

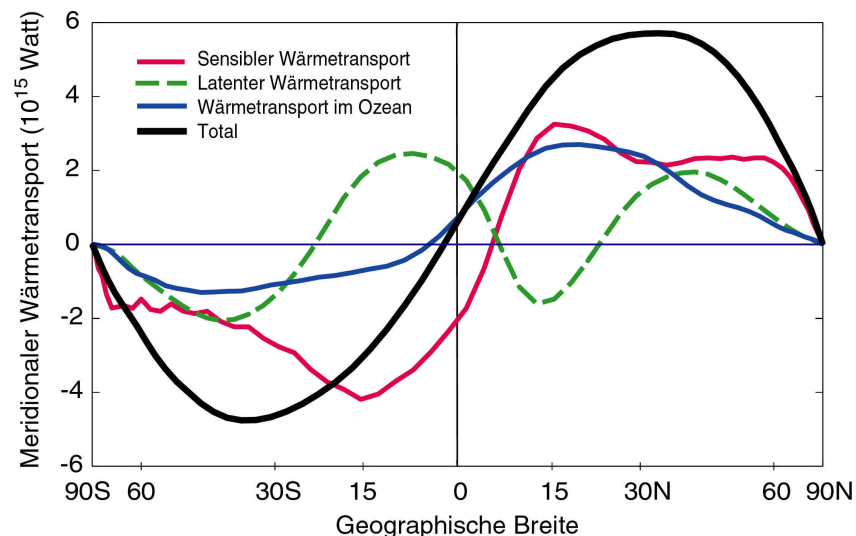
Das Meer und das Klima

Thomas Stocker
Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut
Universität Bern

Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. 92, 35-45, 2003.

Der Ozean als globale Wärmepumpe

Der Energiefluss von der Sonne wird durch die Solarkonstante angegeben und beträgt ca. 1368 W/m^2 . Etwa 70% davon steht der Erde zur Verfügung, der Rest wird durch Wolken und helle Oberflächen in den Weltraum zurück reflektiert. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt, verursacht durch Wasserdampf und verschiedene Treibhausgase (CO_2 , CH_4 und N_2O), wäre die mittlere Jahrestemperatur der Erde nur gerade -18°C . Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt eine Erwärmung auf eine mittlere Temperatur von fast 15°C . Die geographischen Breiten äquatorwärts von 30° weisen über das Jahr gemittelt eine positive Energiebilanz aus, polwärts davon besteht aber ein Defizit (Trenberth *et al.*, 2001). 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 (Figur 1).

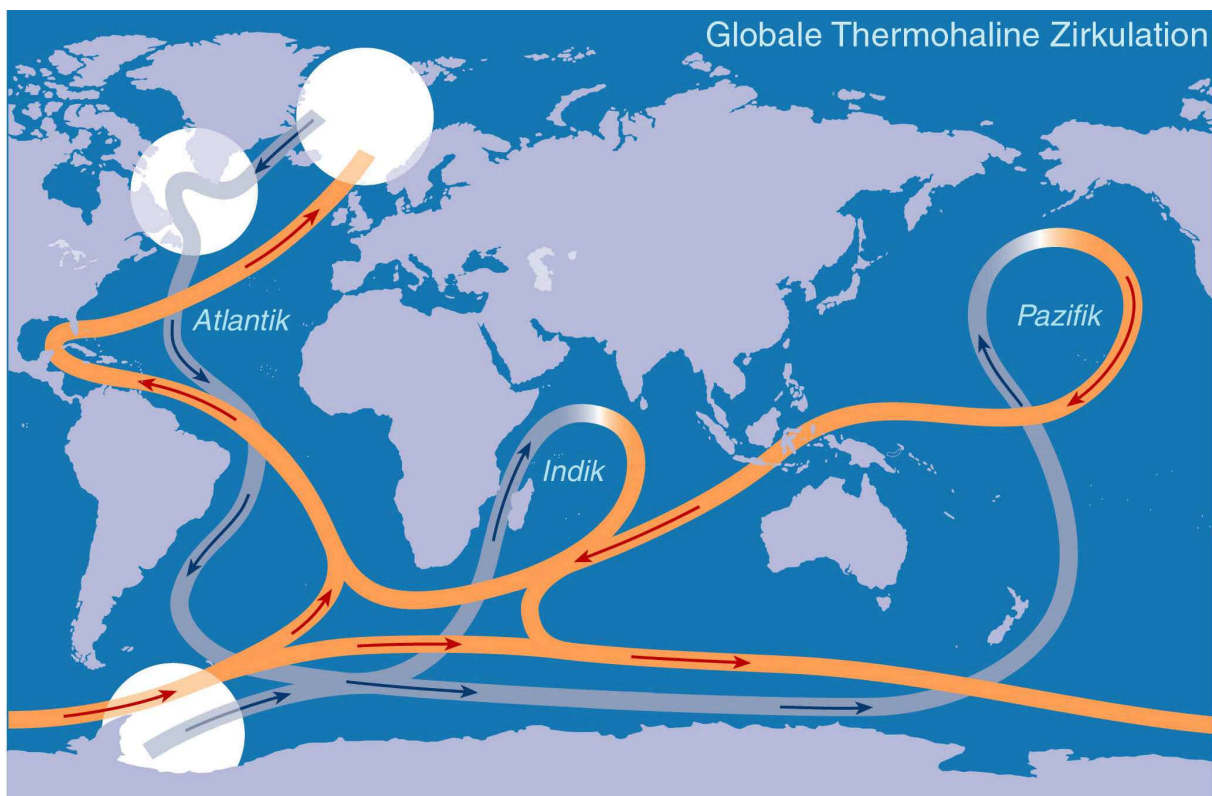


Figur 1: Meridionaler Wärmetransport im Klimasystem. Ozean und Atmosphäre tragen in der Nordhemisphäre etwa gleich viel zum Transport bei. (Figur nach Bryden & Imawaki, 2001).

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 (Figur 2). Im Atlantik fließt warmes Wasser aus den Tropen als Golfstrom nordwärts bis weit in das Nordmeer, wo sich das Wasser abkühlt und die Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Durch die Abkühlung wird das Meerwasser dichter und sinkt in die Tiefe ab. Wegen der Erdrotation bildet sich ein

Randstrom auf etwa 2-3 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. Figur 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.

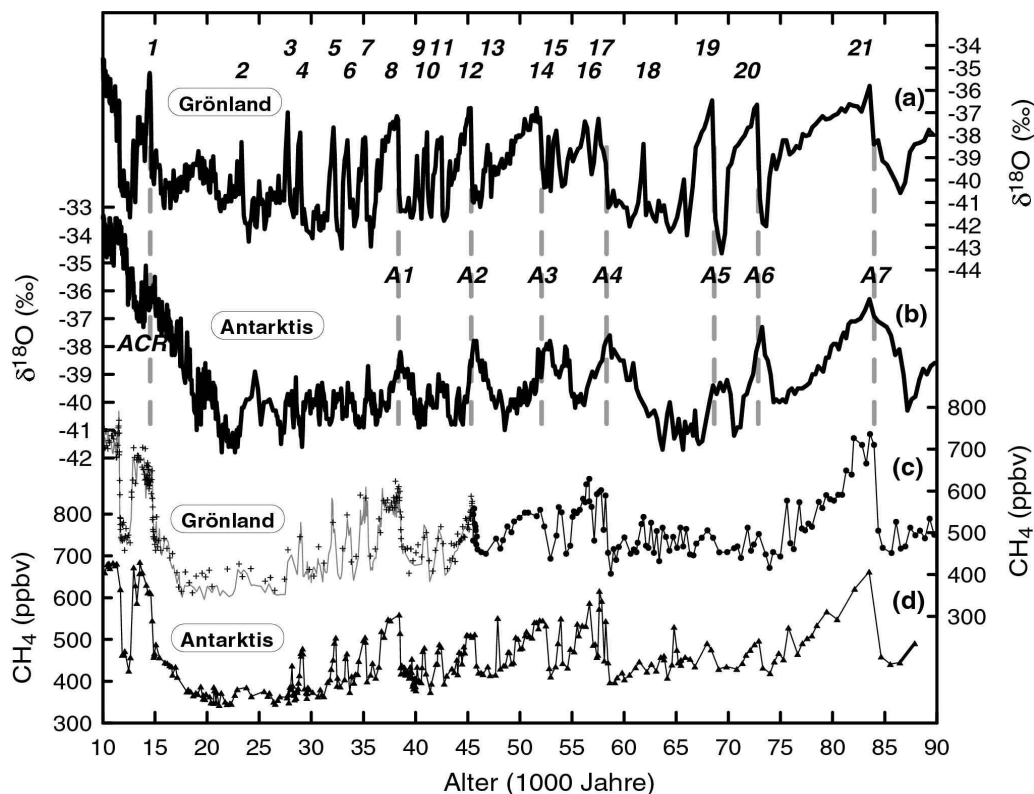
Die in Figur 2 gezeigte Zirkulation wird vor allem durch Wärme- und Wasserflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean angetrieben. Erstere verändern die Temperatur, letztere den Salzgehalt von Meerwasser. Gemeinsam verändern sie die Dichte des Wassers an der Oberfläche. Bei genügender Reduktion der Dichte können Wassermassen in die Tiefe absinken: es wird neues Tiefenwasser gebildet. Diese Strömung wird als "thermohaline Zirkulation" bezeichnet.



Figur 2: Globales thermohalines Stromsystem. Orte, wo Tiefenwasser gebildet wird, sind durch helle Kreisscheiben dargestellt. Dort erfolgt ein Wärmeübertrag vom Ozean in die Atmosphäre, der das lokale Klima stark beeinflusst. (Figur nach IPCC, 2001a)

Abrupte Klimaschwankungen während der Eiszeit: Stotternde Wärmepumpe?

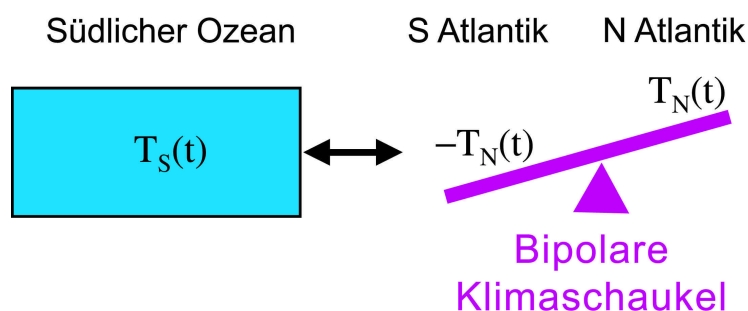
Die Untersuchung von Klimaarchiven wie Meeressedimente und Eisbohrkerne aus Grönland zeigen deutlich, dass die Temperaturen im Nordatlantischen Raum und in Grönland während der letzten Eiszeit nicht nur deutlich kälter waren, sondern auch massiv geschwankt haben (Broecker & Denton, 1989; Stocker, 2000). 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 21 dieser abrupten Erwärmungen, die heute Dansgaard/Oeschger Ereignisse genannt werden, gezählt (Dansgaard *et al.*, 1984; Oeschger *et al.*, 1984). Abkühlungen erfolgten graduell, doch in einigen Fällen ebenfalls sehr schnell. Figur 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 welche Abkühlungen über mehrere hundert 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 Treibhausgaskonzentrationen, die in den im Eis eingeschlossenen Luftbläschen gemessen werden, gelingt es, die Klimaschwankungen im Norden mit denjenigen im Süden zu korrelieren (Blunier *et al.*, 1998; Blunier & Brook, 2001). 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.



Figur 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. (Figur nach Blunier & Brook, 2001).

Seit einigen Jahren vermutet man, dass der Ozean für diese schnellen Schwankungen verantwortlich ist (Broecker *et al.*, 1985). 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 Wärmequellen und Niederschlag an der Ozeanoberfläche auf die Dichte von Meerwasser zuzuschreiben sind (Stommel, 1961; Stocker & Wright, 1991). 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, und mindestens 4°C in Europa). Es wird vermutet, dass die Störungen, die zum Abstellen der Zirkulation im Atlantik führen, von den kontinentalen 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 Süsswasser in die Bereiche, wo Tiefenwasser gebildet wird. Süsswassereintrag 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 (Stocker, 2000; Rahmstorf, 2002). 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 müsste somit als Fernfeldwirkung beobachtbar sein. Dies hat zur Formulierung der sogenannten "bipolaren Klimaschaukel" als Paradigma zur Wechselwirkung von Nord- und Südhemisphäre während abrupten Klimaschwankungen geführt (Broecker, 1998; Stocker, 1998). Die Klimaschaukel ist in Figur 4 dargestellt und veranschaulicht, dass eine abrupte Erwärmung im Norden zu einer abrupten Abkühlung im Südatlantik führt, beziehungsweise umgekehrt. Koppelt man die Schaukel mit einem grossen Wärmereservoir, bewirkt eine abrupte Abkühlung im Südatlantik eine langsame, kontinuierliche Abkühlung im südlichen Ozean. So kann in einfachster Weise der unterschiedliche Charakter von Temperatursignalen in Grönland und der Antarktis (Fig. 3) erklärt werden (Stocker & Johnsen, 2003).



Figur 4: Bipolare Klimaschaukel gekoppelt mit einem südlichen Wärmereservoir. (Figur nach Stocker & Johnsen, 2003)

Das Klima ändert sich

Heute ist die CO₂ Konzentration in der Atmosphäre über 30% höher als je zuvor in den letzten 420'000 Jahren (Petit *et al.*, 1999). 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 CO₂ Konzentration 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 wurden. Das Physikalische Institut der Universität Bern, mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds, nimmt seit fast 40 Jahren an solchen Projekten teil. An diesen wertvollen Eisproben messen wir die Konzentrationen der wichtigsten Treibhausgase (Kohlendioxid CO₂; Methan CH₄, und Lachgas N₂O).

Zwischen dem Anstieg von CO₂ und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre und der Erwärmung der Erde von 0.6°C während den letzten 100 Jahren 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 die Berücksichtigung der Erhöhung der Treibhausgase und die damit verbundene Emission von Russpartikeln ergibt Resultate, die auch von 1950 bis heute mit den Beobachtungen gut übereinstimmen (Stott *et al.*, 2000; IPCC, 2001b). Die globale Erwärmung hinterlässt ebenfalls Spuren im Ozean. So zeigt ein Vergleich weltweiter Temperaturmessungen aus den 50er und 90er Jahren, dass der Weltozean ca. 2×10^{23} J Wärme aufgenommen hat (Levitus *et al.*, 2000).

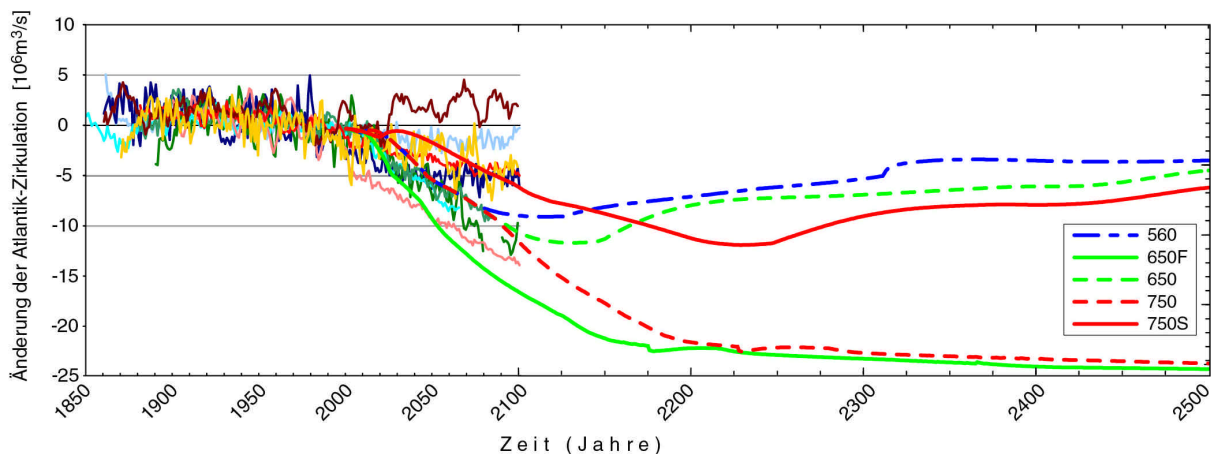
Basierend auf diesen und vielen weiteren Erkenntnissen hat das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ein Expertengremium der UNO, die Aussage gemacht, dass "*der grösste Anteil der Erwärmung der letzten 50 Jahre menschlichen Aktivitäten zuzuschreiben ist*" (IPCC, 2001b). Zum letzten Bericht, der 2001 veröffentlicht wurde, haben über 2000 WissenschaftlerInnen beigetragen; er kann unter www.ipcc.ch eingesehen werden.

Die globale Erwärmung schwächt die ozeanische Wärmepumpe

An der Universität Bern verfügen wir über Klimamodelle, mit denen die künftige Klimaerwärmung berechnet werden kann. Auch die Unsicherheiten in den Einflussgrössen werden systematisch berücksichtigt. In einem moderaten CO₂-Emissionsszenario wird eine Erwärmung von 2.5°C bis ins Jahr 2100 prognostiziert (Knutti *et al.*, 2002; 2003). Wesentlich grössere Erwärmungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Für die pessimistischsten Szenarien, in denen der Verbrauch 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 geographischen Breiten zu bilden. Unsere Simulationen zeigen, dass im Jahr 2100 mit einer Reduktion der Zirkulation von 15 bis 85% gerechnet werden muss (Knutti *et al.*, 2003). Es ist zu beachten, dass die Unsicherheit recht gross ist.

Figur 5 zeigt ein weiteres wichtiges Resultat. Die globale Erwärmung kann längerfristig sogar zu einem vollständigen Abstellen der thermohalinen Zirkulation führen, wenn gewisse Schwellenwerte überschritten werden (Stocker & Schmittner, 1997). 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 in den Ozean nur mit einer Geschwindigkeit aufgenommen werden kann, die durch die 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.



Figur 5: Simulation der Veränderung der thermohalinen Zirkulation im Atlantik in verschiedenen gekoppelten Klimamodellen bis ins Jahr 2100 (nach IPCC, 2001b). Simulationen wurden bis ins Jahr 2500 mit dem Berner Klimamodell fortgeführt unter der Annahme einer konstant gehaltenen CO_2 Konzentration in der Atmosphäre (Stocker & Schmittner, 1997). Dabei tritt eine Bifurkation der Zirkulation ein: je nach Erwärmung und Erwärmungsgeschwindigkeit erfolgt ein vollständiges Abstellen der Zirkulation.

Theoretische Untersuchungen zeigen, dass solche Übergänge der Zirkulation irreversibel sein können (Stocker & Wright, 1991). 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.

Was ist zu tun?

Schon jetzt scheint sich abzuzeichnen, dass technologisch entwickelte Länder mit geeigneten, wenn auch zunehmend teuren Massnahmen sich auf ein wärmeres Klima einstellen können. Aber gerade die ärmeren Länder, die bereits heute äusserst sensibel auf natürliche Klimavariabilität (Dürre, Überschwemmungen, Epidemien) reagieren, werden durch die Klimaänderung und ihre weitreichenden Auswirkungen vor immensen Herausforderungen

stehen. Ein eindrückliches Beispiel ist der Anstieg des Meeresspiegels, der in Holland wohl einige zusätzliche bauliche Massnahmen erfordert, jedoch in Bangladesh eine menschliche Katastrophe auslösen wird.

Das Problem ist nachhaltig einzig an der Wurzel anzupacken. Der 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 sind, der einen gefährliche Einfluss des Menschen auf das Klima ausschliesst. Die Wissenschaft kann aufzeigen, wie sich die Welt verändern wird. Es ist jedoch an der Gesellschaft zu entscheiden, wieviel Klimaänderung wir ertragen wollen. Ohne eine globale Sichtweise kann es zu schwierigen Konflikten kommen, denn ein stabiles Klima ist – noch vielen nicht bewusst – eine wichtige und bedrohte Ressource.

Literaturangaben:

- BLUNIER, T. & E.J. BROOK: Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science* 291, 109-112 (2001).
- BLUNIER, T., J. CHAPPELLAZ, J. SCHWANDER, A. DÄLLENBACH, B. STAUFFER, T.F. STOCKER, D. RAYNAUD, J. JOUZEL, H.B. CLAUSEN, C.U. HAMMER & S.J. JOHNSEN: Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature* 394, 739-743 (1998).
- BROECKER, W.S.: Paleocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seesaw? *Paleoceanography* 13, 119-121 (1998).
- BROECKER, W.S. & G.H. DENTON: The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica Cosmochimica Acta* 53, 2465-2501 (1989).
- BROECKER, W.S., D.M. PETEET & D. RIND: Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? *Nature* 315, 21-25 (1985).
- BRYDEN, H.L. & S. IMAWAKI: Ocean heat transport. In: *International Geophysics Series: Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean (77)* [G. Siedler et al. (eds.)]. Academic Press, New York, 455-474. (2001)
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, D. DAHL-JENSEN, N. GUNDESTRUP, C.U. HAMMER & H. OESCHGER: North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In: *Climate Processes and Climate Sensitivity (Geophys. Monogr. Ser.)* [J.E. Hansen & T. Takahashi (eds.)]. Am. Geophys. Union, Washington, 288-298. (1984)
- IPCC: *Climate Change 2001: Synthesis Report*. [R.T. Watson & Core-Writing-Team (eds.)]. Cambridge University Press, 397 pp. (2001a).
- IPCC: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [J.T. Houghton et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp. (2001b).
- KNUTTI, R., T.F. STOCKER, F. JOOS & G.-K. PLATTNER: Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles. *Nature* 416, 719-723 (2002).
- KNUTTI, R., T.F. STOCKER, F. JOOS & G.-K. PLATTNER: Probabilistic climate change projections using neural networks. *Climate Dynamics* in press (2003).
- LEVITUS, S., J.I. ANTONOV, T.P. BOYER & C. STEPHENS: Warming of the world ocean. *Science* 287, 2225-2229 (2000).

- OESCHGER, H., J. BEER, U. SIEGENTHALER, B. STAUFFER, W. DANSGAARD & C.C. LANGWAY: Late glacial climate history from ice cores. In: *Climate Processes and Climate Sensitivity (Geophysical Monograph Series)* [J.E. Hansen & T. Takahashi (eds.)]. American Geophysical Union, Washington, 299-306. (1984)
- PETIT, J.R., et al.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436 (1999).
- RAHMSTORF, S.: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207-214 (2002).
- STOCKER, T.F.: The seesaw effect. *Science* 282, 61-62 (1998).
- STOCKER, T.F.: Past and future reorganization in the climate system. *Quaternary Science Reviews* 19, 301-319 (2000).
- STOCKER, T.F. & S.J. JOHNSEN: A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography* 18, 1087, doi: 10.1029/2003PA000920 (2003).
- STOCKER, T.F. & A. SCHMITTNER: Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature* 388, 862-865 (1997).
- STOCKER, T.F. & D.G. WRIGHT: Rapid transitions of the ocean's deep circulation induced by changes in surface water fluxes. *Nature* 351, 729-732 (1991).
- STOMMEL, H.: Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13, 224-230 (1961).
- STOTT, P.A., S.F.B. TETT, G.S. JONES, M.R. ALLEN, J.F.B. MITCHELL & G.J. JENKINS: External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcing. *Science* 290, 2133-2137 (2000).
- TRENBERTH, K.E., 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).