

■ Der Golfstrom schwächelt

Neue Rekonstruktionen und Analysemethoden zeigen, dass der Golfstrom schwächer ist als je zuvor in den letzten 1500 Jahren.

Das Zirkulationssystem des Nordatlantischen Ozeans (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) umfasst unter anderem den warmen Golfstrom und dessen Verlängerung, den Nordatlantikstrom. Seit Langem steht es im Zentrum des Interesses von Klimaforschern und Ozeanographen, denn dieses Zirkulationssystem besteht nicht nur aus Oberflächenströmen, sondern ist Teil einer globalen Umwälzbewegung. Diese lässt sich mit einem Förderband vergleichen [1]: Das warme, relativ salzhaltige Wasser des Golfstroms kühlt in den Nordatlantischen Polargebieten so stark ab, dass es in die Tiefe sinkt und wieder nach Süden in den Rest der Weltmeere strömt. Die globale Umwälzbewegung ist von entscheidender Bedeutung für die Wärmeverteilung auf der Erde, insbesondere zwischen den beiden Halbkugeln, aber auch für den Kohlenstoffhaushalt des Ozeans und dessen Austausch mit der Atmosphäre.

Änderungen dieser Umwälzbewegung – mit dem „Zentrum“ im Nordatlantik, wo das Tiefenwasser gebildet wird – sind die Ursache für einige der dramatischen Klimaveränderungen der letzten 2,6 Millionen Jahre [2]. Sie werden seit Langem mit der (gleichzeitigen) Existenz mehrerer Gleichgewichtszustände in Verbindung gebracht [3, 4]. Eine abrupte

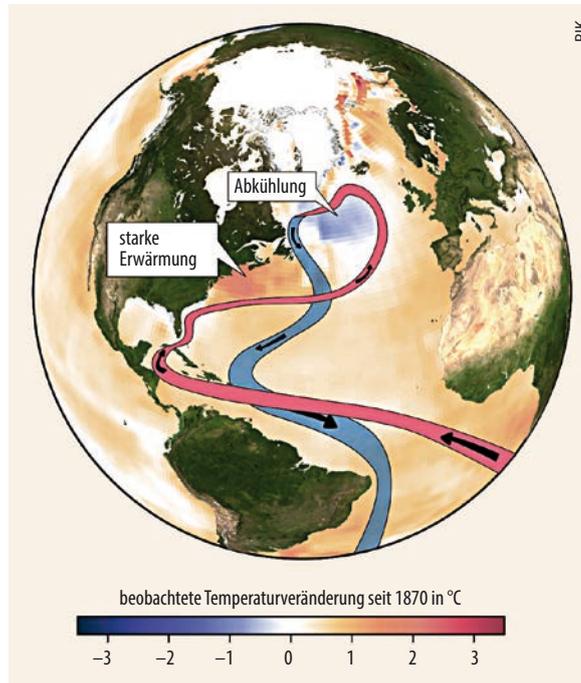


Abb. 1 Eine Abkühlung des Ozeans südlich von Grönland und eine ungewöhnliche Erwärmung vor der US-Küste sind der „Fingerabdruck“ für eine abgeschwächte Umwälzung der Wassermassen im Atlantik.

Änderung des nordwärts gerichteten Wärmetransports könnte auf ein umgekehrtes Strömungsmuster mit Tiefenwasserbildung im Südlichen Ozean hindeuten. Viele aktuelle Klimamodelle sagen eine Abschwächung der Umwälzbewegung bis 2100 voraus, aber nur wenige prognostizieren eine (irreversible) Änderung zu einem anderen Strömungsmuster. Diese Modelle könnten jedoch die Stabilität des aktuellen Klimazustands überschätzen, da sie viele abrupte Klimaänderungen der Vergangenheit nicht erklären können [5]. Direkte Messungen der Stärke der

Umwälzbewegung gibt es erst seit zehn Jahren durch Strömungstransportmessungen entlang der 26,5°N-Linie im Nordatlantik. Sie deuten auf eine Abnahme sowie starke Schwankungen hin [6].

Zwei kürzlich veröffentlichte Studien kommen nun zu sehr ähnlichen Schlussfolgerungen: Die globale Umwälzbewegung ist im letzten Jahrhundert um etwa 15 Prozent schwächer geworden [7, 8]. Die beiden Forschergruppen nutzten unterschiedliche Indikatoren. Beide Studien verwenden (direkte oder indirekte) Messdaten der Meerestemperatur und rekonstruieren die Stromgeschwindigkeit. Die Schlussfolgerungen basieren stark auf Modellsimulationen, die eine physikalische Verbindung zwischen der Umwälzbewegung und der Temperatur-, Salz- und Strömungsverteilung im Nordatlantischen Ozean annehmen. Das unterstreicht einmal mehr, wie unerlässlich die Kombination von Messdaten, numerischen Modellen (verschiedener Komplexität) und geologischen Daten in der Klimaforschung ist.

Das Team um Levke Caesar und Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

KURZGEFASST

■ Wasser als Plasma

Indem sie flüssiges Wasser mit den ultrakurzen und hochintensiven Strahlen des Freie-Elektronen-Lasers LCLS am Forschungszentrum SLAC anregte, erzeugte eine internationale Forschergruppe Wasser im Plasmazustand. Ziel der Messungen war es, Computersimulationen zu validieren, die helfen könnten, die Eigenschaften von Wasser besser zu verstehen, darunter auch die Anomalien von Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität.

K. R. Beyerlein et al., PNAS 115, 5652 (2018), DOI: 10.1073/pnas.1711220115

■ Pinguine als Glas

Die Brutpaare von Königspinguinen verhalten sich wie die Moleküle eines erstarrten Glases. Das beobachteten Physiker und Biologen der U Erlangen-Nürnberg. In den riesigen Brutkolonien halten sich zwei Kräfte die Waage: Das Verteidigen des Brutplatzes wirkt abstoßend. Gleichzeitig suchen die Tiere Nähe, um sich vor Feinden und Kälte zu schützen. Das führt zu der Glasstruktur, die bei lokalen Störungen schneller ausheilt als z. B. ein Gitter.

R. Gerum et al., J. Phys. D 51, 164004 (2018), DOI: 10.1088/1361-6463/aab46b

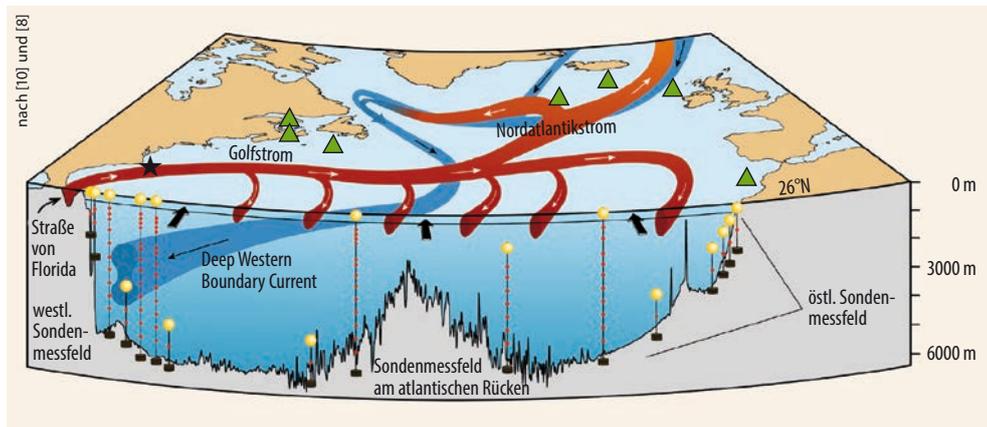


Abb. 2 Die Stärke der Atlantischen Umwälzbewegung lässt sich mit den Messsonden des RAPID/MOCHA-Projektes messen [10], die an den gelben Schwimmkörpern hängen. Außerdem sind die Positionen der Sedimentkerne eingezeichnet, die zur Rekonstruktion des tiefen westlichen Randstroms (Stern) und der Temperatur der oberen 200 Meter (grüne Dreiecke) dienen [8].

(PIK) nutzte einen „Fingerabdruck“ der Umwälzbewegung – ein räumliches Muster der Oberflächentemperatur des Nordatlantiks [7] (**Abb. 1**): Die Golfstromregion erwärmt sich, während die subpolaren Gebiete abkühlen. Dieses Temperaturmuster lässt sich mithilfe eines hochauflösenden Klimamodells direkt an eine Abschwächung der Umwälzbewegung und eine Verschiebung des Golfstroms nach Norden koppeln und findet sich in Beobachtungsdaten der Oberflächentemperatur seit 1870 wieder. Eine Kalibrierung durch ein Modellensemble von „historischen“ Simulationen für die Jahre 1870 bis 2016 (CMIP5 [9]) zeigt, wie sich die Stärke der Umwälzbewegung seit 1950 signifikant abschwächt.

Die zweite Studie von Thornalley et al. nutzt eine Kombination von Indikatoren an einzelnen Punkten im Ozean, um die Stärke der Umwälzbewegung der letzten 1600 Jahre zu rekonstruieren (**Abb. 2**) [8]. Die Körnchengröße in Tiefsee-Sedimenten gibt Auskunft über die Strömungsgeschwindigkeit am Meeresboden in der Region des Nordatlantischen tiefen westlichen Grenzstroms (Deep Western Boundary Current, DWBC), in dem ein großer Teil des Rückstroms der Umwälzbewegung stattfindet.

Modellsimulationen zeigen eine Korrelation zwischen der Stärke der Umwälzbewegung (AMOC @ 45°N), dem tiefen westlichen Grenzstrom sowie der Dichteanomalien in der Labradorsee, in der sich ein großer Teil des Tiefenwassers bildet. Außerdem verändert eine schwächere AMOC

den Wärmegehalt im subpolaren Nordatlantik. Diese letztere Verbindung liefert eine weitere Eingrenzung der AMOC-Stärke durch einen Temperatur-Fingerabdruck ähnlich dem der PIK-Studie: Sediment-Rekonstruktionen der oberen Meerestemperatur (50 bis 200 m Tiefe) in zwei Gebieten (Nordost- und Nordwestatlantik), jeweils etwa im Zentrum der positiven und negativen Anomalien des „Fingerabdrucks“ lassen sich entsprechend mit der AMOC-Stärke korrelieren.

Diese Kombination von Indikatoren zeigt, dass die Umwälzbewegung in den vergangenen 150 Jahren ungewöhnlich schwach im Vergleich zu den 1500 Jahren davor ausfällt. Die Abschwächung scheint bereits gegen Ende der „kleinen Eiszeit“ im Laufe des 19. Jahrhunderts einzusetzen, vermutlich ausgelöst durch das Schmelzen von Gletschern. Das Schmelzen des Grönländischen Eisschildes im 20. Jahrhundert könnte dann dafür gesorgt haben, dass sich die Umwälzbewegung nicht erholt, sondern weiter abschwächt.

Auch wenn die beiden Studien eine ähnlich starke Abnahme der Umwälzbewegung von etwa 15 Prozent finden, unterscheiden sie sich deutlich beim Zeitpunkt des Einsetzens. Dieser Zeitpunkt ist aber wichtig, da die Abschwächung oft mit dem Schmelzen von Eiskappen aufgrund der globalen Erwärmung in Verbindung gebracht wird. Allerdings reichen die Daten der PIK-Studie nur bis zum Anfang der industriellen Ära zurück, während die Studie von Thornalley et al. eine viel längere Perspektive zeigt.

Unklar bleibt weiterhin, ob die beobachtete Abnahme „nur“ eine graduelle Abschwächung ist oder aber durch einen Umkehrpunkt der Umwälzbewegung erklärbar ist. Dafür gilt es, mit den komplexen und hochauflösenden Klimamodellen auch Änderungen weit vor den der letzten 150 Jahre zu erklären. Nicht zuletzt bewegen sich die Konzentrationen von Treibhausgasen in Richtung von Werten, wie es sie seit über 10 Millionen Jahren nicht mehr gegeben hat. Um die Modelle zu „validieren“, müsste man also mehr über das damalige Klima wissen. Aus diesen Zeiten gibt es natürlich keine direkten Messungen, aber zunehmend mehr und genauere Rekonstruktionen einiger Variablen. Außerdem ist es wichtig, die Messreihen der Umwälzbewegung im Nordatlantik langfristig fortzuführen. Nur so werden sich die offenen Fragen klären lassen.

Anna von der Heydt

- [1] W. S. Broecker, *Oceanography* **4**, 79 (1991).
- [2] V. Masson-Delmotte et al. in: T. F. Stocker et al. (Hrsg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge (2013), Kap. 5, S. 383; www.ipcc.ch/report/ar5/wgl
- [3] T. M. Lenton et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 1786 (2008)
- [4] A. S. von der Heydt, *Physik Journal*, November 2011, S. 23
- [5] P. Valdes, *Nature Geoscience* **4**, 414 (2011)
- [6] M. A. Srokosz und H. L. Bryden, *Science* **348**, 1330 (2015)
- [7] L. Caesar et al., *Nature* **556**, 191 (2018)
- [8] D. J. R. Thornalley et al., *Nature* **556**, 227 (2018)
- [9] K. E. Taylor et al., *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **93**, 485 (2012), <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- [10] S. A. Cunningham et al., *Science* **317**, 935 (2007), www.rapid.ac.uk/rapidmoc

Dr. Anna von der Heydt, Institute for Marine and Atmospheric Research (IMAU), Utrecht University, Princetonplein 5, 3584CC Utrecht, Niederlande