



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Klimaforschung im Ozean

Veränderte Ozeanströmungen und zukünftiges Klimageschehen

**FORSCHUNG**





Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Klimaforschung im Ozean

Veränderte Ozeanströmungen und zukünftiges Klimageschehen



# Vorwort



Das Klima der Erde unterliegt einem ständigen Wandel. Doch zum ersten Mal sind wir heute in der Lage, im Voraus zu erkennen, dass wir in den kommenden Jahrzehnten sowohl global als auch regional mit außergewöhnlichen Klimaveränderungen zu rechnen haben. Nur mit einem präzisen Wissen über die klimarelevanten Prozesse werden wir in der Lage sein, den Klimawandel zu begrenzen und uns an das sich ändernde Klima anzupassen.

Weil die Ozeane die größten Kohlenstoff- und Wärmespeicher im Klimasystem der Erde sind, spielen sie eine herausragende Rolle im Klimageschehen. Sie heizen und kühlen die Atmosphäre und bestimmen maßgeblich das Wetter und Klima der angrenzenden Kontinente. Änderungen der Meereszirkulation können erhebliche Auswirkungen auf das regionale Klima und damit auf die Lebensbedingungen an Land haben.

Veränderungen im Temperaturhaushalt des Meeres oder in der Fähigkeit, CO<sub>2</sub> aufzunehmen, werden durch die Meeresströmungen global verteilt und haben Auswirkungen auf unser Klima. Erst aus der Kenntnis des komplizierten Zusammenspiels zwischen Ozean, Atmosphäre und Land können wir ableiten, wie sich zukünftig unser Klima in Europa, das insbesondere durch den Nordatlantik bestimmt wird, der Meeresspiegel oder die marinen Ökosysteme an unseren Küsten entwickeln werden.

Die deutsche Meeres- und Polarforschung liefert wichtige Grundlagen für Klima- und Ozeanvorhersagen. Diese Forschung ist Teil der Zukunftsvorsorge für unsere Gesellschaft. Darum ist sie ein Schwerpunktthema in dem 2010 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung neu aufgelegten Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ (FONA). Die vorliegende Broschüre greift die wichtigsten klimarelevanten Fragen der Meeres- und Polarforschung auf, informiert über die aktuellen wissenschaftlichen Ergebnisse und erläutert die gesellschaftspolitische Bedeutung. Das ist unsere Agenda der nächsten Jahre für die klimarelevante Ozeanforschung und für die Forschungspolitik.

Bundesministerin für Bildung und Forschung



# Inhalt

## Vorwort

<b>Inhalt.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Ozeanzirkulation .....</b>	<b>3</b>
1.1 Die Rolle einer sich ändernden Ozeanzirkulation im Klimageschehen .....	3
1.2 Erfolge und Herausforderungen in der deutschen Ozean-Klimaforschung .....	5
<b>2. Anwendungsbeispiele mit gesellschaftlicher Bedeutung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Atlantische Zirkulation und europäisches Klima .....	7
2.2 Meeresspiegel, Variabilität und Trends .....	9
2.3 Arktisches Meereis .....	10
2.4 Ozeanische CO <sub>2</sub> -Aufnahme und Versauerung .....	12
2.5 Wechselwirkungen des Atlantiks mit der Nordsee .....	14
2.6 Beeinflussung mariner Lebewesen durch Ozeanzirkulation .....	15
<b>3. Herausforderungen an die Infrastruktur der Meeresforschung.....</b>	<b>16</b>
3.1 Beobachtungen.....	16
3.2 Ozeanmodellierung und Großrechner .....	19
3.3 Datenmanagement für Beobachtungen und Modelle .....	21
3.4 Ozean-Dienste .....	23





# 1. Ozeanzirkulation

## 1.1 Die Rolle einer sich ändernden Ozeanzirkulation im Klimageschehen



Die Weltmeere bedecken rund 70 Prozent der Erdoberfläche. Sie beherbergen das größte zusammenhängende Ökosystem des Planeten, und viel spricht dafür, dass sie auch die Geburtsstätte des irdischen Lebens waren. Für uns Menschen sind die Ozeane überdies von enormer ökonomischer Bedeutung, zum Beispiel für Tourismus, Fischerei, Aquakultur, als Transportweg oder als Rohstoffquelle. Im Klimasystem ist der Ozean mit seinen durch Sonne und Wind angetriebenen regionalen und globalen Strömungssystemen ein herausragender Faktor. Weil er große Mengen von Wärme und Gasen speichern kann, hat der Ozean bisher circa 30 Prozent des anthropogenen Kohlendioxids ( $\text{CO}_2$ ) aufgenommen; etwa 90 Prozent der Änderungen des globalen Wärmehaushalts sind im Ozean zu finden.

Die Verteilung der Wärme und den Gastransport im Wasserkörper übernehmen großräumige Meeresströmungen, bei denen man zwei von ihrer Anregung her unterschiedliche Systeme unterscheidet. Dies sind einmal die überwiegend windgetriebenen Strömungen, zu denen die beckenweiten subpolaren und subtropischen Wirbel gehören. Im Inneren der Ozeane haben diese nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Sekunde, in den westlichen Randströmen, wie im Golfstrom, werden allerdings

Geschwindigkeiten von mehr als einem Meter pro Sekunde beobachtet. Die mit diesen Systemen jeweils verbundenen Volumentransporte liegen im Bereich von 50 bis 100 Millionen Kubikmetern pro Sekunde. Das entspricht dem 500fachen Transportvolumen des Amazonas, immerhin des größten Flusses der Erde.

Die zweite Art von Strömungen bildet die globale meridionale Zirkulation, die mit einer großräumigen vertikalen Umwälzung des Ozeans verbunden ist. In hohen Breiten wird schweres Wasser erzeugt, denn dort kühlt sich das Wasser ab; außerdem erhöht sich sein Salzgehalt, weil im Meereis Süßwasser gebunden wird. Das schwere Wasser sinkt ab und breitet sich dann von der Antarktis und dem subpolaren Atlantik im Weltozean als Tiefenströmung aus. Oberflächenströmungen sorgen dafür, dass in den Quellregionen das absinkende Wasser ersetzt wird. Dadurch hat die meridionale Umwälzzirkulation für das Klima der Erde eine große Bedeutung, da die mit ihr verbundenen Wärmetransporte ungleich höher sind als jene der windgetriebenen Strömungen.

Gegenüber der Atmosphäre besitzt der Ozean ein „weitaus längeres Gedächtnis“, denn sein Wasserkörper reagiert wegen seiner großen Wärmekapazität träger auf veränderte Einträge von Wärmeenergie, und seine Strömungen fließen mit weitaus geringerer Geschwindigkeit. Deshalb ist der Ozean nicht nur wichtig für das Klima im Allgemeinen, sondern auch für die Sensitivität unseres gesamten Klimasystems gegenüber Änderungen im Antrieb. Ändert sich der Wärmetransfer vom Ozean zur Atmosphäre, zum Beispiel durch die globale Temperaturzunahme der Luft, wird der Ozean geringer abgekühlt, die Tiefenwasserproduktion lässt nach und die meridionale Umwälzbewegung schwächt sich ab. Solch eine Abschwächung kann auch durch eine zusätzliche Süßwasserzufuhr, zum Beispiel durch einen erhöhten Eintrag von grönländischem Schmelzwasser, hervorgerufen werden, da Süßwasser die Dichte des Oberflächenwassers verringert und so die Tiefenwasserbildung reduzieren kann. Modellprognosen auf der Basis von Klimaszenarien zeigten Abschwächungen der meridionalen Umwälzbewegung von bis zu 40 Prozent im Verlauf der nächsten 100 Jahre. Wie diese Abschwächung abläuft und welche Auswirkungen sie hat, ist aber mit den heutigen, grob-auflösenden Klimamodellen noch nicht detailliert zu beschreiben. Nicht

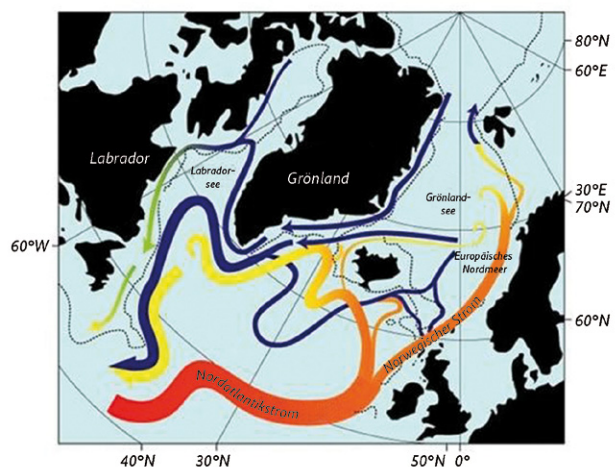
zuletzt vor dem Hintergrund möglicher Klimaveränderungen muss daher intensiv erforscht werden, wie die Ozeanzirkulation funktioniert, welche Auswirkungen von einer sich ändernden Ozeanzirkulation für die Weltbevölkerung zu erwarten sind, und wie man diese Veränderungen gegebenenfalls vorhersagen kann.

Nur im Gleichgewichtszustand weist jede Region des Weltozeans eine mittlere Zirkulation und mittlere Temperatur- und Salzverteilungen auf. Diese Mittelwerte sind allerdings von jahreszeitlichen bis zu mehrjährigen Schwankungen überlagert, die auch vom Ozean selbst beeinflusst werden, zum Beispiel durch veränderliche Zirkulation. Prägnante Klimavariationen in bestimmten geographischen Regionen wechselwirken auf besondere Art mit Atmosphäre und Eisgebieten und erzeugen so bestimmte wiederkehrende Muster. Diese werden als Klimamoden bezeichnet und besitzen Zeitskalen von einigen Jahren bis zu Jahrzehnten. Prominente Beispiele dafür sind im Pazifik El Niño, im Atlantik die Nordatlantische Oszillation sowie im südlichen Ozean die Südliche Ringmode. Sie alle haben typische Rückwirkungen zum Beispiel auf Niederschlag und Bodentemperatur und beeinflussen damit das Leben der Bevölkerung vieler Staaten.

Auf Europa bezogen können Änderungen in der Atlantikzirkulation unser Klimasystem, den Meeresspiegel an unseren Küsten und die Funktionsweise des dortigen marinen Ökosystems grundlegend beeinflussen. Konkret könnte sich das in der zukünftigen Versauerung des Atlantiks, in seiner Sauerstoffaufnahme, der Aufrechterhaltung intakter Ökosysteme und der Auswirkung auf den Fischfang zeigen. Der Einfluss der Zirkulation wird überdies am sommerlichen Rückgang des arktischen Meereises mit vier Rekordjahren in Folge (2007 – 2010) deutlich. Dieser Rückgang hat das Interesse an einer stärkeren kommerziellen Nutzung des Nordpolarmeers geweckt, wobei für Deutschland mit seiner großen Handelsflotte insbesondere die potentielle Nutzung der Nord-Ost-Passage von Bedeutung ist, die die Transportwege nach Asien deutlich verkürzen würde. Bei den zu erwartenden Veränderungen ist zu beachten, dass im gekoppelten System Ozean-Atmosphäre-Eis jede Komponente unterschiedliche Reaktionszeiten besitzt, die einzeln und im Zusammenspiel verstanden werden müssen. Dafür muss man nicht nur laufende deutsche

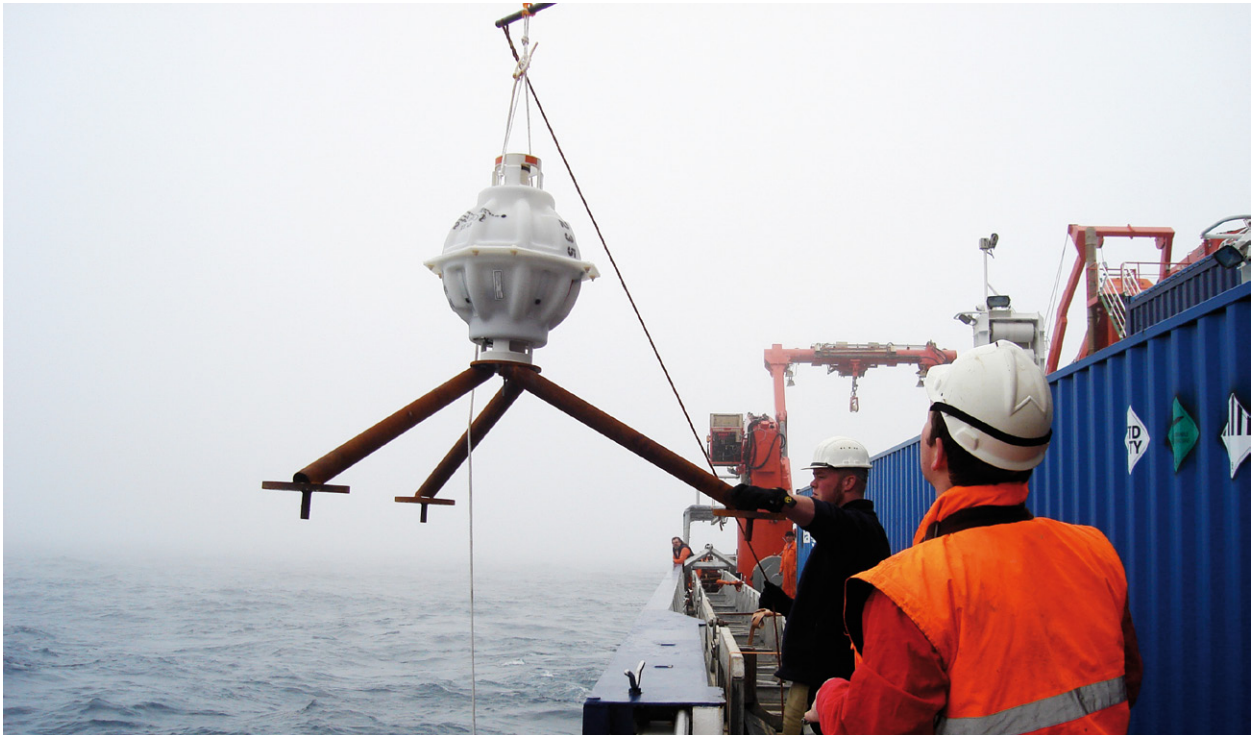
Messkampagnen weiterführen, sondern sie auch in länderübergreifender Kooperation auf besondere Schlüsselregionen erweitern.

Zirkulation und Zustand des Ozeans müssen kontinuierlich beobachtet und modelliert werden, und zwar in klimarelevanten Schlüsselregionen, wo sich geänderte äußere Einflüsse eindeutig und kurzfristig zeigen. So können die Auswirkungen des sich ändernden Strömungsfeldes abgeschätzt werden. Global wären das etwa Schwankungen im Meeresspiegel und die Aufnahme von CO<sub>2</sub> im Ozean oder Auswirkungen der Versauerung des Weltozeans. Kontinuierliche Beobachtungen und andauernde Modellierungsaktivitäten im Atlantik sind ebenfalls unabdingbar für Untersuchungen und Vorhersagen des Zusammenspiels zwischen physikalischen und bio-geochemischen Prozessen. Viele der wichtigen und klimarelevanten Prozesse finden auf relativ kleiner räumlicher Ausdehnung statt und sind verknüpft mit der Aktivität von Wirbeln im Atlantik, die vergleichbar mit Hoch- und Tiefdrucksystemen in der Atmosphäre sind. Wegen der großen Auswirkung der Zirkulation des Atlantiks auf Europa und Deutschland liegt daher ein langfristig angelegtes deutsches Forschungsprogramm zur Rolle des Ozeans im Klimageschehen im nationalen Interesse.



Schematische Darstellung der Ozeanzirkulationen im Nordatlantik  
Rot: warme Meeresströmungen, blau: kalte Meeresströmungen

## 1.2 Erfolge und Herausforderungen in der deutschen Ozean-Klimaforschung



Aussetzen eines Bodenecholotes zur Berechnung von Transport-Zeitreihen

Deutsche physikalische Ozeanographen haben über die vergangenen Dekaden hinweg wiederholt international herausragende Erkenntnisse gewonnen und sind darüber hinaus auch bekannt für ein enges Zusammenspiel zwischen Beobachtungen, Theorie und Modellierung. Im Rahmen von BMBF-Verbundprojekten und anderen nationalen und internationalen Programmen konnte die deutsche Meeresforschung in den letzten 15 Jahren

- kontinuierliche Messreihen in Schlüsselregionen des Atlantiks gewinnen, die entscheidend zum Verständnis dekadischer Ozean-Klimaschwankungen beigetragen haben,
- einen maßgeblichen Beitrag zum Aufbau des internationalen Argo-Netzwerkes von global circa 3.000 profilierenden Tiefendriftern leisten,
- durch Entwicklung hochauflösender Ozeanmodelle viele grundlegende Fragen zu den Ursachen und Wirkungszusammenhängen langjähriger Veränderungen in den Zirkulationsmustern des Atlantischen Ozeans klären,

- fundamentale Beiträge zur Verbesserung von Datenassimilationsverfahren leisten, so dass Beobachtungen zu einer dynamischen Beschreibung des sich zeitlich ändernden ozeanischen Strömungssystems zusammengeführt werden können,
- eine international führende Stellung bei der Entwicklung von dekadischen Klima-Vorhersagesystemen und deren Initialisierung durch Ozeanbeobachtungen einnehmen.

All diese Aktivitäten und nationalen Beiträge stehen seit langem im Zusammenhang und sind eng eingebettet in internationale Projekte des World Climate Research Programs (WCRP), zum Beispiel als Beiträge zum World Ocean Circulation Experiment oder dem CLIVAR Projekt (Climate Variability and Predictability). Sie leisten ebenso Beiträge zu Klimaberichten des Weltklimarates (IPCC). Deutsche Forschungsschiffe sind ein wichtiger und integraler Bestandteil der internationalen Forschungsflotte und dadurch von international sichtbarer Bedeutung.



Akustischer Strömungsmesser mit Auftriebskugeln

### Herausforderungen an die deutsche Ozean-Klimaforschung

Ein wesentliches Ziel der physikalischen Meeresforschung ist es, das Verständnis des Systems Ozean und seiner Rolle im Klimageschehen zu verbessern. Hierzu gehören Aspekte wie:

- den Einfluss quantitativ zu bestimmen, den die Änderung der ozeanischen Zirkulation und Vermischung auf physikalische, aber auch bio-geochemische Prozesse und das Ökosystem ausübt
- das Verständnis von ozeanischen Schlüsselprozessen mit Hilfe von beobachtenden und theoretischen Methoden zu verbessern
- die Modelle der ozeanischen Zirkulation auf globaler und regionaler Skala zu optimieren.

Die Herausforderung für die Meeresforschung besteht darin, für die nächsten Dekaden bis hin zu 100 Jahren abzuschätzen, wie sich Ozeanzirkulationen unter möglichen Klimaprojektionen verändern und welche Auswirkungen das haben wird. Hierzu gehören:

- die Beschreibung der laufenden oder zu erwartenden Veränderungen der großskaligen Ozeanzirkulation
- die Erforschung von Mechanismen und Fernwirkzusammenhängen auf globaler und regionaler Skala
- die Trennung von natürlichen und anthropogenen Variationen und Änderungen

- die Untersuchung des Einflusses von Änderungen in der Arktis auf den subpolaren Atlantik
- die Untersuchung der Auswirkung von Zirkulationsschwankungen auf regionale bio-geochemische Parameter (inklusive der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den Ozean).

Wichtig ist zudem, den Einfluss von Klimaänderungen abzuschätzen. Für die gerade im Aufbau befindlichen Klima-Beratungsdienste wesentlich sind dabei Antworten auf Fragen wie:

- Wie groß ist der Einfluss einer sich ändernden atmosphärischen Zirkulation auf den zukünftigen Meeresspiegel?
- Wie groß ist der Einfluss des Süßwassers von Grönland auf den Atlantik einschließlich des Meeresspiegels?
- Welche Wechselwirkungen des wärmeren Ozeans mit tropischen Sturmsystemen wird es geben, und wie groß ist der Einfluss von Änderungen im Wasserkreislauf auf Niederschlag, Überflutungen und Dürren?

### Wissenstransfer

Die Erfolge der deutschen Meeresforschung ermöglichen einen Wissenstransfer zu Agenturen, Ämtern und anderen Nutzern hinsichtlich:

- der Klimaschwankungen in Deutschland und Europa (Climate Service Center (CSC), Centre on Migration, Policy and Society (COMPAS))
- operationeller saisonaler bis dekadischer Klimavorhersagen
- des erforderlichen Küstenschutzes
- Auswirkungen auf Verkehr und Wasserstraßen
- Fischerei
- CO<sub>2</sub>-Handel und natürlicher Senken
- Meerestechnologie
- Rückversicherungen

## 2. Anwendungsbeispiele mit gesellschaftlicher Bedeutung



### 2.1 Atlantische Zirkulation und europäisches Klima

Der Atlantische Ozean leistet durch seine Zirkulationssysteme einen signifikanten Beitrag zum Wärmehaushalt der nördlichen Hemisphäre – und damit zum milden Klima Nordeuropas. Eines der herausragenden Elemente der Atlantischen Zirkulation ist dabei ihre meridionale Umwälzbewegung (meridional overturning circulation, oder MOC), deren obere Komponente durch den Golfstrom und seinen ostwärtigen Ausläufer, den Nordatlantischen Strom, repräsentiert wird. Diese Ströme tragen zum Transport von Wärme in die nördlichen Breiten des Ostatlantiks und damit zur Erwärmung von Nordeuropa bei.

Eine sich ändernde Ozeanzirkulation spielt eine Schlüsselrolle in der Erzeugung oder Modulation von natürlichen Klimamoden, wie sie zum Beispiel durch die Nordatlantische Oszillation (NAO) oder die Arktische Oszillation (AO) manifestiert ist. So beeinflussen Änderungen in der Ozeanzirkulation die regionale Oberflächentemperatur, mit direkten Auswirkungen auf regionale Niederschlagsmuster etwa über Europa und Afrika. Das stellt einen wichtigen Kopplungsmechanismus des Ozeans mit der Atmosphäre dar und damit das Kernstück für dekadische Klimavorhersagen. Ein verbessertes Verständnis von Klimamoden über dem Atlantik und über Europa ist eine zentrale Aufgabe für die Ozeanographie und die Klimaforschung. Nur so können die Vorhersagen verbessert werden. Aus diesem

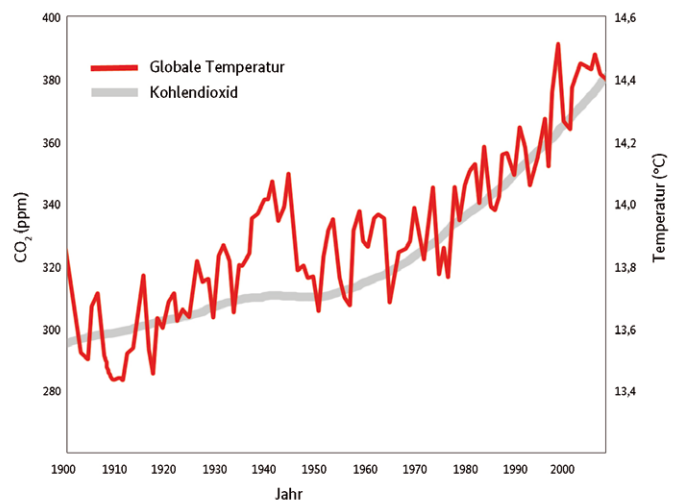
Grund müssen in Zukunft Änderungen der Atlantik-Zirkulation und deren Effekte auf die Atmosphäre, die Arktis und allgemein unser Klima besser verstanden und kontinuierlich verfolgt werden. Insbesondere muss die ozeanographische Wissenschaft versuchen, Zirkulationsänderungen vorherzusagen, um Auswirkungen auf das Klima rechtzeitig erkennen zu können.

Das 20. Jahrhundert verzeichnete bereits eine erhebliche und messbare anthropogene Erwärmung, und wir können davon ausgehen, dass sich dieser Trend unter jedem erdenklichen Klimaszenario über die nächsten Dekaden weiter fortsetzen wird. Wichtig dabei ist jedoch, dass diese Änderungen wegen der sich ändernden Ozeanzirkulation nicht monoton verlaufen; sie zeigen tatsächlich erhebliche Schwankungen, die mit natürlichen Klimavariationen verbunden sind.

Regionale Langzeit-Klimaänderungen unterliegen ebenso wie der mittlere Klimazustand natürlichen Fluktuationen, die erhebliche sozioökonomische Auswirkungen haben können. Bekannte Beispiele hierfür sind die große „Dust Bowl“-Trockenphase im Nordamerika der 1930er Jahre oder die sich wiederholenden Dürrephasen in der Sahel-Zone, die jedes Mal hunderttausende von Todesopfern fordern. Messungen der Ozeanoberflächentemperatur (SST) gibt es bereits seit langer Zeit. Aus der Differenz der Werte zwischen dem Nord- und Südatlantik kann man einen Index der dekadischen MOC-Variation berechnen. Dieser Index ist mit dem Niederschlag über der Sahel-Zone korreliert, ebenso wie mit der Hurrikan-Aktivität über dem tropischen Atlantik. Vorhersagen der Atlantischen

Zirkulation, der MOC und der SST haben daher großes Potenzial, dekadische Variationen in atmosphärischen Parametern über dem Atlantik und den angrenzenden Kontinenten, besonders in Europa und Afrika, vorherzusagen.

Erste Pilotstudien zur Vorhersage von Klimafluktuationen auf dekadischer Zeitskala wurden bereits mit komplexen Klimamodellen durchgeführt. In diese Klimamodelle flossen ozeanographische Daten ein, und sie wurden für verschiedene Treibhausgasszenarien gerechnet. Trotz verbleibender Unterschiede in den Lösungen zeigen diese Pilot-Studien vielversprechende Resultate und das Potenzial für Vorhersagen auf dekadischer Zeitskala. In Zukunft wird es wichtig sein, diese ersten Erfolge der Klimavorhersage im Zusammenhang mit der weiter fortschreitenden globalen Erwärmung auszubauen.



Global gemittelte jährliche Oberflächen-Lufttemperatur (SAT, rote Kurve) und geglättete atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration (graue Kurve) von 1900 – 2008. Die Temperaturschwankungen, die den Trend der Erwärmung im 20. Jahrhundert überlagern, spiegeln die natürliche Variabilität wider.

## 2.2 Meeresspiegel, Variabilität und Trends



Ein Anstieg des Meeresspiegels, wie er für die nächsten 100 Jahre und darüber hinaus prognostiziert wird, kann große Herausforderungen für die Bevölkerungen nahezu aller Staaten, und damit auch für den Küstenschutz in Europa, darstellen. Der momentan beobachtete Anstieg des globalen Meeresspiegels liegt bei etwa drei Millimetern pro Jahr. Klimaprojektionen stimmen jedoch darin überein, dass der globale Meeresspiegel infolge der Erderwärmung in Zukunft stärker ansteigen wird. Allerdings ist die Abschätzung des globalen Anstieges im Zeitraum von 2000 bis 2100 von circa 0,5 Metern mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet.

Beobachtungen des Meeresspiegels sowie die Ursachensuche für seine Variation sind äußerst komplex. Insbesondere weichen regionale und lokale Änderungen des Meeresspiegels, wie in der Nordsee, oft erheblich vom globalen Mittelwert ab: Der Anstieg kann sich entweder verstärken oder in Einzelfällen sogar in einen gegenläufigen Trend umschlagen. Änderungen des Meeresspiegels können unter anderem auf Grundlage von in situ-Messungen (zum Beispiel Argo, Hydrographie, Gezeitenpegel und Zeitserien in Schlüsselregionen) sowie von Satellitenmessungen (besonders Altimetrie, Windstress und Gravimetrie) erfasst werden. Die Ursachen regionaler Änderungen im Meeresspiegel können dann mit Hilfe von dynamischen Zirkulationsmodellen studiert werden, die mit diesen Beobachtungsdaten in Einklang gebracht wurden.

Änderungen des Meeresspiegels im Nordatlantik ebenso wie entlang der deutschen Küste sind fundamental mit der Zirkulation des Atlantiks verbunden. Neben der Zu- oder Abnahme der Masse zeigen Dichteänderungen – etwa aufgrund von Erwärmung oder im Zusammenhang mit dem Eintrag von frischem, das heißt relativ leichtem, Schmelzwasser des Grönlandeises – regionale Muster. Im Jahresvergleich und auf dekadischen Zeitskalen spielt die so erzeugte regionale Variabilität eine wichtige Rolle, die auch den global gemittelten Wert beeinflussen kann.

Alle regionalen Schwankungen des Meeresspiegels unterliegen zusätzlich globalen Einflüssen aufgrund von Veränderungen des Meeresvolumens, zum Beispiel durch das Abschmelzen der polaren Eisschilde. Auch die feste Erde übt Einfluss aus, zum Beispiel im Zusammenhang mit dem postglazialen Anheben des Meeresbodens oder durch Anpassungen des Geoids aufgrund von Eismassenveränderungen. Darüber hinaus können graduelle Veränderungen der Atmosphäre im Rahmen eines sich ändernden Klimas einen messbaren Beitrag zum regionalen Meeresspiegelanstieg leisten, weil sich die Meeresoberfläche auf Veränderungen von Luftdrucksystemen innerhalb weniger Tage isostatisch einstellt.

Für die deutsche Küste liegt der resultierende lokale Meeresspiegelanstieg im langfristigen Trend bei 1,8 bis 2,0 Millimetern im Jahr. Beobachtungen zeigen aber einen höheren Anstieg am Ende des 20. Jahrhunderts mit Werten zwischen drei und vier Millimetern im Jahr. Analysen der Gezeitenpegel zeigen gleichzeitig eine Erhöhung des Gezeitenhubs. Mittels regionaler Klimamodelle wird daher zurzeit untersucht, wie sich in Zukunft mit dem Meeresspiegel auch die Stärke von Sturmfluten und Wellen verändern wird.

Für einen effektiven nationalen Küstenschutz in der Nord- und Ostsee ist daher über globale Prognosen hinaus eine hinreichend genaue Abschätzung von lokalen Änderungen des Meeresspiegels von großer Bedeutung. Eine kontinuierliche Beobachtung und quantitative Modellierung der Atlantischen Ozeanzirkulation und ihrer klimatischen Änderungen ist Grundvoraussetzung für den Küstenschutz und für Meeresspiegelprognosen entlang der deutschen Küste über die nächsten Jahrzehnte und Jahrhunderte.

### 2.3 Arktisches Meereis

Die Zirkulation des Nordatlantiks trägt einen erheblichen Anteil zum polwärtigen Wärmetransport bei und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Meereisverteilung. Im Nordost-Atlantik reicht deshalb die Eiskante nicht weiter südlich als 75°N, während die Beringsee im pazifischen Sektor südlich des Polarkreises (66,5°N) im Winter regelmäßig vereist. Die Variabilität und der jüngste Rückgang der winterlichen Eisbedeckung im Nordpolarmeer, speziell in der Barentssee, gehen daher zu einem großen Teil auf die Erwärmung des nordwärts fließenden Norwegisch-Atlantischen Stroms zurück, eines Ausläufers des Nordatlantischen Stroms.

Die enge Verzahnung von ozeanischer Zirkulation und Meereis-Prozessen hat entscheidenden Einfluss auf die Wassermassentransformation des Atlantischen Wassers im Nordpolarmeer. Ozean-Meereis-Modelle besagen, dass der Einfluss von warmem Wasser aus dem Atlantik in das Nordpolarmeer hinein auf die Arktis stark von den Eigenschaften des Wassers abhängt, welches aus der Barentssee in mittlere Tiefen der arktischen Becken fließt. Mit jahrzehntelanger Verzögerung führen die warmen Einstromereignisse zu einer Änderung der Dichteschichtung im Europäischen Nordmeer und können eine Schwächung der

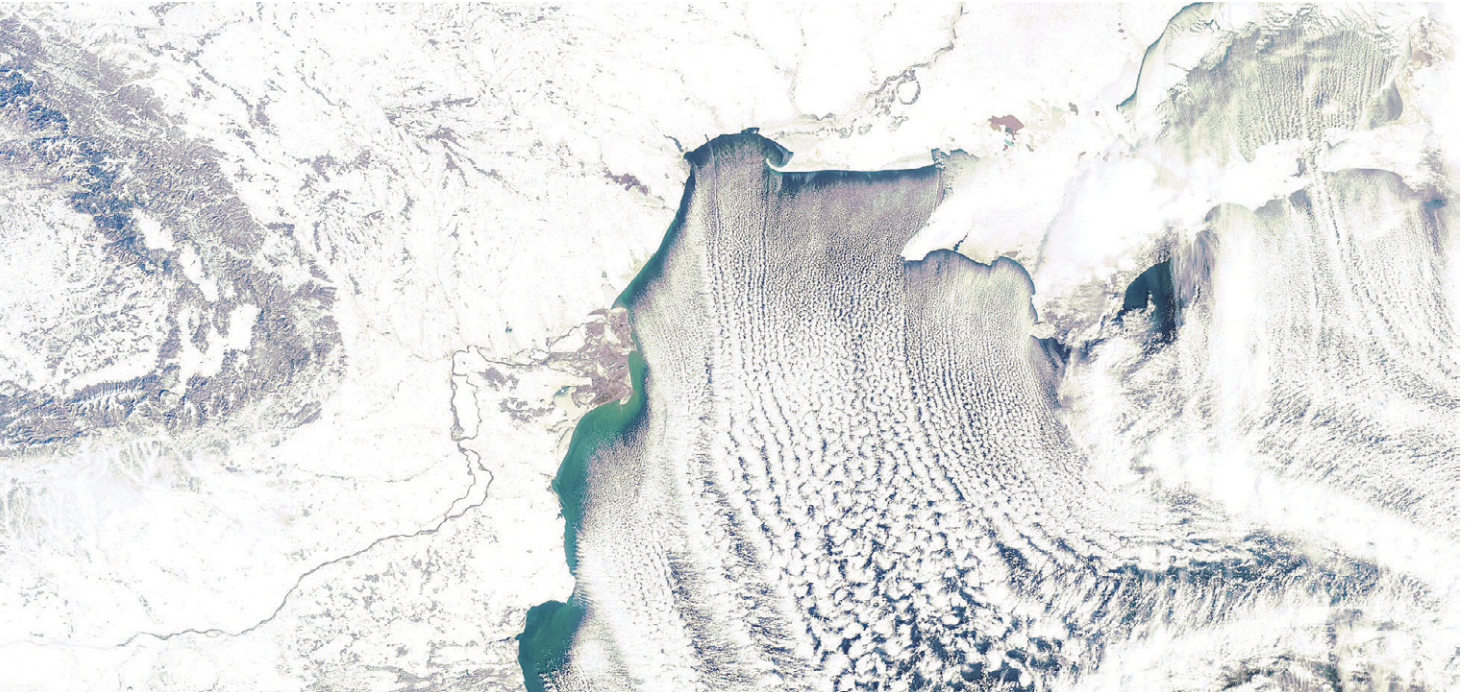
großräumigen ozeanischen Umwälzzirkulation bewirken. In diesen Wechselwirkungen liegt ein Potenzial für die langfristige Vorhersage von ozeanischen Zirkulationsänderungen.

Der Eintrag von Meereis und von Schmelzwasser in die Barentssee spielt eine wichtige Rolle für die biologische Primärproduktion in diesem für den Fischfang wichtigem Gebiet. Schmelzwasser erhöht die Stabilität der Wassersäule und verhindert damit den Transport von Nährstoffen in die lichtdurchflutete oberflächennahe Schicht. Die Lebensgemeinschaften am Meeresboden in der Region westlich von Spitzbergen reagieren anscheinend sensitiv auf Änderungen der Eisverhältnisse in dieser Region.

Messkampagnen in der Nähe der Framstraße zeigen, dass die Dicke des Meereises kontinuierlich abnimmt. Dieser Rückgang wird auch von Ozean-Meereis-Modellen reproduziert. Der Rückgang der Eisdicke wird nicht durch entsprechende Beschleunigung der Eisdrift aufgewogen, so dass sich der Eisexport aus dem Nordpolarmeer ins Europäische Nordmeer volumenmäßig reduziert. Ein solcher Rückgang hat Folgen für die ozeanischen Verhältnisse im Nordpolarmeer, da das verbleibende Schmelzwasser und der verminderte Salzeintrag beim Frieren zu einer zunehmenden Aussüßung des Nordpolarmeers

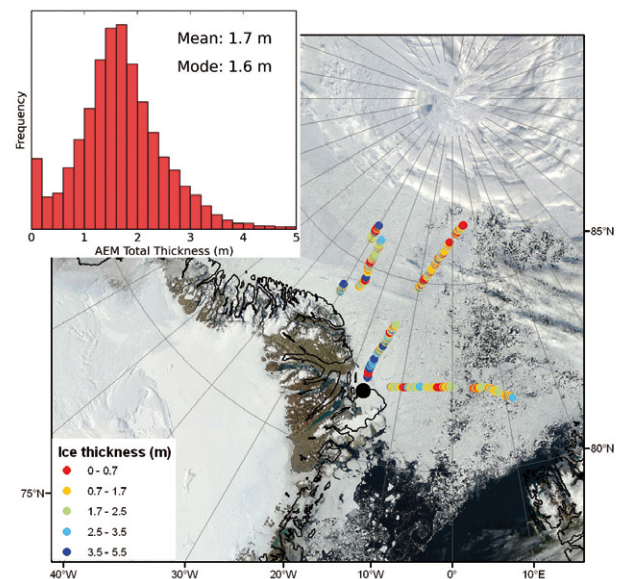






beitragen. Gleichzeitig erreicht weniger Süßwasser das Europäische Nordmeer und andere Regionen des subpolaren Nordatlantiks, was für die Erneuerung des Zwischen- und Tiefenwassers, und damit für die meridionale Umwälzbewegung im Atlantik von Bedeutung sein kann.

Die Veränderlichkeit der Meereisbedeckung zu verstehen, ist für die Meeresforschung ebenso herausfordernd wie die Erklärung der unterschiedlichen Meereisverhältnisse in der Arktis und Antarktis. Während die Abnahme des Meereises in der Arktis unbestritten ist, ist in der Antarktis eine derartige Tendenz nicht zu erkennen. Allerdings sind die Fluktuationen auf mehrjährigen Zeitskalen erheblich, so dass lange Zeitreihen erforderlich sind, um ein verbessertes Prozessverständnis zu ermöglichen. Die regelmäßige Beobachtung von eisbedeckten Regionen des Weltozeans ist eine technische Herausforderung und erfordert Entwicklung und Einsatz neuer Technologien auf und unter dem Meereis, aber auch von weltraumgestützten Systemen. Für ein verbessertes Prozessverständnis – und damit auch ein verbessertes Vorhersagepotenzial ist auch die Weiterentwicklung und Verbesserung von gekoppelten Klimamodellen erforderlich.



Eisdickenverteilung im Bereich Framstraße, die im August 2010 vom Forschungsflugzeug Polar 5 des Alfred-Wegener-Institut (AWI) gewonnen wurde. Die Eisdickenverteilung des Fluges entlang 82°N (oben links) ist durch eine häufige Dicke von unter 1,8m und einen schnellen Abfall zu hohen Dicken hin gekennzeichnet. Die Eisdicke ist insgesamt gering und der schnelle Abfall in der Häufigkeit mit zunehmender Eisdicke deutet auf das Fehlen von Presseisrücken hin. In dieser Region mit einem Zusammenfluss von Meereis aus verschiedenen Bildungsregionen ist das sehr ungewöhnlich.

## 2.4 Ozeanische CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Versauerung

Der Weltozean stellt den größten der rasch miteinander austauschenden Kohlenstoffspeicher Atmosphäre – Landbiosphäre – Hydrosphäre dar. Mit einer Masse von 38.000 Gigatonnen Kohlenstoff (1 Gt C = 1 Milliarde Tonnen Kohlenstoff) beinhaltet der Ozean dabei gut 60 Mal so viel Kohlenstoff wie die vorindustrielle Atmosphäre, die nur bei knapp 600 Gt C lag. Auch der gesamte Kohlenstoffinhalt der terrestrischen Biosphäre erreicht nur sechs Prozent des marinen Kohlenstoffspeichers.



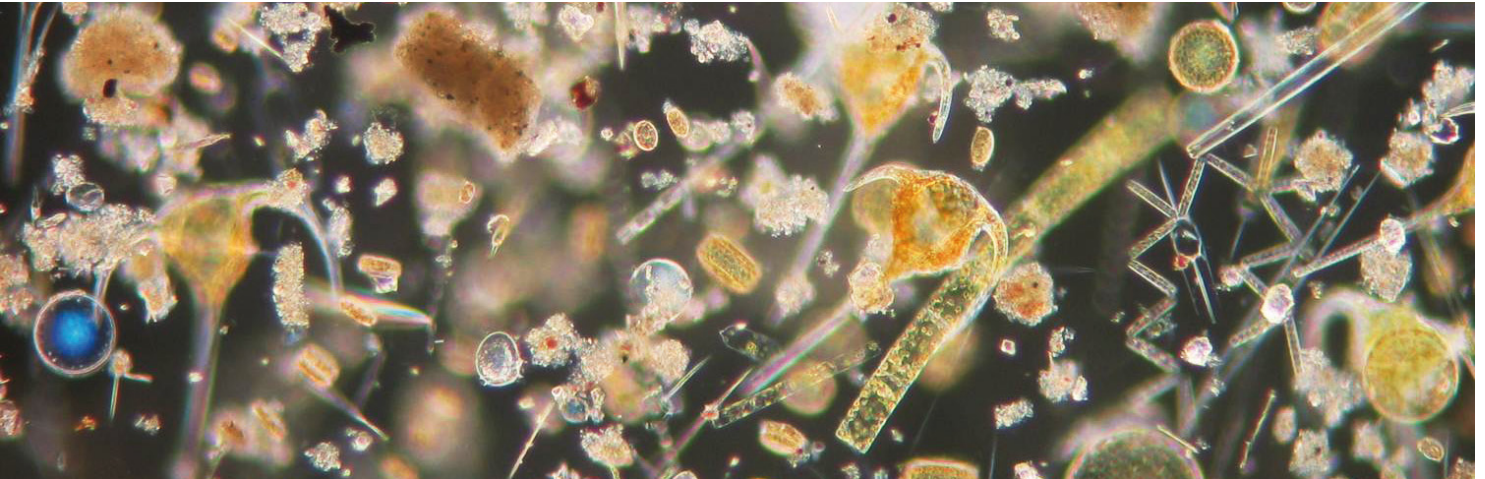
Doppler Current Meter RCM 11 für Tiefseemessungen bis zu 6.000 Meter

Aufgrund der chemischen Eigenschaften des marinen CO<sub>2</sub>-Systems besitzt Meerwasser eine sehr hohe Aufnahmekapazität für zusätzliches (anthropogenes) CO<sub>2</sub>. Diese Kapazität führt dazu, dass der Weltozean in einem zukünftigen geochemischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre etwa 80 Prozent aller anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgenommen haben wird. Berücksichtigt man zusätzlich die puffernde Wirkung der Tiefsee-Kalksedimente, die auf deren partielle Auflösung zurückzuführen ist, so werden sogar etwa 95 Prozent der anthropogenen Emissionen vom Ozean aufgenommen und gespeichert. Der Ozean braucht jedoch mehrere Jahrhunderte, um diese Aufnahme zu leisten, so dass gegenwärtig ein Ungleichgewicht besteht und in der Atmosphäre ein deutlich „zu großer“ Anteil des anthropogenen CO<sub>2</sub> zurückbleibt. Die Quantifizierung der aktuellen ozeanischen Senke für anthropogenes CO<sub>2</sub> ist daher für zuverlässige Klimaprognosen von ganz entscheidender Bedeutung.

Angesichts der gewaltigen Größe des natürlichen Kohlenstoffreservoirs nehmen sich anthropogene Änderungen im Ozean – ganz im Gegensatz zur Atmosphäre – sehr klein aus. Sie werden zudem durch die erhebliche natürliche Variabilität im oberflächennahen Ozean überlagert und maskiert. Die zuverlässige Quantifizierung der Aufnahme und Speicherung von anthropogenem CO<sub>2</sub> im Ozean gehört daher zu den anspruchsvollsten Aufgaben der chemischen Ozeanographie. In den letzten vier Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Verfahren zur Identifizierung von anthropogenem CO<sub>2</sub> entwickelt, das durch den Weltozean aufgenommen wurde. Diese Verfahren beruhen auf sehr unterschiedlichen Konzepten und reichen etwa von der Messung von Spurenstoffen über statistische oder Rückrechnungsverfahren bis hin zu Messungen von Isotopensignaturen oder CO<sub>2</sub>-Flüssen durch die Ozean-Atmosphäre-Grenzfläche.

Abschätzungen der Aufnahme von anthropogenem CO<sub>2</sub> durch den Weltozean zeigen vor allem im letzten Jahrzehnt eine hohe Konvergenz. Danach sind vor allem die physikalischen Eigenschaften des Oberflächenozeans und die Prozesse der Bildung von Zwischen- und Tiefenwasser für die Aufnahme von anthropogenem CO<sub>2</sub> in den Ozean verantwortlich, welche sich auf über 30 Prozent des seit Beginn der Industrialisierung ausgestoßenen CO<sub>2</sub> beläuft. Die gegenwärtige Aufnahme liegt bei etwa zwei Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis sind diese Ergebnisse jedoch als langjährige klimatologische Mittel zu verstehen.

Ein genauerer Blick auf zwischenjährliche Schwankungen, und damit auf die steuernden physikalischen und bio-geochemischen Prozesse, ist bisher kaum möglich. Eine erfreuliche Ausnahme bildet der Nordatlantik, für den durch internationale und nicht zuletzt auch deutsche Kampagnen eine sehr hohe Datendichte erreicht werden konnte. Diese hat erstmals den Blick auf unerwartet hohe zwischenjährliche Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Senke in dieser Region ermöglicht. So konnte gezeigt werden, dass die seit Mitte der 1990er Jahre abnehmende Produktion von Tiefenwasser die Aufnahme von anthropogenem CO<sub>2</sub> im subpolaren Westatlantik zwischen 1997 und 2003 nur um zwei Prozent anstatt um elf Prozent wachsen ließ, wie es angesichts des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anstiegs zu



Mikroalgen unter dem Mikroskop, CO<sub>2</sub>-Fresser im Ozean

erwarten gewesen wäre. Diese ersten Beispiele sind Hinweise auf die wichtige Rolle, die die Variabilität des physikalischen Systems Ozean – Atmosphäre für die ozeanische CO<sub>2</sub>-Aufnahme spielt. Doch auch im biogeochemischen System sind wesentliche Rückkopplungsmechanismen identifiziert worden. Hier sind Ozeanversauerung oder die Abnahme des Sauerstoffgehalts im Wasserkörper als potenziell wichtige Veränderungen der marinen Umwelt zu nennen. Die Erforschung möglicher Rückwirkungen des biologischen Systems auf den Kohlenstoffkreislauf in den Ozeanen und damit auf das Klima steht jedoch erst am Anfang.

Eine Herausforderung besteht in der Abschätzung, welchen Einfluss der globale (Klima-)Wandel auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf des Ozeans haben wird. Dieser Einfluss muss quantifiziert werden, da er voraussichtlich für das zukünftige Klima auf unserem Planeten relevant sein wird. Dafür ist eine bessere Ozeanbeobachtung nötig. Hierfür müssen neue Beobachtungsansätze und -methoden entwickelt werden.



Wasseranalyse im Schiffslabor

## 2.5 Wechselwirkungen des Atlantiks mit der Nordsee

Deutschland besitzt eine lange maritime Geschichte und die Küstenräume von Nord- und Ostsee spielen in der nationalen Kultur und Ökonomie eine wichtige Rolle. Rund 400.000 Arbeitsplätze sind im maritimen Sektor angesiedelt und mehr als ein Viertel des deutschen Außenhandels wird über die deutschen Seehäfen abgewickelt. Den Küstenräumen wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da diese dicht besiedelten Gebiete dem Meereseinfluss unmittelbar ausgesetzt sind, zum Beispiel durch Hochwassergefährdung oder Landverluste bei Sturmfluten.

Die Nordsee ist ein flaches Randmeer des Atlantiks, und ihr Zustand wird bestimmt durch externen Antrieb (Austausch mit dem Atlantik und der Ostsee, Windeinfluss) und interne Dynamik (Vermischung durch starke Gezeitenströmung, Zirkulation in der Nordsee, lokaler Wärme- und Süßwasseraustausch). Diese Faktoren kontrollieren die Verteilung von Temperatur, Salzgehalt und Nährstoffen und haben dadurch Einfluss auf die Zirkulation und Wasserstände in der Nordsee. Der Austausch mit dem Atlantik findet im Wesentlichen entlang der breiten Öffnung im Norden statt und zu einem geringeren Ausmaß über den Einstrom durch den Englischen Kanal im Süden, der wärmer und salzreicher ist als der nördliche Einstrom und insbesondere die Verhältnisse in der Deutschen Bucht beeinflusst.

Der Einstrom aus dem Atlantik ist außerordentlich variabel und zeigt auf mehrjährigen Zeitskalen eine hohe Korrelation zur sogenannten Nordatlantischen Oszillation, der vorherrschenden atmosphärischen Klimavariabilität im Nordatlantik. Die Nordatlantische Oszillation ist ein Maß für die Luftdruckgegensätze zwischen Azorenhoch und Islandtief und damit bestimmend für die Stärke der Westwinde in diesem Bereich. Bei großem Luftdruckgegensatz verstärken sich die Westwinde und der Einstrom Atlantischen Wassers in die Nordsee und umgekehrt. So war der Einstrom in den 1960er und 1970er Jahren gering und

nahm seit Ende der 1980er Jahre wieder zu. Klimasimulationen weisen darauf hin, dass sich die Nordatlantische Oszillation als Folge des Klimawandels verstärkt und damit langfristig der Atlantische Einstrom stärker schwanken könnte.

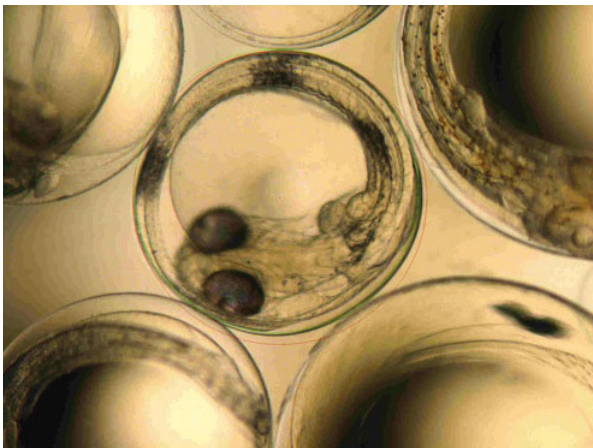
Die Wärme-, Süßwasser- und Nährstoffbudgets der Nordsee hängen sowohl von der Menge als auch von den Wassermasseneigenschaften des Atlantischen Einstroms ab. Die Anzeichen mehren sich, dass für die zunehmenden Temperaturen und Salzgehalte im Nordatlantik der Klimawandel verantwortlich ist. Seit 1980 haben sich die Oberflächentemperaturen des Nordostatlantiks um 0,2 bis 0,6 Grad Celsius erwärmt. Auch in der Nordsee wurden steigende Wassertemperaturen verzeichnet, sieben der zehn wärmsten Jahre traten in der letzten Dekade auf. Dies ist hauptsächlich eine direkte Folge der steigenden Lufttemperaturen. Wie groß der zusätzliche Beitrag aus dem sich erwärmenden Atlantischen Einstrom ist, muss mittels Simulationen von Klimamodellen quantifiziert werden. Aufgrund der geringen Wassertiefen und hohen Gezeitenvermischung wirkt sich die erhöhte Oberflächenerwärmung über die gesamte Wassersäule aus. Für Änderungen des Salzgehalts der Nordsee spielt der Austausch mit dem Atlantik eine wichtigere Rolle.

Hinsichtlich der Stürme über Westeuropa und damit auch über der Nordsee werden deren Pfade und Intensität von der Oberflächentemperatur im Bereich des Golfstroms beeinflusst. Über diese Fernwirkung wirken sich Veränderungen der Zirkulation des Atlantiks mittelbar, aber mit großer Tragweite auf Sturmfluten in der Nordsee aus. Zugrunde liegende Stürme erzeugen auch Veränderungen im Wellenregime, die Auswirkungen auf die Küstenregionen haben, besonders in Verbindung mit Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg. Deutschland hat bis auf Helgoland keine Felsküsten, und 50 Prozent der deutschen Küste liegt unter fünf Meter Höhe, im Vergleich zu neun Prozent aller Küstenzonen in Europa. Stärkere Windwellen und Dünung können die Erosion der Küste erhöhen.

## 2.6 Beeinflussung mariner Lebewesen durch Ozeanzirkulation

Veränderungen der Ozeanzirkulation und des Ozeanklimas haben weitreichende Auswirkungen auf die Populationen mariner Organismen. Die Mechanismen dieser Auswirkungen sind komplex und in vielen Fällen nicht gut verstanden.

Eine veränderte Zirkulation kann die Temperatur und den Salzgehalt ändern und die Populationen zu Reaktionen zwingen, wenn die Temperaturen außerhalb ihrer Toleranzgrenzen liegen. Wo, wie zum Beispiel in der Ostsee, die Organismen bereits jetzt an ihren Toleranzgrenzen leben, werden sich Änderungen der hydrographischen Bedingungen unmittelbar auswirken. So sinkt der Schlupferfolg der Sprottenlarven unterhalb von vier Grad Celcius dramatisch, so dass in sehr kalten Jahrgängen der Nachwuchs der Sprotte gefährdet ist. Änderungen der Wassereigenschaften können auch indirekt auf die Populationen wirken, wenn die Toleranzgrenzen von Räuber- oder Nahrungspopulationen überschritten werden.



Embryonen des Ostseedorsches im späten Entwicklungsstadium kurz vor dem Schlupf

Die Ermittlung dieser Grenzen ist allerdings schwierig, da viele Arten in ihrem Lebenszyklus unterschiedliche Stadien durchlaufen und jedes Stadium eigene Grenzen aufweisen kann. So ist in der Ostsee für den Kabeljau das Ei-Stadium limitierend, weil die Eier bei zu geringem Salzgehalt nicht schwebfähig sind. Oft kennen wir den

statistischen Zusammenhang zwischen der Änderung von Klima und Hydrographie und den Verbreitungsgrenzen oder der Größe von Populationen, können die kausalen Zusammenhänge aber nicht erklären. Bei den Ruderfußkrebse wird beispielsweise seit Anfang der 1980er Jahre ein Rückgang der Bestände verzeichnet. Experten vermuten einen Zusammenhang mit dem Einstrom von Tiefenwasser aus dem Nordatlantik in die Norwegische Rinne. Diese Theorie konnte aber noch nicht eindeutig bestätigt werden.

Der Lebenszyklus vieler mariner Organismen ist in die vorherrschenden mittleren Strömungsregime eingebettet. So wandern Fische gezielt zum Laichen in Gebiete, von denen die Eier und Larven dann in primär-produktive Aufwuchsgebiete verdriftet werden. Änderungen der Strömung können also das Überleben des Nachwuchses beeinträchtigen und damit früher oder später zum Rückgang einer Population führen. Dieser Mechanismus wurde für den Einbruch der Heringsbestände in den 1970er Jahren in der Nordsee mit verantwortlich gemacht. Veränderte Strömungsbedingungen können aber auch die räumliche Überlappung von Räuber- und Beutepopulationen verschieben und damit den Niedergang einer Population über höheren Fraßdruck auslösen.

Physikalische Phänomene wie Auftrieb oder die Durchmischung der Deckschicht steuern über die Nährstoffverteilung die Höhe der biologischen Primärproduktion, die den Anfang der Nahrungskette bildet und daher weit reichende Auswirkungen auf die Struktur mariner Ökosysteme hat. Physikalische Prozesse beeinflussen damit auch letztlich die Menge der nachhaltig zu entnehmenden Fischfänge. Allerdings ist unklar, auf welchem Weg und mit welcher Effizienz die Änderungen in der Primärproduktion durch das Nahrungsnetz weitergereicht werden und ob dabei für den Menschen nutzbare Populationen profitieren oder eher solche ohne direkten Nutzen, wie zum Beispiel Quallen.

### 3. Herausforderungen an die Infrastruktur der Meeresforschung



CTD-Messgerät für Messungen des Salzgehaltes, der Temperatur und der Tiefe

Die Erforschung der veränderlichen Ozeanzirkulation, ihrer Wechselwirkungen mit globalen anthropogenen Klimaveränderungen sowie mit natürlichen Klimaschwankungen im Nordatlantischen Raum samt seiner europäischen Randmeere und Schelfgebiete ist eine wissenschaftliche, technische und nicht zuletzt logistische Herausforderung für die Infrastruktur der Meeres- und Klimaforschung. Zu den wichtigen Komponenten dieser Infrastruktur gehören Satelliten zur globalen Beobachtung der Meeresoberfläche und moderne Forschungsschiffe ebenso wie autonom operierende Messplattformen für die Untersuchung des Ozeaninneren. Zur Forschungsinfrastruktur gehören weiterhin moderne und auf die Zukunft dimensionierte Großrechner sowie numerische Modell- und Datenverteilssysteme. Es ist wesentlich, jede dieser Komponenten langfristig verfügbar zu haben und auf zukünftige Anforderungen anzupassen.

#### 3.1 Beobachtungen

Die Erfassung zeitlicher Veränderungen der Ozeanzirkulation auf saisonalen bis dekadischen und

längeren Zeitskalen ist eine der Grundvoraussetzungen für die Ozean- und Klimaforschung und erfordert kontinuierliche Langzeitbeobachtungen. Die deutsche Meeresforschung leistet mit Hilfe unterschiedlicher Beobachtungsnetzwerke substantielle Beiträge dazu. Sie liefert aber auch wichtige Informationen im Bereich der operativen Nutzung der Meere.

#### Forschungsschiffe

Die Erforschung und Überwachung des Ozeaninneren auf globaler und beckenweiter Skala (Nordatlantik und Pazifik) bis hin zur regionalen Skala (Nordsee) ist nur durch eine moderne Flotte von Forschungsschiffen zu erfüllen. Im Rahmen von Forschungsprojekten – wie beispielsweise dem bestehenden BMBF-Verbundprojekt „Nordatlantik“, dem neuen Verbundprojekt „RACE“, ebenso wie im Rahmen zukünftiger Forschungsprogramme, die durch das BMBF über die Projektförderung, die institutionelle Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) und über die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie durch die EU gefördert werden – sind seegehende Arbeiten mit leistungsfähigen und modernen deutschen

Hochseeforschungsschiffen als Teil einer internationalen Forschungsflotte unverzichtbar. Die seegehende experimentelle Ozeanographie bleibt auch in Zukunft ein wichtiger Bestandteil der globalen Meeresforschung und erlaubt es, Veränderungen in der thermohalinen und windgetriebenen Zirkulation aufzuspüren sowie Modellvorhersagen und die ihnen zugrunde liegenden Prozesse zu überprüfen.

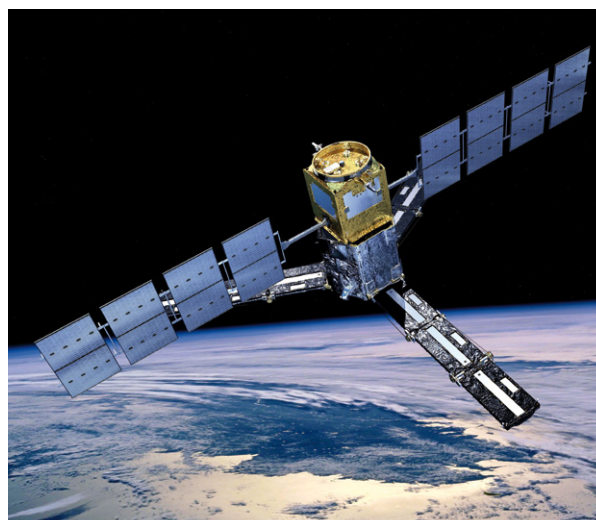
Eine erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit wird momentan durch die verschiedenen deutschen Forschungsschiffe (zum Beispiel FS POLARSTERN, FS METEOR, FS MARIA S. MERIAN, FS SONNE und FS POSEIDON) von den eisbedeckten Meeren der Arktis und Antarktis, zum äquatorialen Atlantik und bis in den Pazifik hinein gewährleistet. Die Weiterentwicklung von Beobachtungstechniken und -methoden erfordert jedoch eine kontinuierliche Verbesserung und Erneuerung der deutschen Forschungsflotte.

### Satelliten

Satellitendaten spielen eine zentrale Rolle in der deutschen Ozeanforschung und sind ein fester Bestandteil eines Ozeanbeobachtungssystems. Sie müssen langfristig durch internationale Raumfahrtprogramme mit deutscher Beteiligung sichergestellt beziehungsweise verbessert werden.

Zwar kann vom Weltraum aus nur der oberflächennahe Ozean beobachtet werden, doch können diese Beobachtungen unabhängig von Wetter oder Jahreszeiten durchgeführt werden. Ein erheblicher Vorteil liegt hierbei besonders in der nahezu globalen Abdeckung des Ozeans in nur wenigen Tagen, wodurch Variationen von Ozeanparametern, zum Beispiel erzeugt durch ozeanische Wirbel, raum-zeitlich sehr viel besser als mit in situ-Messsystemen beobachtet werden können.

Zu den längsten Messreihen im Ozean gehören inzwischen Satellitenmessungen von Oberflächentemperaturen (SST), Meeresspiegel (SSH) und Meereisparametern. Die Satellitendaten müssen im Zusammenhang mit in situ-Messungen ausgewertet und mit numerischen Modellsimulationen verknüpft werden,



Satellit SMOS zur Bestimmung des Ozeansalzgehaltes und der Bodenfeuchte

um Prozesse im Ozean zu beschreiben und zu interpretieren. Sie sind ebenfalls notwendig, um die Darstellung ozeanischer Prozesse in numerischen Modellen zu testen beziehungsweise weiterzuentwickeln. Die aus der Synthese von Beobachtungsdaten und Ozeanmodellen gewonnene quantitative Bestimmung des Ozeanzustands ist eine wesentliche Voraussetzung für die Initialisierung von Klimavorhersagen über dekadische Zeiträume.

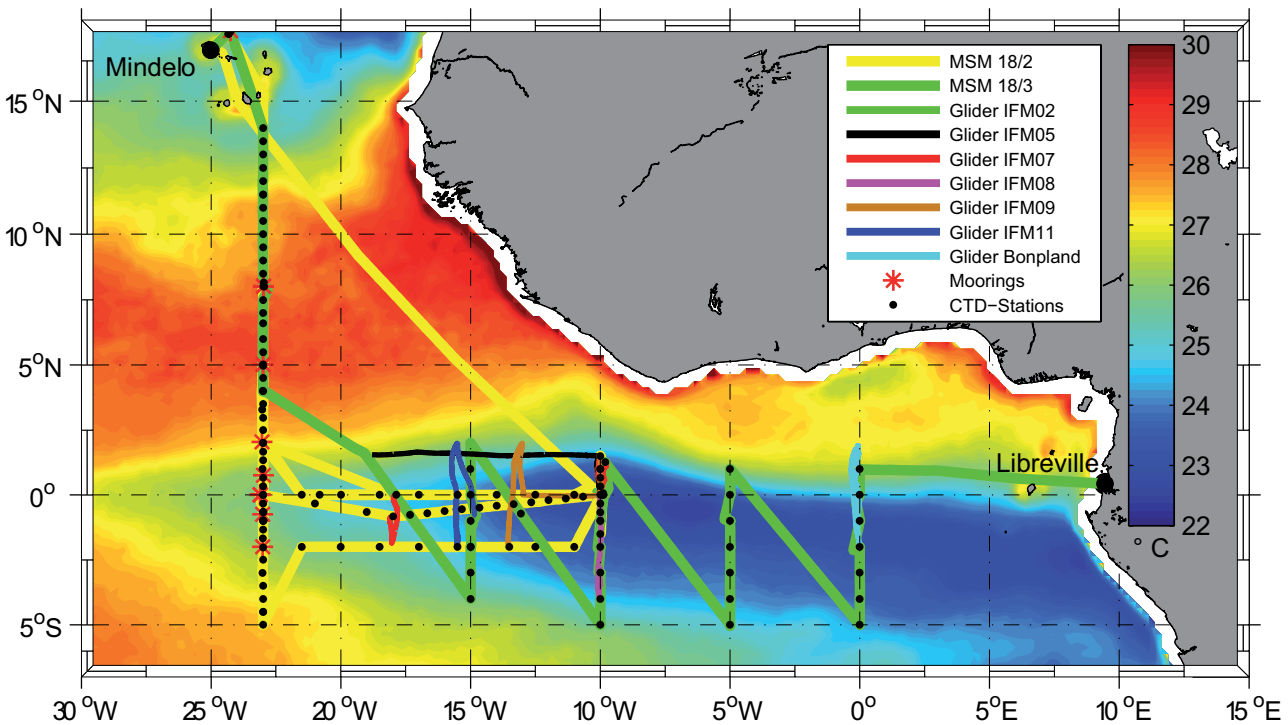
### Wichtige Satellitenparameter

Oberflächentemperatur, Meeresspiegelhöhe und damit Abschätzungen von geostrophischen Oberflächenströmungen, Wellenhöhen, Oberflächenwinde, Farbe des Ozeans und damit Chlorophyll-Konzentrationen, Änderungen in der Masse des Ozeans beziehungsweise des Bodendrucks und neuerdings auch Messungen des Oberflächen-salzgehaltes und Meereisfreibords, Windstresses, Chlorophylls, der Meereisbedeckung, Oberflächenrauigkeit oder des Schwerefeldes

**Autonome Messplattformen**

Argo ist das internationale Paradeprogramm zur Beobachtung des Ozeaninneren mit autonom profilierenden Driftkörpern. Bereits in der Anfangsphase von Argo war das BMBF mit substantiellen deutschen Beiträgen an der Förderung beteiligt. Die deutschen Beiträge wurden inzwischen durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) verstetigt und werden hier beispielhaft für die Partner im Euro-Argo-Verbund genannt. Weiterhin leistet Deutschland Beiträge zur routinemäßigen Erfassung von oberflächennahen Parametern von Handels- und Forschungsschiffen aus. Zu den Herausforderungen zählt der dauerhafte Erhalt des Argo-Netzwerks ebenso wie die Anpassung der Float-Technologie und Sensorik an die wissenschaftliche und technische Entwicklung. Hierzu gehört die Ausdehnung von Argomessungen über die gesamte Wassersäule (bis 6.000 Meter Tiefe) und in zeitweilig eisbedeckte Regionen hinein ebenso wie die routinemäßige Implementierung von Sauerstoffsensoren.

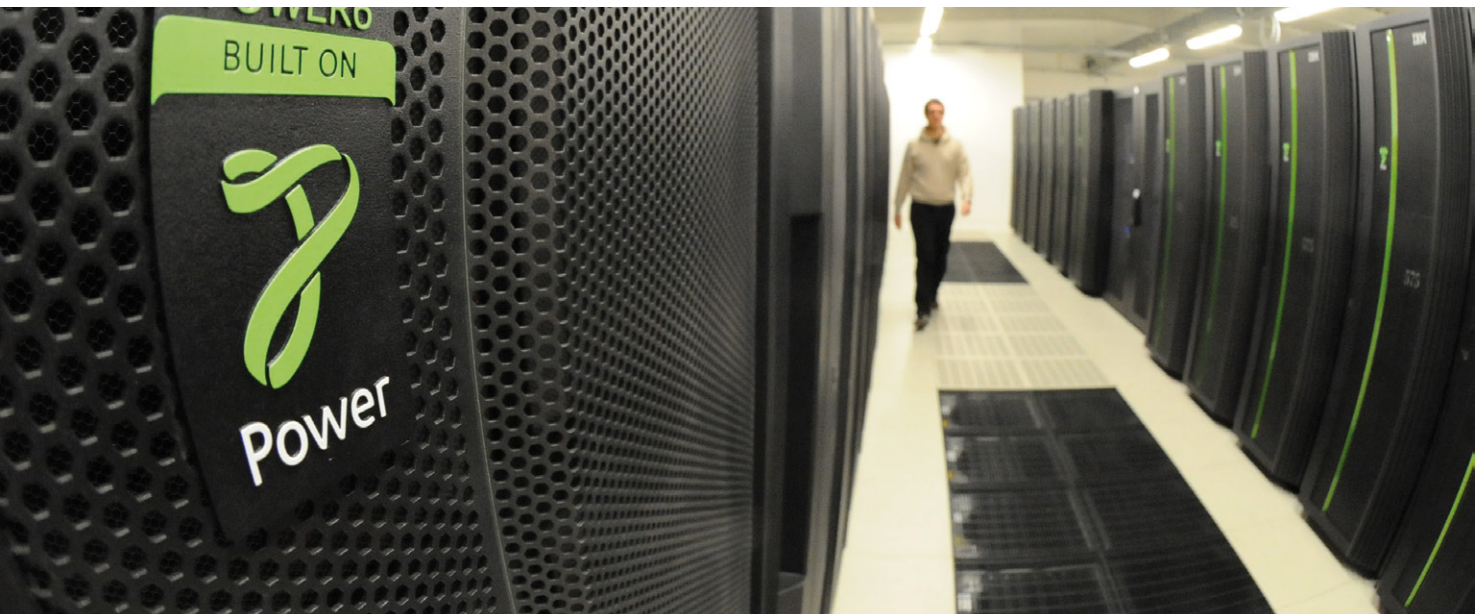
Dort, wo die Floats nicht hintreiben, werden diese durch steuerbare „Gleiter“ oder durch fest verankerte Systeme ergänzt. Alle diese Systeme sind für Studien von Prozessen mit langen Zeitskalen (Jahre bis Dekaden) erforderlich. Verankerte Messsysteme (Observatorien) sind geeignet, permanent die Veränderungen in bestimmten Wasserschichten zu registrieren, was in eisbedeckten Meeresgebieten eine Herausforderung darstellt. Diese verankerten Observatorien werden international durch das Netzwerk OceanSITES koordiniert. Im Rahmen des BMBF-Projekts „Nordatlantik“ werden Regionen im tropischen, subpolaren und polaren Nordatlantik systematisch und teilweise schon über einen längeren Zeitraum beprobt. In Zukunft soll die Technologie routinemäßig so implementiert werden, dass Daten direkt durch Satellitenverbindungen empfangen werden können.



Oberflächentemperatur im äquatorialen Atlantik, Juni / Juli 2011 mit Schema der durchgeführten Arbeiten. Zwei Maria S. Merian Abschnitte von Mai bis Juli 2011 (dicke gelbe und grüne Linien mit Stationsarbeiten), der Einsatz eines Gleiterschwarms (verschiedenfarbige Linien) sowie verankerte Beobachtungsinstrumente (rote Sterne) wurden genutzt, um physikalische, chemische und biologische Prozesse bei der Entwicklung der äquatorialen Kaltwasserzunge zu studieren.



### 3.2 Ozeanmodellierung und Großrechner



Großrechner des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg

Die Auswirkung einer sich ändernden ozeanischen Zirkulation auf den künftigen regionalen Meeresspiegel oder auf die ozeanische CO<sub>2</sub>-Aufnahme kann ohne ein enges Zusammenspiel zwischen Beobachtung und Modellierung nicht erfasst werden. Für ein quantitatives Gesamtbild der ozeanischen Vorgänge und ihrer zeitlichen Veränderungen braucht man dreidimensionale numerische Modelle der ozeanischen Zirkulation und ihrer Wechselbeziehungen mit der Atmosphäre, der polaren Kryosphäre und bio-geochemischen Stoffflüssen.

Im Kontext der Erdsystemmodellierung stellt eine realistische Simulation des Ozeans aufgrund der großen Bedeutung kleinskaliger Randströmungen und Wirbel sowie kritischer topographischer Einflussfaktoren, wie enger Meeresstraßen, nach wie vor eine extrem anspruchsvolle Aufgabe dar. Eine Simulation dieser Strömungsprozesse erfordert sehr hohe horizontale Auflösungen, die im subtropischen Ozean bei etwa zehn Kilometer, in polar-subpolaren Bereichen aber teils bei weniger als fünf Kilometern liegen können. Wegen der enormen Anforderungen an die Rechenleistung ist dies bislang erst in Ansätzen erreicht worden. Erste Ergebnisse solcher Simulationen haben aber bereits demonstriert, dass sie wesentlich zur

Interpretation lokaler Beobachtungen, zur Planung gezielter Messkampagnen und zum Systemverständnis beitragen können.

Als wesentliche Aufgabenbereiche der Ozeanmodellierung lassen sich unterscheiden:

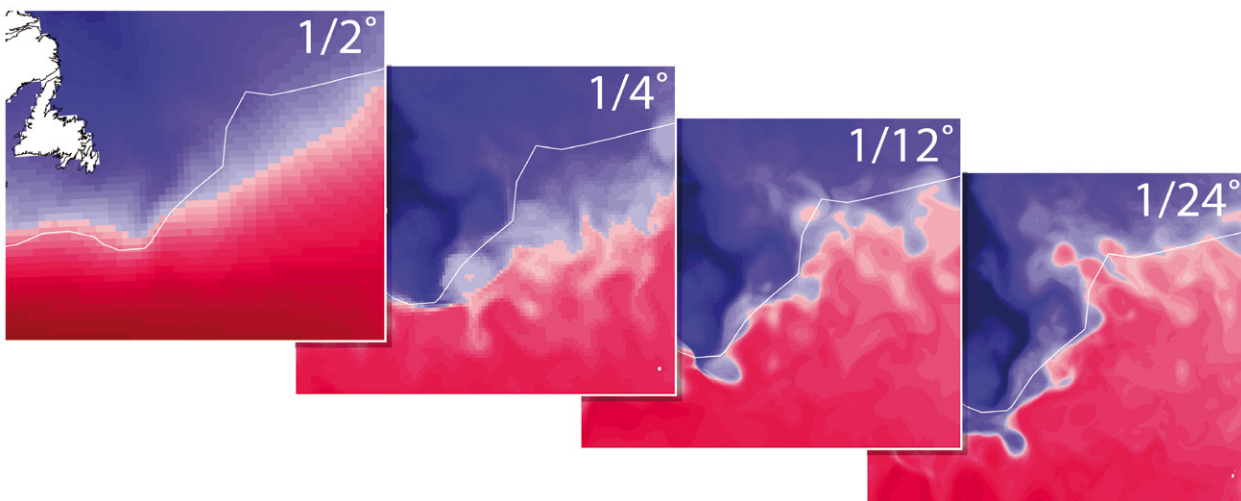
- die Erstellung einer quantitativen, dreidimensionalen Beschreibung der ozeanischen Transportvorgänge und ihres zeitlichen Verlaufs über die letzten Jahrzehnte durch modellgestützte Synthese aller verfügbarer Datensätze (Datenassimilation)
- das Verständnis der dynamischen Mechanismen in den Ozeanen in Reaktion auf langfristige Trends in den atmosphärischen Wärme- und Niederschlagsverteilungen sowie den großräumigen Windverhältnissen
- und schließlich eine bis auf die regionale Ebene verfeinerte Aussage von Klimamodell-Szenarien über zu erwartende Entwicklungen kritischer ozeanischer Parameter (Meeresspiegel, CO<sub>2</sub>-Aufnahme, Versauerung) über die nächsten 50 bis 100 Jahre.

## Herausforderungen für die Modellierungs-Infrastruktur

Ozeanmodellierungsvorhaben gehören zu den größten Rechenprojekten auf nationalen Höchstleistungsrechnern (HLR), zum Beispiel des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg (DKRZ), des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen in Berlin und Hannover (HLRN) und des High Performance Computing Center in Stuttgart (HLRS). Die verfügbare Rechenkapazität stellt für die absehbare Zukunft weiterhin den begrenzenden Faktor für den Fortschritt in der Ozean- und Klimamodellierung dar. Grundlegende Voraussetzung zur Sicherung einer internationalen konkurrenzfähigen Position ist daher ein ausreichender Zugang zu Rechnersystemen der

höchsten verfügbaren Leistungsklasse. Für Abschätzungen des zukünftig erwachsenden Bedarfs an HLR-Kapazität in Deutschland sind die Erfordernisse hochauflösender Ozeanmodelle (als einer der ressourcenintensivsten Komponenten der Erdsystem-Modellierung) ein wichtiger Faktor.

Eine wichtige Grundlage für realitätsnahe Simulationen und gleichzeitig eine methodische Herausforderung für die Ozeanmodell-Entwicklung bildet dabei die fortlaufende Verfeinerung der Modelle selbst. Fortschritte in diesen Bereichen erfordern eine systematische Integration von Prozessbeobachtung, theoretischer Konzeptentwicklung und numerischer Methodik bis hin zur Implementierung und zum Test neuer Ansätze in globalen Ozean-(Klima-) Modellen.



Einfluss der Modell-Auflösung auf die Simulation der nordatlantischen Strömungsverhältnisse. Eine realistische Simulation von Strömungen und Wirbeln in den mittleren Breiten (zum Beispiel des Nordatlantischen Stroms) wird mit Gitterauflösungen von etwa 10 Kilometern erreicht; die dafür erforderliche Rechenleistung liegt im Grenzbereich heutiger HLR-Systeme. Die in subpolaren Ozeanen vorherrschenden kleineren Strömungsskalen erfordern nochmals eine deutlich erhöhte Auflösung (5 Kilometer). Die umfassende Exploration dieser Dynamik und ihrer Bedeutung für regionale Ozean-Klima-Veränderungen erfordern Rechnersysteme der nächsten Generation und stellen eine Herausforderung für die zukünftige Ozeanmodellierung dar.

### 3.3 Datenmanagement für Beobachtungen und Modelle

Meereskundliche Messgeräte haben in den letzten 100 Jahren eine enorme technische Entwicklung erfahren. Bis in die 1960er Jahre wurden hydrographische Parameter wie Temperatur und Salzgehalt im tiefen Ozean überwiegend von Schiffen aus mit Hilfe von Wasserschöpfern und Quecksilber-Kippthermometern gemessen. Heute dagegen werden Daten hauptsächlich mit elektronischen Messsonden gewonnen, die zum großen Teil auf autonomen Plattformen wie Bojen oder Gleitern angebracht sind und mit Auflösungen im Meterbereich arbeiten. So bestand die Ausbeute der Deutschen Atlantischen Expedition mit dem Forschungsschiff METEOR in den Jahren 1925 bis 1927 aus circa 3.000 tiefen Temperatur- und Salzgehaltswerten, während alleine die profilierenden Driftkörper (Floats) des Argo-Programms im Südatlantik heute pro Jahr etwa fünf Millionen dieser Wertepaare liefern.

Der Großteil der heutigen Forschung umfasst großräumigere Themen, deren Grundlage großräumige Langzeitdatensätze bilden. Solche Datensammlungen sind eine unabdingbare Voraussetzung für Arbeiten, die sich mit der langfristigen Entwicklung des Erdsystems, zum Beispiel seines Klimas, beschäftigen. Dies schließt Modellierer und Theoretiker ein, die die Beobachtungsdaten zur Verbesserung der Modellergebnisse benötigen. Eine stringente Qualitätskontrolle der Beobachtung und die Erstellung von Metadaten ist ein fester Bestandteil einer Langzeitdatenstrategie.

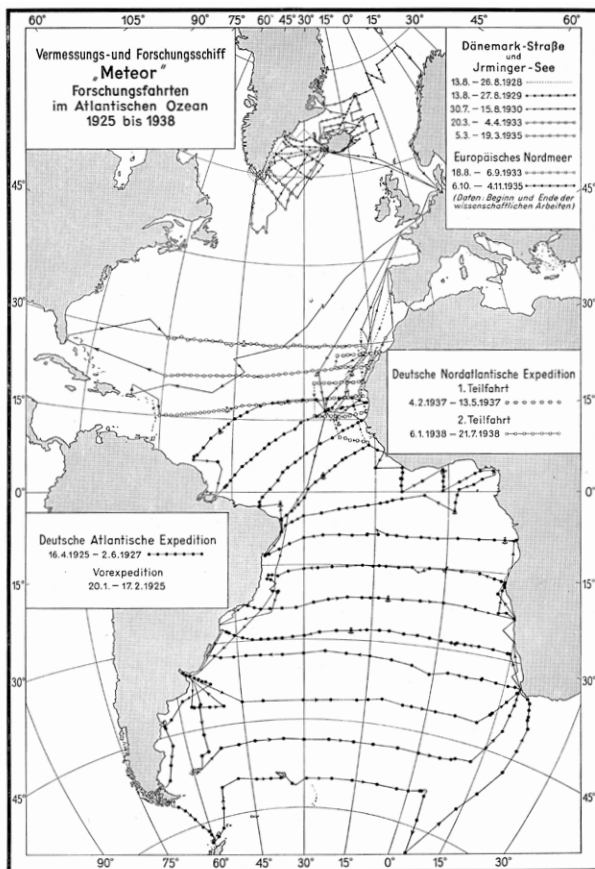
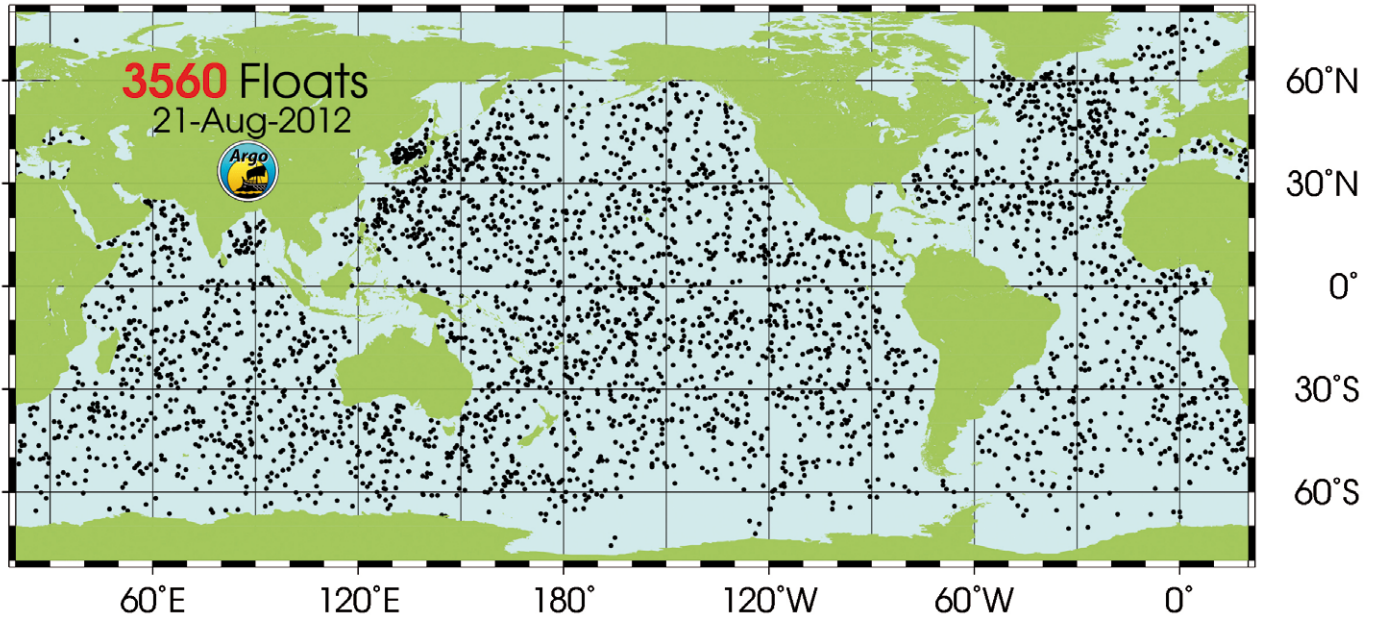
Von vielen staatlichen Institutionen werden routinemäßig atmosphärische und ozeanische Vorhersagemodelle betrieben, die auf den Eintrag aktueller Daten angewiesen sind. Dieses erfordert Kommunikationsstrategien, mit deren Hilfe die Daten innerhalb von Stunden von den Messplattformen den operationellen Zentren zur Verfügung gestellt werden. Mit dieser Anforderung verbunden ist die Notwendigkeit eines schnellen und umfassenden Datenaustausches, ebenso wie die Langzeitdatenarchivierung in internationalen Datenzentren.



Zu verankernde Instrumente und Auftriebskörper an Bord bereit zur Auslegung

Datenarchivierung von qualitätskontrollierten Beobachtungen und die Bereitstellung von Beobachtungsdaten und Modellergebnissen sind heutzutage genauso wichtig wie das Sammeln von Daten. Hierzu erforderlich ist eine dauerhafte institutionelle Förderung ebenso wie die Verbesserung von Beobachtungsmethoden und Datenmanagement. Dieses schließt die verbesserte Nutzung von Forschungsschiffen als autonome Beobachtungsplattform von „underway“-Messungen wichtiger ozeanographischer und meteorologischer Parameter ein.

In Deutschland sind das Deutsche Ozeanische Zentrum (DOD) und das Datenzentrum für Erdsystem- und Umweltwissenschaften (PANGAEA) zentrale Einrichtungen der Datenarchivierung und Datenkommunikation. Diese Zentren sind Teil einer dauerhaft benötigten Infrastruktur.



Verteilung der 150 Messstationen des FS METEOR während der Deutschen Atlantikexpedition 1925 – 1927 (links) und Lage der im Argo-Programm mit Hilfe von autonomen profilierenden Floats während einer Woche gewonnenen Profildaten (oben)

(nach G. Böhnecke und A. Schumacher, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 3, Heft 1/2 (1950), Meteor/Schmidt-Ott-Heft)

### 3.4 Ozean-Dienste

Ozean-Dienste sind im maritimen ebenso wie im Klimabereich erforderlich.

#### Maritime Dienste

Zu den meereskundlichen Diensten gehört eine regelmäßige Überwachung des Ozeans, besonders in seinen Randbereichen. Wesentliche Aspekte hierbei sind Sicherheit (einschließlich Verschmutzung und Schiffsleistung), Ressourcen (einschließlich Ökosystem-Management) und Umwelt (zum Beispiel Wasserqualität).

Am Beispiel der Nordsee steht für Dienste die Infrastruktur der Meeresforschung vor der Herausforderung, verlässliche Langfrist-Beobachtungen (in situ und Fernerkundung) bereitzustellen und validierte regionalisierte gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle zu betreiben. Beides ist notwendig, um das zum Teil noch lückenhafte Prozessverständnis im Ozean zu verbessern und um Fernwirkungen zwischen dem globalen Ozean und den Schelfmeeren beziehungsweise den Kontinenten vorherzusagen.

Für den Betrieb operationeller Vorhersagemodelle ist dabei die Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Atlantik und Nordsee unerlässlich. Dies betrifft sowohl

die Wassermasseneigenschaften des einströmenden Atlantischen Wassers und die Wasserstandsschwankungen am nördlichen Rand als auch atmosphärische Änderungen. Die Bewertung des Ist-Zustandes des Ozeans und seiner Küstenbereiche, die Verbesserung der Vorhersagemodelle sowie die kontinuierliche Anpassung der operationellen Dienste und Produkte an veränderte Umweltbedingungen erfordern dabei ein verbessertes Verständnis von Wechselwirkungen im Ozean, Transfermechanismen, Zeitskalen und Variabilitäten.

#### Klima-Dienste

Zu den Diensten im Klimabereich gehört grundsätzlich die Bereitstellung verlässlicher Klimainformationen, die es den Staaten ermöglicht, sich rechtzeitig auf Klimaschwankungen und -änderungen einzustellen. Hierzu zählen saisonale bis hin zu dekadischen Vorhersagen, einschließlich Informationen über Schwankungen im Niederschlag, anhaltende Trockenperioden oder Wärmeanomalien. Regional adaptierte Forschungsergebnisse sind eine wesentliche Grundlage für politische und wirtschaftliche Entscheidungsprozesse. Sie werden generell zur Entwicklung und Umsetzung von nationalen Anpassungsstrategien an den Klimawandel gebraucht, um unter anderem auch die Auswirkungen von zukünftigen Meeresnutzungen



auf die Meeresumwelt abzuschätzen. Regional und lokal werden sie bei der Planung, Bemessung und Bewirtschaftung von Küstenschutzbauwerken, Hafenanlagen, Schifffahrtswegen und Offshore-Installationen wie zum Beispiel Offshore-Windparks berücksichtigt.

In nahezu allen Fällen von Klima-Diensten sind direkt oder indirekt Informationen über die Ozeanzirkulation erforderlich, die sowohl zur Bewertung beobachteter Klima-Änderungen verwendet werden als auch zur Validierung von Modellvorhersagen, beziehungsweise zu deren Initialisierung. Erste Pilot-Projekte zu dekadischen Vorhersagen sind insbesondere in Deutschland durchgeführt worden. Obwohl vielversprechend, gibt es noch erhebliche Unsicherheiten, die reduziert werden müssen, bevor verlässliche Klimainformationen daraus erzeugt werden können. Durch die Nutzung eines Ensemblemittels von verschiedenen Vorhersagen (vergleichbar mit modernen Wettervorhersagen) erreicht man dabei jedoch eine deutlich verbesserte Qualität, was demonstriert, dass in zukünftigen dekadischen Vorhersagen Modellunsicherheiten berücksichtigt werden müssen. Weiterhin ist in den Regionen, in denen die interne Klimavariabilität groß ist, zu erwarten, dass die Initialisierung durch Ozeandaten zu besseren Ergebnissen führt als bei nur extern angetriebenen Klimarechnungen.

Obwohl der sozioökonomische Nutzen noch demonstriert werden muss, lassen erste dekadische Vorhersagen diesen schon erkennen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Auswirkung der veränderlichen Meeresströmungen auf regionale Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur. Veränderungen in der regionalen Oberflächentemperatur haben insbesondere in den Tropen direkte Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation und die damit verbundenen Änderungen in regionalen Niederschlagsmustern. Diese Kopplung ist eine der zentralen Eigenschaften für dekadische Klimavorhersagen, zum Beispiel über Europa und Afrika. In Verbindung mit operationellen Vorhersage- und Beratungsdiensten sind aus Vorhersagen der Ozeanzirkulation resultierende Erkenntnisse ein wesentlicher Baustein für die Sicherheit und Leistungsfähigkeit der nationalen maritimen Infrastruktur. Ein unerlässlicher Prozess ist die Überführung der Ergebnisse in die praktische Anwendung. Die langfristige Erhaltung der Klima-Referenzstationen im Ozean ist dafür eine wichtige Voraussetzung.

## Impressum

### Herausgeber

Bundesministerium  
für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat System Erde  
53170 Bonn

### Bestellungen

schriftlich an:  
Publikationsversand der Bundesregierung  
Postfach 48 10 09  
18132 Rostock  
oder per  
Tel.: 01805 - 77 80 90  
Fax: 01805 - 77 80 94  
(14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz,  
Mobilfunk max. 42 Cent/Min.)  
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de  
Internet: <http://www.bmbf.de>

### Stand

August 2012

### Druck

Pecks-Druck Düren

### Gestaltung

Stefanie Jelic, Projektträger Jülich (PtJ)

### Bildnachweis

Titel: [www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com); S. 3, 7, 9, 23: Antje Tittebrand,  
Universität Hamburg; S. 4, 8: Mojib Latif, Geomar; S. 5, 6, 12, 13  
unten: IUP Bremen; S. 10: Stefan Kern, Universität Hamburg;  
S. 11 oben, 17: Europäische Weltraumorganisation ESA; S. 11  
unten: Thomas Krumpfen, Stiftung Alfred-Wegener-Institut  
(AWI); S. 13 oben: Annegret Stuhr, Geomar; S. 15: Christoph  
Peteleit, Geomar; S. 16, 21: Gerard Bourret; S. 18: Peter Brandt,  
Geomar; S. 19: Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg; S. 20:  
Markus Scheinert, Geomar; S. 22 oben: [www.argo.ucsd.edu](http://www.argo.ucsd.edu); S. 22  
unten: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 3, Heft 1/2  
(1950)

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit  
vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich  
abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf  
weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder  
Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum  
Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-,  
Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen  
Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen  
und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken  
oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Unter-  
sagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.  
Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese  
Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch  
ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise  
verwendet werden, die als Parteinarbeit der Bundesregierung zugunsten  
einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

