

Zukunft der  
**Golfstromzirkulation**



Fakten und Hintergründe aus der Forschung

Diese Broschüre gibt einen verständlichen Überblick über den wissenschaftlichen Kenntnisstand zur Golfstromzirkulation. Forscherinnen und Forscher ordnen verwirrende und oft widersprüchliche Informationen ein, die in der Öffentlichkeit diskutiert werden. Die Broschüre bietet Orientierung über plausible Zukunftsszenarien und relevante Forschungsfragen.

Das Klima Nordeuropas ist im Vergleich zu dem im Nordosten Kanadas recht mild, obwohl beide Regionen ungefähr auf der gleichen geografischen Breite liegen. Einer der Gründe dafür ist die Golfstromzirkulation. Bei weiter steigenden Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahrzehnten könnte sich die Golfstromzirkulation aber beträchtlich abschwächen. Dies würde auf jeden Fall gravierende Folgen nach sich ziehen: für das Klima, die Meeresspiegel, den Kohlenstoffkreislauf und die marinen Ökosysteme. Die Auswirkungen würden sich nicht auf den nordatlantischen Raum beschränken, sondern auch in vielen Regionen der Erde spürbar sein.

Zwar zeigen Strömungsmessungen in unterschiedlichen Regionen des Atlantiks wie auch Simulationen mit realitätsnahen Ozeanmodellen für die vergangenen zwei Jahrzehnte eine relativ stabile Golfstromzirkulation. Warum dies kein Grund zur Entwarnung ist, zeigen wir in dieser Broschüre. Wir nutzen dabei die aktuellsten Messungen, erläutern die wissenschaftlichen Methoden und legen dar, warum es so schwierig ist, die wenigen vorhandenen Daten zu interpretieren und die Funktionsweise der Golfstromzirkulation zu verstehen.

# Inhalt

Vorwort	4
<b>1. Bedeutung der Golfstromzirkulation</b>	<b>5</b>
<b>2. Das Atlantische Strömungssystem</b>	<b>6</b>
<b>3. Rolle im Erdsystem</b>	<b>9</b>
Exkurs: Wie bekomme ich aus Proxydaten Informationen über die Golfstromzirkulation?	10
<b>4. Veränderungen seit Beginn des 20. Jahrhunderts</b>	<b>12</b>
<b>5. Aktuelle Entwicklungen</b>	<b>15</b>
<b>6. Zukunftsszenarien</b>	<b>17</b>
<b>7. Fazit</b>	<b>19</b>
Glossar	21
Literatur	21
Abbildungs-/Fotoverzeichnis	22
Weiterführende Literatur	23
Autorinnen und Autoren	24
Beteiligte Institutionen	24
Über uns	25
Impressum	27

## Vorwort



Pflanzliches und mikrobielles Leben an Land und in den Meeren versorgt unseren Planeten mit Sauerstoff. Leben auf der Erde und menschliche Gesellschaften sind jedoch nicht nur auf Sauerstoff, sondern auch auf einen bestimmten Temperaturbereich angewiesen. Die „richtigen“ Temperaturen haben die Evolution des Lebens, von Tieren und Pflanzen und auch des Menschen erst ermöglicht. Temperaturextreme wiederum haben zu den Krisen der Evolutionsgeschichte beigetragen und ihre Richtung mitgeprägt. Temperaturextreme gefährden auch menschliches Leben, man denke an die vielen Hitzetoten in Westeuropa im Jahr 2003.

Die Golfstromzirkulation könnten wir als Klimaanlage Europas bezeichnen, die die Temperatur in einem angenehmen Bereich hält und Temperaturspitzen nach unten und oben abmildert.

Das „Phänomen Golfstrom“ wird in unzähligen Fachartikeln, aber auch in Feuilletons, Science-Fiction und Filmen aufgegriffen. Allein über 13.000 englischsprachige Veröffentlichungen tragen den Namen des Stroms in ihrem Titel. Er verbindet verschiedene wissenschaftliche Disziplinen wie Ozeanographie, Biologie oder Klimamodellierung und beschäftigt Entscheidungsträger in Politik und Gesellschaft.

Die Golfstromzirkulation erscheint uns heute immer noch wie eine Konstante in Raum und Zeit. Sie ist aber doch wie das gesamte Erdsystem empfindlich gegen scheinbar kleine Veränderungen der Umweltbedingungen. Angesichts des Klimawandels müssen wir uns Sorgen um die Stabilität des Golfstroms machen und damit um eine wichtige Grundlage für die Gesundheit von Ökosystemen und Menschen sowie für Wohlstand und Frieden in Europa. Wird der Golfstrom uns in gleicher Weise wie bisher erhalten bleiben? Dies ist Teil der Fragen und Herausforderungen, die der Klimawandel für das Leben auf der Erde und das Wohlergehen des Menschen mit sich bringt.

Generell rückt die Bedeutung der Meere für das Klima und die Zukunft der Menschen immer mehr in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit. Als Ko-Vorsitzender der Arbeitsgruppe zu Klimafolgen im Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) betreue ich in der aktuellen Berichtsperiode zwei Sonderberichte, in denen es zentral um die Veränderungen der Ozeane und die Klimafolgen für Mensch und Umwelt geht. Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung widmet sein Wissenschaftsjahr 2016\*17 dem Thema „Meere und Ozeane“.

Der größte Lebensraum des Planeten hält noch viele Forschungsfragen für uns bereit, die wir erst nach und nach, durch den Einsatz immer besserer Technik, enträtseln können. Dabei wird immer deutlicher, wie sehr unser Leben von einem intakten Ozean abhängt.

Hans-Otto Pörtner, Ko-Vorsitzender der Arbeitsgruppe II „Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit“, IPCC

# 1. Bedeutung der Golfstromzirkulation

Seit vielen Jahren steht die Golfstromzirkulation im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Das liegt an ihrer zentralen Bedeutung für das europäische Klima und daran, dass die meisten Klimamodelle eine deutliche Abschwächung dieses Stromsystems im 21. Jahrhundert vorhersagen, sollten der Ausstoß von Treibhausgasen durch den Menschen und der sich daraus ergebende Klimawandel ungebremst fortschreiten.

Die Golfstromzirkulation transportiert warmes und relativ salziges Wasser aus den Subtropen bis in die Arktis und trägt so zu dem moderaten Klima Nordeuropas bei. Deutschland wird von der Golfstromzirkulation beeinflusst, wie auch Norwegen mit seinen ganzjährig eisfreien Häfen oder die Westküste Spitzbergens, die trotz ihrer nördlichen Lage mehrere Monate lang kein Meereis aufweist.

Was meinen wir mit Golfstromzirkulation? Was wissen wir darüber? Wie hat sie sich in der Vergangenheit geändert und warum? Wie ist der gegenwärtige Zustand der Zirkulation? Und wie wird sie sich in der Zukunft entwickeln? Diesen Fragen wollen wir in dieser Broschüre nachgehen. Wir zeigen auch, warum die bisherigen Informationen über das Ozeansystem nur lückenhaft sind und es so schwierig ist, eine Aussage über die Zukunft der Golfstromzirkulation und damit die Zukunft unseres europäischen Klimas zu treffen.

„Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem ist klar.“ So lautet die Kernbotschaft aus dem fünften Bericht des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz IPCC) aus dem Jahr 2014. Diese Aussage beruht unter anderem auf den systematischen Temperaturmessungen, die seit 1850 aus vielen Regionen der Erde verfügbar sind. So zeigt die globale Durchschnittstemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts einen klaren Erwärmungstrend. Auch ist hinreichend belegt, dass die Menschen die Hauptverursacher des Temperaturanstiegs sind, weil sie große Mengen von Treibhausgasen in die Atmosphäre ausstoßen, allen voran Kohlendioxid.

In Teilen der Ozeane und insbesondere für die Golfstromzirkulation sind die Verhältnisse längst nicht so eindeutig. Eine unzureichende Datenlage, die hohe Komplexität der Ozeandynamik und daraus resultierende Defizite in den Klimamodellen erlauben es derzeit nicht, belastbare Aussagen über den bisherigen Grad der menschlichen Beeinflussung zu treffen und die zukünftige Entwicklung der Golfstromzirkulation mit großer Genauigkeit vorherzusagen. Die vergangenen Jahrzehnte haben keinen offensichtlichen Trend gezeigt, wohl aber eine überraschend große natürliche Schwankungsbreite.

## 2. Das Atlantische Strömungssystem

Als Golfstrom bezeichnet die Wissenschaft nur das Stück längs der amerikanischen Ostküste. Das gesamte Stromsystem in den oberen Meeresschichten von der Floridastraße über den Nordatlantik bis in die Arktis wird als Golfstromzirkulation bezeichnet.

Die Ozeane werden von vielfältigen Strömungen durchzogen und beeinflussen so den physikalischen, chemischen und biologischen Zustand der Meere. Ein besonders wichtiges Stromsystem bildet die Golfstromzirkulation. Den Atlantik durchzieht ein ganzes Netz von Meeresströmungen, die man grob in einen warmen oberen (rot) und einen kalten unteren Ast (blau) einteilen kann, wie Abbildung 1 zeigt. Als Golfstrom bezeichnet die Wissenschaft nur das Stück längs der amerikanischen Ostküste. Der Name hat sich aber umgangssprachlich für das gesamte Stromsystem in den oberen Meeresschichten von der Floridastraße über den Nordatlantik bis in die Arktis eingebürgert. Dieses Strömungsband bildet den warmen Ast der Atlantikzirkulation, das wir hier als Golfstromzirkulation bezeichnen.



Abbildung 1: Stark vereinfachte Darstellung der Strömungen im Atlantik. Warme oberflächennahe Strömungen sind rot, kalte Tiefenströmungen blau gekennzeichnet.

Die Golfstromzirkulation ist eines der stärksten Strömungssysteme des Weltozeans: Vor Florida strömt das Wasser mit etwa 32 Millionen Kubikmeter pro Sekunde ( $1 \text{ Mio. m}^3/\text{s} = 1 \text{ Sverdrup, Sv}$ ) gen Norden und führt damit ungefähr 30-mal so viel Wasser, wie alle Flüsse der Erde zusammen. Auf seinem Weg Richtung Arktis wächst die Strömung sogar noch weiter an und erreicht etwa 150 Sv. Ein beträchtlicher Teil fließt allerdings im Subtropenwirbel wieder zurück nach Süden. Übrig bleiben etwa 30 Sv, die ihren Weg weiter nach Norden fortsetzen. Die Strömung gabelt sich erneut und knapp ein Drittel fließt weiter in das Europäische Nordmeer und in den Arktischen Ozean.

Was sind die Antriebe für dieses gigantische Strömungssystem? Die Golfstromzirkulation wird zum einen von den Winden und zum anderen von den Unterschieden in Temperatur und Salzgehalt angetrieben, dem sogenannten thermohalinen Antrieb: je kälter und je salzreicher das Wasser, desto

dichter und damit schwerer ist es. Das aus den Tropen nach Norden strömende warme und salzreiche Wasser kühlt sich immer weiter ab und wird dabei dichter. An wenigen Stellen wird das Wasser an der Oberfläche dichter als das Wasser in der Tiefe. Es sinkt ab und fließt als kalte Tiefenströmung zurück nach Süden (Abbildung 1). Genügend hohe Dichten für ein Absinken und damit eine vertikale Umwälzbewegung (Abbildung 2) können nicht allein durch Abkühlung erreicht werden, das Wasser muss auch salzig genug sein, und dieses Salz bringt die Golfstromzirkulation selbst mit. Der hohe Salzgehalt ist einer der Gründe warum das Absinken auf der Nordhalbkugel nur im Nordatlantik geschieht.

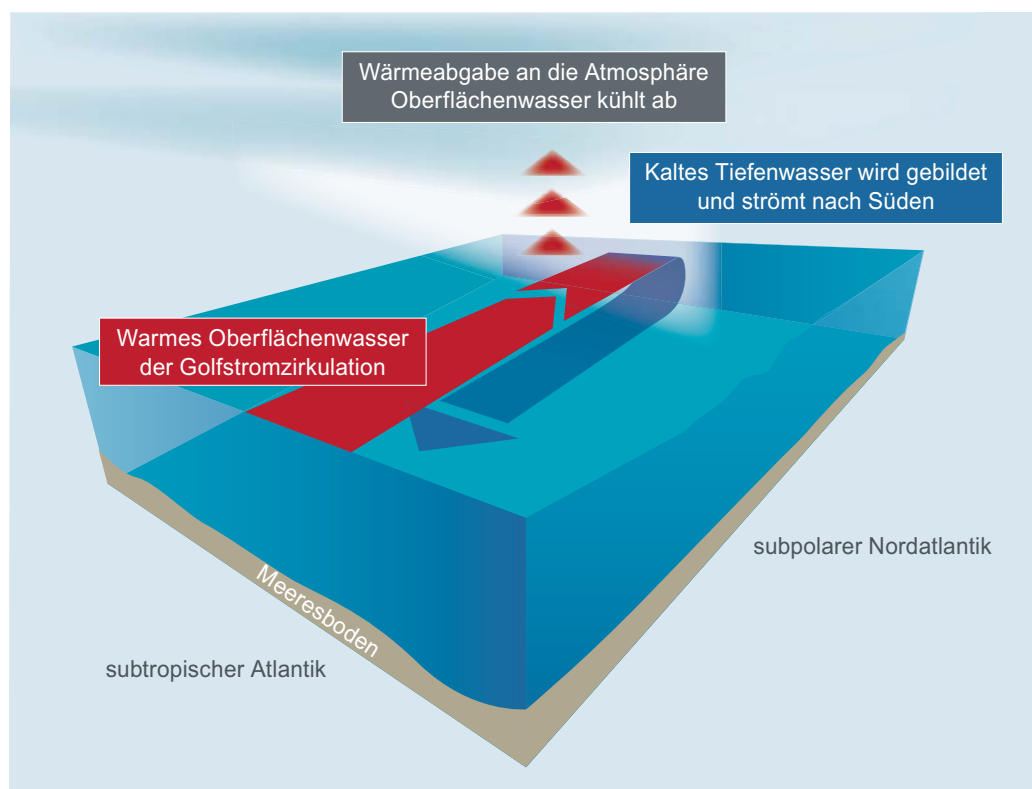


Abbildung 2: Schematische Darstellung der durch Temperaturänderungen und durch Salzgehaltsänderungen (daher „thermohalin“) angetriebenen Zirkulation, die als Umwälzirkulation bezeichnet wird.

Der tiefe „blaue“ Zweig der Umwälzbewegung (Abbildung 1) wird aus zwei Quellen gespeist: der Labradorsee und dem Europäischen Nordmeer. In der Labradorsee zwischen Grönland und Kanada kann es durch eine starke winterliche Abkühlung zum Absinken von Wassermassen bis in 2000 Meter Tiefe kommen. Wasser aus dem Europäischen Nordmeer füllt die Schichten darunter. Es überquert die untermeerischen Schwellen zwischen Grönland und Schottland und stürzt dann in gigantischen Wasserfällen bis zum Meeresgrund hinab. Insgesamt strömt das große Volumen von etwa 30 Sv kaltem Tiefenwasser entlang der amerikanischen Küste nach Süden. Ein Teil des Tiefenwassers kehrt um, sodass circa 18 Sv übrig bleiben, die in die Tropen und weiter in den Südatlantik strömen.

Wenn von der menschlichen Beeinflussung der Golfstromzirkulation die Rede ist, ist im Allgemeinen die Umwälzzirkulation gemeint.

Die Umwälzzirkulation ist von elementarer Bedeutung für das Klima, da sie an der Oberfläche im gesamten Bereich des Atlantiks Wärme von Süden nach Norden befördert. Der maximale Wärmetransport erfolgt in den Subtropen und beträgt circa 1.200.000 Gigawatt. Beim Übergang zwischen dem subtropischen und dem subpolaren Wirbel sinkt die Energieleistung um die Hälfte. Zum Vergleich: Die elektrische Leistung eines Atomkraftwerks beträgt typischerweise ein Gigawatt. Wenn von der menschlichen Beeinflussung der Golfstromzirkulation die Rede ist, ist im Allgemeinen diese Umwälzzirkulation gemeint.

Die schweren Wassermassen der Tiefsee müssen sich an anderer geografischer Stelle mit leichteren, darüber liegenden Wassermassen vermischen, um die Umwälzzirkulation zu schließen. Dazu bedarf es eines weiteren Antriebs: Gezeiten und Winde liefern die benötigte Energie. Diese vertikale Vermischung sorgt dafür, dass eine Umwälzung des Ozeans auf Dauer weitergehen kann und nicht irgendwann erlahmt. Veränderungen der Umwälzzirkulation in Zeiträumen von Jahrzehnten bis zu wenigen Jahrhunderten – das sind die Zeiträume, die uns beim anthropogenen Klimawandel vor allem interessieren – sind jedoch hauptsächlich Veränderungen bei der Tiefenwasserbildung in den hohen nördlichen Breiten geschuldet.





### 3. Rolle im Erdsystem

Das Klima befindet sich seit circa 11.000 Jahren in einer Warmzeit, dem Holozän. In dieser Zeit war die Umwälzzirkulation recht stabil. Aber war das schon immer so? Rekonstruktionen von Klimaänderungen (siehe Exkurs S. 10) legen eine starke Veränderlichkeit und sogar kurzzeitige Beinahe-Zusammenbrüche der Umwälzzirkulation nahe. Abbildung 3 zeigt den Temperaturverlauf auf Grönland und im subtropischen Atlantik während der vergangenen 60.000 Jahre. Zu erkennen ist eine Abfolge von spontanen Abkühlungen – sogenannte Heinrich-Ereignisse – sowie abrupten Erwärmungsgeschehen – sogenannte Dansgaard-Oeschger-Ereignisse. Die letzte massive Abschwächung des Stromsystems und die damit einhergehende relativ rasche Abkühlung geschah vor etwas weniger als 13.000 Jahren und ist als das Jüngere Dryas-Ereignis (YD) bekannt.

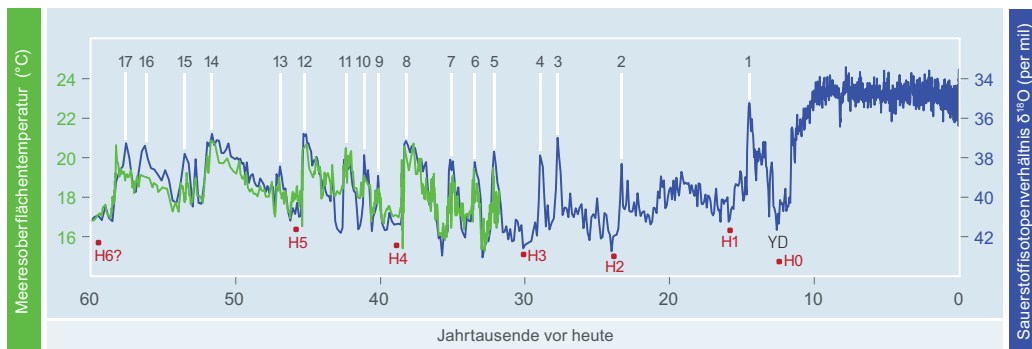


Abbildung 3: Das Sauerstoffisotopenverhältnis ( $\delta^{18}\text{O}$ ) im Grönlandeis (blaue Kurve) als Maß für die lokale Temperatur und die Rekonstruktion der Temperatur der Meeresoberfläche im subtropischen Atlantik aus Meeressedimenten (grüne Kurve) während der vergangenen 60.000 Jahre. Rote Punkte zeigen den Zeitpunkt von Kältephasen infolge massiver Eisrutschungen, den sogenannten Heinrich-Ereignissen (H). Man erkennt außerdem eine Reihe von abrupten Erwärmungseignissen, die als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (DO) bekannt und mit Nummern gekennzeichnet sind. Diese werden auf abrupte Änderungen der Atlantikströmungen zurückgeführt. Die hohe Übereinstimmung der blauen und grünen Kurven, die auf unterschiedlichen Methoden und unabhängigen Datensätzen beruhen, belegt, dass die Erkenntnisse robust sind und die gezeigten Klimaänderungen weiträumig waren.

Das Jüngere Dryas-Ereignis passierte zu einer Zeit, als die Erde nach der letzten Eiszeit langsam in die gegenwärtige Warmzeit, das Holozän, steuerte. Der plötzliche Rückgang der Umwälzzirkulation verursachte eine spontane Abkühlung der Nordhalbkugel, im Mittel um mehrere Grad. Erst danach setzte sich das Holozän, das sich durch eine bemerkenswerte Stabilität des Klimas auszeichnet, endgültig durch (Abbildung 3). Diese Stabilität ist wahrscheinlich ein wichtiger Faktor gewesen, der die Entwicklung der menschlichen Zivilisation begünstigt hat. Der vom Menschen verursachte Klimawandel könnte dieser Stabilität ein Ende setzen.

## Exkurs: Wie bekomme ich aus Proxydaten Informationen über die Golfstromzirkulation?

Ein Ziel der Paläozeanographie ist die Rekonstruktion von Meeresströmungen der Vergangenheit. Aus Proxydaten können Raten und Größenordnungen der natürlichen Variabilität bestimmt werden. Das wichtigste „Archiv“ ist der Meeresboden. Mit zunehmender Tiefe im Sediment enthalten die älteren Sedimentschichten vielfältige Informationen über vergangene Ozeanzustände, die mit hochmodernen Techniken wie Massenspektroskopie analysiert werden. „Proxies“ sind direkt am Sediment oder an einzelnen Sedimentkomponenten gemessene geochemische, isotopische oder mikropaläontologische Größen. Sie erlauben mittels empirischer Beziehungen beispielsweise die Ermittlung der Ozeantemperatur, des Salzgehalts, des Nährstoffverbrauchs oder der Ventilationsraten in vergangenen Erdzeitaltern.

Die zeitliche und räumliche Veränderlichkeit des oberen (warmen) Zweigs des Golfstromsystems kann man über die Häufigkeit von Skelettteilen planktonischer Mikroorganismen, mit geochemischen Temperaturproxies und deren Kombination mit Sauerstoffisotopen ermitteln. Kohlenstoffisotopenverhältnisse von Mikrofossilgehäusen reflektieren die in den hohen nördlichen Breiten durch absinkende sauerstoffreiche Oberflächenwassermassen verursachten Ventilationsänderungen des tiefen Atlantiks. Der tiefe Rückstrom kalten Wassers lässt sich aufgrund seiner erodierenden Wirkung auf die Sedimente im Bereich des Grönland-Färöer-Rückens ebenfalls bestimmen.

Mehrere über Jahrtausende andauernde Abschwächungen der Umwälzzirkulation während extremer Kältephasen sind dokumentiert, unter anderem aus der gemeinsamen Analyse des Neodym-Isotopensignals ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ), ein Indikator für die Herkunft der Wassermassen, und des partikulären Protactinium/Thorium-Isotopensignals ( $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ ) aus Tiefseesedimenten (Abbildung 4). Zeitgleich dazu kam es zu einer signifikanten Verminderung des nach Norden gerichteten Wärmetransportes mit einem über Temperaturproxies nachgewiesenen „Wärme-stau“ im Südatlantik.

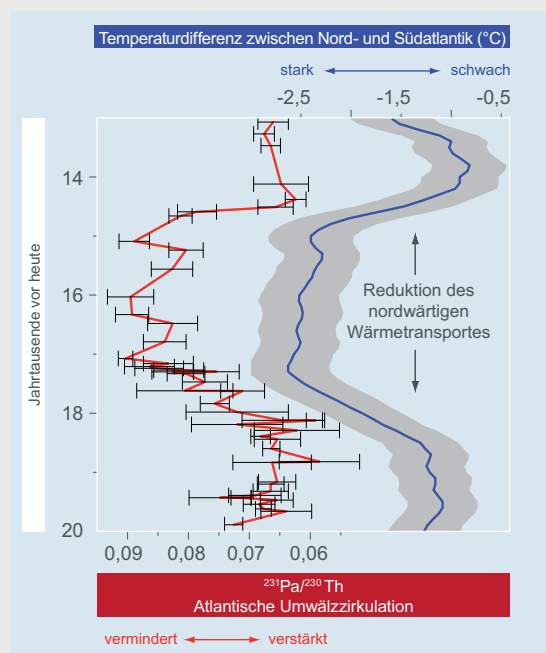


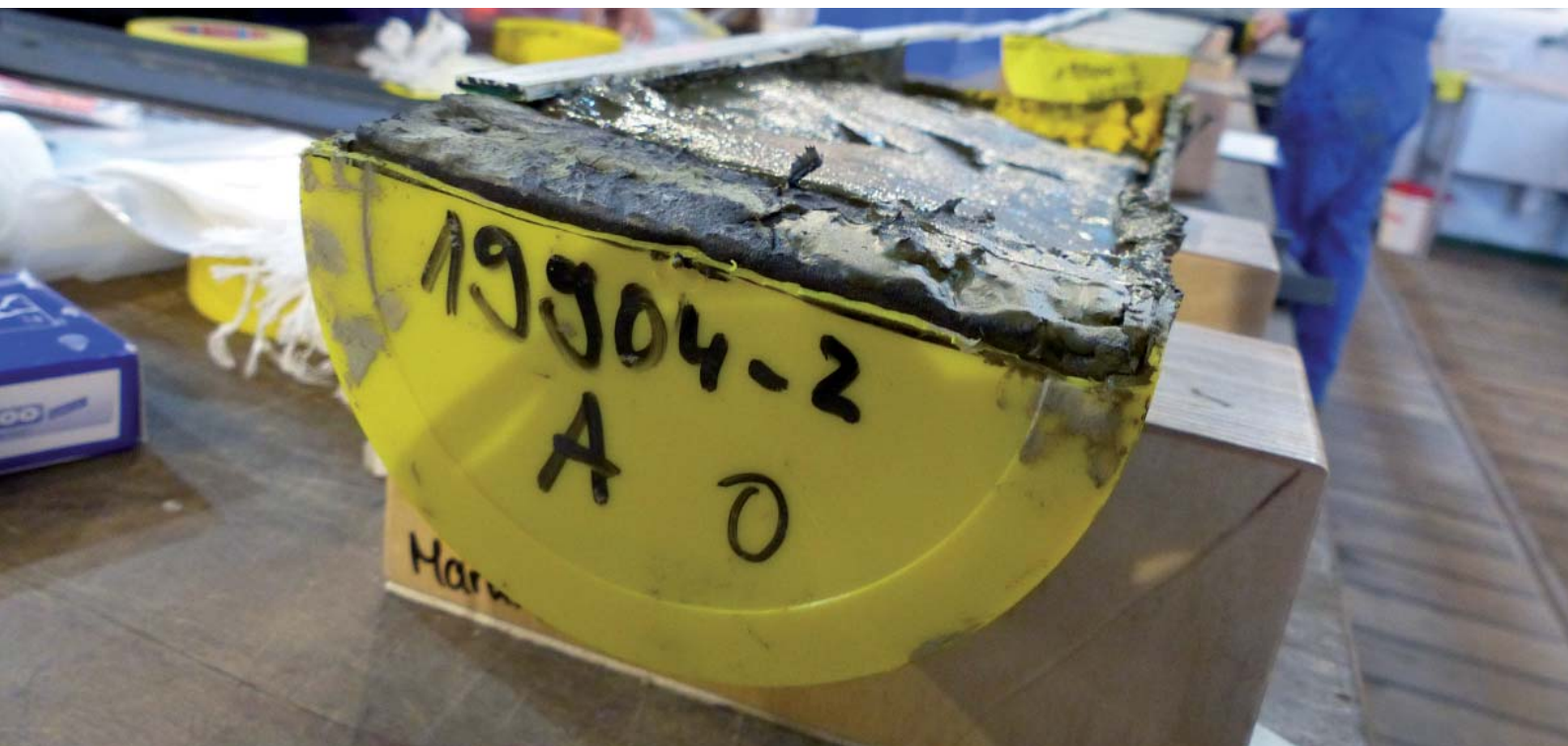
Abbildung 4: Der Beinahe-Zusammenbruch der Umwälzzirkulation am Ende der letzten Eiszeit vor etwa 20.000 Jahren und das nachfolgende Wiedereinsetzen können mit Proxydaten belegt werden. Die synchrone Erwärmung des Südatlantiks belegt den Zusammenhang zwischen atlantischer Umwälzzirkulation und dem nach Norden gerichteten Wärmetransport.

In diesem Zusammenhang darf man den Auslöser der Verlangsamung der Umwälzzirkulation, nämlich die Erderwärmung selbst, nicht außer Acht lassen. Durch die Abkühlung infolge der schwächeren Umwälzzirkulation würde der globale Trend der Erderwärmung in vielen Gegenden der Nordhalbkugel leicht abgeschwächt werden. Eiszeitszenarien sind also völlig fehl am Platz.

Eine schwächere Umwälzzirkulation könnte aber noch eine ganze Reihe anderer Folgen haben, an die man nicht intuitiv denken würde:

- Möglich sind Veränderungen der atlantischen Hurrikan-Aktivität, des Regens in der Sahelzone oder des Indischen Sommermonsuns.
- Auch würde weniger  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre in die unteren Meeresschichten transportiert werden, mit der Folge, dass mehr  $\text{CO}_2$  in der Luft verbleiben und die Erderwärmung weiter fördern würde.
- Darüber hinaus ließe eine schwächere Umwälzzirkulation den Meeresspiegel im Nordatlantik steigen, im Südatlantik dagegen fallen.
- Diese regionalen Änderungen würden den globalen Anstieg des Meeresspiegels überlagern. Die Folge wäre, dass die Pegel rund um den Nordatlantik stärker als im weltweiten Durchschnitt stiegen.

Aus allen diesen Gründen wäre eine Abschwächung der Umwälzzirkulation mit hohen Risiken für die Gesellschaft verbunden.



## 4. Veränderungen seit Beginn des 20. Jahrhunderts

Können wir schon eine längerfristige Abschwächung der Umwälzzirkulation durch die Erderwärmung nachweisen? Um diese Frage zu beantworten, wollen wir eine Reihe von Ansätzen vorstellen und einordnen.

Die Entwicklung seit Beginn der Industrialisierung ist eine Überlagerung von natürlichen und anthropogenen Einflüssen. Im Jahr 2005 sorgte eine Studie für Schlagzeilen, wonach sich die Umwälzzirkulation von 1957 bis 2004 um rund 30 Prozent abgeschwächt hätte. Dieses Ergebnis beruhte auf Schiffsmessungen quer über den Atlantik in fünf verschiedenen Jahren innerhalb dieser Zeitspanne. Fünf Zeitpunkte reichen jedoch nicht für eine zuverlässige Bestimmung von Lanzeittrends. Außerdem hatten die Messkampagnen zu unterschiedlichen Jahreszeiten stattgefunden. Eine Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen verringerte die Abschwächung von den ursprünglich berechneten 30 Prozent auf rund 10 Prozent – und lag damit noch im Rahmen der gemessenen natürlichen Schwankungsbreite. Diese sowie andere, ähnlich gelagerte Studien zeigen, dass die Datenlage bisher noch nicht ausreichend für die Beantwortung dieser Frage ist. Die Umwälzzirkulation wird erst seit 1995 einigermaßen direkt durch Strömungsmessungen dokumentiert, diese Daten können also nicht die Frage nach langfristigen Trends der vergangenen 100 Jahre beantworten.

Angesichts dieser Tatsache wird versucht, indirekt auf Veränderungen der Umwälzzirkulation zu schließen. Da das Stromsystem wie eine „Zentralheizung“ wirkt und riesige Wärmemengen aus dem Südatlantik in den nördlichen Atlantik transportiert, bieten sich hierfür die Temperaturen der Meeresoberfläche an, die seit über 100 Jahren nahezu flächendeckend gemessen werden. Aus Klimamodellen kennen wir eine Art Fingerabdruck, wenn sich die Umwälzzirkulation abschwächt. Dieser besteht in einer Abkühlung südlich von Grönland und Island und einer Erwärmung des Südatlantiks (Abbildung 5). Unter Verwendung dieses Fingerabdrucks könnte sich die Umwälzzirkulation tatsächlich in einem Abwärtstrend befinden. Während sich die Erde seit 1900 fast überall erwärmt hat, im Mittel um etwa 1°C, findet man in Teilen des Nordatlantiks ein „Erwärmungsloch“ – gerade dort, wo sinkende Temperaturen infolge einer schwächeren Umwälzzirkulation zu erwarten wären. Im Jahr 2015 beobachtete man in dieser Meeresregion sogar die tiefsten Temperaturen an der Oberfläche seit Beginn der flächendeckenden instrumentellen Messungen.

Während sich die Erde seit 1900 im Mittel um etwa 1°C erwärmt hat, findet man im Nordatlantik ein „Erwärmungsloch“ – gerade dort, wo sinkende Temperaturen infolge einer schwächeren Umwälzzirkulation zu erwarten wären.

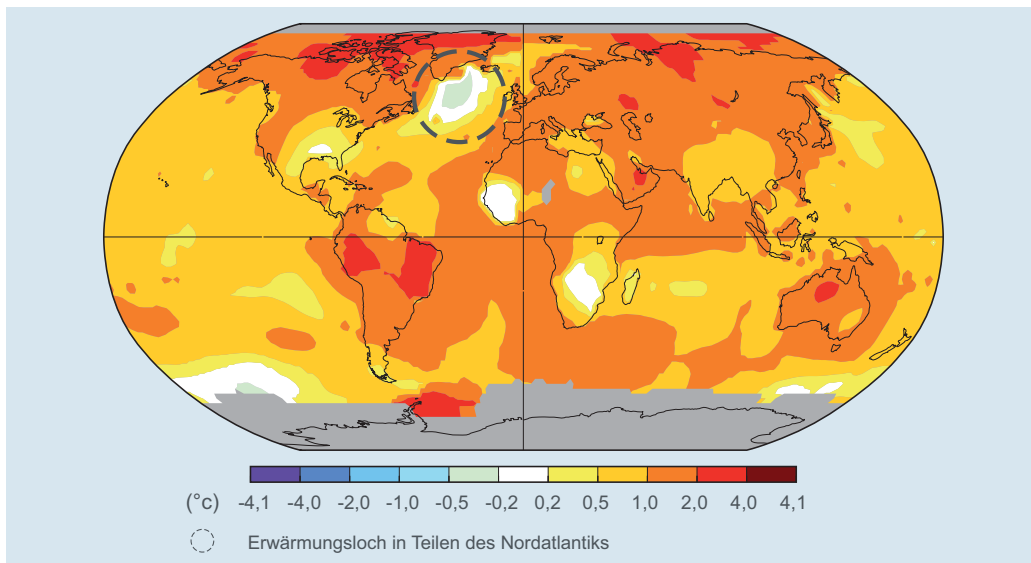


Abbildung 5: Die linearen Trends der jährlichen Meeresoberflächentemperaturen (°C) beziehungsweise der Lufttemperatur (°C) in 2 Meter Höhe über Land im Zeitraum 1900 bis 2016. Der global gemittelte Temperaturtrend beträgt etwa 1°C. Auffällig ist das „Erwärmungsloch“ in Teilen des Nordatlantiks, in denen sich die Temperaturen nicht erwärmt oder leicht abgekühlt haben. Regionen mit ungenügenden Daten sind grau dargestellt.

Eine Reihe von Klimamodellen stützt diese Erklärung für das Erwärmungsloch, wenn man sie mit den seit 1880 gemessenen atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen rechnet, andere Modelle jedoch nicht.

Eine alternative Erklärung führt das Erwärmungsloch auf den anthropogenen Eintrag von Aerosolen zurück, die hauptsächlich bei der Verbrennung von Kohle entstehen und von Nordamerika mit den vorherrschenden Westwinden über den Nordatlantik geweht werden. Dort behindern die Aerosole die Sonneneinstrahlung und verändern die optischen Eigenschaften von Wolken. Beides führt zu einem kühlenden Effekt. Das zeigt die Schwierigkeit, allein von den Temperaturen an der Meeresoberfläche auf die Umwälzzirkulation schließen zu wollen, denn die Temperaturänderungen können mehrere Ursachen haben.



Schauen wir uns die Änderungen in den verschiedenen Tiefen der Labradorsee an, eine Region, in der Tiefenwasserbildung stattfindet und die für die Umwälzzirkulation von großer Bedeutung ist. Wir verfügen dort durch Messungen seit den 1940er Jahren über recht lange Datenreihen. Wir wissen, dass die Umwälzzirkulation umso stärker ist, je mehr Tiefenwasser gebildet wird, das heißt je kälter das Tiefenwasser wird. Zu erwarten wäre also, über diesen langen Zeitraum einen Trend zu erkennen. Stattdessen sehen wir in Abbildung 6 eine ausgeprägte Variabilität. Kaum ein Jahr ist wie das andere, kaum ein Jahrzehnt wie das andere. Einen Langzeittrend vermag man in den Temperaturen nicht zu erkennen, insbesondere nicht in Tiefen unterhalb von 1000 Metern und darunter, wo sich das gebildete Tiefenwasser einschichtet. Die Messungen aus der Labradorsee liefern keinen Anhaltspunkt dafür, dass sich die Umwälzzirkulation in einer Phase jahrzehntelanger Abschwächung befindet. Dieses Ergebnis wird von Rechnungen mit realitätsnahen Ozeanmodellen gestützt, die ebenfalls keinen Langzeittrend seit Mitte des 20. Jahrhunderts ergeben, wenn man die atmosphärischen Bedingungen aus Messungen vorgibt.

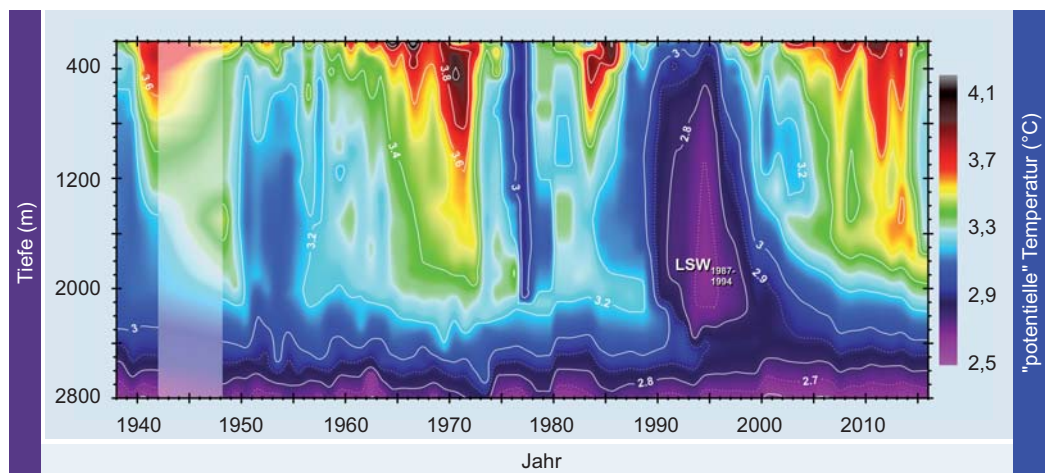


Abbildung 6: Gemessene „potentielle“ Temperaturen (°C) in der Labradorsee in den verschiedenen Tiefen seit den 1940er Jahren. Die „potentielle“ Temperatur dient dazu, die Temperatur von Wasser unterschiedlicher Tiefen miteinander vergleichbar zu machen, das heißt unterschiedliche Drücke zu berücksichtigen. Im Zeitraum von 1942 bis 1948, der in der Grafik schattiert ist, sind sehr wenige Daten verfügbar, sodass die tatsächliche Änderung der Temperatur unsicher ist. Das mit LSW 1987 bis 1994 gekennzeichnete Wasser ist das kälteste Tiefenwasser seit Beginn der Messungen, das in der Labradorsee gebildet wurde. Ein Langzeittrend ist bei den „potentiellen“ Temperaturen nicht ersichtlich. Bei Anwesenheit eines Langzeittrends würden die Linien gleicher „potentieller“ Temperatur annähernd diagonal verlaufen.

## 5. Aktuelle Entwicklungen

Ein entscheidender Fortschritt in der Meeresforschung während der vergangenen beiden Jahrzehnte ist die Dokumentation der hohen Veränderlichkeit der Meeresströmungen von Monat zu Monat, von Jahr zu Jahr und selbst von Jahrzehnt zu Jahrzehnt. Durch die neuen Daten konnte das alte Paradigma einer weitgehend statischen Ozeanzirkulation ad acta gelegt werden. Wir wissen nun, dass die chaotischen Wetterabläufe die Tiefenwasserbildung beeinflussen und zu langfristigen Änderungen der Umwälzzirkulation führen können. Das Vorhandensein solcher natürlicher Schwankungen erschwert den Nachweis eines möglicherweise schon vorhandenen menschlichen Einflusses.

Neue technische und wissenschaftliche Entwicklungen erlauben es seit den 1990er Jahren, die Stärke der Umwälzzirkulation an einigen wenigen Schlüsselorten mittels verankerter Messinstrumente direkt zu erfassen (Abbildung 7). Diese Strömungsmessungen deuten auf eine recht stabile Umwälzzirkulation während der vergangenen 20 Jahre hin, obwohl die Schwankungsbreite außergewöhnlich hoch ist. Der Transport kalten Tiefenwassers in der Labradorsee (Graph c in Abbildung 7) zeigt zwar einen Trend seit 2011, der auf eine Abschwächung der Umwälzzirkulation hindeuten würde. Dieser Trend liegt jedoch innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite, wie es die Temperaturmessungen in der Labradorsee veranschaulichen (Abbildung 6).

Ein entscheidender Fortschritt in der Meeresforschung ist die Dokumentation der hohen Veränderlichkeit der Meeresströmungen von Monat zu Monat, von Jahr zu Jahr und selbst von Jahrzehnt zu Jahrzehnt.

Strömungsmessungen deuten auf eine recht stabile Umwälzzirkulation während der vergangenen 20 Jahre hin.

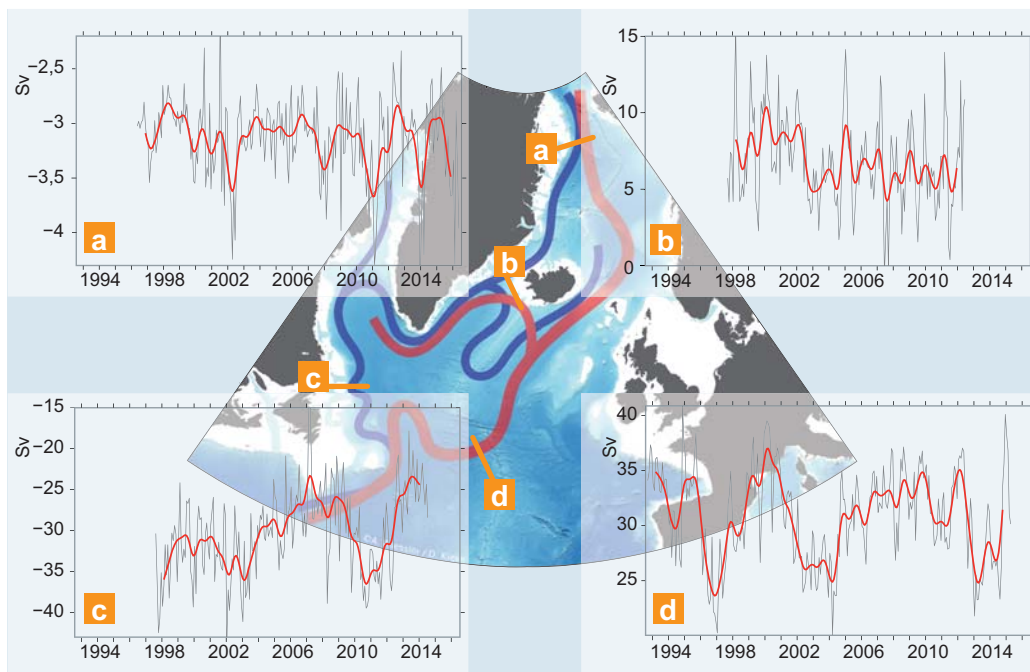
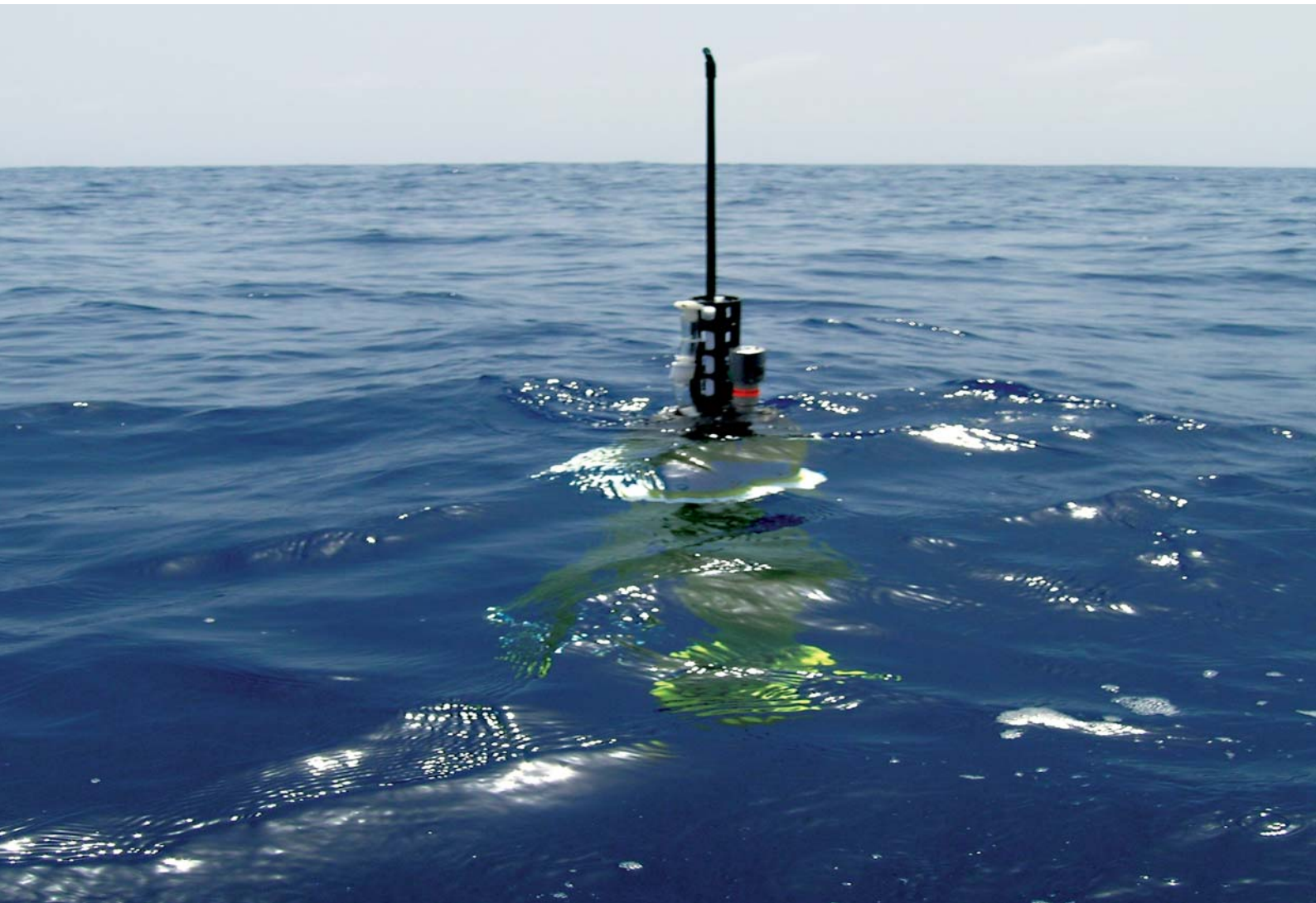


Abbildung 7: Vier Transport-Zeitreihen (Sv) von Schlüsselkomponenten der Umwälzzirkulation. a) Transport von warmem und salzreichem Atlantikwasser durch die Framstraße in den Arktischen Ozean; b) Transport von kaltem und dichtem Wasser aus dem Europäischen Nordmeer über die Schwelle zwischen Grönland und Island; c) Transport von kaltem Tiefenwasser aus der Labradorsee nach Süden; d) Transport von warmem, salzreichem Golfstromwasser und von kaltem Tiefenwasser von West in den Ostatlantik.

Satellitengestützte Meeresspiegelmessungen hat man ebenfalls zur Abschätzung der Umwälz-  
zirkulation herangezogen als auch die fast 4000 autonomen und profilierenden Driftbojen in den  
Weltmeeren, die im Rahmen des internationalen Programms ARGO seit einigen Jahren nahezu  
flächendeckend Auskunft über die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung in verschiedenen Mee-  
restiefen der oberen zwei Kilometer geben. Auch diese Messsysteme deuten übereinstimmend  
auf eine recht stabile Umwälzzirkulation während der vergangenen 20 bis 30 Jahre hin.





## 6. Zukunftsszenarien

Die Zukunft der Umwältzirkulation lässt sich mit Klimamodellen berechnen unter Vorgabe von Szenarien für die zukünftige Entwicklung der atmosphärischen Zusammensetzung. Dazu gehört insbesondere der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft. Welchen Weg die Menschheit einschlagen wird, wissen wir nicht und damit auch nicht, wie sich die Zusammensetzung der Luft in der Zukunft ändern wird. Aus diesem Grund spricht man bei solchen Berechnungen von Projektionen und nicht von Vorhersagen, es handelt sich um Wenn-Dann Aussagen, die denkbare „Zukünfte“ darstellen. Die Modelle benötigen außerdem den Zustand der Ozeane während der vergangenen Jahrzehnte auch in den tieferen Meeresschichten, um die natürliche Variabilität, die die anthropogen verursachte Veränderung überlagert, so gut wie möglich zu erfassen. Diese Messungen gibt es nicht in ausreichendem Maß, wie bereits erwähnt. Erst seit dem Jahr 2000 liegen Messungen mit profilierenden Driftbojen (ARGO Floats) vor, die Daten aus den oberen zwei Kilometern nahezu aller Meeresregionen liefern.

Aus diesem Grund und auch wegen der immer noch beträchtlichen Modelldefizite, wie etwa bei der Vermischung von Wassermassen, die aus Messungen kaum bekannt ist, gibt es eine große Streuung in den Projektionen für die Umwältzirkulation bis zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 8). Hier werden zwei Treibhausgasszenarien betrachtet, ein moderates Szenario (RCP4.5), nach dem die Emissionen ihren Höhepunkt 2040 erreichen und ein „Worst-Case-Szenario“ (RCP8.5), nach dem die Emissionen während des gesamten 21. Jahrhunderts weiter steigen.

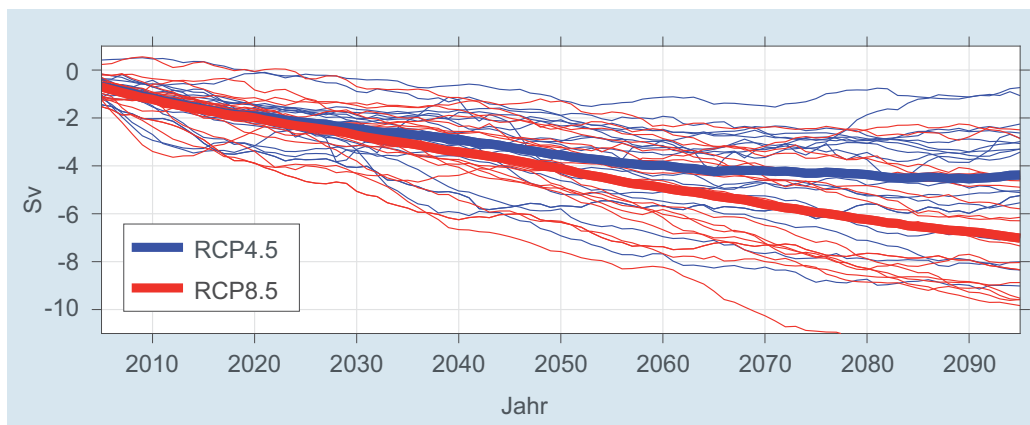


Abbildung 8: Die mit verschiedenen Klimamodellen für das 21. Jahrhundert projizierte und mit einem Zehn-Jahre-Filter geglättete Änderung der Umwältzirkulation (Sv) bei  $30^\circ$  N gegenüber 1970-2000, deren Ergebnisse im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarats Eingang gefunden haben. Gezeigt sind Ergebnisse für zwei Treibhausgasszenarien: Ein moderates Szenario (RCP4.5, blaue Linien) und ein „Worst-Case-Szenario“ (RCP8.5, rote Linien). Das RCP8.5 Szenario entspricht einer äquivalenten  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 1370 ppm (parts per million) gegen Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber 650 ppm im RCP4.5 Szenario. Die Mittelwerte über alle Modelle sind als fette Linien gezeigt. Die Stärke der Umwältzirkulation bei  $26,5^\circ$  N im Zeitraum 1970-2000 beträgt im Mittel über alle Modelle 19 Sv. Die gemessene Stärke bei  $26,5^\circ$  N lag von April 2004 bis Oktober 2015 bei  $16,9 \pm 4,4$  Sv.

Im Mittel über alle Modelle verringert sich die Umwälzzirkulation um etwa 30 Prozent bei Verwendung des „Worst-Case-Szenarios“.

Im Mittel über alle Modelle verringert sich die Umwälzzirkulation um etwa 30 Prozent bei Verwendung des „Worst-Case-Szenarios“ (RCP8.5), das in etwa einer Vervierfachung der vorindustriellen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration am Ende des 21. Jahrhunderts entspricht. Die insgesamt große Streuung der Ergebnisse rührt in erster Linie von den Unterschieden zwischen den Modellen her und nicht von den Unterschieden zwischen den Treibhausgasszenarien, obwohl sich die beiden Treibhausgasszenarien erheblich voneinander unterscheiden. Bei Projektionen für die global gemittelte Erdoberflächentemperatur dagegen leisten die Unterschiede in den Treibhausgasszenarien den größten Beitrag zur Streuung der Ergebnisse am Ende des 21. Jahrhunderts. Längere Messreihen aus dem Ozean werden es zukünftig ermöglichen, einerseits die Modelle zu verbessern und andererseits die natürliche Variabilität genauer zu erfassen, sodass sich die Unsicherheit in der Projektion für die Umwälzbewegung erheblich verringern wird.

Wie wird sich der Eisanspanzer Grönlands in der Zukunft verhalten? Dieser Faktor ist in den Simulationen die „große Unbekannte“.

Aber es gibt noch weitere Aspekte, die die Projektionen für die kommenden Jahrzehnte erschweren. Wie wird sich der Eisanspanzer Grönlands in der Zukunft verhalten? In den Simulationen ist der Süßwassereintrag, der durch das Schmelzen des Grönlandeises entsteht, nicht berücksichtigt. Dieser Faktor ist als „große Unbekannte“ nicht genau vorhersehbar. Tatsache ist, dass der grönländische Eisanspanzer bereits Masse verliert. Seit Beginn der Satellitenmessungen sind es im Mittel ungefähr 270 Milliarden Tonnen pro Jahr. Das lässt eine noch stärkere Abschwächung der Umwälzzirkulation erwarten als in den obigen Berechnungen ohne den Schmelzwassereintrag, in einigen Fällen um mehr als 50 Prozent. Das Schmelzen des Grönlandeises könnte sich in den kommenden Jahrzehnten noch beschleunigen, was die Umwälzbewegung noch mehr verlangsamen könnte. Der Einfluss des grönländischen Schmelzwassers auf die Umwälzzirkulation hängt aber davon ab, ob es in die Regionen mit Tiefenwasserbildung gelangt oder um sie herum geführt wird. Das ist eine wichtige Forschungsfrage, die es in den nächsten Jahren zu klären gilt.



## 7. Fazit

Während der vergangenen 20 Jahre war die Umwälzzirkulation relativ stabil, die beobachteten Schwankungen befinden sich innerhalb der natürlichen Variabilität. Um Trends beobachten zu können, die auf den anthropogenen Klimawandel hinweisen, benötigen wir zuverlässige direkte Messungen über einen langen Zeitraum und in einem dichten Messnetz. Seit dem Einsatz der Driftbojen (ARGO Floats) im Jahr 2000 und gut platzierten Strömungsobservatorien seit 1995 verbessert sich die Datenlage kontinuierlich, aber die Zeitspanne reicht noch nicht, um belastbare Aussagen zu treffen.

Aus den heute verfügbaren Daten sowie den Kenntnissen der Physik der Ozeane und des Klimasystems erwarten wir aber eine deutliche Abschwächung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Wie hoch diese Abschwächung tatsächlich sein wird, ist noch unsicher und wird stark vom Schicksal des Grönlandeises, der „großen Unbekannten“, abhängen.

Die Beobachtung des gesamten Ozeans und lange Messreihen sind aufwändig und teuer. Aber punktuelle und zu seltene Messungen lassen keine eindeutigen Aussagen zu. Für verlässliche Prognosen ist noch viel Forschungsarbeit, sind genauere Modelle und umfangreichere Messreihen nötig. Dazu werden weiterhin Hochtechnologien benötigt, die auf Forschungsschiffen, in Satelliten und auch in autonomen oder ferngesteuerten Geräten eingesetzt werden können. Weitere Voraussetzungen sind ein effizientes Datenmanagement und Großrechner – damit wir die Prozesse schneller, besser und genauer verstehen, welche die Golfstromzirkulation steuern und Auswirkungen mit großer gesellschaftlicher Relevanz auf unser Leben in Nord- und Westeuropa haben.

Während in den öffentlichen Debatten die Angst vor einer abrupten Abkühlung Europas durch ein plötzliches Ausbleiben der Umwälzzirkulation im Vordergrund steht, ist dies für die Wissenschaft ein äußerst unwahrscheinliches Szenario. Gleichwohl macht sich die Wissenschaft Sorgen um die als sicher geltende Abschwächung und die damit verbundenen anderen Risiken. Dazu zählen positive Rückkopplungen, die die Erderwärmung weiter aufschaukeln, langfristige und unumkehrbare Verschiebungen von Niederschlagsmustern oder auch zusätzliche Antriebe für den ohnehin gefährlichen Meeresspiegelanstieg – gerade in unseren Breiten.

Eine signifikante Abschwächung der Zirkulation würde daher auf jeden Fall beträchtliche Folgen nach sich ziehen: für das Klima, die Meeresspiegel, den Kohlenstoffkreislauf und die marinen Ökosysteme.

Ebenso würde es folgenschwere sozioökonomische Auswirkungen haben. Der ohnehin laut fünftem IPCC-Sachstandsbericht erwartete globale Meeresspiegelanstieg von rund 30 bis 80 Zentimetern bis Ende des Jahrhunderts würde beispielsweise durch eine schwächelnde Umwälzzirkulation in Europa noch höher ausfallen. Die Ökosysteme und die menschliche Gesellschaft würden unter Druck geraten. Denn die Golfstromzirkulation prägt die Lebensgemeinschaften mit ihren Pflanzen und Tieren, sowie letztlich auch die Geschichte und die Kulturen der Menschen in den europäischen Ländern.

Die überwiegend milden Temperaturen und die Verteilung ausreichender Niederschläge sorgen für eine grüne Landschaft mit hoher Artenvielfalt und zuverlässig hohen Erträgen in der Landwirtschaft. Die hohen Erträge der Fischerei im Atlantik hängen ebenfalls mit der Golfstromzirkulation zusammen, denn Temperatur und Strömung haben einen großen Einfluss auf die Verteilung von Nährstoffen und Nahrung.

Von herausragender gesellschaftlicher Bedeutung ist die Umwälzzirkulation aber nicht nur im Hinblick auf das relativ milde Klima im nordwestlichen und nördlichen Europa: Durch ihre zentrale Rolle in der globalen Tiefenzirkulation der Ozeane wirkt dieser Prozess auch in die anderen Ozeane hinein und könnte längerfristig die Versorgung der Tiefsee mit Sauerstoff beeinträchtigen.

Ein ungebremster Klimawandel wird dazu beitragen, dass eine Phase von über 10.000 Jahren mit relativ stabilem Klima zu Ende geht und die Menschen dann vermutlich mit Veränderungen zurechtkommen müssen, für die es in ihrer Geschichte, ihren Kulturen und Traditionen keine Vorlage gibt. Wie genau sich die Umwälzzirkulation ändern wird, können wir nicht mit hoher Sicherheit vorhersehen. Dass sie sich in den kommenden Jahrzehnten abschwächen wird, ist Konsens in der Wissenschaft. Ob sich dies abrupt oder allmählich vollziehen wird, kann die Forschung heute nicht beantworten. In jedem Fall wären die Folgen gravierend.

## Glossar

**Aerosole:** Feste oder flüssige Schwebeteilchen in der Atmosphäre

**ARGO Floats:** Autonome profilierende Driftbojen mit der Fähigkeit, im Wasser auf- und abzustiegen und dabei Temperatur, Leitfähigkeit und Druck zwischen der Oberfläche und 2000 Metern Tiefe zu messen und die Daten an Satelliten zu übertragen. Aus den Daten können Salzgehalt und Dichte als wichtige physikalische Größen für die Darstellung des Strömungssystems berechnet werden. Im ARGO-Programm werden von mehr als 30 Nationen fast 4000 Driftbojen in allen Ozeanen gemeinsam ständig eingesetzt.

**Atlantikzirkulation:** Atlantischer Teil der globalen Umwälzzirkulation, auch: atlantischer Teil des „globalen Förderbandes“

**Dichte des Meerwassers:** In der Ozeanographie wird aus extrem genauen Messungen von Salzgehalt und Temperatur die potentielle Dichte des Meerwassers berechnet, um aus horizontalen Dichteunterschieden dann auf Strömungen zu schließen. Die potentielle Dichte ist diejenige Dichte, die ein Wasser hätte, wenn es aus der ursprünglichen Tiefe an die Oberfläche gebracht würde.

**Golfstrom:** Bezeichnet eigentlich nur das kurze Stück längs der amerikanischen Ostküste; fälschlich in der Öffentlichkeit oft synonym für Golfstromzirkulation oder auch Atlantikzirkulation gebraucht.

**Golfstromzirkulation:** Die Strömung in den oberen, warmen Meeresschichten der Atlantikzirkulation, die sich von der Floridastraße über den Nordatlantikstrom bis in die Arktis erstreckt.

**Umwälzzirkulation oder thermohaline Zirkulation (Synonyme):** Primär durch horizontale Unterschiede in der Dichteverteilung des Meerwassers getriebene Ozeanzirkulation. Diese Dichteunterschiede sind überwiegend durch Temperatur und Salzgehalt bestimmt.

**Sverdrup (Sv):** In der Ozeanographie gebräuchliche Maßeinheit für den Transport größerer Wasservolumina, benannt nach dem norwegischen Ozeanographen Harald Sverdrup. 1 Sv = 1 Mio. m<sup>3</sup>/s.

## Literatur

IPCC (2014). Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2016).

Yashayaev, I. & Loder, J.W. (2016). Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016. Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/2016GL071668.

## Abbildungs-/Fotoverzeichnis

<b>Umschlag</b>	<b>Expedition mit Forschungsschiff Meteor</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, V. Diekamp	
<b>Foto</b>	<b>Prof. Dr. Hans-Otto Pörtner</b> © Alfred-Wegener-Institut, K. Rolfes	4
<b>Abbildung 1</b>	<b>Golfstromzirkulation.</b> Gestaltung: VISUV	6
<b>Abbildung 2</b>	<b>Thermohaline Umwälzzirkulation.</b> Gestaltung: VISUV	7
<b>Foto</b>	<b>Offener Ozean</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, J. Stone	8
<b>Abbildung 3</b>	<b>Rekonstruktion von Klimaänderungen.</b> Rahmstorf, S., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.	9
<b>Abbildung 4</b>	<b>Umwälzzirkulation und Wärmetransport.</b> Mulitza, S., MARUM, Nürnberg, D., GEOMAR nach: McManus et al., 2004/Shakun et al., 2012.	10
<b>Foto</b>	<b>Sedimentbohrkern</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, D.Hebbeln	11
<b>Abbildung 5</b>	<b>Luft- und Meeresoberflächentemperatur.</b> GISTEMP Team, 2016: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 2017-06-05 at <a href="https://data.giss.nasa.gov/gistemp/">https://data.giss.nasa.gov/gistemp/</a>	13
<b>Foto</b>	<b>Einsatz von Forschungsinstrumenten</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, V. Diekamp	13
<b>Abbildung 6</b>	<b>Temperaturen in der Labradorsee.</b> Yashayaev, I. and J.W. Loder (2016b). Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016. <i>Geophys. Res. Lett.</i> , doi:10.1002/2016GL071668.	14
<b>Abbildung 7</b>	<b>Transport-Zeitreihen der Umwälzzirkulation.</b> Roessler, A. und Kieke, D. Institut für Umweltphysik (IUP), Universität Bremen	15
<b>Foto</b>	<b>ARGO-Float im Einsatz</b> © GEOMAR	16
<b>Abbildung 8</b>	<b>Projizierte Änderung der Umwälzzirkulation.</b> Reintges, A., Martin, T., Latif, M., & Keenlyside, N. S. Uncertainty in twenty-first century projections of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in CMIP3 and CMIP5 models. <i>Climate Dynamics</i> . doi:10.1007/s00382-016-3180-x, Springer Verlag, Heidelberg 2016.	17
<b>Foto</b>	<b>Eisberg vor Grönland</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, D.Hebbeln.	18
<b>Foto</b>	<b>Fischschwarm</b> © GEOMAR	26

## Weiterführende Literatur

Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Referat System Erde (Hrsg.) (2012). Klimaforschung im Ozean: Veränderte Ozeanströmungen und zukünftiges Klimageschehen. Bonn.

Deutsches Klima-Konsortium DKK (Hrsg.) (2015). Perspektiven für die Klimaforschung 2015 bis 2025. Positionspapier. Berlin.

Heinrich-Böll-Stiftung, Heinrich-Böll-Stiftung Schleswig-Holstein, Ozean der Zukunft, Le Monde diplomatique (Hrsg.) (2017). Meeresatlas: Daten und Fakten über unseren Umgang mit dem Ozean. Berlin.

Latif, M. (2017). Die Meere, der Mensch und das Leben. Herder.

Latif, M. (2012): Globale Erwärmung. Ulmer Verlag.

Latif, M. (2010): Warum der Eisbär einen Kühlschrank hat ... und andere Geheimnisse aus der Klima- und Wetterforschung. Herder.

Maribus, in Kooperation mit Ozean Der Zukunft, International Ocean Institute, Mare (Hrsg.) (2010): World Ocean Review. Mit den Meeren Leben. Hamburg.

Rahmstorf, S. (2012). Wolken, Wind & Wetter. Deutsche Verlagsanstalt.

Rahmstorf, S. & Richardson, K. (2007). Wie bedroht sind die Ozeane. Biologische und physikalische Aspekte. Fischer.

Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H. J. (2006). Der Klimawandel. Beck Verlag.

WBGU (2006). Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten 2006. Berlin.

## Autorinnen und Autoren

**Prof. Dr. Mojib Latif**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Universität Kiel

**Dr. Stefan Mulitza**, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Prof. Dr. Dirk Nürnberg**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

**Prof. Dr. Stefan Rahmstorf**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

**Prof. Dr. Monika Rhein**, Institut für Umweltphysik (IUP) und MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Prof. Dr. Michael Schulz**, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Prof. Dr. Detlef Stammer**, CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg

**Dr. Jin-Song von Storch**, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

**Prof. Dr. Martin Visbeck**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Universität Kiel

## Beteiligte Institutionen

CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg

Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Institut für Umweltphysik (IUP), Universität Bremen

MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)



## Über uns

### **Strategiegruppe „Ozeanzirkulation und Klima“ von DKK und KDM**

Der Ozean ist eine der zentralen Komponenten des Klimasystems. Veränderungen in den Meeren wirken sich vielfach auf das Klima aus. Deshalb ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Klima- und Meeresforschung ausschlaggebend. Die gemeinsame Strategiegruppe „Ozeanzirkulation und Klima“ des Deutschen Klima-Konsortiums (DKK) und des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM) bringt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der wichtigsten deutschen Forschungseinrichtungen zusammen, die sich mit diesem Themenfeld befassen. Sie identifiziert die drängenden Fragen im Zusammenhang mit der Rolle der Ozeane beim Klimawandel und entwickelt aus der Forschung heraus die Wissensbasis für politische Entscheidungen.

### **Deutsches Klima-Konsortium (DKK)**

Das Deutsche Klima-Konsortium e. V. (DKK) vertritt führende Akteure der deutschen Klimaforschung und Klimafolgenforschung. Dazu gehören Universitäten, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und Bundesbehörden. Das DKK steht für wissenschaftsbasierte Politikberatung, greift aktuelle Themen auf und liefert Hintergründe aus Expertensicht.

### **Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM)**

KDM bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.



### Herausgeber

Deutsches Klima-Konsortium e. V. (DKK)  
im Wissenschaftsforum Berlin  
Markgrafenstraße 37  
10117 Berlin

Telefon: +49 (0)30 76 77 18 69-0  
E-Mail: [info@klima-konsortium.de](mailto:info@klima-konsortium.de)  
[www.deutsches-klima-konsortium.de](http://www.deutsches-klima-konsortium.de)

Konsortium Deutsche Meeresforschung e. V. (KDM)  
im Wissenschaftsforum Berlin  
Markgrafenstraße 37  
10117 Berlin

Telefon: +49 (0)30 200 747 90  
E-Mail: [info@deutsche-meeresforschung.de](mailto:info@deutsche-meeresforschung.de)  
[www.deutsche-meeresforschung.de](http://www.deutsche-meeresforschung.de)

### Redaktion

Marie-Luise Beck  
Elisabeth Weidinger

Sebastian Konitzer  
Rolf Peinert

Gestaltung: VISUV, Greifswald  
gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier

Berlin, Sommer 2017

