

Paläo-Ozeanographie

Rainer Zahn

GEOMAR, Kiel

Die thermohaline Zirkulation des Ozeans und der damit verbundene marine Wärmetransport ist ein wesentlicher Bestandteil des globalen Klimasgeschehens. Dabei nimmt der Wärmetransport in den nördlichen Nordatlantik eine Schlüsselrolle ein, da er das thermische Ungleichgewicht zwischen Ozean und Atmosphäre bestimmt und damit die Voraussetzungen schafft für Verdunstung und Salzanreicherung sowie Abkühlung des Oberflächenwassers. Dies sind wichtige Vorbedingungen für die tiefreichende Konvektion in der Labrador See und im Europäischen Nordmeer, die die thermohaline Zirkulationsschleife antreiben (Broecker, 1991; Schmitz und McCartney, 1993; Dickson et al., 1996; Sy et al., 1997).

Wesentliche Teile der in den Nordatlantik advectierten Wärme stammen aus dem Südatlantik (ca. 144×10^{13} Watt) und dem Indischen Ozean (ca. 47×10^{13} Watt) (Stommel, 1980; Gordon, 1985, 1986). Entscheidend für den inter-ozeanischen Wärmetransport in den Südatlantik sind die "Kaltwasser"- und "Warmwasser"-Wege durch die Drake Passage und im Agulhas Strom um die Südspitze Südafrikas (z. B. Rintoul, 1991). Beide marinen "gateways" stellen aufgrund ihrer engen Geometrie im Verbund mit klimagesteuerten Verlagerungen des südpolaren Frontensystems wesentliche limitierende Faktoren für den thermohalinen Oberflächen-Rückstrom aus dem Indik und Pazifik dar (Prell et al., 1980; McIntyre et al., 1989), und damit auch für den Wärmehaushalt des Südatlan-

tik. Der transäquatoriale Wärmetransport im Brasil-Strom und dem äquatorialen Strömungssystem bildet das thermohaline Bindeglied zwischen Süd- und Nordatlantik (Stramma und Schott, 1996). Dieser Wärmestrom wird nach dem Durchfluss durch die Karibik und den Golf von Mexiko in den Westrandstrom des Nordatlantik eingespeist, mit dem er im Golfstrom und dem Nordatlantischen Driftstrom schließlich den nördlichen Nordatlantik erreicht (Schmitz und Richardson, 1991; Schott und Molinari, 1996).

Labrador See Tiefenwasser (LSDW) als Komponente des oberen Nordatlantischen Tiefenwassers und Nordatlantisches Tiefenwasser (NADW) sind die wichtigsten charakteristischen Tiefenwassermassen des Nordatlantiks (Dickson et al., 1996). Beide entstehen im Zuge tiefreichender Winterkonvektion und fließen in den Südatlantik und das Südpolarmeer ab, wo sie in den Zirkumantarktischen Strömungsring (Zirkumantarktisches Tiefenwasser, CPDW) eingespeist und weiter in den Indischen und Pazifischen Ozean exportiert werden. Der Zustrom von NADW bestimmt die thermische und haline Struktur des CPDW und trägt zur Bildung von Antarktischen Zwischen- und Bodenwasser bei (Foster und Carmack, 1976), die beide nach Norden strömen und die thermohaline Zirkulationsschleife des Atlantiks schließen.

Klimaprofile entlang von Eiskernen aus Grönland weisen für die letzten 50.000 Jahre abrupte Klimasprünge nach, in denen das nordatlantische Klima zwi-

schen borealen Warmphasen und vollglazialen Kaltphasen mit mittleren Temperaturänderungen von bis zu 7°C in Zeiträumen von wenigen 10er Jahren wechselte (Dansgaard et al., 1993; Grootes et al., 1993; Taylor et al., 1993). Diese Klimasprünge werden mit Einbrüchen der thermohalinen Zirkulation in Verbindung mit Schmelzwasseranomalien erklärt, die eine reduzierte oder ganz aussetzende Advektion tropisch-subtropischer Wassermassen in den Nordatlantik bewirkten und die Wassermassenneubildung dort anfällig machten für feinstskalige Änderungen des salinen Budgets (Hughes, 1992; Weaver und Hughes, 1994; Manabe und Stouffer, 1995; Seidov et al., 1996). Paläo-ozeanographische Arbeiten der letzten 5 Jahre konnten nachweisen, dass die thermohaline Zirkulation des Ozeans in der Tat weit aus "flexibler" auf externe Impulse reagieren kann als traditionelle Konzepte bis dahin postulierten. Besonders wirksam sind Schmelzwasserinjektionen, deren Klimawirksamkeit nicht alleine vom Volumen des freigesetzten Schmelzwassers bestimmt wird, sondern von der Zielrichtung des Schmelzwasserflusses. Numerische Zirkulationsmodelle zeigen, dass ein fokussierter Schmelzwassereintrag in ein offen-ozeanisches Konvektionsgebiet die thermohaline Umwälzung effektiver herabsetzen kann als großvolumige aber diffuse Schmelzwasserflüsse, die ein Ozeanbecken flächig erfassen (Rahmstorf, 1995, 1996).

Zeitserien paläo-ozeanographischer Proxy-Daten, die entlang von Sedimentkernen aus ozeanographisch sensiblen Regionen erstellt wurden, stützen diese Modellierungsergebnisse. In Sedimentkernen aus dem nördlichen Nordatlantik sind rasche Klimawechsel in Form sprunghafter Änderungen planktischer Floren- und Faunengemeinschaften dokumentiert (Bond et

al., 1993; Bond und Lotti, 1995; Maslin, 1995; Maslin et al., 1995; Sarinthein et al., 1995; de Vernal et al., 1996; Rasmussen et al., 1996). Organische und inorganische Sedimentkomponenten liefern zusätzliche Belege für rasche Umstrukturierungen des marinen Kohlenstoffreservoirs, die nachweislich rascher als die bislang zugrundegelegten Responsezeiten (Broecker und Peng, 1987) des marinen Kohlenstoff- und Karbonatreservoirs von $1-6 \times 10^3$ Jahren stattfanden. Einbrüche benthischer Kohlenstoffisotopenwerte und des Karbonatgehaltes in Sedimentkernen aus dem flachen und tiefen Nordatlantik (1.000 m bis tiefer 4.000 m Wassertiefe; Keigwin und Jones, 1994; Oppo und Lehman, 1995; Curry und Oppo, 1997; Zahn et al., 1997) zeigen, dass die thermohaline Zirkulation des Nordatlantiks in der Tat in Zeiträumen von wenigen hundert Jahren von einem interglazialen auf ein glaziales Niveau gesunken ist.

Die Auswirkungen der Konvektionseinbrüche haben also offensichtlich die gesamte Wassersäule vom Zwischenwasser bis zum Bodenwasser erfasst. Änderungen der marinen Umwelt auf vergleichbar kurzen Zeitskalen werden auch im tropisch-subtropischen Bereich, im Südatlantik, Pazifik, Südpolarmeer und dem Arabischen Meer beobachtet (Waelbroeck et al., 1995; Behl & Kennett, 1996; Curry & Oppo, 1997; Little et al., 1997; U. v. Rad, Pakomin, BGR), so dass eine Einbindung des globalen Klimasystems in die abrupten Wechsel anzunehmen ist. Dies wird u. a. durch Beobachtungen kurzfristiger Klimaanomalien in südpolaren Eiskernen gestützt (Waelbroeck et al., 1995; Yiou et al., 1995; Jouzel et al., 1996). Trotz der im Vergleich zu den grönländischen Klimaserien niedrigeren zeitlichen Auflösung lassen sich auch hier wesentliche Merkmale der "Dansgaard-Oeschger"-Klimaoszillatio-

nen wiederfinden (Bender et al., 1994; Yiou et al., 1995). Der interhemisphärische Charakter dieser Klima-anomalien weist auf Rückkoppelungseffekte zwischen ozeanischer und atmosphärischer Zirkulation hin (z. B. Crowley, 1992; Charles et al., 1996; s. a. Latif et al., 1996).

Literatur

- Behl, R. J. & J. P. Kennett (1996): Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature*, **379**, 243 – 246.
- Bender, M., T. Sowers, M.-L. Dickson, J. Orchardo, P. Grootes, P. A. Mayewski, & D. A. Meese (1994): Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100.000 years. *Nature*, **372**, 663 – 666.
- Bond, G., W. Broecker, S. Johnson, J. McManus, L. Labeyrie, J. Jouzel, & G. Bonani (1993): Correlations between climatic records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 143 – 147.
- Bond, G. C & R. Lotti (1995): Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, **267**, 1.005 – 1.010.
- Broecker W. S. (1991): The great ocean conveyor. *Oceanography*, **4**.
- Broecker, W. S. & T.-H. Peng (1987): The oceanic salt pump: does it contribute to the glacial-interglacial difference in CO₂ content? *Global Biogeochem. Cycles*, **1**, 251 – 259.
- Charles, C. D., J. Lynch-Stieglitz, U. S. Ninnemann & R. G. Fairbanks (1996): Climate connections between the hemisphere revealed by deep sea sediment core/ice core correlations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **142**, 19 – 27.
- Crowley, T. J. (1992): North Atlantic Deep Water cools the southern hemisphere. *Paleoceanography*, **7**, 489 – 497.
- Curry, W. B. & D. W. Oppo (1997): Synchronous, high-frequency oscillations in tropical sea surface temperatures and North Atlantic Deep Water production during the last glacial cycle. *Paleoceanography*, **12**, 1 – 14.
- Dansgaard, W., J. J. Johnson, B. H. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjörndottir, J. Jouzel & G. Bond (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218 - 220.
- de Vernal, A., C. Hillaire-Marcel & G. Bilodeau (1996): Reduced meltwater outflow from the Laurentide ice margin during the Younger Dryas. *Nature*, **381**, 774 – 777.
- Dickson, R., J. Lazier, J. Meincke, P. Rhines & J. Swift (1996): Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic. *Progr. Oceanogr.*, **38**, 241 – 295.
- Foster, T. D. & E. C. Carmack (1976): Frontal zone mixing and Antarctic Bottom Water formation in the southern Wedell Sea. *Deep-Sea Res.*, **23**, 301 – 317.
- Gordon, A. L. (1985): Indian-Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflexion. *Science*, **218**, 883 – 884.
- Gordon, A. L. (1986): Interocean exchange of thermocline water, *J. Geophys. Res.*, **91**, 5.037 – 5.046.
- Hughes, T. (1992): Abrupt climatic change related to unstable ice-sheet dynamics: toward a new paradigm. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* (*Global*

- Planet. Change Sect.*), **97**, 203 – 234.
- Jouzel, J., L. Waelbroeck, B. Maloize, M. Bender, J. R. Petit, M. Stievenard, N. I. Barkov, J. M. Barnola, T. King, V. M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, D. Raynaud, C. Ritz & T. Sowers (1996): Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records. *Clim. Dyn.*, **12**, 513 – 521.
- Keigwin, L. D. & G. A. Jones (1994): Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate. *Journal of Geophysical Research*, **99(C6)**, 12.397 – 12.410.
- Latif, M., A. Grötzner, M. Münnich, E. Maier-Reimer, S. Venzke & T. P. Barnett (1996): A mechanism for decadal climate variability. in D. L. T. Anderson & J. Willebrand (eds.): Decadal Climate Variability. *NATO Advanced Science Institutes Series*, **44**, 263 – 292.
- Little, M. G., R. R. Schneider, D. Kroon, B. Price, C. P. Summerhayes & M. Segl (1997): Trade wind forcing of upwelling, seasonality, and Heinrich events as a response to sub-Milankovitch climate variability. *Paleoceanography*, **12**, 568 – 576.
- Manabe, S. & R. J. Stouffer (1995): Simulation of abrupt climatic change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **378**, 165 – 167.
- Maslin, M. A. (1995): Changes in North Atlantic deep-water formation associated with the Heinrich events. *Naturwissenschaften*, **82**, 330 – 333.
- Maslin, M. A., N. J. Shackleton & U. Pflaumann (1995): Surface water temperature, salinity, and density changes in the northeast Atlantic during the last 45.000 years: Heinrich events, deep water formation, and climatic rebounds. *Paleoceanography*, **10**, 527 – 544.
- McIntyre, A., W. F. Ruddiman, K. Karlin & A. C. Mix (1989): Surface water response of the equatorial Atlantic Ocean to orbital forcing. *Paleoceanography*, **4**, 19 – 55.
- Oppo, D. W. & S. J. Lehman (1995): Suborbital time scale variability of North Atlantic Deep Water during the past 200.000 years. *Paleoceanography*, **10**, 901 – 910.
- Prell, W., W. Hutson, D. Williams, A. Be, K. Geitzenauer & B. Molino (1980): Surface circulation of the Indian Ocean during the last glacial maximum, approximately 18.000 yr. B. P., *Quat. Res.*, **14**, 309 – 336.
- Rahmstorf, S. (1995): Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature*, **378**, 145 – 149.
- Rahmstorf, S. (1996): On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics*, **12**, 799 – 811.
- Rasmussen, T. L., E. Thomsen, T. C. E. v. Weering & L. Labeyrie (1996): Rapid changes in surface and deepwater-conditions at the Faeroe Margin during the last 58.000 years. *Paleoceanography*, **11**, 757 – 771.
- Rintoul, S. R. (1991): South Atlantic interbasin exchange. *J. Geophys. Res.*, **96**, 2.675 – 2.692.
- Sarnthein, M., E. Jansen, M. Weinelt, M. Arnold, J.-C. Duplessy, H. Erlenkeuser, A. Flatøy, G. Johannessen, T. Johannessen, S. Jung, N. Koc, L. Labeyrie, M. Maslin, U. Pflaumann, & H. Schulz (1995): Variations in Atlantic surface ocean paleoceanography, 50° - 80°N: a time-slice record of the last 30.000 years. *Paleoceanography*, **10**,

- 1.063 – 1.094.
- Schmitz Jr., W. J. J. & M. S. McCartney (1993): On the North Atlantic Circulation. *Rev. Geophys.*, **31(1)**, 29 – 49.
- Schmitz, W. J., Jr. & W.S. Richardson (1991): On the sources of the Florida Current. *Deep-Sea Res.*, **38**, Suppl. 1, 379 – 409.
- Schott, F. & R. L. Molinari (1996): The western boundary circulation of the subtropical warmwatersphere, in W. Krauss (ed.), *The Warmwatersphere of the North Atlantic Ocean*. Bornträger Berlin-Stuttgart, 229 – 252.
- Stommel, H. (1980): Asymmetry of interoceanic fresh-water and heat fluxes. *Geophysics*, **77**, 2.377 – 2.381.
- Stramma, L. & F. Schott (1996): Western equatorial circulation and inter-hemispheric exchange. in W. Krauss (ed.), *The warmwatersphere of the North Atlantic Ocean*. Bornträger Berlin-Stuttgart, 195 – 227.
- Sy, A., M. Rhein, J. R. N. Lazier, K. P. Koltermann, J. Meincke, A. Putzka & M. Bersch (1997): Surprisingly rapid spreading or newly formed intermediate waters across the North Atlantic Ocean. *Nature*, **386**, 675 – 679.
- Taylor, K. C., G. W. Lamorey, G. A. Doyle, R. B. Alley, P. M. Grootes, P. A. Mayewski, J. W. C. White & L. K. Barlow (1993): The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, **361**, 432 – 436.
- Waelbroeck, A. J., J. Jouzel, L. Labeyrie, C. Lorius, M. Labracherie, M. Stievenard & N. I. Barkov (1995): Comparing the Vostok ice deuterium record and series from Southern Ocean core MD 88 - 770 over the last two glacial-interglacial cycles. *Clim. Dyn.*, **12**, 113 – 123.
- Weaver, A. J. & T. M. C. Hughes (1994): Rapid interglacial climate fluctuations driven by North Atlantic ocean circulation. *Nature*, **367**, 447 – 450.
- Yiou, P., J. Jouzel, S. Johnsen & Ö. E. Rögnvaldson (1995): Rapid oscillations in Vostok and GRIP ice cores. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2.179 – 2.182.
- Zahn, R., J. Schönfeld, H.-R. Kudrass, M.-H. Park, H. Erlenkeuser & P. Grootes (1997): Thermohaline instability in the North Atlantic during meltwater events: stable isotope and ice-rafted detritus records from Core SO75-26KL, Portuguese Margin. *Paleoceanography*, **12**, 696 – 710.