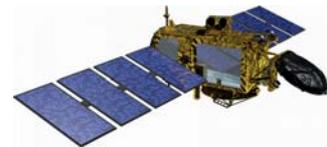


Die Vermessung der **Atlantikzirkulation**



Fakten und Hintergründe aus der Forschung

Diese Broschüre gibt einen verständlichen Überblick über die Vermessung der Atlantikzirkulation. Sie zeigt, wie wichtig diese Langzeitmessungen für das Verständnis der Klimarolle des Ozeans sind. Die Messergebnisse setzen darüber hinaus den Standard zur Überprüfung und Verbesserung der Klimamodelle und damit auch der Prognosen für das 21. Jahrhundert.

Die Meeresströmungen im Atlantik spielen für unser Klima eine wichtige Rolle. Klimamodelle zeigen, dass bei weiter steigenden Treibhausgas-Emissionen die Stärke der Strömungen abnimmt und sich ihr Verlauf ändert. Dies hat weitreichende Folgen für die regionale Erwärmung, Niederschläge, Meeresspiegel, Landwirtschaft und Fischerei auch in Deutschland. Deshalb haben die führenden deutschen Meeresforschungsinstitute Langzeitbeobachtungen der Meeresströmungen an Schlüsselstellen im Atlantik installiert. Durch sie kennen wir nun die Strömungsstärken und ihre Schwankungen über Zeiträume von Stunden bis Jahrzehnte und können Klimatrends frühzeitig erkennen. Die Messungen haben auch gezeigt, dass selbst in den aktuellsten Klimamodellen noch immer große Unterschiede zwischen den simulierten und den beobachteten Strömungen bestehen und auch die vorhersagte Abschwächung der Strömungen bis ins Jahr 2100 in den Modellen unterschiedlich ausfällt. Um die Ergebnisse der Klimamodelle auch in Zukunft durch Beobachtungen bewerten zu können, müssen die Langzeitbeobachtungen der Atlantikzirkulation aufrechterhalten werden.

Diese Broschüre knüpft an die bereits erschienenen Bände „Zukunft der Golfstromzirkulation“ (2016) und „Zukunft der Meeresspiegel“ (2019) an, in die ebenfalls Resultate aus den Langzeit-Beobachtungssystemen eingeflossen sind.

Inhalt

Vorwort	4
1. Ozeanzirkulation und Klimawandel	5
Die Atlantikzirkulation	6
Zukunft der Atlantikzirkulation und ihre Folgen	6
Auswirkungen einer schwächeren Zirkulation	6
Bedeutung der Langzeitmessungen der Atlantikzirkulation	7
Zukunft der deutschen Langzeitbeobachtungen	8
2. Die Langzeit-Beobachtungssysteme der Atlantikzirkulation	9
Die Langzeitbeobachtungen in der Framstraße bei 79°N	12
Die Langzeitbeobachtungen in der Dänemarkstraße bei 66°N	14
Die Messungen des Ausstroms aus der Labradorsee bei 53°N	16
Das NOAC-Beobachtungssystem bei 47°N	18
Das tropische Beobachtungssystem bei 11°S und am Äquator bei 23°W	19
3. Schiffsmessungen	23
4. Beobachtungssysteme unter dem Eis	25
5. Datensynthese	27
6. Klimamodellierung	29
7. Fazit	30
Glossar	32
Verzeichnis der Abbildungen und Fotografien	33
Weiterführende Literatur	33
Autorinnen und Autoren	34
Über uns	35

Vorwort

Inzwischen gibt es keinen Berggipfel mehr, der nicht vermessen ist, keinen Ort an Land, dessen Koordinaten nicht genau bekannt sind. Für den Ozean sieht das anders aus: trotz seiner für uns bedeutenden Rolle für Transport, Ernährung, Tourismus, Meeresspiegel und Klimawandel können seine Strömungen nur mit viel Aufwand vermessen werden – und das auch erst seit wenigen Jahrzehnten. Bekannt sind die Oberflächenströmungen schon lange, der Golfstrom wurde zum Beispiel schon im 16. Jahrhundert in Seekarten eingezeichnet. Diese qualitative Sicht auf Ozeanströmungen und die Beschränkung auf die Oberfläche reichen aber nicht aus, um die Mechanismen zu verstehen, die unter dem Klimawandel die Strömungen verändern werden. Die Klimamodelle deuten auf eine Abschwächung der Golfstromzirkulation in den kommenden Jahrzehnten hin. Dies hat Auswirkungen auf den Meeresspiegel an unserer Küste (steigt stärker an), auf die Anzahl von Sturmfluten (steigt) und auf die Temperaturzunahme über Westeuropa, die ohne Änderungen in der Zirkulation geringer wäre.

Rechtzeitig zu Beginn der UN-Ozeandekade beschreibt diese Broschüre anschaulich die Vermessung der klimarelevanten Strömungen im Atlantik, wie sie von den leitenden deutschen Meeresforschungsinstituten durchgeführt wird und erläutert, wie die Beobachtungen und die Modelle verknüpft werden. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler informieren regelmäßig die Öffentlichkeit, z.B. in einem Parlamentarischen Abend oder in Form von Broschüren. Die Herausforderungen für die Zukunft werden ebenfalls diskutiert. Denn lange, kontinuierliche Zeitreihen der dreidimensionalen Strömungen sind nötig, um zu testen, wie realitätsnah die Ozeanzirkulation in den Klimamodellen dargestellt wird. Sie sind der wichtigste Maßstab für die Güte der Modelle hinsichtlich der zukünftigen Veränderung der Atlantikzirkulation und der damit einhergehenden Konsequenzen für den regionalen Meeresspiegel und das Klima.



Professoren M. Latif, A. Waite und M. Rhein im Gespräch über die Atlantikzirkulation mit Dr. K.-E. Huthmacher (BMBF) und Moderatorin M.-L. Beck (DKK) auf dem Parlamentarischen Abend am 21.2.2018 (v.l.n.r)

Prof. Dr. Monika Rhein, Koordinatorin der BMBF Verbundvorhaben RACE (Regionale Atlantikzirkulation und Globaler Wandel) und RACE – Synthese (<https://race-synthese.de/de/>)

1 Ozeanzirkulation und Klimawandel

Durch den zunehmenden Verbrauch fossiler Brennstoffe steigen die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, und dies ist die Hauptursache für die globale Klimaerwärmung. Der Ozean spielt eine wichtige Rolle im Klimawandel: Die Meere haben 93 % der zusätzlich im Erdsystem vorhandenen Wärmeenergie und 25 bis 30 % der durch menschliche Aktivitäten erzeugten (anthropogenen) Kohlenstoff (CO₂) -Emissionen aufgenommen. Dies hat den Anstieg der Lufttemperatur abgeschwächt. Meeresströmungen transportieren die aufgenommene Energie, Gase, Nährstoffe und andere Substanzen wie Plastik und verursachen regionale Unterschiede in deren Verteilung. Die Strömungen beeinflussen daher das regionale Klima, aber auch die marinen Ökosysteme und die Lebensbedingungen in den unterschiedlichen Regionen.

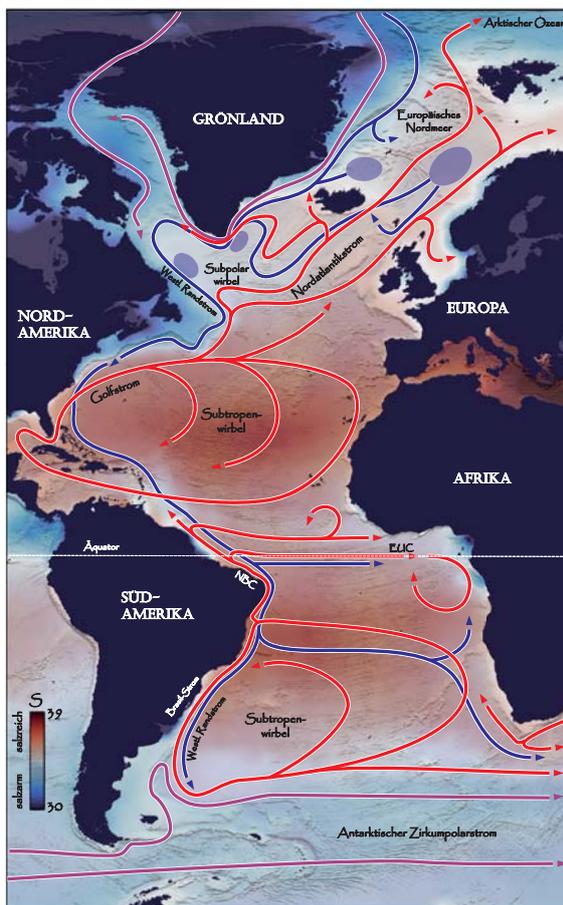


Abbildung 1. Vereinfachte Darstellung der Atlantikzirkulation. Warme und salzreiche oberflächennahe Strömungen sind rot, kalte Strömungen violett (oberflächennah) und blau (Tiefenströmungen) dargestellt. Der Farbverlauf im Hintergrund zeigt die Intensität des Salzgehalts an der Oberfläche. Graue Ovale im Nordatlantik stehen für die Regionen, in denen Wasser aus der Oberfläche absinkt und in den tiefen Zweig der Atlantikzirkulation eingespeist wird.

Die Atlantikzirkulation

Für Europa besonders wichtig ist die Atlantikzirkulation (Abb. 1). Im Oberflächenzweig dieser Zirkulation fließt warmes und salzreiches Wasser aus dem Südatlantik und dem tropischen Atlantik nach Norden bis in die Arktis. Bei der Ausbreitung nach Norden kühlt das Wasser ab, da es Wärme an die Atmosphäre abgibt, die mit dem Westwind nach Europa gelangt. Folgen sind zum Beispiel die relativ milden Winter in Westeuropa und eisfreie Häfen in Skandinavien. Nördlich von Island ist im Winter das salzreiche Wasser so stark abgekühlt und dicht genug, um von der Oberfläche ins Ozeaninnere abzusinken. Ein Teil strömt dann über die untermeerischen Gebirgrücken zwischen Grönland und Schottland nach Süden zurück. Kurz hinter den Gebirgen sinkt das kalte Wasser zu Boden und bildet das unterste Stockwerk des tiefen Zweigs der Atlantikzirkulation. Die zweite Region, in der Oberflächenwasser in die Tiefe sinkt, liegt zwischen Kanada und Grönland (Abb. 1). Das aus dieser Region eingespeiste Tiefenwasser schichtet sich oberhalb von 2.500 Metern Tiefe ein und ist das oberste Stockwerk des tiefen Zweigs der Atlantikzirkulation. Den wichtigsten Tiefenwasserpfad nach Süden bilden die Strömungen am westlichen Rand des Atlantiks entlang des amerikanischen Kontinents, der sogenannte tiefe westliche Randstrom.

Zukunft der Atlantikzirkulation und ihre Folgen

Fortgesetzte Treibhausgas-Emissionen treiben den Klimawandel voran und werden auch in der Atlantikzirkulation zu signifikanten Änderungen führen. Die zunehmende Erwärmung von Atmosphäre und Ozean erschwert die Umwandlung von Oberflächen- zu Tiefenwasser, da warmes Wasser leichter ist und nicht so gut absinkt wie kaltes. Das Abschmelzen des Eispanzers auf Grönland und die Abnahme des Meereises im Arktischen Ozean wird zusätzliches Süßwasser in die Absinkgebiete bringen und das Oberflächenwasser noch leichter machen. Neueste Klimamodelle zeigen für das Jahr 2100 im Vergleich zu heute eine um etwa 40 % schwächere Atlantikzirkulation, sofern die CO₂-Emissionen nicht drastisch eingeschränkt werden. Die Unterschiede von Modell zu Modell sind jedoch groß.

Auswirkungen einer schwächeren Zirkulation

Die Auswirkungen sind vielfältig (Abb. 2): Eine verlangsamte Atlantikzirkulation führt zu einem deutlich höheren Anstieg des Meeresspiegels in der Nordsee und zu mehr Stürmen über dem Nordatlantik, als ohne Änderung der Zirkulation zu erwarten wäre. Gleichzeitig wird durch schwächere Atlantikströmungen weniger Wärme aus den Tropen und Subtropen nach Norden transportiert. Dadurch erwärmt sich die Lufttemperatur unter anderem in Deutschland weniger (Abb. 2). Die Fischerei im Nordatlantik wird negativ beeinträchtigt, ebenso wie die Nahrungsmittelerzeugung in Europa. Eine Abschwächung der Atlantikzirkulation hat weitreichende Auswirkungen auf die Lage der Regengebiete in Südamerika und Afrika, mit zunehmender Trockenheit nördlich des Äquators und zunehmenden Regenfällen südlich des Äquators (Abb. 2). Neben diesen langfristigen Änderungen unterliegen die Tropen natürlichen Klimaschwankungen auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrzehnten, die man bis jetzt noch nicht gut genug in den Klimamodellen simulieren kann.

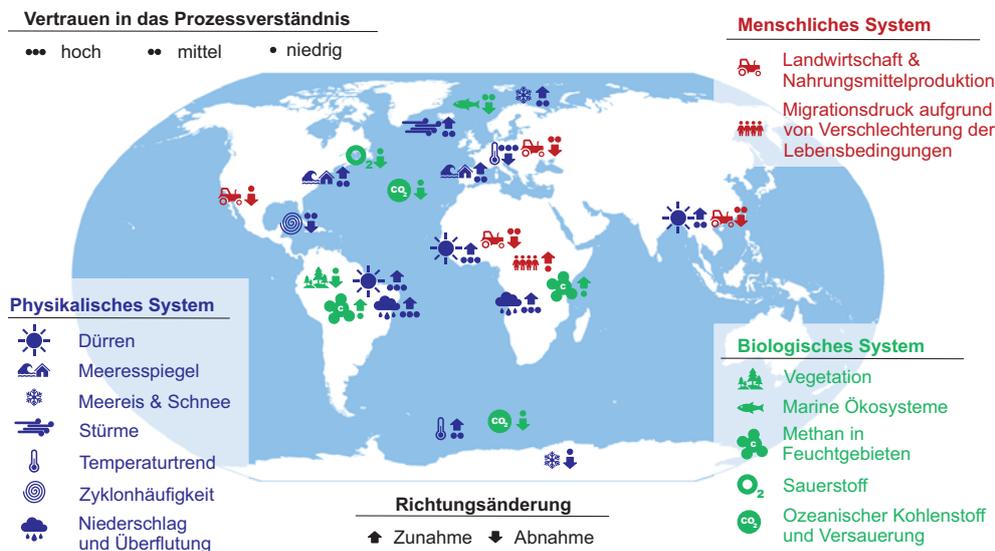


Abbildung 2. Die Konsequenzen einer Abschwächung der Atlantikzirkulation. Änderungen im physikalischen Klimasystem sind in Blau dargestellt, biologisch-chemische Änderungen an Land und im Meer in Grün. Die Farbe Rot markiert die Folgen, die die menschliche Gesellschaft betreffen. Nach oben gerichtete Pfeile stehen für die Zunahme einer Kenngröße, nach unten weisende Pfeile für deren Abnahme. Die Anzahl der Punkte gibt an, wie hoch das Vertrauen seitens der Wissenschaft in die Aussage ist. Die Zusammenstellung stammt aus dem Sonderbericht der Weltklimarats IPCC über Ozean und Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (SROCC).

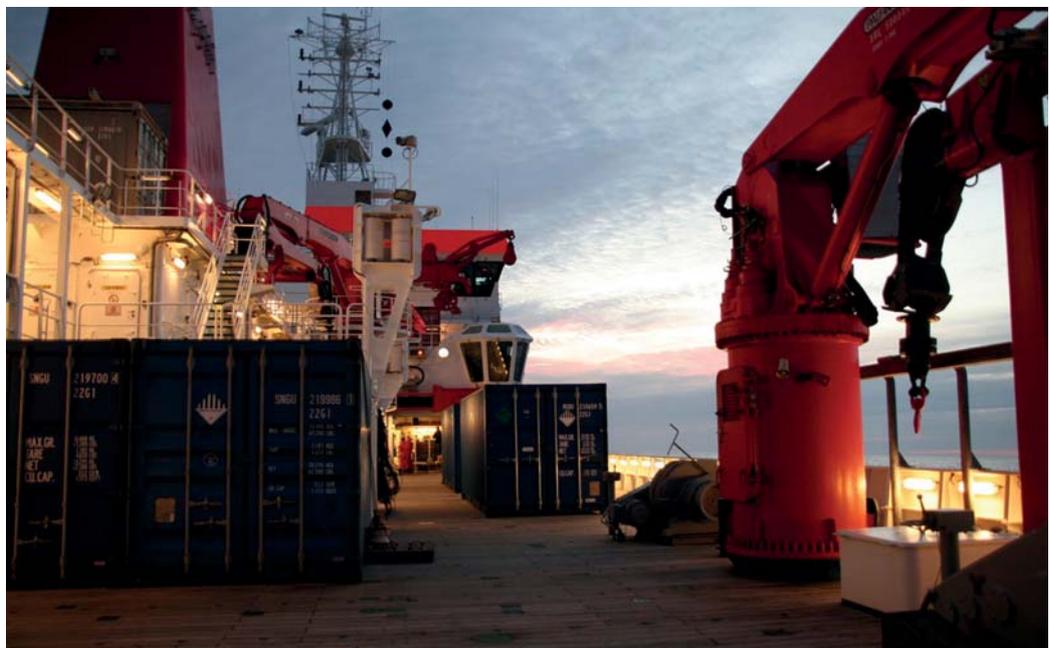
Bedeutung der Langzeitmessungen der Atlantikzirkulation

Die fundamentale Bedeutung des atlantischen Strömungssystems für das regionale Klima, den Klimawandel und den Meeresspiegel ist offensichtlich, aber es gibt noch viele offene Fragen: Wie stark sind jeweils die verschiedenen Komponenten der Atlantikzirkulation? Für welche dieser Komponenten können schon Änderungen durch den Klimawandel festgestellt werden? Wie groß sind die natürlichen Schwankungen? Wie genau kennen wir die beteiligten Prozesse? Wie realitätsnah ist die Atlantikzirkulation in den Klimamodellen dargestellt? Wie verlässlich sind Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Zirkulation und ihre Auswirkungen? Welche Regionen sind zuerst betroffen, wo sind Änderungen erst in ferner Zukunft zu erwarten? Um diese Fragen zu beantworten, sind langfristige Beobachtungen in Schlüsselregionen der Zirkulation mit modernster Technologie und optimierten Messstrategien notwendig. Ohne direkt zu messen, wie die reale Ozeanzirkulation aussieht und wie sie auf Änderungen reagiert, kann man nicht wissen, ob die Modellsimulationen realitätsnah sind. Und das müssen sie sein, um verlässliche Aussagen über die zukünftige Stärke der Meeresströmungen und ihre Auswirkungen auf Klima und Meeresspiegel sowie auf die Verteilung von CO₂, Nährstoffen und anderer Substanzen machen zu können.

Die nationalen Langzeitmessungen sind ein Kernbestandteil der internationalen Bemühungen, die Stärke¹ und die Schwankungen der Zirkulation an Schlüsselstellen im Atlantik zu vermessen (Abb. 3). Die Analysen und Prozessstudien, die mit den Langzeitbeobachtungen und Modellen bereits durchgeführt wurden, haben unser Verständnis der Mechanismen für Zirkulationsänderungen und ihrer Konsequenzen signifikant erweitert und zu Fortschritten in der Vorhersagbarkeit geführt.

Zukunft der deutschen Langzeitbeobachtungen

Trotz der fundamentalen Bedeutung der Atlantikzirkulation für die zukünftige Entwicklung von Klima und regionalen Meeresspiegeln gibt es noch kein stabil und auf Dauer angelegtes Beobachtungssystem im Atlantik, mit dem der Zustand und die Veränderungen der Zirkulation verlässlich und kontinuierlich gemessen werden können. Die wissenschaftliche Projektförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die „NORDATLANTIK“- und „RACE“-Verbundprojekte hat sichtbare Beiträge dazu geleistet. Allerdings ist die Fortführung vieler der in dieser Broschüre vorgestellten Langzeitmessungen unsicher, da sie nicht auf Dauer finanziert sind, sondern von Erfolgen bei zukünftigen Projektanträgen abhängen. Wir brauchen einen Paradigmenwandel in den Ozeanbeobachtungen hin zu operationellen Beobachtungs- und Modellsystemen, die durch die Wissenschaft im Rahmen von Projekten und Initiativen kontinuierlich optimiert sowie gemeinsam mit anderen Akteuren aus dem Bereich der operativen Dienste betrieben werden.



¹ Die Stärke einer ozeanischen Strömung wird in Sverdrup (Sv) angegeben. 1 Sv entspricht einem Transport von 1 Million Kubikmetern Wasser pro Sekunde. Der Amazonas transportiert etwa 0.2 Sv, die stärksten Ozeanströmungen wie zum Beispiel der Golfstrom können mehr als 140 Sv stark sein

2 Die Langzeit-Beobachtungssysteme der Atlantikzirkulation

Vor etwa 20 Jahren waren die Hauptzweige der Atlantikzirkulation durch Beobachtungen zwar bekannt, aber die mittlere Stärke des Transportes sowie die Transportschwankungen und -pfade im Ozeaninneren kaum oder gar nicht gemessen. Um diese Wissenslücken zu schließen, begannen die deutschen Meeresforschungsinstitute in Bremen, Bremerhaven, Hamburg und Kiel, Schlüsselregionen im Atlantik zu identifizieren und für diese Regionen langfristige ozeanische Messsysteme und -strategien zu entwickeln.

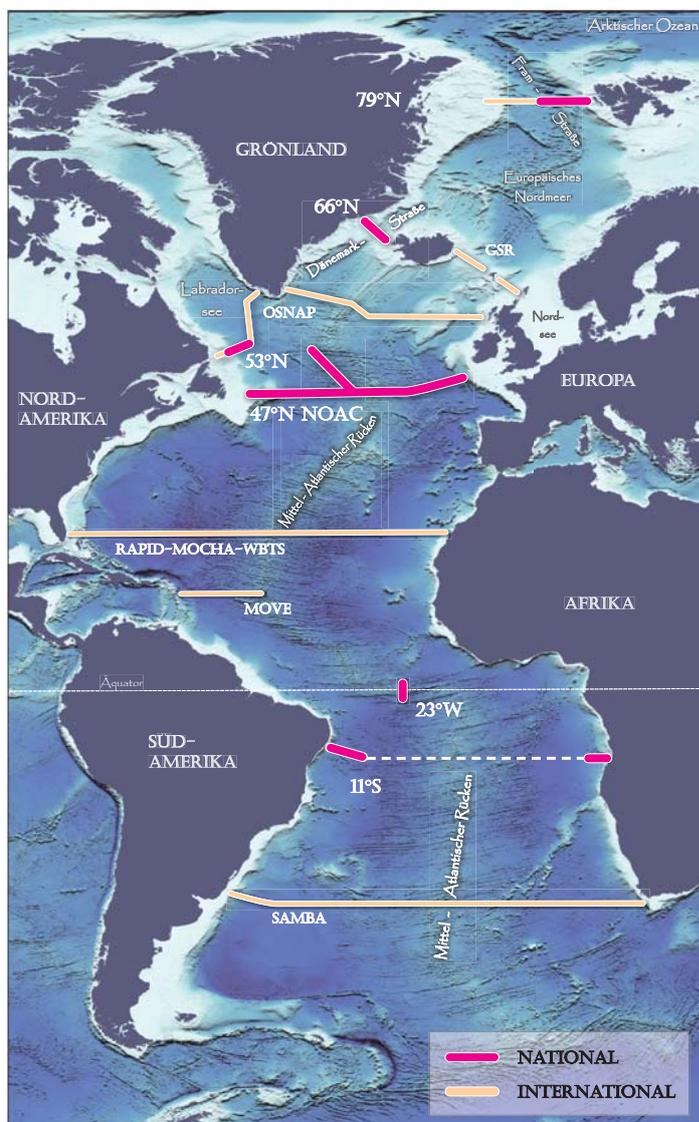


Abbildung 3. Nationale (rot) und internationale (beige) Langzeit-Beobachtungssysteme zur Vermessung der Atlantikzirkulation.

Das Betreiben dieser Systeme ist sehr aufwendig. Regelmäßige Expeditionen mit Forschungsschiffen sind erforderlich, um die Instrumente auszutauschen, zu kalibrieren und die Messungen auf dem neuesten technischen Stand zu halten. Die Instrumente müssen oft erneuert werden, da sie hohen Wasserdrücken und Korrosion ausgesetzt sind. Seit 2006 wurden insgesamt 62 Expeditionen zu den Langzeit-Beobachtungssystemen durchgeführt.

Im Folgenden werden die nationalen Langzeitbeobachtungen vorgestellt. Ihre Hauptaufgaben sind die Vermessung der Strömungen an Schlüsselstellen des Atlantiks. Das sind a) der Einstrom von warmem und salzreichem Wasser in den Arktischen Ozean, b) der tiefe Zweig der Atlantikzirkulation an mehreren Orten, c) der Import von warmem und der Export von kaltem Wasser an der Grenze zwischen Subtropen und Subpolarregion bei 47°N sowie d) die tropische Zirkulation und die Ausbreitung von Signalen zwischen Süd- und Nordhemisphäre.



Exkurs 1: Die Vermessung von Randströmen

Die westlichen Randströme entlang des amerikanischen Kontinentalabhangs sind ein wichtiger Teil der Atlantikzirkulation, da sie die Schnellstraße nach Süden für den tiefen Zweig dieser Zirkulation darstellen. Ihre Querschnittsfläche ist etwa 100 bis 200 Kilometer breit und reicht über mehrere Tausend Meter bis zum Ozeanboden. Die Geschwindigkeit der Ströme misst man mit Sensoren, die in verschiedenen Tiefen und an unterschiedlichen Positionen viele Monate bis Jahre verankert werden. Ein Ankergewicht hält das Seil, an dem diese Sensoren befestigt sind, an seiner Position. Auftriebskugeln sorgen dafür, dass die Seile mit den Geräten aufrecht im Wasser stehen (Abb. 4). Am häufigsten werden akustische Verfahren verwendet, um die Strömungen zu messen (siehe Glossar).

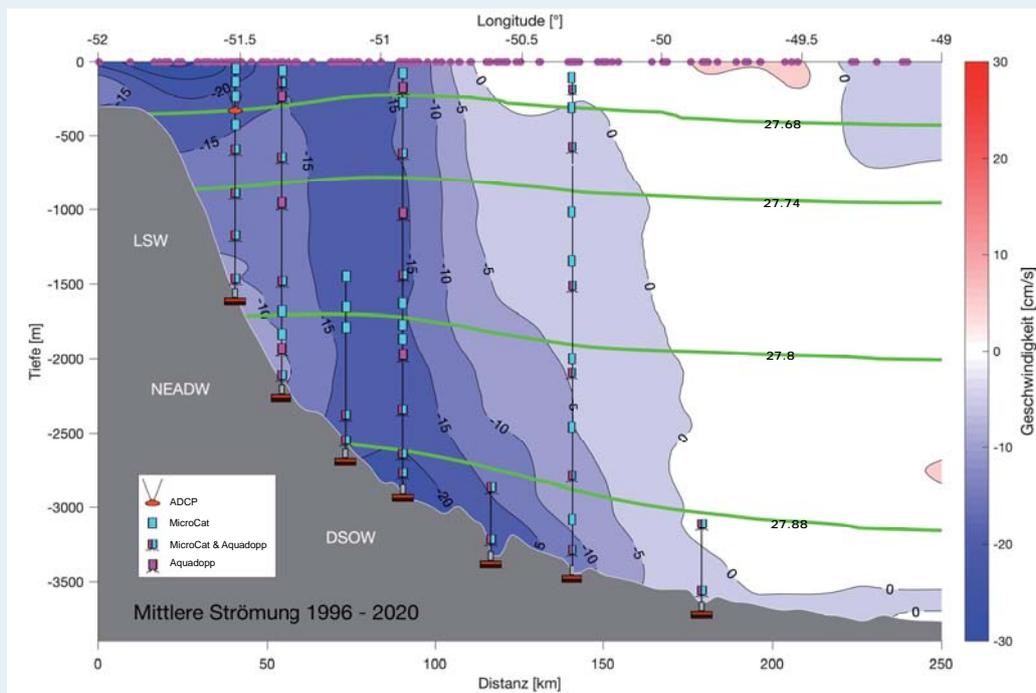


Abbildung 4. Messung eines Randstromtransportes (in Abb. 3 bei 53°N). Gemessen werden Geschwindigkeit, Temperatur (T) und Salzgehalt (S) in verschiedenen Tiefen. Randströme sind etwa 100 bis 200 Kilometer breit. Die blauen und roten Flächen zeigen die mittlere Strömungsgeschwindigkeit (Zentimeter pro Sekunde) entlang des Kontinentalabhangs aus Schiffsmessungen, die etwa einmal pro Jahr durchgeführt werden. Diese Messungen zeigen, ob die Verankerungen so platziert sind, dass der gesamte Randstromtransport erfasst wird. Die grünen Linien sind Linien gleicher Wasserdichte und trennen die verschiedenen Wassermassen des tiefen Zweigs der Atlantikzirkulation. Hier liegt die Grenze zwischen dem tiefen und dem oberen Zweig der Zirkulation bei etwa 400 Metern Tiefe. Je weiter man nach Süden geht, desto tiefer sinkt diese Grenze. Die pinkfarbenen Punkte an der Oberfläche sind die Positionen, an denen vom Schiff aus Messungen durchgeführt wurden.

Die Langzeitbeobachtungen in der Framstraße bei 79°N

Atlantikwasser stellt die wichtigste ozeanische Quelle von Wärme, Salz und Nährstoffen für den Arktischen Ozean dar. Ein Teil des Wassers strömt am östlichen Rand der Framstraße bei 79°N im Westspitzbergenstrom in den Arktischen Ozean. Die Rolle dieses Einstroms für die zukünftige Entwicklung des arktischen Klimas und der Meereisbedeckung – die sogenannte Atlantifizierung der Arktis – ist eines der wichtigen Forschungsthemen, für die diese Messungen eine zentrale Bedeutung haben. Der Einstrom wird kontinuierlich erfasst (Abb. 5). Dabei werden mit mehreren Verankerungen (Exkurs 1) die Wassertransporte, die Temperaturen und die Salzgehalte dieser Strömung gemessen. Die Messungen wurden 1997 vom Alfred-Wegener-Institut (AWI), Bremerhaven, zum ersten Mal durchgeführt. Heute ist das Atlantikwasser etwa 1°C wärmer als zu Beginn der Zeitreihe (Abb. 6), aber der Transport hat sich im Mittel nicht verändert.

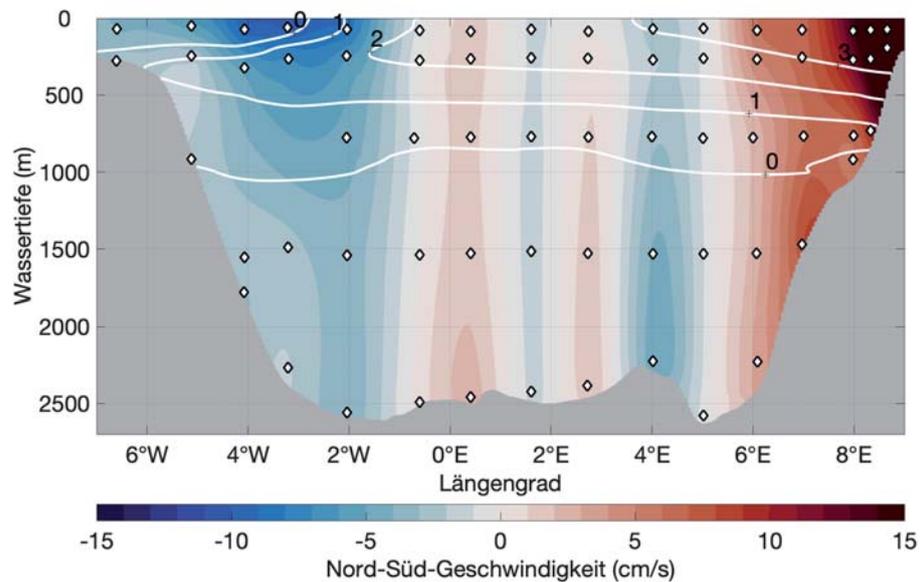


Abbildung 5. Mittelbares Geschwindigkeitsfeld durch die Framstraße (in Abb. 3 bei 79°N) zwischen Grönland (links) und Spitzbergen (rechts). Die schwarzen Rauten markieren die Positionen der verankerten Strömungsmesser (Exkurs 1). Das nach Norden gerichtete Strömungsband (rot) auf der rechten Seite ist der Westspitzbergenstrom, das süd-wärtige Band links der Ostgrönlandstrom. Die weißen durchgezogenen Konturen stellen Linien gleicher Temperatur dar. Man kann erkennen, dass auch der nach Süden gerichtete Strom warmes Atlantikwasser enthält.

Die Langzeitmessungen zeigen die große Bedeutung von Wirbeln, die Teile des Atlantikwassers aus dem Westspitzbergenstrom zuerst ins Innere der Framstraße transportieren und von dort in den nach Süden strömenden Ostgrönlandstrom unterhalb des kalten und salzarmen Polarwassers einspeisen. Auf der westlichen Seite der Framstraße betreiben Partner vom norwegischen Polarinstitut in Tromsø ebenfalls Verankerungen (Abb. 3), um neben diesem Rückstrom des Atlantikwassers auch den Transport von Polarwasser aus dem Arktischen Ozean zu vermessen. Die Verankerungen des AWI im Westspitzbergenstrom sind Teil der FRAM (Frontiers in Arctic Marine Monitoring) Infrastruktur, einem integrierten System ganzjähriger physikalischer, biogeochemischer und biologischer Messungen in der Framstraße und im zentralen Arktischen Ozean.

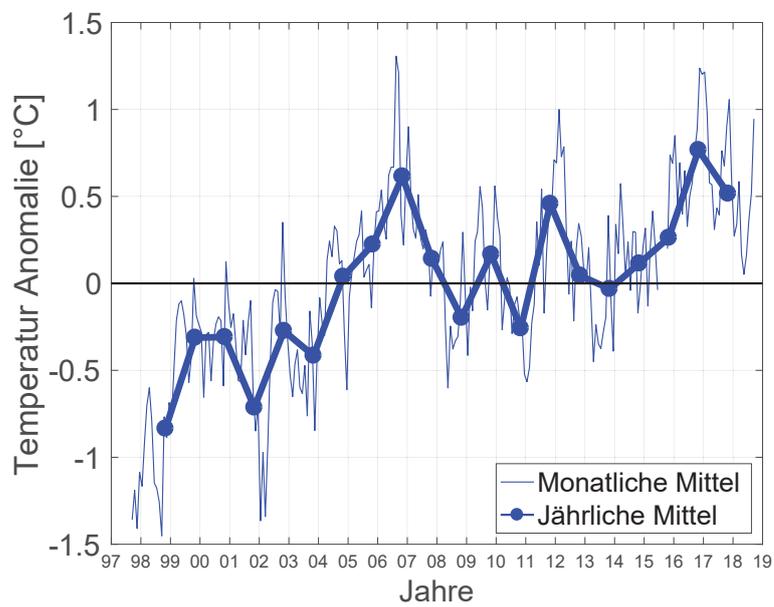


Abbildung 6. Zeitreihe der Temperatur im Westspitzbergenstrom, die aus Messungen von verankerten Temperatursensoren seit 1997 berechnet wurde. Der Westspitzbergenstrom transportiert warmes Wasser aus dem Atlantik in den Arktischen Ozean. Die dünne Linie zeigt die Monatsmittelwerte, die dicke verbindet die Jahresmittelwerte (blaue Punkte). Die monatlichen Schwankungen sind stark; dennoch ist die langfristige Erwärmung seit 1997 nicht zu übersehen.



Die Langzeitbeobachtungen in der Dänemarkstraße bei 66°N

Hier bildet der Grönland-Schottland-Rücken eine natürliche Barriere zwischen dem Europäischen Nordmeer und dem Rest des Atlantiks. Der Rücken ragt sogar über die Wasserlinie hinaus (Island und die Färöer-Inseln). Das für die Atlantikzirkulation wichtige Tiefenwasser kann daher nur an bestimmten Stellen diesen Rücken überqueren. Der wichtigste Durchlass ist die Dänemarkstraße zwischen Grönland und Island. Seit 1996 messen dort Forscherinnen und Forscher der Universität Hamburg und Partnerinstituten in Island den Transport des tiefsten Zweigs der Atlantikzirkulation. Sie kooperieren eng mit den skandinavischen Partnern, die die Schwellen zwischen Island und Schottland betreuen, durch die ebenfalls Wasser des tiefen Zweigs der Atlantikzirkulation nach Süden strömt. Durch diese europäische Zusammenarbeit ist es möglich, alle wichtigen Transporte vom Europäischen Nordmeer nach Süden zu erfassen.

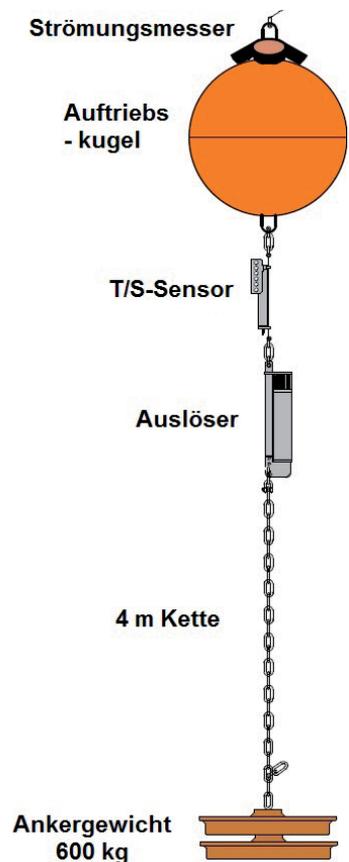


Abbildung 7. Links: Bergung eines akustischen Strommessers, der ein Jahr lang geschützt durch die orangefarbene Auftriebskugel in der Dänemarkstraße verankert war. Die Sender/Empfänger der akustischen Signale sind im oberen Teil der Kugel als blau umrandete Scheiben zu sehen. Rechts: schematischer Aufbau der gesamten Verankerung.

Die Dänemarkstraße ist nicht besonders breit, sodass für eine gute Abschätzung des Tiefenwassertransportes durch diese Meerenge Messungen aus Verankerung an zwei Positionen genügen. Hier wird viel Fischerei betrieben. Um Verluste der Geräte durch Abreißen oder Verschleppen zu vermeiden, können Sensoren nur in Bodennähe ausgesetzt werden. Eine Verankerung besteht aus einem Strömungsmesser (ADCP) und einem Temperatur- und Salzgehaltssensor (Abb. 7). Die bisherigen Messungen zeigen, dass der Strömungstransport seit 1996 weder bedeutend abgenommen noch zugenommen hat, aber sehr stark von Jahr zu Jahr schwanken kann. Die Ursachen dieser Variabilität wurden für ein Jahr durch ein erweitertes Netz von fünf Verankerungen untersucht; dabei stellte sich heraus, dass vorbeiziehende Wasserwirbel verantwortlich sind. Da Klimamodelle große Probleme haben, die Transporte durch eine so enge Straße zu simulieren und sich ein bisher stabiler Transport bei einer weiteren Klimaerwärmung ändern kann, sind diese Messungen von großer Bedeutung und müssen aufrechterhalten werden.



Die Messungen des Ausstroms aus der Labradorsee bei 53°N

Der Südausgang der Labradorsee ist ein idealer Ort, um Veränderungen in den Transporten des tiefen Zweigs der Atlantikzirkulation zu erfassen. Das Kieler Institut GEOMAR hat im Jahr 1997 bei 53°N am Südausgang der Labradorsee ein dafür geeignetes Langzeit-Beobachtungssystem installiert (Abb. 4) und es seitdem aufrechterhalten sowie weiterentwickelt. Die Messungen sind seit 2014 Teil des internationalen OSNAP-Verbundes mit Beteiligung von Gruppen aus den USA, Kanada, den Niederlanden, China und Großbritannien. Die Messungen liefern die Transporte der einzelnen Komponenten der Atlantikzirkulation; es lassen sich Schwankungen und Trends auf Zeitskalen von Tagen bis Jahrzehnten bestimmen. Die zusätzlichen Daten der Expeditionen sind Momentaufnahmen der physikalischen und geochemischen Struktur der Wassersäule. Die Daten werden zum einen für Prozessstudien, zum anderen für eine regionale Einordnung der lokalen Langzeitmessungen genutzt.

Der Tiefenwassertransport (Abb. 8) setzt sich jeweils zur Hälfte aus dem Tiefenwasser der Labradorsee (15 Sv) und dem Tiefenwasser, das über die Schwellen zwischen Grönland und Schottland geströmt ist (15 Sv), zusammen. Die Transportschwankungen auf Zeitskalen von wenigen Tagen sind auf Wechselwirkungen der Strömung mit der Neigung des Ozeanbodens zurückzuführen, durch die sogenannte topografische Rossby-Wellen erzeugt werden. Auf den langen Zeitskalen von zirka zehn Jahren wurde ein klarer Unterschied zwischen den Fluktuationen in den beiden Zweigen der tiefen Atlantikzirkulation festgestellt. Es war eine Überraschung, dass der tiefste Zweig auf die Luftdruckunterschiede zwischen Island und den Azoren, die sogenannte Nordatlantische Oszillation (NAO), reagiert. Warum ein solcher Zusammenhang nicht auch für die anderen tiefen Wassermassen gefunden wurde, ist noch unklar. Bei einer 17-jährigen Zeitreihe, deren Ergebnisse über Jahre hinweg stark schwanken, ist es sehr schwierig, einen Langzeit-Trend zu bestimmen (Abb. 8). Er hängt davon ab, bei welcher Phase der Schwankungen die Zeitreihe beginnt und endet. Die Ursachen der Schwankungen werden weiterhin durch die gemeinsame Auswertung von beobachteten und modellierten Zeitserien untersucht.

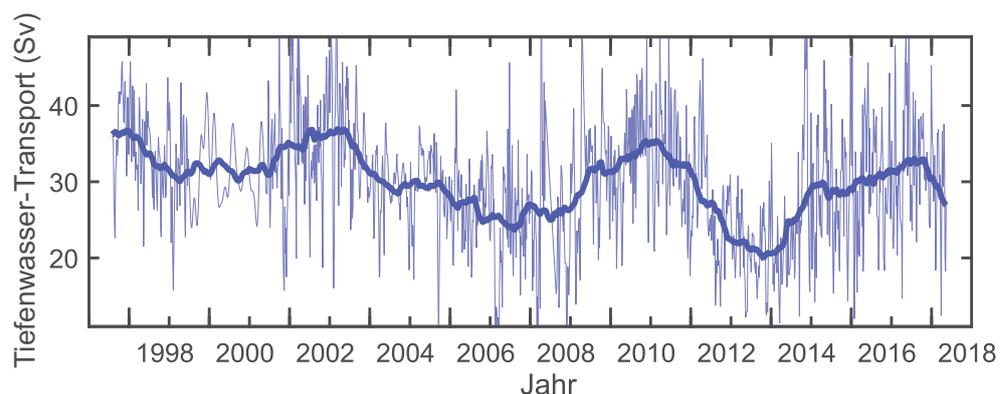


Abbildung 8. Zeitreihe des Exports von Tiefenwasser aus der Labradorsee im westlichen Randstrom bei 53°N. Die dünnen Linien stehen für Fünf-Tages-Werte; die dicke Linie für die Mittelung über ein Jahr.

Exkurs 2: Transportmessungen im Ozeaninneren

Im Ozeaninneren ist die Randstrom-Methode (siehe Exkurs 1) nicht anwendbar. Es wären zu viele Verankerungen und zu viele Arbeitstage auf einem Forschungsschiff erforderlich, um die Strömungen zu erfassen und die Geräte zu warten. Deshalb verwendet man indirekte Methoden. Um die mittlere Strömung zwischen zwei auch weit auseinanderliegenden Positionen zu messen, benötigt man zwei Bodenecholote, die am Ozeanboden verankert werden. Sie senden ein Schallsignal zur Meeresoberfläche und messen die Zeit, bis das Signal wieder am Gerät ankommt. Das dauert nur wenige Sekunden und ist abhängig von der Ozeantiefe, der Temperatur sowie dem Salzgehalt. Die Methode funktioniert, wenn zu jeder vom Bodenecholot gemessenen Laufzeit nur ein bestimmtes Temperatur- und Salzgehaltsprofil aus der Region passt. Um das herauszufinden, benötigt man die Messungen der Argo-Tiefendrifter. Sind diese Voruntersuchungen erfolgreich, dann lassen sich aus Messungen von Bodenecholoten an zwei Positionen horizontale Dichteunterschiede bestimmen und daraus die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zwischen beiden Positionen berechnen (Abb. 9). Daraus ergibt sich dann der Transport zwischen den beiden Positionen.

Seit 1993 werden die Meeresoberflächenhöhe und ihre Änderungen kontinuierlich durch Satelliten gemessen. Daraus lassen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in den obersten zehn Metern des Ozeans ermitteln. Was unterhalb dieser Oberflächenschicht passiert, bleibt für den Satelliten unsichtbar. Wenn nun die Transporte (aus den Bodenecholot-Messungen) mit den Oberflächengeschwindigkeiten (gemessen mit Satelliten) eindeutig verknüpft sind, dann kann man jeder Satellitenmessung einen Transport im Ozeaninneren zuordnen. Mit diesem Verfahren wurden im NOAC-Beobachtungssystem bei 47°N (Abb. 3) seit 2006 Transportzeitreihen erstellt und mithilfe der Satellitendaten zurück bis ins Jahr 1993 ausgedehnt.

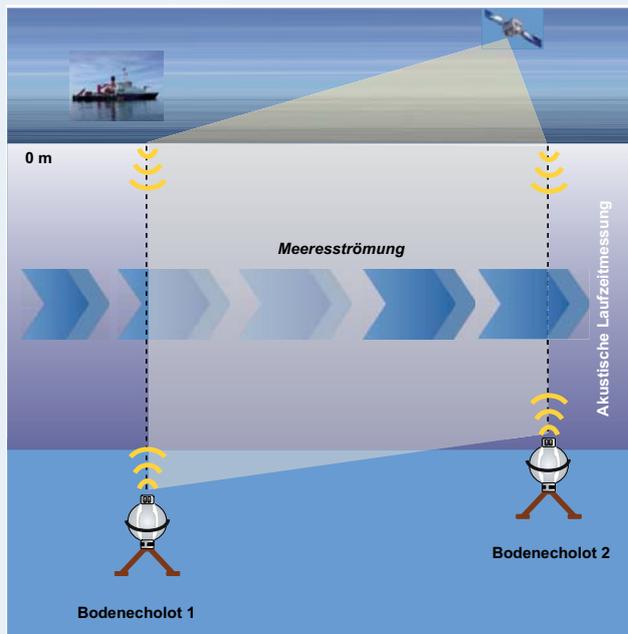


Abbildung 9. Bestimmung der Strömungstransporte im Ozeaninneren mithilfe von Bodenecholoten und Satelliten.

Das NOAC-Beobachtungssystem bei 47°N

Bei etwa 47°N tauscht sich der subpolare mit dem subtropischen Nordatlantik aus. Dabei werden große Wärmemengen aus den Subtropen nach Norden bewegt und dort teilweise an die Atmosphäre abgegeben beziehungsweise weiter bis in die Arktis transportiert. Die Zirkulation in diesem Meeresgebiet mit verschiedenen Strömungspfaden des subtropischen Wassers nach Norden oder auch zurück in den Süden ist allerdings sehr komplex. Änderungen dieser Zirkulation, die auch die Nordsee beeinflussen, können durch die Analyse der Verteilungsmuster und die Vermessung der Transportstärke einzelner Pfade bestimmt werden.

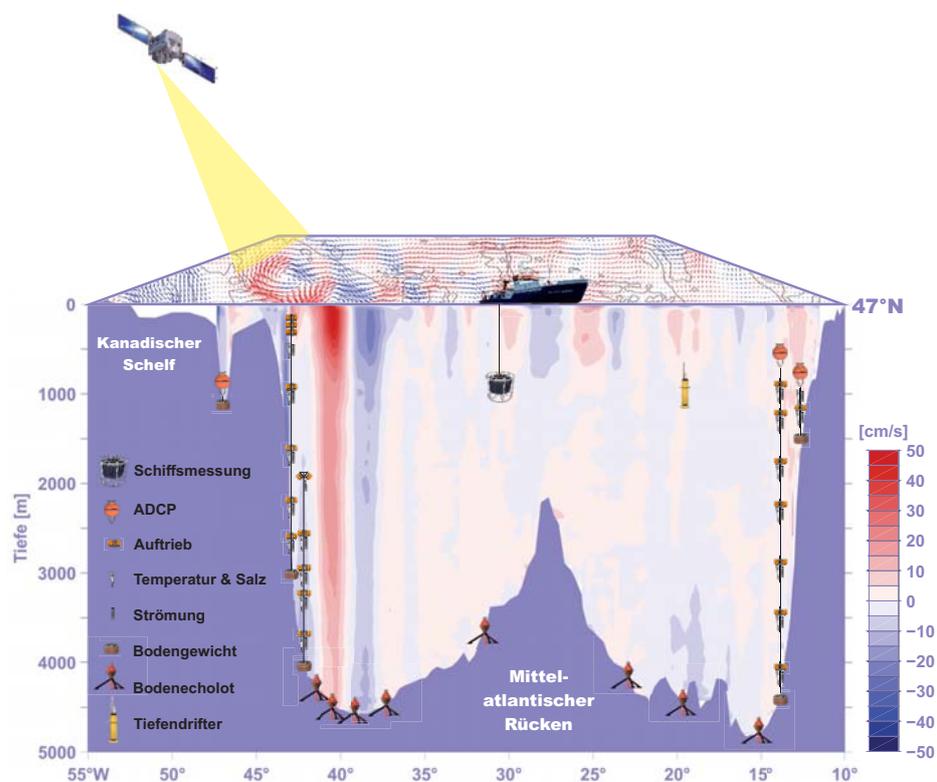


Abbildung 10. Transportuntersuchungen durch verankerte Geräte entlang 47°N. Die Randströme werden ähnlich wie im Beispiel in Abb. 4 durch Verankerungen vermessen. Im Ozeaninneren sind Bodenecholote installiert, mit denen man in Kombination mit Satellitenmessungen und Argo-Tiefendriftern Transport-Zeitreihen berechnen kann (siehe Exkurs 2). Die eingefärbten Flächen zeigen die mittleren Strömungen nach Norden (rot) und nach Süden (blau) aus Schiffsmessungen. Das starke rote Band stellt den Nordatlantikstrom dar, die südliche Strömung links davon den westlichen Randstrom (Abb. 1).

Die Universität Bremen baute in Kooperation mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg das NOAC-Langzeit-Beobachtungssystem bei 47°N und entlang des Mittelatlantischen Rückens auf (Abb. 3 und 10). Hier werden Mittelwerte und Schwankungen der Strömungspfade zwischen den Subtropen und dem subpolaren Nordatlantik vermessen sowie der Transport vom West- in den Ostatlantik bestimmt.

Die kontinuierlichen Messungen haben 2006 begonnen. Sie lieferten zum ersten Mal ein detailliertes Bild der Zirkulation und ihrer Schwankungen im Inneren des Nordatlantiks. Das NOAC-System schließt eine wichtige räumliche Lücke zwischen den nördlichen Beobachtungssystemen bei 53°N sowie 66°N und dem britisch-amerikanischen Langzeitsystem RAPID bei 26°N (Abb. 3).

Die Lagen der einzelnen Strömungsbänder wurden mit jährlichen Schiffsmessungen der Strömungsgeschwindigkeit identifiziert (Abb. 10). Der Transport von Tiefenwasser im Randstrom am kanadischen Kontinentalabhang ist ähnlich wie bei 53°N. Der nach Norden fließende Nordatlantikstrom ist mit bis zu 1 Meter pro Sekunde enorm schnell für eine Meeresströmung und mit über 100 Sv eine der stärksten des Weltozeans. Die Schwankungen in den einzelnen Transportpfaden sind groß, und Jahresmittel Geschwindigkeiten können bis zu 50 % geringer sein als der langjährige Mittelwert. Bisherige Analysen zeigen, dass sich der Transport des Nordatlantikstroms seit 1993 nicht signifikant geändert hat. Die Transporte im Inneren des Westatlantiks haben allerdings seither stark abgenommen, während die Transporte im Inneren des Ostatlantiks leicht zugenommen haben. Grund ist die regionale unterschiedliche Ozean-Erwärmung: Die Randbereiche des Nordatlantiks haben sich stärker erwärmt als das Zentrum, und das schwächt beziehungsweise verstärkt die horizontalen Dichte- und Druckunterschiede, die wiederum die Strömungen anschwellen lassen, beziehungsweise sie reduzieren.



Das tropische Beobachtungssystem bei 11°S und am Äquator bei 23°W

Die Verbindung zwischen der Atlantikzirkulation im Nord- und Südatlantik wird mit einem tropischen Langzeit-Observatorium vermessen (Abb. 11). Das Beobachtungssystem bei 11°S am westlichen Rand vor Brasilien, von 2000 bis 2004 und seit 2013 wieder betrieben, besetzt eine Schlüsselstelle zwischen den nordatlantischen Zirkulationsmessungen und dem südatlantischen Langzeit-Beobachtungssystem bei 34°S (SAMBA, Abb. 3). Es hat das Ziel, sowohl den Warmwassertransport nach Norden als auch den Tiefenwassertransport nach Süden zu erfassen und die Mechanismen von Transportschwankungen zu verstehen.

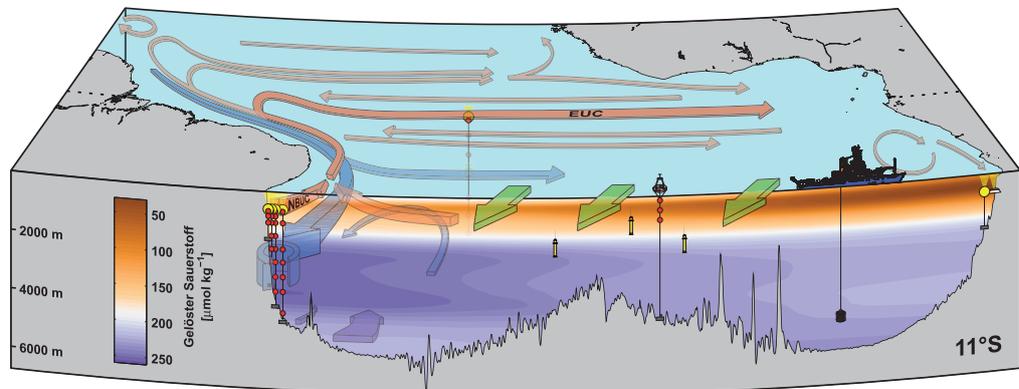


Abbildung 11. Schematische Darstellung der Zirkulation im tropischen Atlantik, des Beobachtungssystems bei 11°S und der Langzeitverankerung am Äquator bei 23°W. Die rötlichen Pfeile repräsentieren die Warmwasserströmungen im oberen Ozean einschließlich des Nordbrasilianischen Unterstroms (NBUC) und seinem Abzweig zum Äquatorialen Unterstrom (EUC). Blaue Pfeile stellen die Zirkulation des Tiefenwassers aus dem Nordatlantik, violette Pfeile die Ausbreitung des antarktischen Bodenwassers und grüne Pfeile den windgetriebenen Transport bei 11°S dar. Der Vordergrund zeigt die Sauerstoffverteilung entlang von 11°S; hier fallen der Westliche Randstrom und Umgebung durch einen hohen Sauerstoffgehalt auf. Ursache dafür ist, dass das Tiefenwasser im Randstrom auf dem schnellsten Weg bis 11°S geströmt ist und der Sauerstoff deshalb noch nicht so stark verbraucht wurde wie bei älterem Tiefenwasser.

Neben ihrer Bedeutung für die Ausbreitung von klimarelevanten Signalen über den Äquator hinweg ist die tropische atlantische Zirkulation eng verbunden mit regionalen Klima- und Niederschlagschwankungen in den angrenzenden Ländern Afrikas und Südamerikas. Deshalb wird neben den Randstrommessungen vor Brasilien seit 2001 eine Verankerung direkt am Äquator im zentralen Atlantik bei 23°W betrieben. Sie wurde für einige Jahre zu einem Beobachtungssystem zwischen 2°N und 2°S erweitert, um die Ost-West-Transporte insbesondere vom Äquatorialen Unterstrom (EUC), der stärksten Strömung im tropischen Atlantik, zu erfassen. Mit dieser Langzeitverankerung können an dieser Stelle erstmals auch dekadische Schwankungen mit direkten Strömungsmessungen untersucht werden.

Diese räumlich getrennten Systeme ermöglichen es, Zirkulationsänderungen im westlichen Randstromsystem mit denen im östlichen tropischen Atlantik zu verknüpfen. Sie sind Kernelemente des internationalen tropischen atlantischen Beobachtungssystems, das künftig mit Partnern aus den USA, Frankreich, Brasilien und Argentinien fortgeführt wird. Eine Erweiterung der Messungen bei 11°S auf den afrikanischen Schelf vor Angola (Abb. 3) ermöglichte bereits erste Abschätzungen der Atlantikzirkulation in den Tropen, die für den Vergleich mit ähnlichen Abschätzungen und Modelluntersuchungen zur Verfügung stehen.

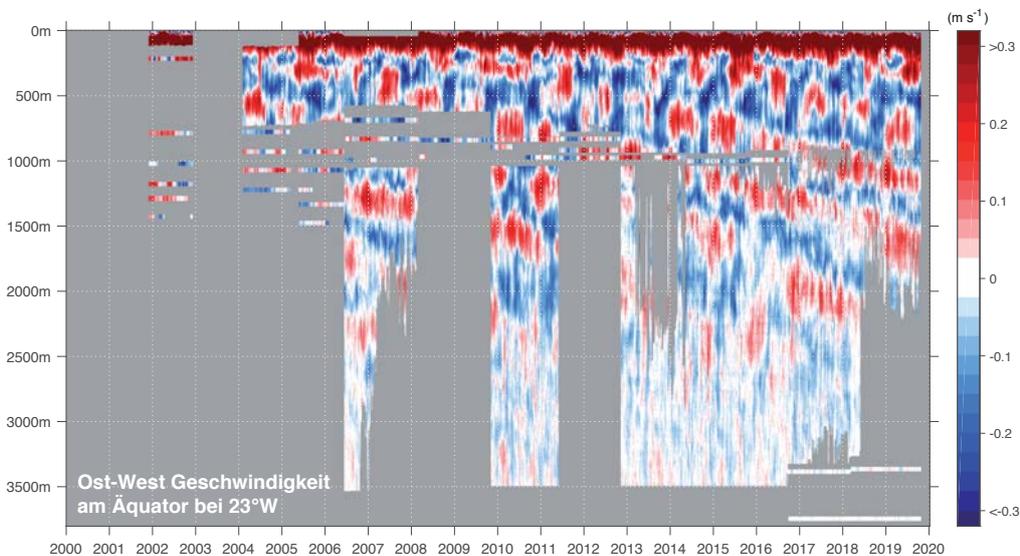


Abbildung 12. Zeitliche Veränderung der mittleren Geschwindigkeit entlang des Äquators bei 23°W (rot nach Osten, blau nach Westen). Grau: Zeiträume und Tiefenbereiche ohne Messungen. Die stärkste Strömung in etwa 80 Metern Tiefe ist der ostwärts strömende Äquatoriale Unterstrom EUC (dunkelrot). Die Strömungsvariabilität am Äquator wird durch jahreszeitliche Schwankungen und durch Schwankungen mit einer Periode von etwa 4,5 Jahren bestimmt. Starke, mit der Tiefe die Richtung wechselnde Strömungen bestimmen die mittleren Tiefen.

Der tropische Atlantik ist durch besonders schnelle Strömungen entlang des Äquators gekennzeichnet. Die stärkste Strömung ist der EUC mit einer Kerntiefe zwischen 50 und 100 Metern, der Wasser vom Westrand nach Osten transportiert (Abb. 12). Der EUC versorgt dabei die Auftriebsgebiete am Äquator sowie vor Afrika und trägt wesentlich zur Nährstoffversorgung in diesen biologisch hochproduktiven Gebieten bei. Die Strömung ist Teil des oberen Zweiges der Atlantikzirkulation. Gleichzeitig gehört sie zur sogenannten subtropischen Zelle, die Wasser in den oberen 300 Metern zwischen Äquator und Subtropen vertikal umwälzt, und ist Teil der beckenweiten windgetriebenen Zirkulation.

Transportschwankungen können also verschiedene Ursachen haben. Am Äquator wird die Zirkulation insbesondere durch das Klimaphänomen „atlantischer Niño“ im Bereich des EUC und durch mehrjährig fluktuierende Tiefenströmungen beeinflusst. Der atlantische Niño führt analog zum pazifischen El Niño zu Oberflächentemperaturschwankungen im östlichen äquatorialen Atlantik, die wiederum mit einer Variabilität des Niederschlags im Golf von Guinea vor Afrika und im Bereich der innertropischen Konvergenzzone einhergehen.

Die Transportzeitreihen des Nordbrasilstroms und des tiefen westlichen Randstroms (Abb. 13), die den warmen und kalten Pfad der Atlantikzirkulation im tropischen Atlantik bilden, zeigen bisher keine langfristigen Veränderungen, die mit der Klimaerwärmung einhergehen. Allerdings konnten langfristige Schwankungen in den Eigenschaften der Wassermassen im Nordbrasilianischen Unterstrom festgestellt werden, die auf einen verstärkten Einstrom von salzreichem Wasser aus dem Indischen Ozean zurückgeführt werden. Änderungen in Temperatur und Salzgehalt des Tiefenwassers bei 11°S sind mehrheitlich auf Schwankungen zurückzuführen, die vor etwa 30 Jahren in oder nahe den Bildungsgebieten des Tiefenwassers stattgefunden haben.

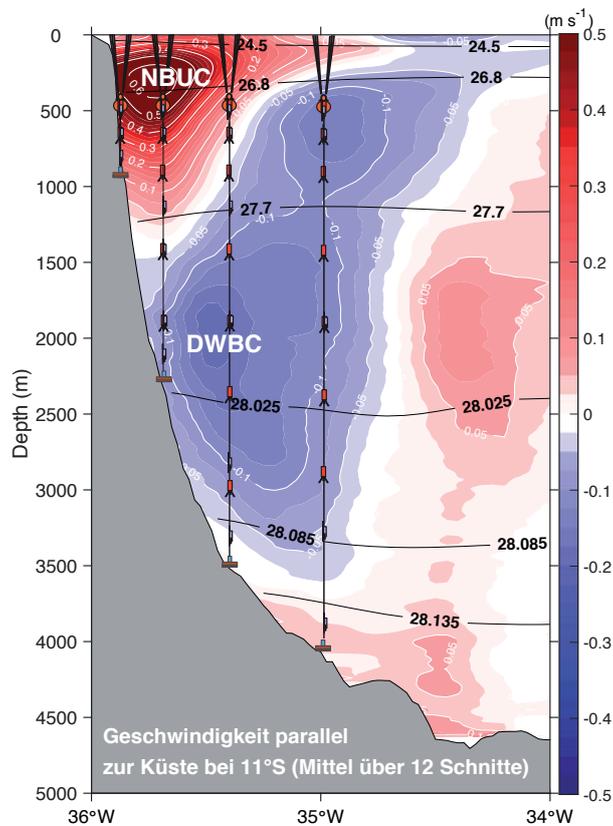
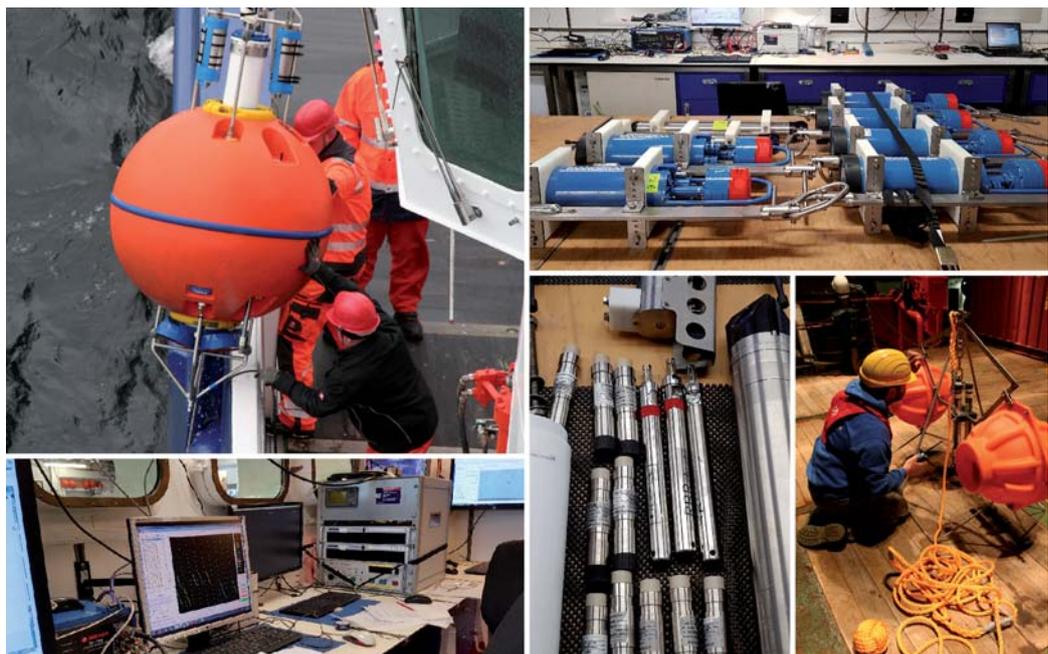


Abbildung 13. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus Schiffsmessungen parallel zur Küste bei 11°S vor Brasilien in Metern pro Sekunde (rot nach Norden, blau nach Süden). Das Hauptsignal des Nordbrasilianischen Unterstroms (NBUC) ist im Mittel in einer Wassertiefe von 200 bis 300 Metern zu finden (dunkelroter Bereich). Der tiefe Randstrom (DWBC) hingegen befindet sich unterhalb des Nordbrasilstroms im Tiefenbereich zwischen 1.200 und 3.500 Metern. Die Verankerungen sind so platziert, dass sie beide Strömungen gut erfassen.



3 Schiffsmessungen

Die Langzeit-Beobachtungssysteme für die Atlantikzirkulation reichen alleine nicht aus, um die Änderungen in der Atlantikzirkulation zu verstehen. Die Transportmessungen an den wenigen Stellen, an denen sie aufrechterhalten werden können, müssen in einen größeren räumlichen Kontext eingebunden werden, um zum Beispiel zu erkennen, wie sich die Wärmespeicherung im Atlantik oder atlantikweite Zirkulationsmuster verändern. Deshalb sind Expeditionen mit Forschungsschiffen nicht nur für den technischen Erhalt der Beobachtungssysteme wichtig, sondern auch für die Interpretation der Transportschwankungen.

Wissenschaftliche Expeditionen, vor allem mit der deutschen Forschungsschiffflotte (zum Beispiel mit FS Meteor, FS Maria S. Merian und bis vor Kurzem FS Poseidon), bilden ein wichtiges Standbein für die Einrichtung und Aufrechterhaltung der Langzeit-Observatorien. Während ein Großteil der verankerten Sensoren nur in der Tiefe messen kann, in der sie installiert sind, lassen sich vom Schiff aus durch hochgenaue Sensoren Daten von der Wasseroberfläche bis zum Meeresboden erfassen. Sie liefern an Ort und Stelle Informationen beispielsweise über die Strömungsgeschwindigkeit in vertikalen Abständen von 4 bis 50 Metern. Diese Daten stellen eine wichtige Momentaufnahme des Ozeans dar. Wiederholte Schiffsreisen entlang der gleichen Messlinie geben Auskunft über das Mittel und die Variabilität der ozeanischen Zirkulation.

Auf Schiffsexpeditionen werden auch Parameter gemessen, für die es bislang keine verankerbaren Sensoren gibt. Von großer Wichtigkeit sind die Messung von Spurengasen wie FCKW aus Wasserproben. Diese industriell hergestellten Gase werden in die Atmosphäre eingetragen, wo ihre Konzentration über Jahrzehnte kontinuierlich angestiegen ist. Die Gase gelangen von der Atmosphäre in das Oberflächenwasser. In den Ozeanregionen, in denen das Oberflächenwasser so dicht wird, dass es absinken kann, gelangen die Gase in große Tiefen und breiten sich dort aus. Diese Eigenschaft lässt sich ausnutzen. Je länger der Zeitpunkt des Absinkens zurückliegt, desto geringer sind die Konzentrationen des Gases, sodass man aus den Konzentrationen der Spurengase im Ozeaninneren ein Alter bestimmen kann. Mit „Alter“ ist die Zeit gemeint, die seit dem Abtauchen des Wassers von der Oberfläche verstrichen ist (Abb. 14). Diese Daten sind für die Langzeitbeobachtungen der Atlantikzirkulation von großer Bedeutung. Sie zeigen, auf welchen Raum- und Zeitskalen die an verschiedenen Orten gemessenen Ozeansignale miteinander verbunden sind und wie lokale Signale mit beckenweiten Veränderungen zusammenhängen.

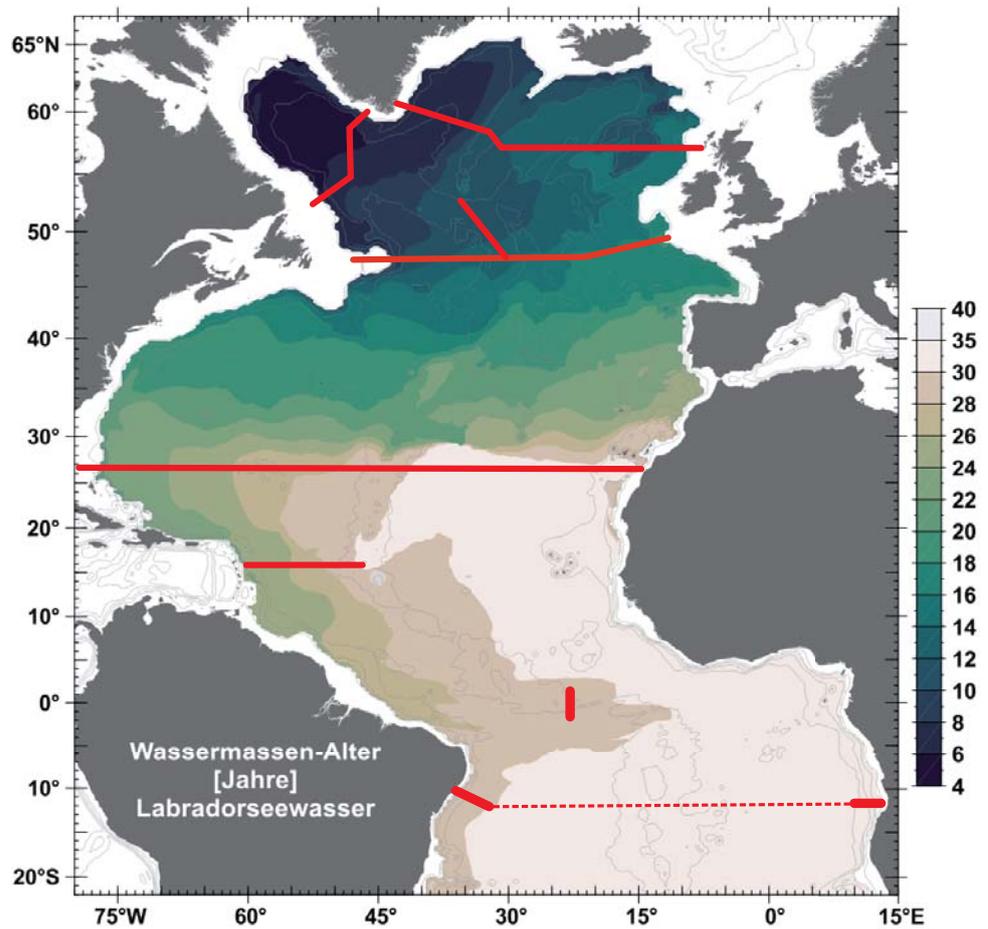


Abbildung 14. Altersverteilung von Labradorseewasser (LSW), das zwischen Kanada und Grönland gebildet wurde (siehe auch graues Oval in Abb. 1) und Teil des tiefen Zweiges der Atlantikzirkulation ist. Es ist am jüngsten in der Labradorsee und Umgebung, da es dort von der Oberfläche in die Tiefe sinkt. Die wichtigsten und schnellsten Ausbreitungspfade des LSW zeichnen sich durch junge Wassermassenalter aus. Es dauert etwa 25 Jahre, bis dieses Tiefenwasser auf dem schnellsten Weg (dem westlichen Randstrom) den Äquator erreicht.



4 Beobachtungssysteme unter dem Eis

Der Arktische Ozean steht schon seit Langem im Zeichen des Klimawandels. Die Temperaturerhöhung ist zwei- bis dreimal so groß wie im Rest der Welt; die Dicke und die Ausdehnung des Meereises haben bereits dramatisch abgenommen. Zudem schmilzt der grönländische Eispanzer immer schneller ab und trägt zusätzliches Süßwasser in den Atlantik ein. Beides hat noch nicht abschätzbare Folgen für die Atlantikzirkulation. Zusätzliches Süßwasser verringert den Salzgehalt. Reduziert sich der Salzgehalt in den Regionen, in denen Wasser aus der Oberfläche in die Tiefe absinkt, dann wird das Absinken erschwert oder sogar gänzlich verhindert.

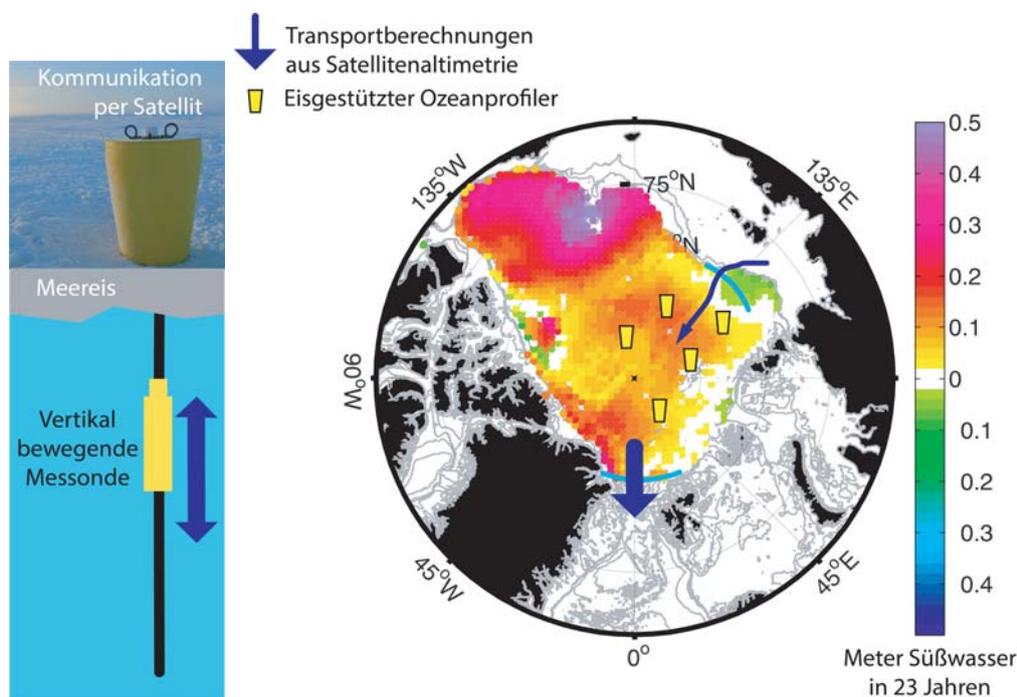


Abbildung 15. Links: Messverfahren von im driftenden Meereis verankerten Messbojen für Temperatur- und Salzgehalt. Rechts: Änderung des Süßwassergehalts im Arktischen Ozean in Metern zwischen 1992 und 2014. Rote und lilafarbene Flächen zeigen eine Zunahme des Süßwassers in diesen 23 Jahren, grüne Bereiche eine Abnahme. In fast allen Regionen der Arktis ist eine Zunahme von Süßwasser und damit eine Verringerung des Salzgehalts zu beobachten. Der dicke dunkelblaue Pfeil zeigt den Transport von Süßwasser durch die Framstraße. Der dünne dunkelblaue Pfeil zeigt, dass von Sibirien aus Süßwasser durch Flüsse in den Arktischen Ozean eingetragen wird und sich auf den flachen Schelfen Eis bildet. Diese Transporte können durch Satellitenmessungen der Meereshöhe bestimmt werden. Die gelben Markierungen mit schwarzem Rand zeigen die im Meereis befestigten Messbojen.

In Ozeanregionen, die zumindest saisonal mit Eis bedeckt sind, sind Sensoren im Einsatz, die in einer Meereisscholle verankert werden. Sie driften mit dem Eis und nehmen in gewissen Zeitabständen ein Tiefenprofil von Temperatur und Salzgehalt unter der Eisdecke auf (Abb. 15, links). Diese eisgestützten Bojen werden in internationaler Zusammenarbeit vom AWI in ein- bis zweijährigem Turnus ausgebracht. Mit diesen Messungen werden dann die räumliche Salzgehaltsverteilung und ihre Schwankungen unter dem Eis abgeschätzt. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der Süßwassergehalt im Arktischen Ozean unter der Eisdecke erhöht (Abb. 15, rechts), aber noch ist der Transport in den Atlantik unbeeinflusst. Die Süßwasseränderungen beeinflussen allerdings die Zirkulation innerhalb der Arktis, und diese Änderungen sind auch in den Satellitenmessungen erkennbar.



5 Datensynthese

Direkte Ozeanbeobachtungen sind absolut notwendig, um die Zirkulation und deren Änderungen zu erfassen. Sie reichen aber alleine nicht aus, um das Klimasystem zu verstehen und Änderungen vorherzusagen. Hier kommt nun eine Kombination von Beobachtungen mit Ozeanmodellen mittels Datenassimilation ins Spiel (Abb. 16). Für die Wettervorhersage ist dies eine etablierte Methode. Dabei werden dem Wettermodell etwa alle sechs Stunden Messungen aus der Atmosphäre und der Erdoberfläche hinzugefügt, um die nächsten Vorhersagen zu starten.

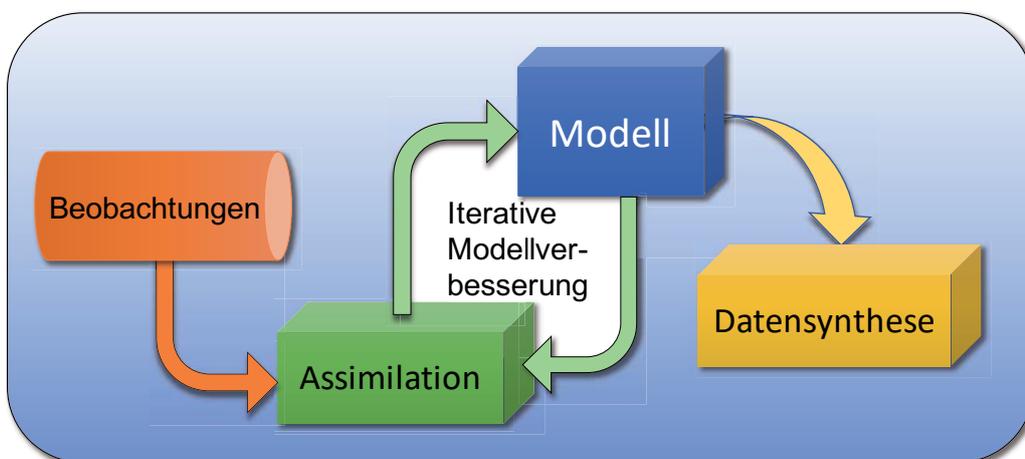


Abbildung 16. Schema für die Modellverbesserungen durch Datenassimilation.

Datenassimilation wird seit längerem auch sehr erfolgreich für den Ozean angewendet, allerdings weniger in Hinblick auf Vorhersagen, sondern mehr mit dem Fokus auf der Datensynthese, das heißt der gemeinsamen Auswertung der existierenden Beobachtungen. Dabei steht die Interpretation und von sich tatsächlich ereignenden Änderungen in der Zirkulation im Vordergrund. Die Datensynthese liefert auch einen Anfangszustand des Ozeans, der zum Starten (Initialisierung) von Klimavorhersagen benötigt wird (siehe Kapitel 6). Dabei dient die Datenassimilation dazu, numerische Modelle optimal an Beobachtungen anzupassen, um dann das Modell dynamisch auszuwerten.

Datensynthesen sind mittlerweile ein integraler Teil eines jeden Ozean-Beobachtungssystems. Besonders wichtig sind dabei global vorhandene Messungen wie zum Beispiel die Satellitenmessungen der Höhe der Meeresoberfläche und die Messungen der Temperatur- und Salzgehaltsverteilung in den oberen 2.000 Metern des Ozeans durch die etwa 4.000 Argo-Tiefendrifter. Das an der Universität Hamburg betriebene Synthesesystem basiert auf dem in den USA entwickelten ECCO-Modell und wird eingesetzt, um dynamische Ozeansynthesen über mehrere Dekaden hinweg zu erstellen. Die Ergebnisse haben sich als GECCO einen Namen gemacht und sind nun in dritter Generation erhältlich (Abb. 17), in die Daten aus den Langzeit-Beobachtungssystemen mit eingeflossen sind.

In Zeitreihen seit den 1960er-Jahren fällt auf, dass es der Atlantik ist, der einen großen Speicher für Wärme darstellt. Das unterstreicht, warum es so wichtig ist, den Atlantik und seine Änderungen im Klimageschehen zu verfolgen, um daraus Konsequenzen für Europa abzuschätzen.

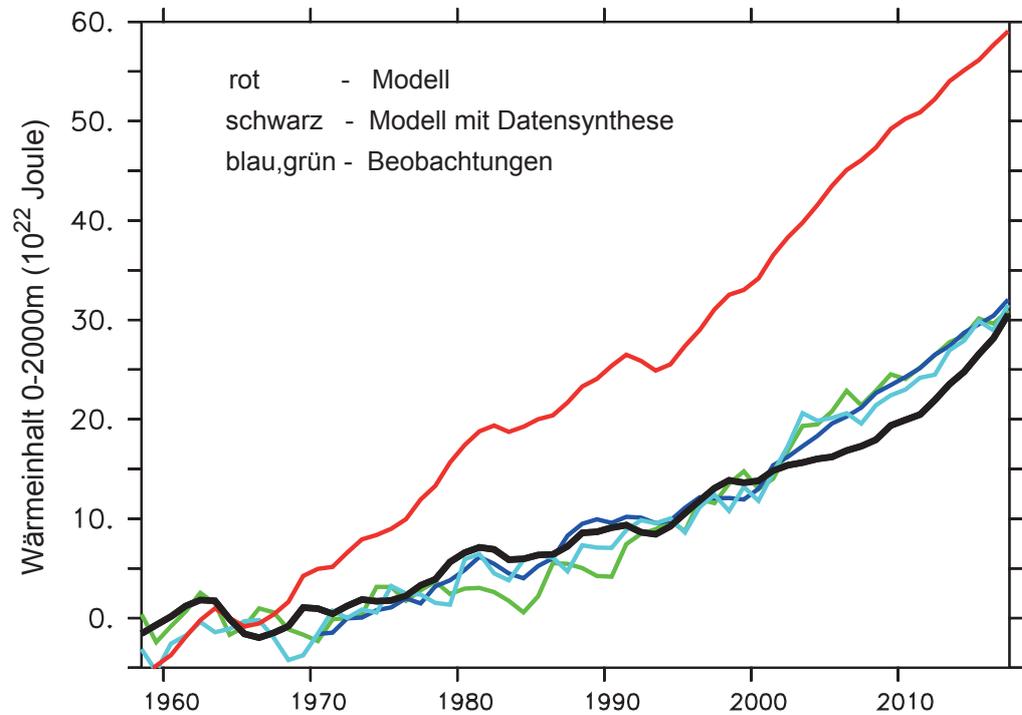


Abbildung 17. Änderungen des globalen Wärmeinhalts des Ozeans im Tiefenbereich 0 bis 2000 Meter bezogen auf den Mittelwert der 1960er-Jahre. Durch Datensynthese können Modelle die beobachteten Veränderungen sehr viel besser wiedergeben, wie hier in GECCO₃, der aktuellsten Version des Hamburger Syntheseprojekts, gezeigt wird. Die Beobachtungen (blaue, grüne und türkisfarbene Linien) zeigen drei verschiedene Methoden zur Bestimmung globaler Werte aus lokalen Einzelmessungen. Der Anstieg des Wärmeinhalts ist durch den globalen Temperaturanstieg verursacht.

6 Klimamodellierung

Klimaänderungen nehmen wir über die Atmosphäre wahr, sie haben aber ihre Ursache oftmals im Ozean. Unter einem Klimamodell versteht man ein Modellsystem, das die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis beschreibt. Klimamodelle sind das Standardwerkzeug, um das Klima der Zukunft vorherzusagen. Dazu müssen sie initialisiert werden, das heißt, sie müssen den gegenwärtigen Zustand des Klimas kennen. Gerade im Ozean fehlen flächendeckende Messungen; deshalb ist die Datenassimilation (siehe Kapitel 5) unverzichtbar, um die wenigen Daten räumlich und zeitlich dynamisch konsistent zu interpolieren. Die so erstellten Synthesen liefern die Startwerte für die Klimavorhersagen.

Klimamodelle dienen auch dazu, die Abläufe und Zusammenhänge im Klimasystem besser zu verstehen, Ozeanbeobachtungen zu interpretieren und die natürliche Schwankungsbreite des Klimas abzuschätzen. Letzteres ist wichtig, um ein sich entwickelndes anthropogenes Klimasignal, wie etwa eine mögliche Abschwächung der Atlantikzirkulation infolge der globalen Erwärmung, möglichst frühzeitig von der natürlichen Klimavariabilität unterscheiden zu können.

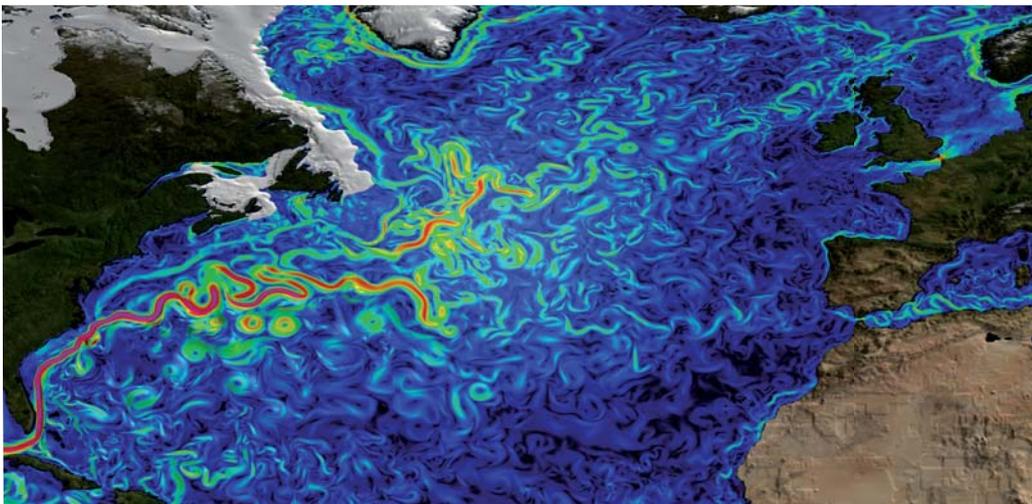


Abbildung 18. Modellerte Oberflächengeschwindigkeiten im Nordatlantik in einem modernen Ozeanmodell. Die schnellsten Strömungsgeschwindigkeiten sind in Rot dargestellt, die langsamsten in Blau.

Klimamodelle können allerdings nur eine grobe Annäherung an die Wirklichkeit sein (Abb. 18). Es ist daher von außerordentlicher Wichtigkeit, die Modelle anhand von Messungen zu überprüfen. Auf den Zeitskalen, auf denen sich die globale Erwärmung entwickelt, spielt der Ozean eine herausragende Rolle für die zu erwartenden Klimaänderungen. Dies ist unter anderem wegen seiner großen thermischen Trägheit und seiner fundamental wichtigen Rolle im Kohlenstoffkreislauf der Fall, und auch weil Änderungen der Meeresströmungen im erheblichen Maße die regionalen Auswirkungen des Klimawandels bestimmen.

Aus diesem Grund haben gerade die ozeanischen Langzeitmessungen für die Klimamodellierung eine enorm wichtige Bedeutung. Sie bieten die Möglichkeit, die Modelle zu überprüfen, einerseits im Hinblick auf die zeitlich gemittelte Ozeanzirkulation und andererseits im Hinblick auf die Variabilität. Ein wichtiges Ergebnis der bisherigen Langzeitmessungen ist die Dokumentation der außerordentlich starken Schwankungen der Ozeanzirkulation auf Zeitskalen bis zu Jahrzehnten, insbesondere auch in der Tiefsee, die bis jetzt noch nicht genügend gut in den Klimamodellen dargestellt wird.

7 Fazit

Seit mehr als 30 Jahren ist die besondere Bedeutung des Ozeans für das globale und regionale Klima bekannt. In den Berichten des Weltklimarats (IPCC) ist das aktuelle Wissen über den Zustand und die Zukunft der Atlantikzirkulation immer Bestandteil der Zusammenfassung für Entscheidungsträger. Im Jahr 2019 wurde zusätzlich ein IPCC-Sonderbericht veröffentlicht, der die Rolle der eisbedeckten Regionen und des Ozeans im Klimawandel besonders tiefgreifend behandelt. Die zu erwartenden Auswirkungen einer schwächeren Atlantikzirkulation auf Änderungen des Klimas und der Lebensbedingungen wurden darin ebenfalls thematisiert und sind in der vorliegenden Publikation in einer deutschsprachigen Übersicht (Abb. 2) vorgestellt.

Trotz dieser Bedeutung für Gesellschaft und Politik gibt es noch kein stabil und auf Dauer angelegtes Beobachtungssystem im Atlantik, mit dem der Zustand und die Veränderungen der Zirkulation verlässlich und kontinuierlich gemessen werden können. Globale Programme wie das Global Ocean Observing System (GOOS) haben den internationalen Rahmen für diese Systeme geschaffen, es fehlt jedoch an finanziellen und institutionellen Möglichkeiten, die Langzeitbeobachtungen weiterzuentwickeln und nachhaltig zu betreiben. Die BMBFVerbundprojekte NORDATLANTIK und RACE haben dazu exzellente Grundlagen geliefert.

Die systematische Auswertung und Einbettung der Zirkulationsmessungen in Ozean- und Klimamodelle durch Datensynthese sind weiterhin im Aufbau begriffen. Eine besondere Schwierigkeit ist, dass Zirkulationsmessungen nur punktuell vorhanden sind und nicht leicht in die Modelle integriert werden können. Erst wenn es gelingt, alle gemessenen Daten und Informationen in die Ozeanmodelle zu assimilieren, lassen sich verlässlichere Indikatoren und Aussagen über die Veränderlichkeit der Atlantikzirkulation ermitteln und diese als gesicherte Informationsbasis den Entscheidungsträgern zeitnah zur Verfügung stellen. Auch diesbezüglich haben die bereits erwähnten Verbundprojekte Erfolge erreicht, aber die operationelle Umsetzung ist über kurzfristige Projektförderungen kaum zu realisieren.

Auf der Seite der erkenntnisgetriebenen Wissenschaft leisten Langzeit-Beobachtungssysteme wichtige Dienste, da man nur so Änderungen auf Zeitskalen von Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten erfassen kann.

Mit diesen Informationen können viele offene Fragen besser und genauer beantwortet werden:

- Wie stark sind eigentlich die verschiedenen Komponenten der Atlantikzirkulation?
- Sind die Schwankungen miteinander verbunden?
- Und in welchem Ausmaß sind die Änderungen mit dem durch die Menschheit verursachten Klimawandel verknüpft?
- Welche Auswirkungen gibt es in Deutschland und in der Nordsee?

Die Beobachtungen, insbesondere der Ozeantransporte, erlauben uns, quantitative Aussagen über die Realitätsnähe der Atlantikzirkulation in den Ozean- und Klimamodellen zu treffen. Dadurch können wir die zukünftigen Veränderungen des Ozeans besser modellieren und genauere Prognosen über die zukünftigen Auswirkungen auf Klima, Meeresspiegel und die Lebensbedingungen liefern.

Wir brauchen einen Paradigmenwandel in der Ozeanbeobachtung. Das bisherige, rein wissenschaftsgetriebene und über kurzzeitige Projekte geförderte Beobachtungs- und Analysesystem muss in ein nachhaltiges operationelles Beobachtungs- und Modellsystem überführt werden. Es muss kontinuierlich durch die Wissenschaft im Rahmen von Projekten und Initiativen optimiert und präzisiert und gemeinsam mit anderen Akteuren im Bereich der operativen Dienste betrieben werden. Die UN-Dekade der Ozeanforschung 2021 bis 2030 für nachhaltige Entwicklung bietet eine besondere Chance, diesen Wandel in der Breite der Ozeanforschung mit der Gesellschaft zu diskutieren und hoffentlich auch zu vollziehen.

Glossar

Akustische Strömungsmesser: Dabei macht man sich die Frequenzverschiebung des Schallsignals durch den Dopplereffekt zunutze. Dieser Dopplereffekt entsteht, wenn sich zum Beispiel ein Auto mit Sirene einem Fußgänger nähert. Die Tonlage der Sirene verändert sich hörbar, wenn sich das Fahrzeug wieder entfernt, und man könnte aus dieser Frequenzveränderung die Geschwindigkeit des Autos berechnen. Es gibt zwei verschiedene Instrumente für die Ozeanforschung: Eines misst die Geschwindigkeit in der Tiefe, in der es verankert wurde. Der Akustische Doppler Profilstrommesser (ADCP) misst die Geschwindigkeit über einen Tiefenbereich von mehreren Hundert Metern.

Argo-Tiefendrifter: Autonome profilierende Driftbojen mit der Fähigkeit, im Wasser auf- und abzustiegen und dabei die Temperatur- sowie die Salzgehaltsverteilung in den oberen 2.000 Metern des Ozeans zu messen. Im Argo-Programm werden von mehr als 30 Nationen (darunter auch Deutschland) etwa 4.000 Tiefendrifter in allen Ozeanen gemeinsam betreut und regelmäßig ersetzt.

Atlantikzirkulation: Atlantischer Teil der globalen Umwälzbewegung des Ozeans. Sie ist auch unter dem Namen „Golfstromzirkulation“ oder „Atlantische Meridionale Umwälzbewegung“ (im englischen abgekürzt AMOC) bekannt.

Datenassimilation: Prozess, durch den Zirkulationsmodelle an Beobachtungen optimal angepasst werden. Dabei wird die Abweichung des Modells von den Beobachtungen mathematisch minimiert, wobei die Unsicherheiten in dem Modell und in den Beobachtungen berücksichtigt werden. Als Endergebnis erhält man ein Modell, das die Realität besser wiedergibt.

Dichte des Meerwassers: Aus sehr genauen Messungen der Temperatur und des Salzgehaltes wird die Dichte des Meerwassers berechnet. Horizontale Dichteunterschiede führen zu Druckunterschieden und damit zu Strömungen. Dieses Prinzip gilt auch in der Atmosphäre: Luftdruckunterschiede erzeugen Winde.

Nordatlantische Oszillation (NAO): Schwankungen des Luftdruck-Gegensatzes zwischen dem Azorenhoch im Süden und dem Islandtief im Norden des Atlantiks. Im nordatlantischen Raum ist die NAO das dominierende Muster der winterlichen Klimavariabilität. Die NAO beeinflusst entscheidend Wetter- und Klimaschwankungen über dem östlichen Nordamerika, dem Nordatlantik und Europa.

Niño, atlantischer: Klimavariabilität, die durch das Auftreten von warmem Wasser im östlichen äquatorialen Atlantik während des Nordsommers gekennzeichnet ist. Analog zum El Niño im Pazifik spielt die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Der atlantische Niño tritt im Abstand von einigen Jahren auf und hat einen wesentlichen Einfluss auf die Niederschläge im Bereich des Golfes von Guinea oder im nördlichen Südamerika, aber auch auf Planktonwachstum und Biologie im äquatorialen Ozean.

Innertropische Konvergenzzone: Tiefdruckband, in dem die Passatwinde der Nord- und Südhemisphäre aufeinandertreffen. Im Atlantik befindet sich diese Zone im Mittel nördlich des Äquators. Hier entsteht durch Aufsteigen von Luftmassen starke Quellbewölkung, die mit ergiebigen Niederschlägen verbunden ist.

Die innertropische Konvergenzzone wandert im Jahresverlauf nach Norden (nördlichste Position im August) und wieder nach Süden (südlichste Position im März).

Windgetriebene Zirkulation: Globale Ozeanzirkulation, die durch Wind angetrieben wird. Sie ist gekennzeichnet durch teilweise tiefreichende ozeanweite Wirbelsysteme wie den subpolaren oder subtropischen Wirbel, aber auch durch starke oberflächennahe Ost-West-Strömungen in den Tropen.

Verzeichnis der Abbildungen und Fotografien

Umschlag:	<i>M. Müller/GEOMAR</i>	
Foto	<i>S. Röhl</i>	4
Abbildung 1	<i>D. Kieke/IUP Uni Bremen</i>	5
Abbildung 2	<i>Aus: IPCC-Sonderbericht „Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima“, Abb. 6.10 (SROCC2019, www.ipcc.ch) Nachgezeichnet & übersetzt von D. Kieke/IUP Bremen</i>	7
Foto	<i>J. Karstensen/GEOMAR</i>	8
Abbildung 3	<i>D. Kieke/IUP Uni Bremen und MARUM</i>	9
Fotos	<i>D. Kieke/ IUP Uni Bremen. AWI/Thomas Krumpfen</i>	10
Abbildung 4	<i>P. Handmann/GEOMAR</i>	11
Abbildung 5	<i>T. Kanzow/AWI</i>	12
Abbildung 6	<i>T. Kanzow/AWI</i>	13
Foto	<i>S. Arndt/Alfred-Wegener-Institut</i>	13
Abbildung 7	<i>K. Jochumsen/BSH Hamburg</i>	14
Fotos	<i>D. Kieke IUP/Uni Bremen</i>	15
Abbildung 8	<i>J. Karstensen/GEOMAR</i>	16
Abbildung 9	<i>D. Kieke/IUP Uni Bremen</i>	17
Abbildung 10	<i>D. Kieke/IUP Uni Bremen</i>	18
Foto	<i>A. Roessler/IUP Uni Bremen</i>	19
Abbildung 11	<i>M. Müller, J. Herrford/GEOMAR</i>	20
Abbildung 12	<i>F.P. Tuchen, P. Brandt/GEOMAR</i>	21
Abbildung 13	<i>R. Hummels/GEOMAR</i>	22
Fotos	<i>D. Kieke IUP/Uni Bremen</i>	22
Abbildung 14	<i>D. Kieke/IUP Uni Bremen</i>	24
Foto	<i>Christian Mertens/IUP Uni Bremen</i>	24
Abbildung 15	<i>B. Rabe/AWI Bremerhaven</i>	25
Foto	<i>Alfred-Wegener-Institut/S.Hendricks</i>	26
Abbildung 16	<i>A. Köhl/CEN Uni Hamburg</i>	27
Abbildung 17	<i>A. Köhl/CEN Uni Hamburg</i>	28
Abbildung 18	<i>C. Böning, K. Getzlaff/GEOMAR</i>	29

Weiterführende Literatur

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

Zukunft der Golfstromzirkulation - Fakten und Hintergründe aus der Forschung. Deutsches Klima-Konsortium/Konsortium Deutsche Meeresforschung (Hrsg.). Berlin, 2017.

Zukunft der Meeresspiegel - Fakten und Hintergründe aus der Forschung. Deutsches Klima-Konsortium/Konsortium Deutsche Meeresforschung (Hrsg.). Berlin, 2019.

Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Ein Sonderbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Pörtner, H.-O. et al (Hrsg.). Deutsche Übersetzung: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, Januar 2021. Erhältlich unter: <https://www.de-ipcc.de/252.php>

RACE Projekt - Informationen und Erklärungen zur Atlantikzirkulation: <https://race-synthese.de/de/entdecke>

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Peter Brandt, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

Dr. Rebecca Hummels, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Dr. Kerstin Jochumsen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg

Prof. Dr. Torsten Kanzow, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), Bremerhaven

Dr. Johannes Karstensen, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Dr. Dagmar Kieke, Institut für Umweltphysik (IUP) und MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

Dr. Armin Köhl, CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg

Prof. Dr. Mojib Latif, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

Dr. Benjamin Rabe, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), Bremerhaven

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

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

Prof. Dr. Martin Visbeck, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

Über uns

Deutsches Klima-Konsortium (DKK)

Das Deutsche Klima-Konsortium ist ein Wissenschaftsverband und 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 der Sicht von Expertinnen und Experten.

Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM)

Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt als Verband 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.

Strategiegruppe „Ozeanzirkulation und Klima“ von DKK und KDM

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. In interdisziplinärer Zusammenarbeit der Klima- und Meeresforschung identifiziert sie die drängenden Fragen im Zusammenhang mit der Rolle der Ozeane beim Klimawandel und entwickelt aus der Forschung heraus die Wissensbasis für politische Entscheidungen

Finanzierung

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierte im Rahmen der Projektförderung von 2006 bis 2012 das Forschungsvorhaben „Nordatlantik“, von 2012 bis 2018 das Vorhaben „Regionale Atlantikzirkulation im globalen Wandel (RACE)“ und von 2019 bis 2020 das Vorhaben „RACE Synthese“. Diese Verbünde hatten die Atlantikzirkulation und ihre Auswirkungen als Forschungsschwerpunkt und gaben der Forschung ihren strukturellen Rahmen. Weitere Mittel wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur Verfügung gestellt. Besonders wichtig war auch die finanzielle, technische und personelle Unterstützung durch die beteiligten Institute. Diese Broschüre wurde durch BMBF-Mittel an die RACE-Synthese-Koordinatorin Monika Rhein finanziert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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
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
www.deutsche-meeresforschung.de

Redaktion

Dr. Jan-Stefan Fritz
Sebastian Konitzer

Gestaltung: VISUV, Greifswald

gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier



Berlin, August 2021

