle und Erdöl, die Produktion von Zement sowie die intensive Landnutzung (Abholzung) führen zu einer Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration

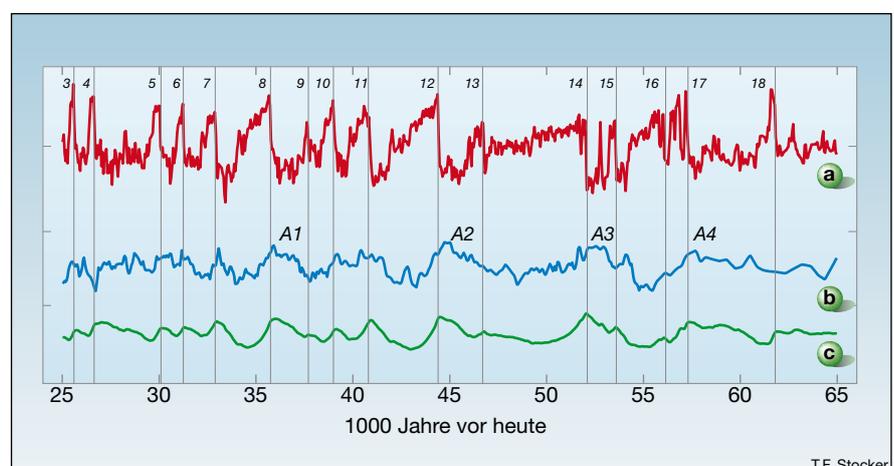


Bild 5 Vergleich Temperaturkurven Simulation und Messung

Hochpass-gefilterte Zeitreihen der stabilen Isotopenkonzentration an den Eisbohrkernen von GRIP (Grönland, Kurve a) und Byrd Station (Antarktis, Kurve b) und simulierte Temperaturkurve aufgrund von Gleichung (2) mit a als $T_N(t)$. Jedes Dansgaard/Oeschger-Ereignis ist als Umkehr eines langsamen Erwärmungstrends in der Antarktis sichtbar (Kurve c).

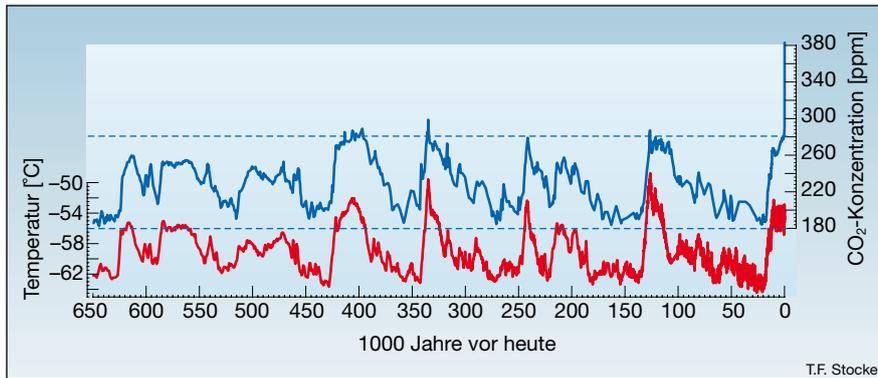


Bild 6 Temperatur und CO₂ der letzten 650000 Jahre

Rekonstruktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration über die letzten 650000 Jahre, gemessen an verschiedenen Eisbohrkernen der Antarktis, sowie der Anstieg über die letzten 50 Jahre aus direkten Messungen der Atmosphäre (blaue Kurve). Die Messungen am ältesten Eis vor 420000 Jahren erfolgten im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) [15]. Die Temperatur in der Antarktis kann durch die Messung der stabilen Isotope des Wassermoleküls abgeschätzt werden (rote Kurve).

von fast 1% pro Jahr. Diese fundamentale Erkenntnis stammt aus Analysen von polaren Eisbohrkernen, die im Rahmen von internationalen Bohr-Expeditionen in Grönland und der Antarktis gewonnen wurde. Das Physikalische Institut der Universität Bern, mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds, nimmt seit fast 40 Jahren an solchen Projekten teil. An diesen wertvollen Eisproben werden die Konzentrationen der wichtigsten Treibhausgase (Kohlendioxid CO₂, Methan CH₄, und Lachgas N₂O) gemessen.

Zwischen dem Anstieg von CO₂ und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre und der Erwärmung der Erde von 0,6 °C während der letzten 100 Jahre besteht ein Zusammenhang. Klimamodelle simulieren die Temperaturveränderungen seit 1860 in guter Übereinstimmung mit den beobachteten Werten bis etwa 1950, falls Veränderungen der Sonneneinstrahlung und Vulkanereignisse berücksichtigt werden. Diese allein genügen aber nicht, um die starke Erwärmung der letzten 50 Jahre zu erklären. Nur der Einbezug der Erhöhung der Treibhausgase und die damit verbundene Emission von Russpartikeln ergibt Resultate, die auch von 1950 bis heute mit den Beobachtungen gut übereinstimmen [16, 17]. Die globale Erwärmung hinterlässt ebenfalls Spuren im Ozean. So zeigt ein Vergleich weltweiter Temperaturmessungen aus den 50er- und 90er-Jahren, dass der Welt-ozean ca. $1,5 \times 10^{23}$ J Wärme aufgenommen hat [18].

Basierend auf diesen und vielen weiteren Erkenntnissen hat das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ein Expertengremium der UNO, die Aussage gemacht, dass «der grösste Anteil der Erwärmung der letzten 50 Jahre menschlichen Aktivitäten zuzuschreiben

ist» [17]. Zum letzten Bericht, der 2001 veröffentlicht wurde, haben über 2000 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen beigetragen; er kann unter www.ipcc.ch eingesehen werden; der nächste Bericht wird im Januar 2007 publiziert [19].

Globale Erwärmung schwächt Wärmepumpe

Klimamodelle der Universität Bern lassen die künftige Klimaerwärmung berechnen, wobei die Unsicherheiten in den Einflussgrössen systematisch berücksichtigt werden. In einem moderaten CO₂-Emissionsszenario wird eine Erwärmung von 2,5 °C bis ins Jahr 2100 prognostiziert [20, 21]. Wesentlich grössere Erwärmungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Für die pessimistischsten Szenarien, in denen der Ver-

brauch von Kohle und Öl weiterhin ungebremst ansteigt, ist mit einer massiv grösseren Erwärmung von bis zu 5,8 °C im globalen Mittel zu rechnen.

Die globale Erwärmung beeinflusst auch die thermohaline Zirkulation des Atlantiks. Durch die Erwärmung der Oberfläche des Ozeans erfolgt eine Reduktion der Dichte des Wassers. Dazu kommt, dass in einem wärmeren Klima der Wasserkreislauf tendenziell verstärkt wird und somit mehr Niederschlag in Bereichen des Nordatlantiks fällt. Dies verringert ebenfalls die Dichte und verstärkt den temperaturbedingten Effekt. Somit wird es zunehmend schwieriger, Tiefenwasser in den hohen geografischen Breiten zu bilden. Unsere Simulationen zeigen, dass im Jahr 2100 mit einer Reduktion der Zirkulation bis zu über 50% gerechnet werden muss [22]. Es ist zu beachten, dass die Unsicherheit der Prognosen dieser Grösse recht gross ist.

Bild 7 zeigt ein weiteres wichtiges Resultat. Die globale Erwärmung kann längerfristig sogar zu einem vollständigen Abstellen der thermohalinen Zirkulation führen, wenn gewisse Schwellenwerte überschritten werden [23]. Die erfolgte atmosphärische Erwärmung stellt einen solchen Schwellenwert dar. Überraschend ist aber, dass die Anstiegsrate dieser Erwärmung die Lage des Schwellenwertes ebenfalls stark beeinflusst. Je schneller die Erwärmung erfolgt, desto tiefer liegt der Schwellenwert für ein Abstellen der Zirkulation. Erfolgt die Erwärmung nur langsam, so kann sich der Ozean anpassen und zeigt keinen Zusammenbruch der Zirkulation. Dies hat damit zu tun, dass Wärme nur mit einer Geschwindigkeit in den Ozean aufgenommen werden kann,

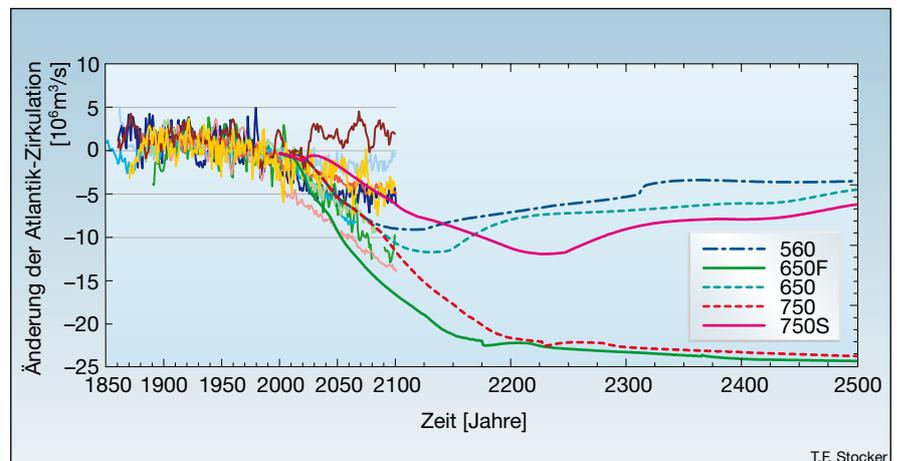


Bild 7 Bedingungen, die den Golfstrom stoppen

Simulation der Veränderung der thermohalinen Zirkulation im Atlantik in verschiedenen gekoppelten Klimamodellen bis ins Jahr 2100 [17]. Simulationen wurden bis ins Jahr 2500 mit dem Berner Klimamodell fortgeführt unter der Annahme einer konstant gehaltenen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre [23]. Dabei tritt eine Bifurkation der Zirkulation ein: Je nach Erwärmung und Erwärmungsgeschwindigkeit erfolgt ein vollständiges Abstellen der Zirkulation.

die im Wesentlichen durch die vertikalen Mischungsprozesse im Ozean bestimmt ist. Erfolgt die Erwärmung der Oberfläche zu schnell, so bilden sich grosse vertikale Dichteunterschiede aus, die die Tiefenwasserbildung schliesslich unterdrücken. Auf langsame Störungen reagiert das Atmosphäre-Ozean-System also in linearer Weise, schnelle Störungen lösen dagegen nicht lineare Reaktionen aus.

Theoretische Untersuchungen zeigen, dass solche Übergänge der Zirkulation irreversibel sein können [9]. Ist einmal die thermohaline Zirkulation im Atlantik abgestellt, so bleibt der Ozean in diesem Zustand, auch wenn die Erwärmung wieder rückgängig gemacht wird. Sogenanntes Hystereseverhalten verhindert also eine Rückkehr des Strömungssystems zum ursprünglichen Zustand. Obwohl die Lage der zugehörigen Schwellenwerte noch äusserst unsicher ist, ist klar, dass irreversible Veränderungen im Klimasystem unter allen Umständen vermieden werden sollten.

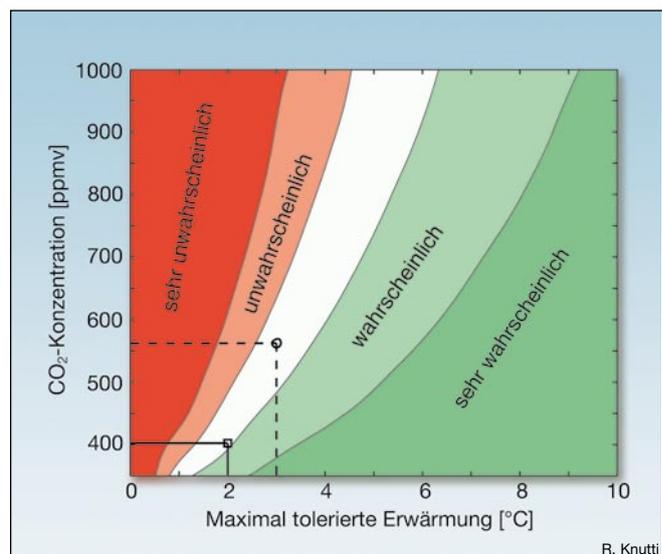
Die Herausforderung für das 21. Jahrhundert

Es steht heute ausser Zweifel, dass die beschleunigte globale Erwärmung der letzten 50 Jahre massgeblich durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen verursacht wurde [17, 19]. Zahlreiche Modellsimulationen verdeutlichen, dass natürliche Einflüsse wie Änderung der Sonneneinstrahlung und Vulkanereignisse sowie natürliche Zyklen nur von untergeordneter Bedeutung waren [16]. Die Temperaturentwicklung der letzten 30 Jahre kann nur durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen der Atmosphäre schlüssig erklärt werden. Auch die Klimasensitivität, die globale mittlere Erwärmung bei einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration und somit ein Mass für die Wirkung von Treibhausgasen, kann nun aufgrund von Paläoklimadaten besser abgeschätzt werden [24]. Diese beiden kürzlich publizierten Resultate verstärken die Eckpfeiler, auf denen die Berechnungen der erwarteten Klimaänderungen der nächsten 100 Jahre beruhen.

Eine für Entscheidungsträger wichtige Fragestellung ist, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, eine vereinbarte globale Erwärmung nicht zu überschreiten. Diese Frage kann mit Klimamodellen angegangen werden, mit denen eine grosse Anzahl von Simulationen durchgeführt wird. Knutti et al. [21] haben das vereinfachte Klimamodell der Universität Bern [25] eingesetzt und eine geschätzte Wahr-

Bild 8 Wahrscheinlichkeit einer Temperaturerhöhung

Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass bei einer gegebenen maximalen Konzentration von CO₂ ein gesetzter Wert der globalen Temperaturerhöhung nicht überschritten wird. «Sehr unwahrscheinlich» bezeichnet <10%, «unwahrscheinlich» <33%, «wahrscheinlich» >66%, und «sehr wahrscheinlich» >90%.



scheinlichkeitsverteilung der Klimasensitivität verwendet [20]. Die Resultate sind in Bild 8 zusammengefasst. Sie zeigen deutlich, dass das erklärte Ziel der EU, die globale Erwärmung auf 2 °C zu beschränken, zwar erreicht werden kann, dass dazu aber rasche und effiziente Reduktionen der CO₂-Emissionen unabdingbar sind. Mit einer Beschränkung der atmosphärischen Konzentrationen auf den doppelten vorindustriellen Wert, also bei ca. 560 ppm, ist es nach diesen Berechnungen möglich, die globale Erwärmung auf 3 °C zu limitieren. Bild 8 zeigt klar, dass die Herausforderungen mit steigender CO₂-Konzentration und strengeren Temperaturbegrenzungen rasch grösser werden.

Eine globale Erwärmung von 2 °C wird oft als tolerierbar bezeichnet. Drei Punkte sind allerdings zu bedenken:

Erstens sind regionale Änderungen relevant für Umwelt und Gesellschaft; global gemittelte Temperaturänderungen sind lediglich ein abstraktes Mass. Aufgrund von fundamentalen physikalischen Prozessen wird die Erwärmung verstärkt in geografischen Breiten mit jahreszeitlicher Schneebedeckung erfolgen. Dies wird als Eis/Schnee-Albedo-Feedback bezeichnet. Insbesondere nördlich von 60 °N wird dadurch die Erwärmung um einen Faktor 2 oder mehr grösser sein. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts erwartet man aus diesem Grund ein grossflächiges Abschmelzen der Meereisbedeckung in der Arktis [26] sowie einen beschleunigten Massenverlust des Grönlandeises [27]. Für die jahreszeitlich schneebedeckten Hochlagen (z.B. Alpen) bedeutet dies eine verkürzte Wintersaison. Diese wird einschneidende Folgen für den Tourismus und die Wasser- und Elektrizitätswirtschaft haben.

Zweitens haben vor allem Veränderungen von Extremereignissen in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit erregt, da diese die gesellschaftlichen Strukturen am stärksten und unmittelbarsten belasten. Aufgrund von einfachen statistischen Überlegungen (Bild 9) ist die Häufigkeit von Extremereignissen besonders anfällig auf kleinste Verschiebungen des Mittelwertes. Die mittlere Klimaänderung manifestiert sich deshalb frühzeitig in einer veränderten Statistik von Extremereignissen. Im Beispiel von Bild 9 führt ein leichter Anstieg der mittleren Sommertemperatur zu einer vermehrten Häufigkeit von Hitzewellen. Berechnungen zeigen, dass die Hitzewelle 2003 in Europa bereits durch die Klimaerwärmung begünstigt wurde [28]. Die Abschätzung über das Auftreten solcher Hitzewellen, basierend auf Simulationen mit Regionalklimamodellen, zeigt, dass ein Ereignis wie die Hitzewelle 2003 gegen Ende des 21. Jahrhunderts 2- bis 3-mal pro Jahrzehnt auftreten könnte [29]. Das Ausmass der Veränderung der Statistik wird durch die Analyse von Paläoklimadaten verdeutlicht. Aus diesen kann geschlossen werden, dass die Hitzewelle 2003 in den letzten 500 Jahren einmalig war [30]!

Drittens sind die langfristigen Veränderungen zu beachten. Die bereits emittierten Treibhausgase weisen eine gewisse Lebensdauer in der Atmosphäre aus. Die längste Lebensdauer weist CO₂ auf, von dem über 15% des bereits emittierten Gases über viele Jahrhunderte in der Atmosphäre bleiben wird. Aufgrund der Trägheit des Klimasystems ist der Ozean noch weit von einem Gleichgewicht entfernt. Durch das Eindringen der Erwärmung in die tieferen Schichten des Ozeans wird der Meeresspiegel noch bis

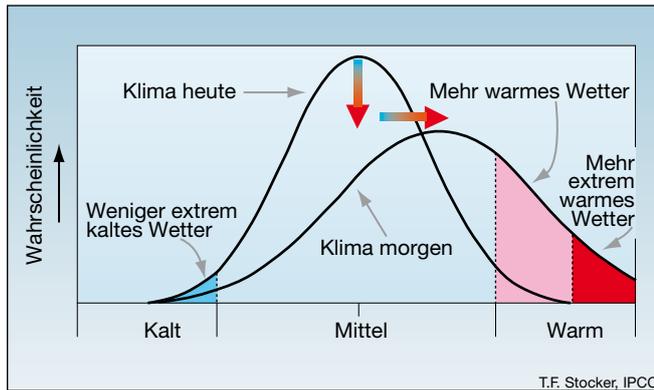


Bild 9 Steigende Sommertemperaturen

Schematische Häufigkeitsverteilung der Sommertemperatur in Mitteleuropa. Durch einen leichten Anstieg des Mittelwerts (Verschiebung der Verteilungskurve nach rechts) kommen kältere Sommer weniger oft vor, wärmere Sommer werden aber um viele Faktoren häufiger (rote Fläche nimmt stark zu).

ins 22. Jahrhundert ansteigen, auch wenn die Emissionen bereits heute reduziert werden. Die Konsequenz ist, dass wir noch nicht alle klimatisch bedingten Veränderungen «erfahren» haben, die uns aufgrund der bereits erfolgten Emissionen noch bevorstehen.

Gibt es ein Wunderrezept?

Wunderrezepte gegen die globale Erwärmung werden wiederholt vorgeschlagen und machen oft Schlagzeilen. Die Emission von Treibhausgasen während der letzten 250 Jahre und die globale Veränderung der Landnutzung können nicht innerhalb von wenigen Jahren mit einigen Massnahmen beseitigt werden. Kurzfristig orientierte Vorschläge wie das Verklappen von Abgasen oder das Aufforsten einiger Gebiete sind praktisch wirkungslos angesichts der gigantischen Massen der bisher emittierten Gase. Einzig langfristige und globale Massnahmen wie die Steigerung der Effizienz beim Einsatz dieser Rohstoffe sowie die schrittweise Reduktion von Emissionen werden ermöglichen, dieses globale Problem in Schranken zu halten.

Neben diesen unabdingbaren Massnahmen, die die Ursachen der Klimaerwärmung betreffen, wird eine Anpassung an bereits erfolgte und sich noch entwickelnde Klimaänderungen in regional unterschiedlicher Ausprägung und Grösse notwendig sein. Nicht nur Klimaschutz (mitigation), wie oft behauptet, sondern auch die klimabedingte Anpassung (adaptation) wird mit hohen Kosten und infrastrukturellen Veränderungen verbunden sein. Diese Kosten skalieren sehr wahrscheinlich nicht linear mit der Klimaerwärmung. Ob die Erwärmung gegen Ende des 21. Jahrhunderts 2 °C, 4 °C oder mehr sein wird, wird allein bestimmt durch das Volumen der ab heute emittierten Treibhausgase und die Änderung der Landnutzung – und deshalb direkt durch die gesellschaftspolitischen Entscheidungen

auf lokaler, regionaler und globaler Ebene.

Der globale Ausstoss von CO₂ muss stabilisiert und in Zukunft, das heisst ab etwa 2030, massiv reduziert werden, um die Erwärmung in vorgegebenen Grenzen zu halten. In der UN-Rahmenkonvention für Globale Klimaänderung (UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC, seit 1994 in Kraft), eines der wenigen und konkreten Resultate der legendären Rio-Konferenz von 1992, heisst es in Artikel 2, dass die Konzentrationen der Treibhausgase auf einem Wert zu stabilisieren seien, der einen gefährlichen Einfluss des Menschen auf das Klima ausschliesse. Bei konkreten Emissionsreduktionen wird die differenzierte Verantwortung der verschiedenen Staaten eine zentrale Rolle spielen.

Die Wissenschaft kann aufzeigen, wie sich die Welt verändern wird. Es ist jedoch an der Gesellschaft zu entscheiden, wie viel Klimaänderung wir ertragen wollen. Ohne eine globale Sichtweise kann es zu weitreichenden Konflikten kommen, denn ein stabiles Klima ist – noch vielen nicht bewusst – eine wichtige und bedrohte Ressource.

Referenzen

- [1] K.E. Trenberth, J.M. Caron, D.P. Stepaniak: The atmospheric energy budget and implications for surface fluxes and ocean heat transports, *Climate Dynamics*, 17, 259–276, 2001.
- [2] W.S. Broecker, G.H. Denton: The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 53, 2465–2501, 1989.
- [3] T.F. Stocker: Past and future reorganizations in the climate system, *Quaternary Science Reviews*, 19, 301–319, 2000.
- [4] NorthGRIP Members: High-resolution climate record of the northern hemisphere back into the last interglacial period, *Nature*, 431, 147–151, 2004.
- [5] T. Blunier et al.: Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period, *Nature*, 394, 739–743, 1998.
- [6] T. Blunier, E.J. Brook: Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland

during the last glacial period, *Science*, 291, 109–112, 2001.

- [7] W.S. Broecker et al.: Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation?, *Nature*, 315, 21–25, 1985.
- [8] H. Stommel: Thermohaline convection with two stable regimes of flow, *Tellus*, 13, 224–230, 1961.
- [9] T.F. Stocker, D.G. Wright: Rapid transitions of the ocean's deep circulation induced by changes in surface water fluxes, *Nature*, 351, 729–732, 1991.
- [10] S. Rahmstorf: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419, 207–214, 2002.
- [11] W.S. Broecker: Paleoclimatic evidence for the last deglaciation: a bipolar seesaw?, *Paleoceanography*, 13, 119–121, 1998.
- [12] T.F. Stocker: The seesaw effect, *Science*, 282, 61–62, 1998.
- [13] T.F. Stocker, S.J. Johnsen: A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw, *Paleoceanography*, 18, 1087, 2003.
- [14] EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica, *Nature*, 444, 195–198, 2006.
- [15] U. Siegenthaler et al.: Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene, *Science*, 310, 1313–1317, 2005.
- [16] P.A. Stott et al.: Observational constraints on past attributable warming and predictions of future global warming, *Journal of Climate*, 19, 3055–3069, 2006.
- [17] IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 881 pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [18] S. Levitus, J. Antonov, T. Boyer: Warming of the world ocean, 1955–2003, *Geophysical Research Letters*, 32, L02604, 2005.
- [19] IPCC, *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 University Press, Cambridge, in review, 2007.

Résumé

La terre en serre

Un défi pour le 21^e siècle. Le fait que le climat de la terre se réchauffe n'est plus guère remis en question que par des politiciens ou la presse. Les scientifiques sont d'accord sur le fait que la combustion du charbon et du pétrole, la production du ciment et l'exploitation intensive des terres (déboisement) ont provoqué ces 50 dernières années un réchauffement non naturel du climat. Actuellement, la recherche tente de déterminer de combien de degrés la terre va se réchauffer au cours de ce siècle: 2 °C, 4 °C ou davantage? Si en outre les courants marins comme le Gulf Stream étaient modifiés, cela aurait des conséquences massives pour l'Europe. Et comme le montrent les bulles d'air dans la glace de carottage de l'Antarctique, le Gulf Stream s'est arrêté et est reparti plusieurs fois durant la dernière ère glaciaire qui a commencé voici 90 000 ans.

- [20] R. Knutti et al.: Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles, *Nature*, 416, 719–723, 2002.
- [21] R. Knutti et al.: Probabilistic climate change projections for CO₂ stabilization profiles, *Geophysical Research Letters*, 32, L20707, 2005.
- [22] A. Schmittner, M. Latif, B. Schneider: Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations, *Geophysical Research Letters*, 32, L23710, 2005.
- [23] T.F. Stocker, A. Schmittner: Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation, *Nature*, 388, 862–865, 1997.
- [24] G.C. Hegerl et al.: Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries, *Nature*, 440, 1029–1032, 2006.
- [25] T.F. Stocker, D.G. Wright, L.A. Mysak: A zonally averaged, coupled ocean-atmosphere model for paleoclimate studies, *Journal of Climate*, 5, 773–797, 1992.
- [26] G.M. Flato: Participating CMIP Modeling Groups, Sea-ice and its response to CO₂ forcing as simulated by global climate change studies, *Climate Dynamics*, 23, 220–241, 2004.
- [27] P. Huybrechts et al.: Modelling Antarctic and Greenland volume changes during the 20th and 21st centuries forced by GCM time slice integrations, *Global and Planetary Change*, 42, 83–105, 2004.
- [28] P.A. Stott, D.A. Stone, M.R. Allen: Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610–613, 2004.
- [29] C. Schär et al.: The role of increasing temperature variability in European summer heat waves, *Nature*, 427, 332–336, 2004.
- [30] J. Luterbacher et al.: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499–1503, 2004.

Angaben zum Autor

Thomas Stocker ist Professor für Klima- und Umweltphysik am Physikalischen Institut der Universität Bern. Er arbeitet mit am Nationalen Forschungszentrum NCCR-Climate und ist Hauptautor des Kapitels «Global Climate Projections» des Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Der vorliegende Beitrag ist eine Erweiterung und Aktualisierung eines im *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 92, 35–45, 2003 erschienenen Artikels.
Universität Bern, 3012 Bern,
stocker@climate.unibe.ch