

# Die Erben der Flaschenpost

Nächste Woche wird der neue IPCC-Sonderbericht „Ozean und Kryosphäre“ veröffentlicht. Tatsächlich prägen die Weltmeere das Klima entscheidend – und sie werden wärmer. Wie es tief unter ihren Oberflächen aussieht, erkundet heute eine Flotte aus mehr als viertausend Tauchrobotern.

Von Roland Wengenmayr

Vor 155 Jahren begann eines der längsten Projekte der Wissenschaftsgeschichte. Der Geophysiker Georg von Neumayer (1801 bis 1896), nach dem die mittlere dritte deutsche Antarktis-Station benannt ist, wollte die weltweiten Meeresströmungen genau kartieren – und zwar per Flaschenpost. In jeder der von Schiffen gezielt ausgebrachten Flaschen steckte ein von Neumayer entworfener standardisierter Zettel, auf dem Position des Auswurfs, der Name des Schiffs, dessen Route und weitere Daten vermerkt waren. Platz für romantische Botschaften war indes nicht vorgesehen.

Die ersten Flaschen wurden 1864 ins Meer geworfen. Danach geschah drei Jahre lang nichts. Niemand schickte Neumayer einen Zettel aus einer irgendwo angespülten Flasche, und der Forscher begann schon an seiner Idee zu zweifeln. Doch dann meldete sich der erste Finder. Seine Flasche war am 17. Juli 1864 von der „Norfolk“ auf der Fahrt von Melbourne nach London nahe Kap Hoorn ins Meer geworfen und am 9. Juni 1867 an Land gespült worden – in Australien, wo Neumayer selbst jahrelang gelebt hatte. In schön geschwungenen Handschrift sind die Daten auf dem Zettel vermerkt, der heute im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg aufbewahrt wird. Fortan erwies sich das Programm als so erfolgreich, dass es bis 1933 fortgeführt wurde: 660 Zettel gelangten nach Hamburg, wo sie nebst den daraus erstellten historischen Strömungskarten archiviert sind. Noch 2018 wurde, ebenfalls in Australien, eine von Neumayers Flaschen entdeckt. Sie war 112 Jahre zuvor ausgesetzt worden. Um die Echtheit zu überprüfen, sei sogar ihr Glas von einem Labor analysiert worden, berichtet Martina Plettenhoff, Leiterin des Archivs im Hambur-

ger Bundesamt. Das Ergebnis: Es ist tatsächlich eine originale Ginflasche aus jener Zeit, die, nachdem sie jemand ausgesunken hatte, in den Dienst der Wissenschaft gestellt wurde. Ihre modernen Nachfolger erinnern ebenfalls an Flaschen, allerdings eher an welche für Industriegröße: die Tauchbojen des Projekts „Argo“, benannt nach dem griechischen Mythologie. Es sind autonome Mini-U-Boote, die vertikal abtauchen und aufsteigen können. Horizontal misсен und sollen sie mit der Strömung driften wie einst die Flaschenpost. Etwa 15 000 Euro kostet eine Argo-Boje in der Standardausführung, bei einer Lebensdauer von bis zu sechs Jahren. Sicher, Ginflaschen waren billiger.

Dafür hat man heute eine immer wieder erweiterte Roboterflotte zur Verfügung, welche die Weltmeere durchtaucht und dabei Daten liefert, die sich bis in unseren Alltag auswirken. So helfen sie zum Beispiel, Ozeanmodelle zu verbessern, integrale Komponenten moderner meteorologischer Modelle, die auch Wettervorhersagen zugrunde liegen. Vor allem aber haben die riesigen Wasserkörper der Meere erheblichen Einfluss auf die mittel- und längerfristigen Entwicklungen in der Atmosphäre, also auf das Klima.

Argo-Daten spielen daher auch eine wichtige Rolle im Spezialbericht „Ozean und Kryosphäre“, den der Weltklimarat IPCC am kommenden Mittwoch vorstellt. Gute Nachrichten sind nicht zu erwarten. Bei einer Erderwärmung von 1,5 Grad Celsius werden sehr wahrscheinlich 70 bis 90 Prozent der tropischen Riffe der Korallenbleiche zum Opfer fallen, bei zwei Grad praktisch alle. Verantwortlich dafür sind marine Hitzewellen (siehe „Klimaflucht in die Tiefsee“), verursacht durch Treibhausgase.

Gestartet wurde das Argo-Programm im Jahr 2000, aktuell sind 34 Länder direkt daran beteiligt. Fast 4000 Tauchbojen treiben mittlerweile vor allem in den großen Ozeanen. Durchschnittlich alle drei Breiten- und Längengrade ist ein Gerät unterwegs. Seinen Namen erhielt das Unternehmen als Partner eines Satellitenprogramms namens Jason, nach dem mythologischen Chef der Argonauten. Diese Satelliten tasten den Meeresspiegel und dessen Veränderungen an dem Weltall ab, und Argo verlängert diese Erkundung bis hinunter in die Tiefsee, wo kein Satellit hinschauen kann.

Wie zu Neumayers Zeiten geht es also um die wissenschaftliche Vermessung der Ozeane. Wenn man eine Argo-Tauchboje auf ihrer einsamen Reise begleiten könnte, würde man mit ihr zunächst tausend Meter in die Tiefe absinken und sich dort neun Tage mit der Strömung treiben lassen. In dieser Zeit schläft das Gerät und schon seine Batterie. Am zehnten Tag wacht Argo auf und taucht zunächst auf 2000 Meter Tiefe ab. Dort angekommen, steigt die Tauchsonde auf, während ihr Messkopf Daten über das von oben anströmende Wasser aufzeichnet. Diese Messrichtung sei wichtig, erklärt der Oldenburger Meeresforscher Oliver Zielinski, weil sie garantiert, dass die Sensoren auf ungestörtes Volumen treffen. Im Kielwasser der Boje werden Verwirbelungen Messfehler verursachen.

Die Standardausführung einer Argo-Einheit erfasst über den Wasserdruk die Wassertiefe sowie die Umgebungstemperatur und den Salzgehalt. Sobald sie aufgetaucht ist, funkt sie dieses Messprofil der Kilometer Wassersäule ins Satellitennetz. Die vierte Information, die sie dabei liefert, ist ihre aktuelle Position. Aus dem Vergleich mit der letzten Position zehn Tage zuvor wird die Richtung

und Geschwindigkeit der Strömung in der Tiefe berechnet. Argo greift damit das alte Programm Georg von Neumayers auf, aber gewissermaßen einen Kilometer tiefergelegt. Vorgänge in den Meeresoberflächen sind schließlich heute fast lückenlos per Satellit erfassbar. Die globale Tiefensondierung öffnet ein neues Fenster ins Klimasystem der Erde. Sebastian Brune vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg vergleicht das Argo-Programm daher mit der Einführung der Wetterballone in die Meteorologie. Damals verschafften die Ballonsonden den zuvor am Boden klebenden Wetterfroschen endlich regelmäßige Messwerte aus den höheren Stockwerken der Atmosphäre, was erheblich zur Verbesserung der Wettervorhersagen beitrug. Brune selbst simuliert die Vorgänge in den Weltmeeren im Rahmen eines sogenannten Erdsystemmodells. Es verknüpft Prozesse im Wasser mit klimarelevanten Abläufen in der Atmosphäre und an Land. Um Veränderungen im Klima aufzuspüren, füttert man ein solches Modell mit historischen Vergleichsdaten. Die aber waren vor Argo spärlich, wie Brune anhand einer Weltkarte von 1957 demonstriert. Damals gab es Messungen der Meeressassertemperatur nur entlang des feinen Spinnennetzes der regelmäßig befahrenen Schifffahrtswege. Die riesigen Löcher in diesem Netz blieben unerfasst. Auf der vergleichbaren Karte für 2007 ist die Lage ganz anders: Die Weltmeere sind bereits gut abgedeckt, abgesehen von den Polargebieten und einigen Regionalmeeren. Mit über hunderttausend Messprofilen pro Jahr liefert Argo sozusagen ein Röntgenbild der Ozeane.

Eine noch bessere Erfassung der Meere war Thema auf einer Tagung deutscher Argo-Nutzer im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, wo Brune

die erwähnten Karten zeigte. Birgit Klein hat diese Tagung organisiert. Die Oceanographie ist seit 2008 so etwas wie die Mutter der deutschen Argo-Beteiligung. Ihre vierköpfige Gruppe ist für die derzeit 175 aktiven Argo-Bojen der Bundesrepublik verantwortlich, bis Ende dieses Jahres sollen es 180 sein. Diese tauchen dabei keineswegs nur durch Nord- und Ostsee. Vielmehr kümmert man sich in Hamburg um den Süden des Atlantiks, dessen hohen Norden und um Lücken anderswo in diesem Ozean. Deutsche Forschungsschiffe setzen die Bojen auf ihren Missionen abseits der Schifffahrtsstraßen ins Wasser. Ein- bis zweimal im Jahr checkt Kleins Gruppe via Satellit an jeder Boje den Zustand der Sensoren.

„Argo hat die Oceanographie revolutioniert“, sagt Birgit Klein und macht auf eine Besonderheit des Programms aufmerksam: Es gibt dafür keine zentrale Organisation. Alles beruht auf einem gegenseitigen Einverständnis der beteiligten Länder und Institutionen, sagt sie. Trotzdem hat das Programm ein offizielles Siegel. Ein Aufkleber auf jeder Boje bezeugt ihre Zugehörigkeit zum weltweiten Klimaforschungsprogramm der Vereinten Nationen. Dies schützt die Wissenschaftler vor juristischen Schwierigkeiten für den Fall, dass eine Boje in die „ausschließliche Wirtschaftszone“ eines Landes driftet. Zugleich ist die Technik der Bojen auch ohne ein „Argo-Headquarter“ so standardisiert und kontrolliert, dass die Daten aller Bojen hohen und einheitlichen Qualitätskriterien genügen. Für die Klimaforschung ist das entscheidend, denn der Klimawandel zeigt sich vor allem in kleinen Veränderungen, die zuverlässig erfasst werden müssen.

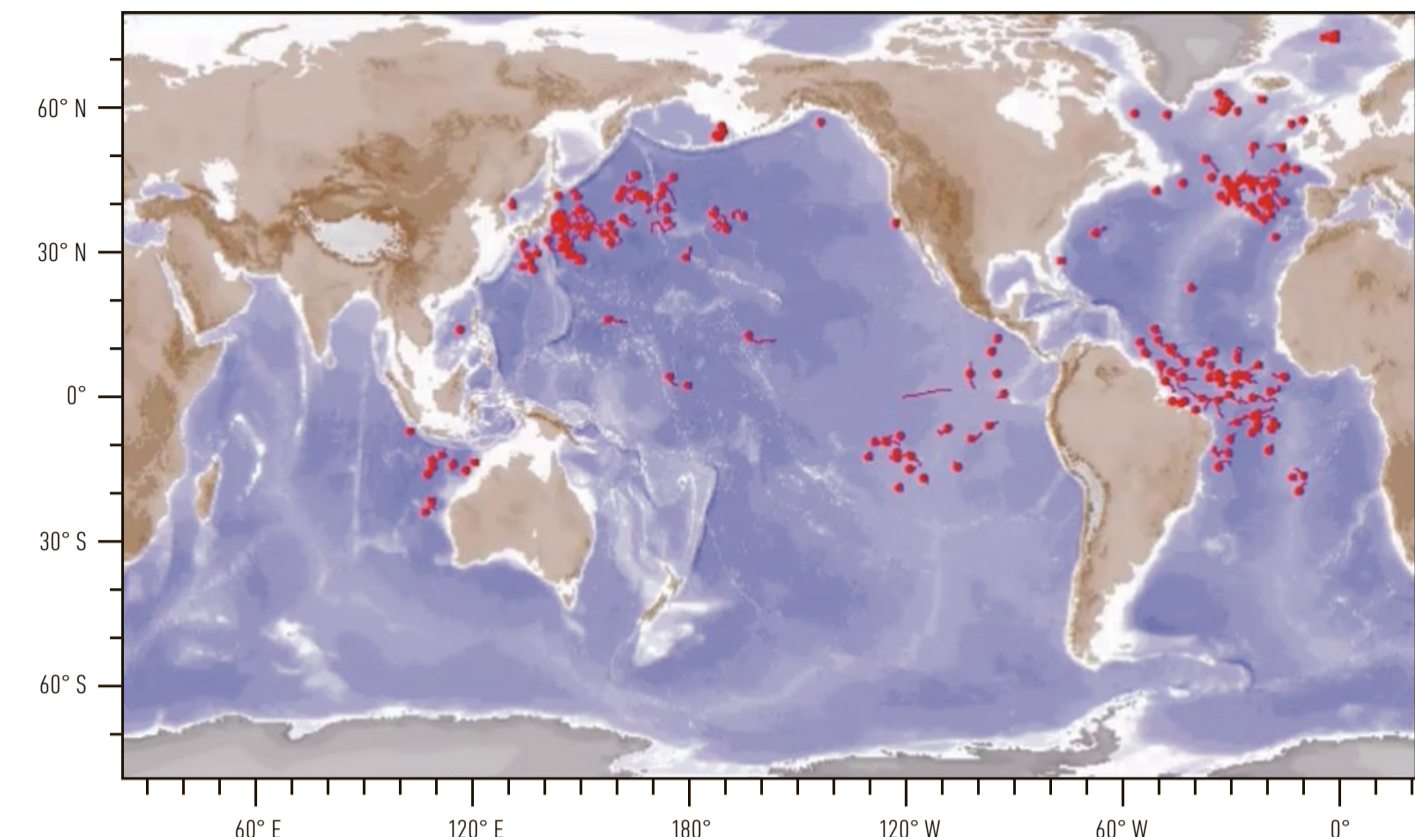
Zu den weißen Flecken, die in Zukunft gefüllt werden sollen, zählen die Wassermassen unter dem arktischen Meeres. Denn sie gehören zu den treibenden Komponenten jenes globalen Systems von Meeresströmungen, zu dem auch der Golfstrom gehört, der das Klima in Mitteleuropa mitbestimmt. Daher sollen Argo-Sonden in Zukunft auch das Meer unter der Arktis durchdrachten können. Allerdings müssen sie für die harschen Bedingungen dort erst fit gemacht werden, wie Ingrid Angel Benavides aus Kleins Gruppe auf der Tagung ausführte. Die Boje muss zum Beispiel am Ende ihres Messzyklus erkennen können, ob es über ihrem Kopf eisfrei ist, bevor sie auftaucht. Stößt sie mit ihrer empfindlichen Antenne gegen das Eis, kann diese beschädigt werden. Eine polartaugliche Boje sollte zukünftig über die Wassertemperatur erkennen können, ob sie sich unter Eis befindet, erklärt die Forscherin. Das Gerät kann dann wieder abtauchen und das aktuelle Messprofil speichern. Die zugehörige Position muss man nachträglich aus der Drift abschätzen. „Das ist aber immer noch viel besser, als keine Daten zu haben“, sagt Angel Benavides. Der Einsatz von Argo soll auch auf andere Bereiche erweitert werden. Im Spezialprogramm DeepArgo wird an kugelförmigen Sonden gearbeitet, die bis zu sechs Kilometer tief tauchen können. Damit können sie in den meisten Meeresregionen die Tiefsee bis zu ihrem Grund erreichen. Und in einem biochemischen Spezialprogramm werden Argo-Tauchroboter mit den Sensoren ausgerüstet, die ihnen so etwas wie Geruchs- und Schweißverleihen. Damit lassen sich zum Beispiel Sauerstoffgehalt und Lichtfeld unter Wasser erfassen und damit die Lebensbedingungen der mannigfaltigen Meeresorganismen. Denn am Ende sind Ozeane nicht nur die Schwungräder der Klimamaschine unseres Planeten, sondern auch ein Teil der Biosphäre.



Foto: www.argo.ucsd.edu

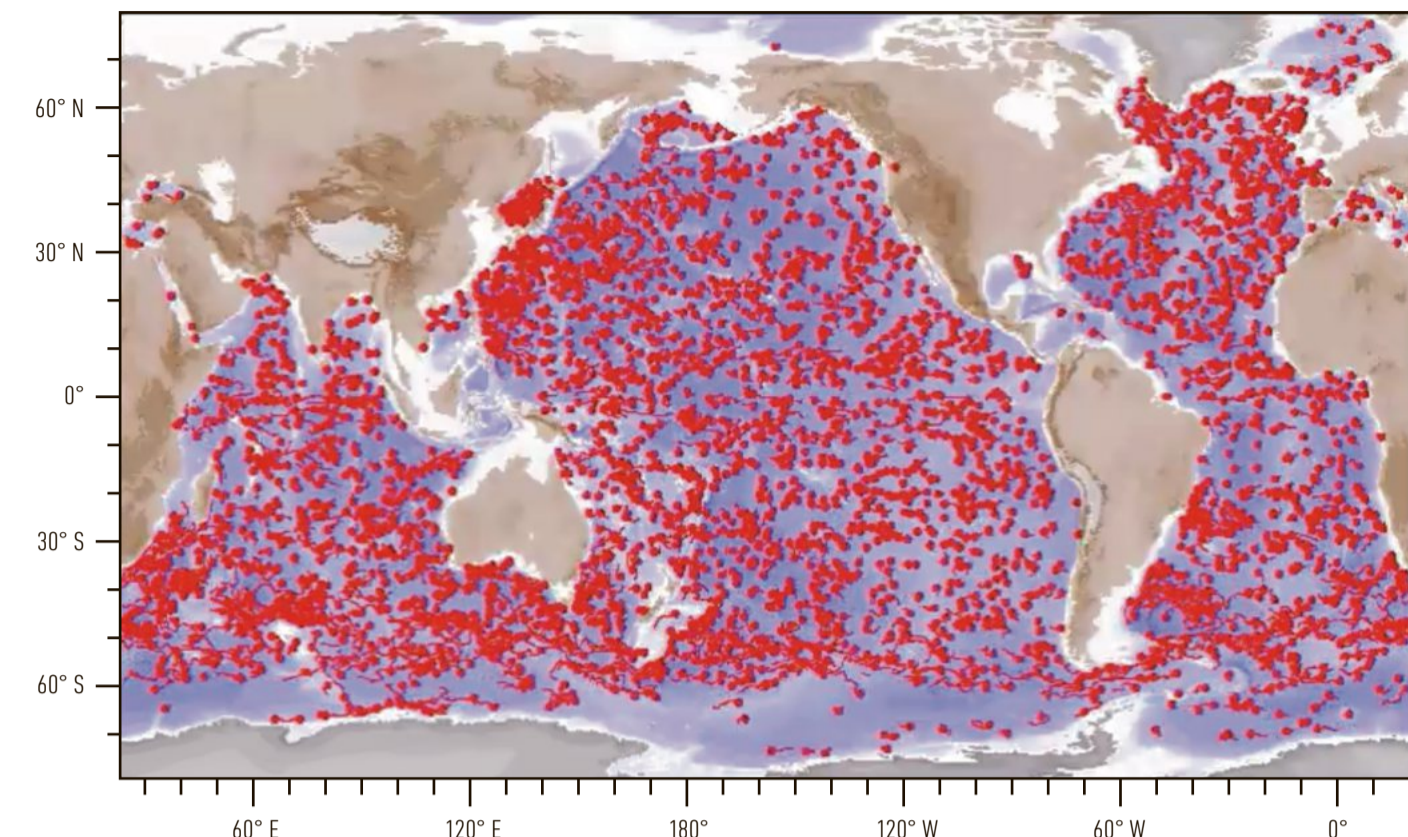
Und los geht's. Von einem deutschen Forschungsschiff wird eine Argo-Tauchboje ausgesetzt.

Juni 2001: 192 Bojen



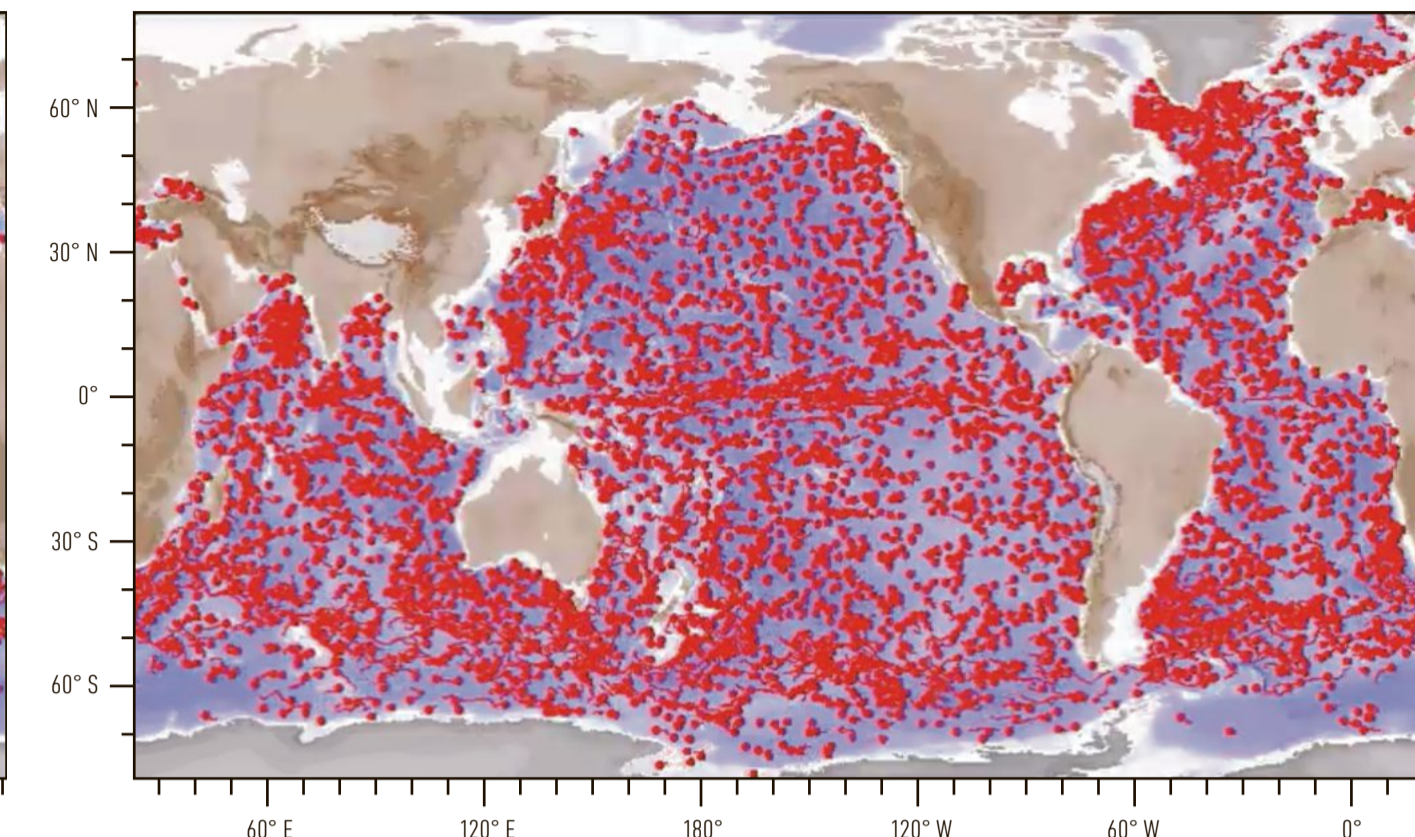
Die ersten Argo-Bojen schwammen in bestimmten, von Forschungsschiffen häufiger frequentierten Seegebieten.

Juni 2010: 3346 Bojen



Neun Jahre später sind die Weltmeere weitgehend abgedeckt. In den Polarmeeren bleiben allerdings große Lücken.

Juni 2018: 4104 Bojen



Heute sind manche Strömungsmuster leicht zu sehen, etwa der Äquatorialstrom des Pazifiks.

Grafiken argo.net, Bearbeitung FAZ, Grafik hen

## Klimaflucht in die Tiefsee

Auch in den Ozeanen nehmen die Hitzewellen zu, sagt der Physiker Thomas Frölicher

**Herr Frölicher, Sie erforschen ozeanische Hitzewellen. Was ist das denn?**

Bei einer Hitzewelle im Ozean ist dessen Temperatur für eine bestimmte Zeit stark erhöht. Sie ist also mit einer Hitzewelle in der Atmosphäre vergleichbar, wie wir sie diesen Sommer wieder erleben haben. Sie unterscheidet sich von der atmosphärischen darin, dass sie meistens länger dauert und sich über größere Gebiete erstreckt. Es braucht mehr Energie, um den Ozean erst einmal zu erwärmen, denn Wasser hat eine viel höhere Aufnahmekapazität für Wärme als Luft. Wenn es dann warm ist, braucht es auch länger, bis die erhöhte Temperatur an die Atmosphäre abgegeben ist.

**Und warum betreffen ozeanische Hitzewellen ausgedehntere Gebiete?**  
Das atmosphärische Wettersystem ist meist viel chaotischer und durchmischt sich schneller, im Ozean geht alles ein bisschen langsamer.

**Das heißt, Wasser ist träger ...**  
Genau, im Vergleich zur Atmosphäre ist es ein bisschen wie dickflüssiger Senf.

**Sind ozeanische Hitzewellen eine neue Entdeckung?**

Ja. Vor zwanzig, dreißig Jahren hatte man die Beobachtungsdaten noch gar nicht, um solche Extremereignisse im Ozean zu untersuchen. Um sie aufzuspüren, braucht man regelmäßige Messungen über sehr lange Zeiträume. Erst seit 1982 hat man Satellitendaten von den

Meeresoberflächen, und seit knapp zwanzig Jahren von den Argo-Bojen.

**Wie entstehen marine Hitzewellen?**  
Die wichtigsten Treiber sind durch die Veränderungen in den Meeresströmungen verursachte Temperaturschwankungen wie El Niño und La Niña. Es gibt aber auch lokale Phänomene wie zum Beispiel 2003 über dem Mittelmeer, wo das Land sich sehr stark erwärmt hat und dann die Wärme in der Atmosphäre einfach vom Ozean aufgenommen wurde. Ein gleiches Phänomen wird dieses Jahr wieder beobachtet. Zu einer Hitzewelle kann es auch kommen, wenn eine Warmwassererublenz in eine kaltere Region wandert oder wenn sich Windsysteme verschieben.

**Und solche Ereignisse häufen sich in den letzten Jahren?**

Da sich das Meer sehr stark erwärmt hat, ist natürlich auch die Wahrscheinlichkeit der Bildung dieser Hitzewellen sehr stark erhöht. Wir haben gezeigt, dass die Häufigkeit, mit der Hitzewellen in den letzten 35 Jahren auftraten, sich verdoppelt hat.

**Ist denn sicher, dass das keine zufällige Häufung solcher Ereignisse ist?**  
Das haben wir mit Klimamodellen nachgewiesen. Man lässt die Modelle mit den beobachteten Treibhauskonzentrationen das Klima für hundert Jahre simulieren. Dann macht man zum Vergleich Klimamodellsimulationen, in denen man die Treibhausgase auf die vorindustrielle Zeit fixiert. Der Unterschied zwischen beiden Simulationen ergibt dann allein den Einfluss durch den menschengemachten Treibhausgaskonzentrationsanstieg. So haben wir gezeigt, dass die Häufigkeit der Hitzewellen in den vergangenen 35 Jahren nicht durch natürliche Klimaschwankungen erklärt werden kann, sondern nur durch die anthropogene globale Erwärmung.

**Und was prognostizieren Ihre Simulationen für die Zukunft?**  
Wir sehen, dass die Häufigkeit der Hitzewellen sehr stark zunehmen wird. Wenn sich die Erde um 35 Grad erwärmen sollte, dann nimmt die Wahrscheinlichkeit von marinen Hitzewellen um das 41-Fache zu. Dies betrifft eigentlich alle Ozeanregionen, aber vor allem die tropischen Regionen – also genau dort, wo Warmwasserkorallen leben. Nicht nur die Häufigkeit der Hitzewellen nimmt zu, sie dauern auch länger. Das hat sehr große Auswirkungen auf Organismen, nicht nur auf Warmwasserkorallen, sondern auf ganze Ökosysteme.

**Das betrifft dann auch die Fische?**  
Man sieht schon jetzt, dass Fische aus den Tropen polwärts in kühlere Zonen migrieren. Das wird noch stärker zunehmen. Die Frage ist, ob sie das überhaupt noch können, wenn diese Hitzewellen sehr stark zunehmen und größer werden. Ihnen bleibt dann vielleicht nur die Flucht in die Tief. Das Problem

ist, dass es dort wenig Sauerstoff gibt und sich diese Sauerstoff-Minimumzonen auch noch ausdehnen können.

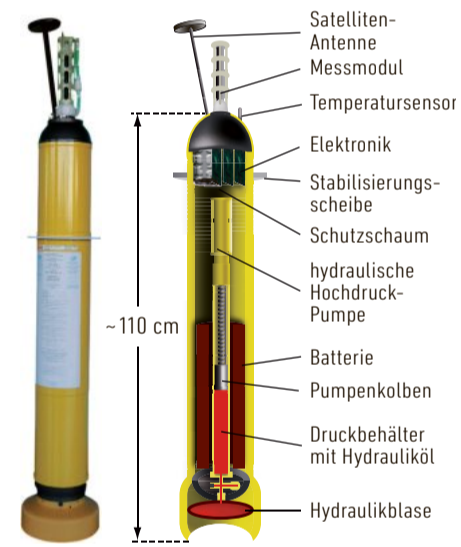
**Und wie sieht es denn mit den Polarregionen aus?**

Das ist auch sehr interessant. Der Arktische Ozean erwärmt sich stark, weil sich dort das Meer eis zurückzieht. In der Arktis sieht man daher eine sehr starke Zunahme dieser Hitzewellen. Im Südpolarmeer ist das ein bisschen anders. Dort gibt es sehr starke Westwinde, die Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche auflaufen lassen. Und da es kalt ist, kann sich die Oberfläche nicht sehr erwärmen – auf jeden Fall nicht über die nächsten hundert Jahre. Dort hat man also eine verzögerte Antwort auf den Klimawandel. Allerdings muss man auch beachten, dass das Südpolarmeer bisher am wenigsten erforscht ist. Es ist sehr schwierig, dort mit Schiffen Messungen zu machen, vor allem im Winter. Hier werden die Argo-Bojen unser Wissen erheblich bereichern.

Etwas hunderttausend Euro kostet eine solche Spezialboje, weshalb jede davon auch nach dem Einsatz wieder geborgen wird. Bei den Standardbojen hingegen rechnet sich dies weder finanziell noch ökologisch. Wenn ein Schiff extra zum Aufsammlen vieler Seemullen anfahren muss, ist das zu teuer und generiert unangenehme viel Treibhausgas. Deshalb sind heutige Bojen so programmiert, dass sie am Ende ihres vier- bis sechsjährigen Lebens, wenn die Batterien erschöpft sind, in die Tiefsee absinken. „Der Trend geht jedoch dahin, die Argo-Bojen langlebiger zu machen“, sagt Zielinski.

Der Forscher kauft seine Argo-Bojen bei einem der Handvoll Hersteller fertig ein und rüstet sie dann auf. Sie sind auf extreme Robustheit ausgelegt. Einmal ausgesetzt, müssen sie schließlich so zuverlässig funktionieren wie Raumsonden. Der Tauchmechanismus ist auf minimalen Energieverbrauch optimiert. Argo hat dazu unten im Fuß eine Gummiblase. Soll die Boje aufsteigen, pumpt sie Hydrauliköl aus einem Drucktank in diese Blase und vergrößert darüber Argos Verdängungsvolumen im Wasser. Will sie abtauchen, presst sie das Öl umgekehrt zurück in den Drucktank. Dort befindet sich oben eine komprimierbare Luftblase.

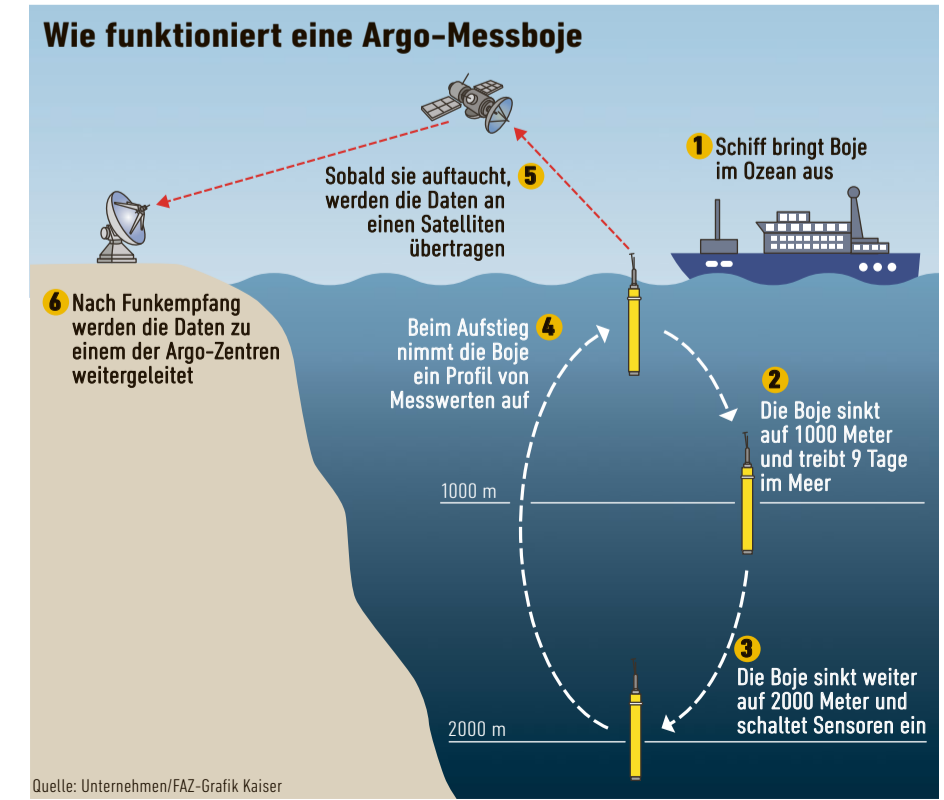
Robust wie eine Raumsonde



Robust wie eine Raumsonde

le der Argo-Boje müssen diesem zweihundertfachen Atmosphärendruck über mindestens 150 Messzyklen standhalten. Beim Aufsteigen pumpt sich der Kopf des Geräts zusätzlich mit der Luft aus dem Drucktank auf, um die Wasseroberfläche ausreichend hoch zu durchstoßen. Ein Ring stabilisiert die senkrecht stehende Boje gegen zu starkes Schaukeln in den Wellen. Das ist wichtig für ein ungestörtes Senden des jüngsten Messprofils. Einer der gerade für die Boje sichtbaren Satelliten empfängt das Funksignal. Früher gehörten sie zum Argos-Kommunikationssystem, mit dem auch besenderte Zugvögel verfolgt werden, seit einigen Jahren ist es das leistungsfähigere Iridium-Satellitensystem, das es auch erlaubt, umgekehrt der Boje Daten zu senden. Die Messdaten gehen zu einem der beiden Argo-Zentren im bretonischen Brest oder in Monterey in Kalifornien. Dort werden sie zunächst automatisch auf Qualität geprüft und veröffentlicht, dann schaut noch mal ein menschlicher Experte drauf. *wzwe*

Wie funktioniert eine Argo-Messboje



Auf und nieder, immer wieder – solange die Batterie hält. Grafiken argo.net, Bearbeitung FAZ, Grafik Kaiser



Foto Olivier Dagonay/Ifremer

Warum nicht? Das französische Forschungsschiff, das hier eben eine Argo-Boje der „Arvor“-Bauform ausgesetzt hat, heißt „Pourquoi Pas?“