



Die Stabilität der atlantischen Umwälzbewegung

Autoren

Jungclaus, Johann; Baehr, Johanna; Haak, Helmuth; Jacob, Daniela; Koenigk, Torben; Marotzke, Jochem

Abteilungen

Ozean im Erdsystem (Marotzke) (Prof. Dr. Jochem Marotzke)

Zusammenfassung

Die Entwicklung und Stabilität der atlantischen Umwälzbewegung unter globaler Erwärmung wird mit dem Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie untersucht, einschließlich der Mess- bzw. Nachweisbarkeit einer solchen anthropogenen Veränderung. Für realistische Projektionen der Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert ergibt sich eine 30-42%-ige Abschwächung, aber kein Zusammenbruch der Umwälzbewegung. Die starke natürliche Variabilität auf Zeitskalen von Tagen bis Jahrzehnten erfordert kontinuierliche Langzeitbeobachtungen im Atlantik, um eine eventuelle Abschwächung entdecken zu können.

Die atlantische meridionale Umwälzbewegung

Die atlantische (meridionale) Umwälzbewegung (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) besteht aus warmen, nordwärts gerichteten oberflächennahen Strömungen, einem Absinken von Wassermassen in hohen Breiten und tiefen Bodenströmungen am westlichen Rand. Die AMOC ist Teil eines globalen ozeanischen Umverteilungssystems für Wärme und Süßwasser. Temperatur- und salinitätsbedingte Dichteunterschiede halten diese Zirkulation aufrecht. Die Umwälzbewegung erreicht eine maximale Stärke von etwa 18-20 Sv (1 Sv = 1 Sverdrup = $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) auf einer Tiefe von ca. 1000 m bei 30-40° N, und der maximale Wärmetransport beträgt mehr als eine Milliarde Megawatt. Große Kernkraftwerke leisten, zum Vergleich, 500-1000 Megawatt. Das Strömungssystem gibt die mitgeführte Wärme zum

großen Teil an die Atmosphäre ab und trägt damit zu dem relativ milden Klima Nordwesteuropas bei. Die AMOC sollte nicht mit dem Golfstrom verwechselt werden, der ein Teil der windgetriebenen Zirkulation des Atlantiks ist und (im Gegensatz zur AMOC) mit dem Kuroshio ein Pendant im Pazifik besitzt. Frühere Modellstudien (z.B. Cubasch et al. [1]) zeigten unter den Bedingungen einer zunehmenden Klimaerwärmung eine beträchtliche Abschwächung der AMOC und damit eine Abnahme des nordwärtigen Wärmetransports.

Wie lässt sich eine anthropogene Abschwächung der AMOC messen?

Beobachtungshäufigkeit	Beobachtungsfehler		
	1 Sv	3 Sv	6 Sv
Kontinuierlich, Modellwerte	59, 40, 47	99, 92, 81	136, 124, 128
Kontinuierlich, simuliertes Beobachtungssystem	58, 66, 50	101, 97, 90	136, 130, 130
Hydrographischer Schnitt alle 5 Jahre	61, 61, 66	91, 86, 86	106, 101, 101
Hydrographischer Schnitt alle 20 Jahre	81, 81, 101	121, 101, 121	121, 121, 121

Abb.1: Nachweisbarkeitszeit (95%-Signifikanz) für kontinuierliche Beobachtungen der AMOC, kontinuierliche Beobachtungen mit dem simulierten Beobachtungssystem, wiederholten hydrographischen Messungen jedes fünfte Jahr und jedes 20. Jahr, in Abhängigkeit vom angenommenen Beobachtungsfehler. Die drei Zahlen in jedem Feld repräsentieren die drei Realisierungen der Simulationen.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Eine Analyse von fünf hydrographischen Schnitten durch den Atlantik bei etwa 26°N aus fünf Jahrzehnten legt nahe, dass eine deutliche Abnahme der AMOC bereits in vollem Gange sei (Bryden et al. [2]). Dabei blieb allerdings fraglich, inwieweit derartige hydrographische „Momentaufnahmen“ den tatsächlichen zeitlichen Verlauf widerspiegeln. Kontinuierliche Messungen, wie von Marotzke et al. [3] vorgeschlagen, gibt es bisher nur für einen kurzen Zeitraum. Um die relative Rolle von natürlichen Fluktuationen und die Nachweisbarkeit von anthropogenen Änderungen der AMOC zu untersuchen, haben Baehr et al. [4, 5] ein künstliches Messnetz im Klimamodell ECHAM5/MPI-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) „ausgelegt“. Sie benutzten dafür Modellrechnungen, die von Jungclaus et al. [6] für den vierten Sachstandsbericht (AR4) des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) durchgeführt und analysiert wurden. Die Stärke der AMOC bei 26°N wurde dabei aus den „gemessenen“ Dichteprofilen und dem Windschub aus dem Modell berechnet. Abhängig von den angenommenen Messfehlern variiert die Nachweiszeit einer anthropogenen Abschwächung der AMOC zwischen einigen Dekaden und einem Jahrhundert (**Tabelle 1**), wobei kontinuierliche Messungen zu schnellerer Entdeckung führen als die wiederholten Schnitte. Baehr et al. [5] zeigen, dass Variationen, wie die von Bryden et al. [2] publizierten, durchaus im Schwankungsbereich der natürlichen Variabilität liegen und nicht als ein Signal einer anthropogenen Abschwächung der AMOC aufgefasst werden sollten.

Wie wird sich die AMOC unter den Bedingungen des globalen Wandels entwickeln?

Weitere Aspekte der Stabilität der AMOC unter Bedingungen des Klimawandels (Jungclaus et al. [7]), ihre Präkonditionierung durch Änderungen des Wasserkreislaufs (Koenigk et al. [8]) und ihre Auswirkung auf das europäische Klima (Jacob et al. [9]) wurden mit dem globalen ECHAM5/MPI-OM-Klimamodell bzw. dem Regionalmodell REMO untersucht. Zunächst wurde das Modell für den Zeitraum 1860-2000 mit beobachteten Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen angetrieben. Im 20. Jahrhundert zeigt das Modell gute Übereinstimmung mit beobachteten Klimakenngrößen (Jungclaus et al. [6]). Im 21. Jahrhundert folgen die Konzentrationen den Szenarien B1, A1B und A2 des IPCC und werden im 22. Jahrhunderts auf dem Wert von 2100 gehalten. Alle Szenariexperimente bestehen aus einem Ensemble von je drei Realisierungen (getrennten Simulationen).

Globale Jahresmitteltemperaturen der Luft für das 20. Jahrhundert (nicht gezeigt) stimmen mit den Beobachtungen überein und zeigen eine zunehmende Erwärmung im letzten Viertel des Jahrhunderts. Dieser Trend setzt sich im 21. Jahrhundert fort. Erst nach 2050 weichen die unterschiedlichen Szenarien deutlich voneinander ab. Die globale Temperaturerhöhung am Ende des 21. Jahrhunderts (relativ zum Zeitraum 1961-1999) reicht von 2,5°C im B1- bis über 4°C im A2-Szenario. Im 20. Jahrhundert wird die AMOC im zeitlichen Mittel durch eine Maximalstärke von 22,5 Sv bei 40°N charakterisiert. In den Szenariexperimenten nimmt die AMOC-Stärke im 21. Jahrhundert ab, es gibt aber bis ca. 2075 keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien (**Abb. 1**, Jungclaus et al. [7]).

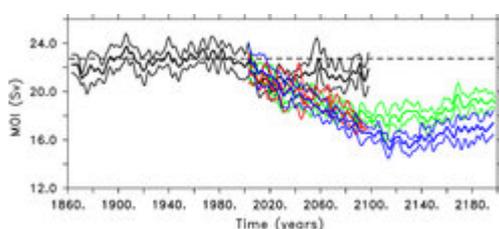


Abb.2: Die Stärke der meridionalen Umwälzbewegung (MOI=Meridional Overturning Index) in den IPCC-Simulationen des MPI-M für das 20. Jahrhundert bzw. für Treibhausgaskonzentrationen auf dem Wert von 2000 festgehalten (schwarz), B1 (grün), A1B (blau) und A2 (rot). Jedes Szenario besteht aus drei Ensemblemitgliedern. Das Ensemblemittel ist durch die dicke Linie, die Ensemblestreuung durch die Einhüllenden dünnen Linien gekennzeichnet. Die gestrichelte Linie ist das Mittel über das 20. Jahrhundert.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Die Experimente B1 bzw. A1B zeigen minimale AMOC-Stärke von 17,5 Sv (22% Abschwächung) bzw. 15,5 Sv (30% Abschwächung) um das Jahr 2125. Während des restlichen 22.

Jahrhunderts zeigt die AMOC sowohl für A1B wie für B1 positive Trends und gewinnt nahezu die Hälfte der AMOC-Abnahme bis zum Ende des Experiments wieder zurück. Zum Ende des 21. Jahrhunderts beeinflusst die Reduzierung des meridionalen ozeanischen Wärmetransports das Klima des Nordatlantiks und Nordwesteuropas erheblich. Verglichen mit dem 20.

Jahrhundert ist der Effekt der abgeschwächten AMOC im 22. Jahrhundert klar zu bestimmen

durch die „Nicht-Erwärmung“ des Nordatlantiks zwischen 45-65°N (**Abb. 2**), während das Mittel über den Breitenkreisgürtel eine Erwärmung von 5°C ergibt.

Die Abnahme der Umwälzbewegung kommt durch Erwärmung und Süßwasserzufuhr in den Absinkregionen zustande, wodurch die Oberflächendichte abnimmt und das Absinken erschwert wird. Die Effekte des intensivierten Wasserkreislaufs auf das arktische Süßwassersystem und die Exporte in den Nordatlantik wurden im Detail von Koenigk et al. [8] untersucht. In wärmerem Klima gibt es einen substantiell größeren Süßwasserexport durch die kanadische Inselgruppe, und Süßwasser beeinflusst die Tiefenwasserbildung in der Labrador See. Für die Framstraße fanden Koenigk et al. heraus, dass der totale Süßwasserexport sich kaum ändert, aber der Eisanteil zu Gunsten des Flüssiganteils abnimmt.

Welche Rolle spielt das Abschmelzen des grönländischen Festlandseises für die AMOC- Stabilität?

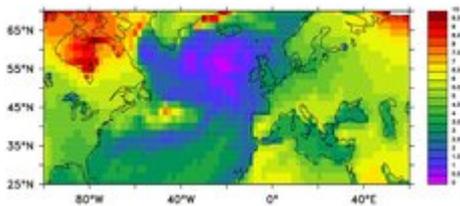


Abb.3: Temperaturdifferenz der bodennahen Luftschichten zwischen dem A1B-Szenario zurzeit abgeschwächter AMOC (Ensemblemittel über die Jahre 2130-2150) und dem Mittel des 20. Jahrhunderts.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Die Abschwächung der AMOC könnte sich durch einen Schmelzwassereintrag vom Grönländischen Inlandeis substantiell beschleunigen oder sogar einen kritischen Schwellwert überschreiten, von dem aus eine Erholung nicht mehr möglich ist. Die regulären, oben beschriebenen IPCC-Experimente berücksichtigen das Abschmelzen der Festlandseismassen nicht. Daher wurden die Schmelzraten a posteriori aus dem IPCC-A1B-Szenario berechnet und das Experiment dann mit der Vorgabe einer entsprechenden Süßwasserquelle um Grönland herum wiederholt (Jungclaus et al. [7]). Für konservative (0,03 Sv) und hohe (0,09 Sv) Schmelzannahmen reduziert sich die AMOC um 35% bzw. 42%, verglichen mit einer Abschwächung um 30% für das Original A1B-Szenario (**Abb. 3**).

Sogar bei hohen Schmelzwasserraten erholt sich die AMOC im 22. Jahrhundert. Die Auswirkungen des zusätzlichen Süßwassers beschränken sich auf eine weitere Verringerung der Oberflächendichte in der Irminger und Labrador See, wo die Tiefenwasserbildung ohnehin schon eingeschränkt ist. Dagegen wird der Kern der Umwälzbewegung durch Tiefenwasserbildung im Nordmeer und den Fluss von Tiefenwasser über den Grönland-Schottland-Rücken aufrechterhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass ein abrupter Klimawandel durch das Abschmelzen des Grönländischen Inlandeises und ein dadurch hervorgerufener

Zusammenbruch der AMOC kein realistisches Szenario für das 21. Jahrhundert ist.

Welche Konsequenzen hätte eine Abschwächung der AMOC für das europäische Klima?

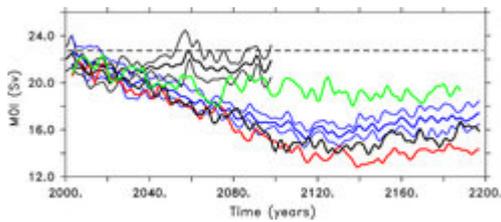


Abb.4: Die Stärke der meridionalen Umwälzbewegung (MOI=Meridional Overturning Index) in den Schmelzwasserexperimenten A1B+0,03 Sv (schwarz) und A1B+0,09 Sv (rot) im Vergleich mit den Standard-IPCC-Experimenten für das 20. Jahrhundert bzw. für auf dem Stand von 2000 festgeschriebenen Treibhausgaskonzentrationen (schwarz, wie in Abb. 1) und A1B (blau, wie in Abb. 1). Die grüne Kurve beschreibt die MOI für den Fall auf dem Stand von 2000 festgeschriebener Treibhausgaskonzentrationen mit zusätzlichem Schmelzwassereintrag von 0,09 Sv.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Wie oben gezeigt (Abb. 2) hat die Abschwächung der AMOC dennoch Konsequenzen für das Klima in Europa. Jacob et al. [9] untersuchen solche Änderungen im Detail, indem sie Daten aus dem globalen gekoppelten Modell für eine idealisierte Abschwächung der AMOC benutzen, um Rechnungen mit dem regionalen Atmosphärenmodell REMO (Jacob und Podzun [10]) durchzuführen. Dieses „dynamische Downscaling“ erlaubt es, regionale Änderungen des Niederschlags, der Schneebedeckung und der Albedo besser abschätzen zu können. Die Studie zeigt, dass eine Abschwächung der thermohalinen Zirkulation einen verstärkten Einfluss maritimen Klimas und eine höhere Schneebedeckung in Europa zur Folge hat. Aus bestimmten Klimakenngrößen lassen sich zudem Auswirkungen auf einen vermehrten Heizenergieverbrauch ableiten.

Originalveröffentlichungen

1. **Cubasch, U., et al.:**

Intergovernmental Panel of Climate Change Third Assessment Report, chapter 8.
Cambridge University Press, New York, 2001.

2. **Bryden, H. L.; Longworth, H. R.; Cunningham, S. A.:**

Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N.
Nature **438**, 655–657 (2005).

3. **Marotzke, J.; Giering, R.; Zhang, K. Q.; Stammer, D.; Hill, C.; Lee, T.:**
Construction of the adjoint MIT ocean general circulation model and application to Atlantic heat transport sensitivity.
Journal of Geophysical Research **104**, 29529-29547 (1999).
4. **Baehr, J.; Keller, K.; Marotzke, J.:**
Detecting potential changes in the meridional overturning circulation at 26°N in the Atlantic.
Climatic Change, doi: 10.1007/s10584-006-9153-z (2007).
5. **Baehr, J.; Haak, H.; Alderson, S.; Cunningham, S. A.; Jungclaus, J. H.; Marotzke, J.:**
Timely detection of changes in the meridional overturning circulation at 26°N in the Atlantic.
Journal of Climate, accepted (2007).
6. **Jungclaus, J. H.; Botzet, M.; Haak, H.; Keenlyside, N.; Luo, J.-J.; Latif, M.; Marotzke, J.; Mikolajewicz, U.; Roeckner, E.:**
Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM.
Journal of Climate **19**, 3952-3972 (2006).
7. **Jungclaus, J. H.; Haak, H.; Esch, M.; Roeckner, E.; Marotzke, J.:**
Will Greenland melting halt the thermohaline circulation?
Geophysical Research Letters **33**, L17708, doi: 10.1029/2006GL026815 (2006).
8. **Koenigk, T.; Mikolajewicz, U.; Haak, H.; Jungclaus, J. H.:**
Arctic fresh water export and its impact on the climate of the 21st and 22nd century.
Journal of Geophysical Research, accepted (2007).
9. **Jacob, D.; Goettel, H.; Jungclaus, J. H.; Muskulus, M.; Podzun, R.; Marotzke, J.:**
Slowdown of the Thermohaline Circulation causes enhanced maritime influence and snow cover over Europe.
Geophysical Research Letters **32**, L21711, doi: 10.1029/2005/GL023286 (2005).

10. **Jacob, D.; Podzun, R.:**

Sensitivity studies with the Regional Climate Model REMO.

Meteorology and Atmospheric Physics **63**, 119-129 (1997).