

UMWELTPHYSIK

Treibgut für die Meeresforschung

Über 3600 selbstständig operierende Messsonden des Argo-Projekts sind in allen Weltmeeren unterwegs und liefern laufend Daten für die Ozean- und Klimaforschung.

Martin Visbeck

Alle bisherigen Daten zeigen, dass sich die oberen 1500 Meter des Ozeans, global gemittelt, relativ gleichmäßig erwärmt haben. Im Vergleich dazu sind die global gemittelten Lufttemperaturen in den letzten zehn Jahren nur leicht gestiegen. Lässt sich die „Erwärmungspause“ der Luft als Hinweis für eine Pause in der globalen Erwärmung interpretieren? Mehr als 90 Prozent der durch den Klimawandel bedingten Erhöhung der Wärmeenergie der Erde findet im Ozean statt. Um also zu beurteilen, ob der Klimawandel fortschreitet, muss man die Temperaturveränderung des Ozeans global erfassen. Dies ist ein zentrales Ziel des Roboternetzwerks Argo.

Der Ozean beherbergt das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde und ist die Geburtsstätte des Lebens. Gleichzeitig ist er ein wichtiger Rohstofflieferant – reich an nachwachsender Nahrung, die jedoch infolge menschlicher Aktivitäten wie zunehmender Überfischung oder Meeresverschmutzung gefährdet ist. Er bedeckt rund 70 Prozent der Erdoberfläche und spielt für das Klima auf der Erde eine große Rolle. Doch die Bedeutung des Ozeans für den Menschen wird erst in jüngster Zeit in zunehmendem Maße wahrgenommen [1]. Um ein genaues Bild der heutigen und zukünftigen Veränderungen zu zeichnen, brauchen wir viel mehr und genauere Informationen und Daten aus allen Bereichen des Ozeans.

Der menschliche Einfluss verändert die Strahlungsbilanz der Atmosphäre durch den Eintrag von Kohlendioxid (CO₂), Methan und ähnlichen Gasen in die Atmosphäre. Die dadurch zunehmende infrarote Rückstrahlung erwärmt die oberen Wasserschichten. Turbulente Vermischung und die Meeresströmungen verteilen das warme Wasser ungleichmäßig über den Ozean. Die Erwärmung des Meeresswassers verändert den Lebensraum Ozean und beeinflusst seine Lebewesen – das Phytoplankton-Vorkommen ändert sich, Fischschwärme wandern in kühlere Regionen aus, und Korallenriffe leiden unter Hitzestress. Warmes Wasser kann zudem weniger Gase aus der Atmosphäre aufnehmen, insbesondere Kohlendioxid und Sauerstoff. In der Folge wachsen sauerstoffarme Zonen im Ozean und verdrängen etwa große Fische. Langfristig verschärft sich auch das Klimaproblem: Ein wärmerer Ozean nimmt weniger als die bisherigen rund 30 Prozent des durch menschliches Handeln zusätzlich



Treiben lassen für die Forschung: Ein frisch ausgesetzter Argo-Tiefendrifter schwimmt im Ozean kurz vor dem Abtauchen.

ausgestoßenen Treibhausgases CO₂ aus der Atmosphäre auf – bedingt durch die geringere Löslichkeit und die zu erwartende Veränderung der Tiefenzirkulation. Zudem steigt der Meeresspiegel an. Dieser Effekt wird ungefähr die Hälfte des vom Weltklimarat IPCC erwarteten globalen Meeresspiegelanstiegs von 80 Zentimeter bis zum Jahr 2100 ausmachen. Eine große Zahl von Megastädten mit über 10 Millionen Einwohnern liegt heute in Küstenregionen; sie werden aktiv auf den Anstieg des Meeresspiegels reagieren müssen. Tropische Koralleninseln und Länder wie Holland, Dänemark oder Norddeutschland machen sich Sorgen um den Küstenschutz.

Hoch spezialisierte Satelliten liefern seit mehr als zwanzig Jahren globale Ozeandaten und dokumentie-

KOMPAKT

- Das Argo-Netzwerk besteht aus über 3600 Tiefendriftern, die alle 10 Tage Messdaten liefern. Mehr als 30 Staaten betreiben das Netzwerk und stellen die Daten frei zugänglich im Internet zur Verfügung.
- Das deutsche Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie setzt jährlich 30 bis 40 Tiefendrifter aus. Forschungseinrichtungen wie das Alfred-Wegener-Institut und GEOMAR sowie Universitäten steuern etwa 20 weitere Tiefendrifter mit zusätzlichen Sensoren bei.
- Neueste Auswertungen der Argo-Daten zeigen, dass der globale eisfreie Ozean sich weiter erwärmt.

Prof. Dr. Martin Visbeck, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Düsternbrooker Weg 20, 24105 Kiel

Abb. 1 Martin Visbeck setzt einen Argo-Tiefendrifter aus. Im Hintergrund ist das deutsche Forschungsschiff Maria S. Merian zu sehen.



GEOMAR, Mario Müller

ren die Oberflächentemperaturen, Meeresspiegelveränderungen, Oberflächenströmungen, die Meereisbedeckung und den oberflächennahen Chlorophyllgehalt. Die Sensorik von Satelliten bleibt jedoch weitgehend blind für Vorgänge unterhalb der Meeresoberfläche, da die elektromagnetische Strahlung nicht in den Ozean eindringen kann. Deshalb ist es nötig, zusätzlich Daten direkt aus dem Meer zu gewinnen. Die insgesamt 335 Millionen Quadratkilometer Meeresfläche macht es unmöglich, die Veränderungen allein mit Schiffen regelmäßig im Blick zu haben. Die Kosten wären einfach zu hoch und das Wetter an vielen Stellen zu schlecht.

Die Meeresforschung reagierte auf diese Herausforderung mit der Entwicklung von autonomen Messplattformen, die mit Schiffen ausgebracht und wieder aufgenommen werden. Seit über dreißig Jahren werden dazu Kabel mit einem Ankergewicht am Meeresboden fixiert, und luftgefüllte Auftriebskugeln lassen sie senkrecht im Wasser stehen. Auf den Kabeln sind in unterschiedlichen Tiefen selbstregistrierende Messsonden angebracht, welche die Veränderungen alle 10 Minuten aufzeichnen. Nach ein bis zwei Jahren werden die Verankerungen vom Forschungsschiff wieder geborgen, die Daten ausgelesen, Batterien gewechselt und erneut ausgebracht. Über hundert Tiefseeverankerungen sind weltweit an ausgewählten Schlüsselstellen im Ozean im Einsatz.

Seit 1980 wird an frei driftenden Messrobotern gearbeitet. Die erste Generation war genau auf die Dichte des Ozeans austariert. Einmal vom Schiff ausgesetzt trieben diese ersten Tiefendrifter in einer fest voreingestellten Tiefe meist zwischen 100 bis 2000 Meter Wassertiefe für mehrere Monate mit der Strömung. Am Ende der Mission wurde ein Gewicht abgeworfen, damit der Drifter an der Oberfläche die Daten per Satellit an Land funken konnte. Die Drifttrajektorie wurde mithilfe eines akustischen Navigationsnetzwerkes, das aus verankerten Schallquellen bestand, bestimmt. Die folgende Generation der Tiefendrifter (Argo-Drifter, Abb. 1) besitzt eine Hochdruckpumpe, die etwa hundert Milliliter Öl aus dem Druckgehäuse in eine außen liegende Gummiblase

pumpt. Der Drifter vergrößert dadurch sein Volumen und wird bei gleicher Masse leichter als das Meerwasser. So beginnt er langsam zu steigen und stellt die Messsensoren an. An der Oberfläche funkt er die neuen Daten via Satellit zur Zentrale. Danach wird das Öl in den Druckzylinder zurück gepumpt, der Tiefendrifter sinkt auf Tiefe (Abb. 2). In 2000 Meter Wassertiefe muss die Pumpe das Öl gegen 200 Bar Umgebungsdruck herausdrücken. Anfangs haben Luftblasen und Verunreinigung im Öl zu Problemen geführt, doch in den letzten zehn Jahren hat sich die Pumptechnik deutlich verbessert. Die Tiefendrifter haben auch von genaueren und langzeitstabileren Leitfähigkeitssensoren profitiert, die den Salzgehalt des Ozeans bestimmen. Heute dienen die profilierenden Tiefendrifter im Rahmen des Argo-Projekts dazu, Temperaturen und Salzgehalte der oberen 2000 Meter des Ozeans zu messen.

Das Argo-Netzwerk

Kein Staat der Welt hat genügend Ressourcen, um Tiefendrifter flächendeckend im Ozean einzusetzen. Daher wurde vor 15 Jahren das internationale Argo-Programm ins Leben gerufen. Über 3600 autonom operierende Messroboter bilden ein globales, den ganzen Ozean umspannendes Netzwerk.¹⁾ Sie werden von Meeresforschungs-Instituten aus über 25 Ländern der Erde betrieben (Abb. 3). Über den Zeitraum von nur zehn Jahren ließ sich erreichen, dass im Schnitt alle 300 bis 500 Kilometer ein Argo-Drifter alle zehn Tage ein Tiefenprofil aufnimmt. Die als profilierende Tiefendrifter bezeichneten Roboter tauchen aktiv in der Wassersäule auf und ab und ermöglichen damit Messungen aus unterschiedlichen Wasserschichten. Einmal vom Schiff ausgesetzt, läuft das Sammeln der Daten vollständig autonom ab. Der Drifter erreicht eine Tiefe von 2000 Metern. Erste Drifter, die bis zu 6000 Meter tief abtauchen können, wurden gerade erfolgreich getestet und sollen langfristig einen kleinen Teil des Netzwerkes ausmachen. In der Tiefe treibt der Drifter zehn Tage lang mit den Strömungen weiter. Danach beginnt der Aufstieg an die Meeresoberfläche. Auf dem Weg nach oben werden kontinuierlich Druck, Temperatur und Salzgehalt gemessen – ein Tiefenprofil der Daten entsteht. Die Gesamtheit dieser Informationen, aufbereitet von zwei Argo-Datenzentren in Nordamerika und Frankreich, steht im Internet der Wissenschaft und jedem Interessierten frei zur Verfügung. Ist die Lebenszeit der eingebauten Batterie erreicht, sinkt der Roboter zum Boden oder wird irgendwo an das Ufer geschwemmt – geborgen wird er meist nicht. Die Lebensdauer eines Tiefendrifters beträgt drei bis fünf Jahre – für die Anzahl der Messungen und der Tauchgänge ist die Batterieleistung der limitierende Faktor. Je nach Driftermodell und Sensorausstattung verbraucht ein Tauchgang 15 bis 25 Kilojoule Batterieenergie. In der Summe benötigt das globale Argo-Netzwerk eine Stromleistung von 80 Watt, was einer mittelstarken Haushaltsglühlampe

1) Argo-Homepage: www.argo.net

entspricht. Allerdings sind regelmäßig neue Tiefendrifter nötig, um die angestrebte Anzahl von 3600 Robotern und den gewünschten Nominalabstand von 300 Kilometern zur stetigen Beobachtung des globalen Ozeans sicher zu stellen.

Vom Tiefendrifter zum Gleiter

Die Tiefendrifter haben die Ozeanographie revolutioniert. Heute liefert das Argo-Netzwerk pro Jahr mehr Tiefenprofile als in zehn Jahren alle Forschungsschiffe zusammen – über 100 000. Ein Nachteil der Tiefendrifter ist, dass sie sich nicht steuern lassen. Ähnlich wie ein Heißluftballon mit dem Wind treibt, treiben sie mit der Strömung. Dadurch lassen sie sich, insbesondere für die Erforschung von regionalen Signalen im Ozean, teilweise nur bedingt nutzen. Die Drifter verlassen oft die Region, wenn es gerade spannend wird und kein anderer Drifter in Sicht ist. Daher gewährleisten sie keine lokal kontinuierliche Beobachtung des Ozeans.

In einer Weiterentwicklung wurden die Tiefendrifter mit Stummelflügeln versehen und durch ein Leitwerk mit Seitenruder steuerbar gemacht – der Gleiter war geboren. Die Gleiter – auch Segelflieger der Meere genannt – können einem Sägezahnmuster folgend durchs Wasser segeln. Die Ölpumpe macht sie mal leichter, mal schwerer als das Wasser, sie segeln langsam rauf und runter und verbrauchen nur wenig Strom zur Fortbewegung. Ein Gleiter benötigt je nach Sensorausrüstung drei bis fünf Watt, vergleichbar mit dem Verbrauch einer Fahrradglühbirne. Diese Energie erlaubt es dem Gleiter, sechsmal pro Tag bis zu 1000 Meter tief zu tauchen, Messdaten aufzunehmen und diese nach jedem Tauchgang per Satellit zur Zentrale zu funken. Gleiter können mehrere Monate autonom messen und am Ende sogar zum vereinbarten Treffpunkt zurückkehren. Den momentanen Weltrekord hält ein Gleiter, der neun Monate lang im Pazifischen Ozean mehr als 4900 Kilometer zurückgelegt hat. In Kiel werden seit einigen Jahren kleine Gleiterflotten

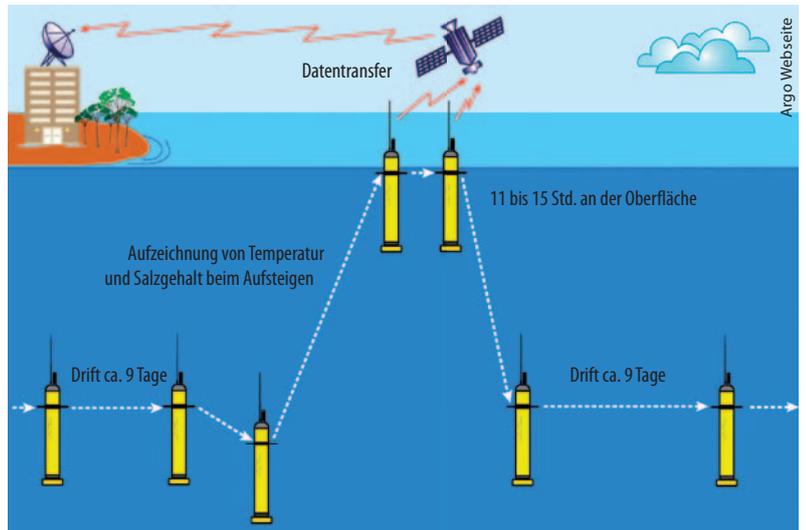


Abb. 2 Die Argo-Tiefendrifter sind selbstständig operierende Roboter für den Einsatz in den Meereswissenschaften. Sie tauchen ab, treiben in der Tiefe

und messen beim Auftauchen Temperatur, Salzgehalt, Druck und geben die Daten über Satelliten an eine Bodenstation.

vom Forschungsschiff aus im Meer ausgesetzt. Die Gleiter schwärmen aus und können die feinen Strukturen im Ozean als Funktion von Raum und Zeit über einige Wochen hinweg auflösen. Bessere Batterien, stromsparende Sensoren und Elektronik werden dazu beitragen, künftig noch leistungsfähigere Gleiter zu bekommen. Erste Prototypen haben schon Tauchgänge bis 5000 Meter Wassertiefe absolviert.

Der Ozean wird wärmer

Schiffe, Tiefendrifter und Gleiter nutzen elektrische oder optische Sensorsysteme, um die Temperatur, den Salzgehalt, den gelösten Sauerstoff, die Fluoreszenz, organische Substanzen oder den Nährstoffgehalt zu bestimmen. Das Verständnis der Physik der Ozeane hat sich in den letzten hundert Jahren rapide verbessert. Wir kennen in allen Meeresgebieten die grobe Verteilung der Wassereigenschaften und können diese

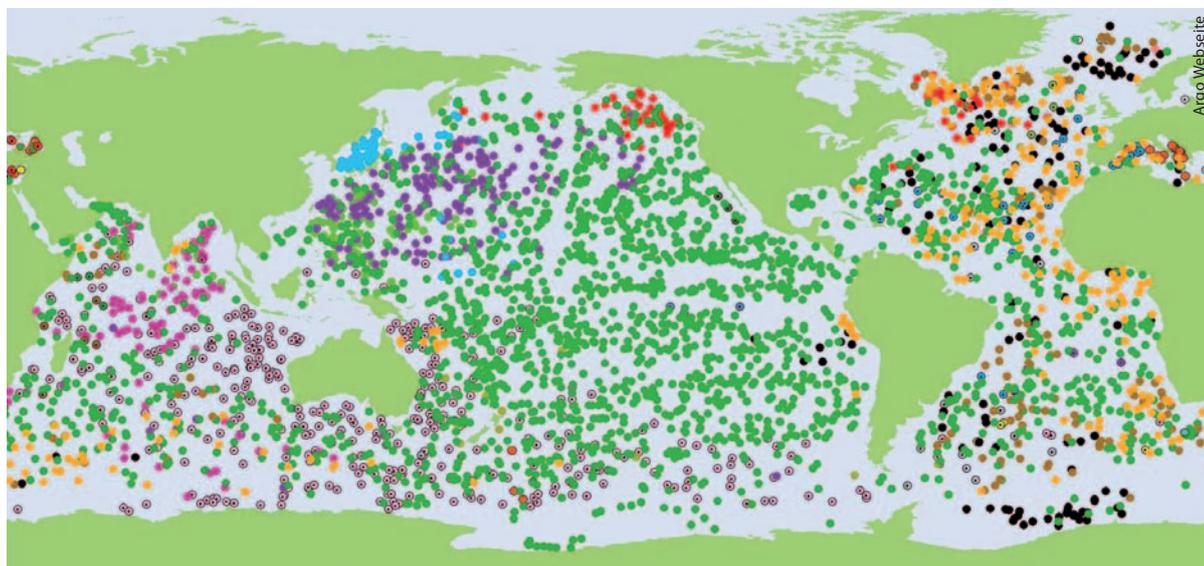


Abb. 3 Die globale Verteilung der über 3600 Argo-Tiefendrifter im Februar 2014: Deutschland finanziert 166 Roboter, markiert durch schwarze Punkte. Mit 2000 steuern die USA die meisten Argo-Drifter bei (grüne Punkte), gefolgt von Australien (368, rosa), Frankreich (256, orange) und Japan (187, violett).

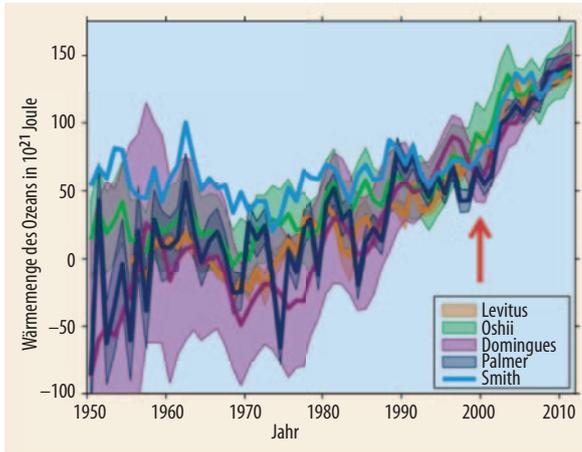


Abb. 4 Die Änderung des Wärmeinhaltes des Ozeans bis zu einer Tiefe von 700 Metern in verschiedenen Analysen [3]: Mit dem Beginn des Argo-Programms (Pfeil) hat die räumliche und zeitliche Abdeckung der Ozeanmessungen erheblich zugenommen. Vor 1970 erlaubt es die geringe Zahl an Messungen nicht, die Wärmeaufnahme eindeutig quantitativ abzuschätzen.

physikalisch erklären und mithilfe von hydrodynamischen Ozeanmodellen simulieren. In den hohen Breiten verändert sich die Temperatur von der 0 bis 5 °C kalten Oberfläche bis in große Tiefen nur geringfügig. In den Subtropen und Tropen allerdings ist der Ozean an der Oberfläche oft mehr als 22 °C warm. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt die Temperatur ab, und zwischen 100 und 250 Metern Wassertiefe werden 15 °C erreicht. In 2000 Meter Tiefe messen die Sensoren das 2 bis 4 °C kalte Tiefenwasser.

Das Tiefenwasser war mit der Wasseroberfläche zuletzt in den Polarregionen in Kontakt und wird mit der globalen Tiefenzirkulation langsam verbreitet und in die Tropen transportiert. Im Nordatlantik bildet sich in der Grönlandsee und Labradorsee am Ende des Winters durch tiefe vertikale Vermischung (Konvektion) bis in 2000 Meter Tiefe das Nordatlantische Tiefenwasser. Es strömt im Westen des Atlantiks nach Süden, überquert den Äquator und gelangt über den Zirkumpolarstrom bis in den Indischen und Pazifischen Ozean. Um die Antarktis herum entsteht in der Nähe des Meereises das Antarktische Bodenwasser. Es breitet sich nach Norden aus und ist in allen Ozeanbecken bis zum Äquator zu finden. Das sehr kalte Antarktische Bodenwasser findet sich nur unterhalb von 3000 Meter Wassertiefe und ist damit für die heutigen Argo-Tiefendrifter nicht zu erreichen.

Eines der Ziele des Argo-Netzwerks ist es, die Veränderungen der Temperaturen und damit den Wärme-

gehalt des Ozeans global zu bestimmen. Dazu wird jedes Profil mit „historischen“ Daten aus den 1950er- und 1990er-Jahren verglichen. Die Unterschiede werden global kartiert und integriert. Ein illustratives Beispiel ist der Vergleich mit den Daten der Challenger-Expedition, die zwischen 1872 und 1876 die Temperaturprofile aller Ozeanbecken bestimmte. Der Vergleich mit den Daten von Argo zeigt, dass die räumlich gemittelte Erwärmung an der Meeresoberfläche $0,59 \pm 0,12$ °C beträgt. 366 Meter unter der Oberfläche beträgt die mittlere Erwärmung noch $0,39 \pm 0,18$ °C und in 914 Metern Tiefe nur $0,12 \pm 0,07$ °C [2].

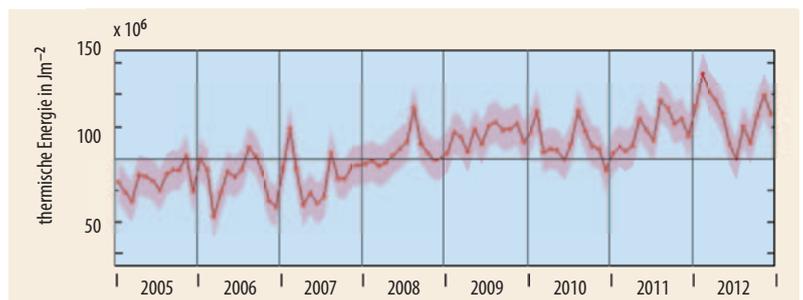
Der Weltklimarat IPCC fasst seit 1990 alle fünf bis sechs Jahre den Stand der Klimaforschung zusammen. Ende September 2013 erschien die Zusammenfassung des fünften Klimasachstandsberichts [3]. Dieser zeigt, dass sich der Ozean global gemittelt relativ gleichmäßig erwärmt hat (Abb. 4). Genau das stützen die Daten des Argo-Netzwerks. Die beispiellose globale Abdeckung der Tiefendriftmessungen zeigt, dass die durch den Klimawandel bedingte Erwärmung des Ozeans ungebremst voran schreitet (Abb. 5) [4].

Bedeutung für die Wissenschaft

Angetrieben durch Sonne und Wind ist der Ozean mit seinen globalen Strömungssystemen einer der wichtigsten Faktoren, die unser Klima beeinflussen. Um diesen Einfluss besser zu verstehen, bedient sich die moderne Meeresforschung nicht nur der Messungen, sondern auch der Theorie und Modellierung. Messungen aus dem Ozean erlauben es, die tatsächlichen heutigen Verhältnisse zu beschreiben.

Die Ozeanmodelle beruhen auf den Grundgleichungen der Hydrodynamik und fordern an jedem Gitterpunkt die Impuls-, Energie und Massenerhaltung. Ähnlich der Wettervorhersage lassen sich die Modelle mit Messdaten initialisieren und durch Spezifizierung des Austauschs von Impuls (Wind Schubspannung) und Wärme (Summe aus kurz- und langwelligen Strahlungen sowie sensiblen und latenten Wärmeflüssen) sowie Masse (Regen oder Verdunstung) zukünftige Zustände des Ozeans errechnen. Zusammen mit der Kenntnis von chemischen und biologischen Eigenschaften folgen recht realistische Ozeanmodelle. Die zum Teil sehr komplizierten physikalischen, chemischen und biologischen Zusammenhänge werden in mathematische Gleichungen gebracht und im Allgemeinen durch numerische Simulation

Abb. 5 Die Anomalien der thermischen Energie pro Quadratmeter für die Meeresschicht von 10 bis 1500 Meter Tiefe, errechnet aus Argo-Daten [4], zeigt für den Zeitraum 2005 bis 2012 eine anhaltende Wärmezunahme der Ozeane. Dafür ist ein zusätzlicher Wärmefluss von $0,5 \pm 0,1$ W/m² in den Ozean nötig.



zeitabhängig gelöst. Diese Modellierung verbindet damit die Messungen mit der Theorie und erlaubt es, die vergangenen, heutigen und zukünftigen Eigenschaften des Ozeans global zu beschreiben.

In der Klimaforschung koppelt man Ozean- mit Atmosphärenmodellen und simuliert die gemeinsame Entwicklung. Ein Schwachpunkt bleibt die horizontale und vertikale Auflösung der Modelle. Die Gitterpunkte liegen weit auseinander, und kleinräumige Prozesse, wie zum Beispiel die turbulente Vermischung des Ozeans, müssen durch einfache Wirkzusammenhänge parametrisiert werden. Die Grundgleichungen des Ozeans lassen sich für einfache Randbedingungen analytisch lösen, woraus sich Theorien der Zirkulation ableiten. Ohne Messungen bleibt diese Theorie nicht überprüfbar. Je mehr Beobachtungen aber vorliegen, umso erfolgreicher funktioniert das Zusammenspiel von Messung, Theorie und Modell und umso realistischer fallen die Modellaussagen zur Analyse und Vorhersage aus.

Das Argo-Programm ist das bislang umfangreichste, und damit ein herausragendes Beispiel dafür, wie es dank eines international koordinierten Projektes gelingen konnte, die Datengrundlage für die internationale Ozean- und Klimaforschung dramatisch zu verbessern. Innerhalb von zehn Jahren ist es gelungen, ein globales Messnetz aufzubauen und erfolgreich bis heute zu betreiben. Derzeitiger Plan ist, diese Messungen weiterzuführen und durch neue Sensoren, tiefer tauchende Roboter und steuerbare Gleiter aus-

zubauen. Die Argo-Daten liefern neue Einblicke in die Eigenschaften des Ozeans sowie dessen regionale Besonderheiten und erlauben es damit, den Einfluss des Ozeans auf das globale Klimageschehen genauer zu quantifizieren.

Literatur

- [1] World Ocean Review: www.worldoceanreview.com
- [2] D. Roemmich, W. J. Gould und J. Gilson, *Nature Climate Change* 2, 425 (2012)
- [3] IPCC (Hrsg.), *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
- [4] K. v. Schuckmann und P.-Y. Le Traon, *Ocean Science* 7, 783 (2011)

DER AUTOR

Martin Visbeck ist physikalischer Ozeanograph am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Professor an der Universität Kiel. Er ist Sprecher des Kieler Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“ (www.futureocean.org). Seine Forschungsschwerpunkte sind die globale Ozeanzirkulation und deren Rolle im Klimasystem. Er ist Mitglied in zahlreichen internationalen Arbeitsgruppen ebenso wie in der Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Leiter des Nationalen Komitees für Nachhaltigkeitsforschung in Future Earth.

