

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft

2016

Ozeane

VERHALTENSFORSCHUNG
Auf der Jagd mit
dem Weißen Hai

METEOROLOGIE
Das Gedächtnis
des Klimas

ETHNOLOGIE
Ein Meer von
Verbindungen

SPEZIAL

The background of the entire page is a stylized, monochromatic blue illustration of a futuristic industrial or research environment. On the left, a large, curved structure, possibly a tunnel or a large pipe, dominates the foreground. In the middle ground, several figures in work uniforms are engaged in various activities: one is looking at a tablet, another is standing near a control panel with multiple screens displaying data, and a third is sitting on a ledge. The overall aesthetic is clean, modern, and technological, with a focus on human-machine interaction in a high-tech setting.

SIEMENS

Pictures of the Future

Das Magazin für Forschung und Innovation

Dossier – Innovationen bei Siemens


Von der ersten Idee bis zur Markteinführung:
Wie Innovationen entstehen.

[siemens.de/pof-innovationen](https://www.siemens.de/pof-innovationen)



Sprudelwasser naturell

Das Wasser vor der Insel Panarea in Süditalien kocht zwar nicht, aber es sprudelt. Dort, in direkter Nachbarschaft zu Europas aktivstem Vulkan, dem Stromboli, strömen ganz natürlicherweise große Mengen Kohlendioxid aus dem Meeresboden. Und gerade das macht die Gegend für Forscher unterschiedlichster Disziplinen sehr interessant. Denn Kohlendioxid (CO_2) ist eines der wichtigsten Treibhausgase. Seit Beginn der Industrialisierung ist sein Anteil in der Erdatmosphäre ständig gestiegen, vor allem durch die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Bei allen Bemühungen, die Erderwärmung zu stoppen oder zumindest zu verlangsamen, spielt daher die Reduktion des CO_2 in der Atmosphäre eine wichtige Rolle. Diskutiert wird dabei auch eine technische Möglichkeit: Beim „Carbon Dioxide Capture and Storage“, kurz CCS, soll das CO_2 aufgefangen oder aus der Luft abgetrennt und in unterirdischen Lagerstätten gespeichert werden. Als Kohlendioxidlager sollen dabei auch Bereiche unter dem Meeresgrund genutzt werden. In einigen Gegenden Europas ist dies bereits Realität, etwa vor der Küste Norwegens. Doch was passiert, falls CO_2 aus solchen Lagerstätten wieder entweicht? Welchen Einfluss haben hohe CO_2 -Konzentrationen auf das umgebende Ökosystem und die Lebewesen im Meer? Genau diesen Fragen gehen die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie im Meer vor Panarea auf den Grund. Hier können sie Meeresbereiche mit starkem Kohlendioxidaustritt direkt mit solchen ohne Ausgasungen vergleichen.

 www.youtube.com/watch?v=d1L7ZO-NpHc

Inhalt



06 Im Sauren: Meerwasser wirkt ätzend auf Seeschmetterlinge, mit die wichtigsten Planktonorganismen.



32 Im Eis: Forscher nehmen Proben in der Arktis. Das Meereis ist hier drastisch zurückgegangen.



40 Im Tiefen: Ein Schwarzer Raucher produziert Wasser, das mit verschiedenen Mineralien angereichert ist.

ERDSYSTEM

06 Luft gibt dem Ozean Saures
Der Mensch hat mit der Industrialisierung ein bedrohliches Großexperiment gestartet, dessen Folgen längst noch nicht abzusehen sind: Mit dem massiven Ausstoß von Kohlendioxid heizt er der Erde ein. Aber nicht nur das: Die erhöhte Konzentration des Treibhausgases in der Luft lässt auch die Ozeane versauern.

BIODIVERSITÄT

12 Das Meer als Genpool
Die Ozeane sind voller Bakterien. Äußerlich sehen diese nahezu gleich aus, doch es gibt viele verschiedene Arten mit unterschiedlichen Lebensweisen. Die Bakterienvielfalt lässt sich mithilfe der Metagenomik analysieren.

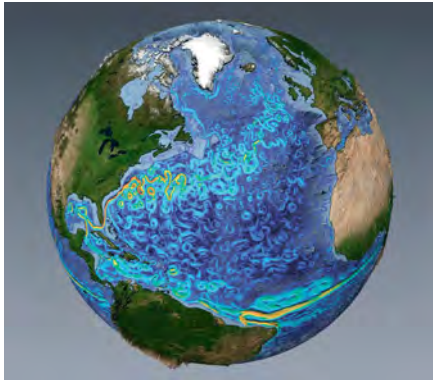
SPEKTRUM

- 26** Australier mit Migrationshintergrund
- 26** Tauschgeschäft im Ozean
- 27** Vulkane als schnelle Recycling-Anlagen
- 27** Giftige Wiedergänger in der See
- 28** Klimaarchiv im Glasschwamm
- 28** Standfester Muschelfuß
- 29** Korallen in der Video-Überwachung
- 29** Kohle im Meer
- 30** Begraben unter Sediment
- 30** Tankstelle in der Tiefsee
- 31** Bakterien entgiften Meerwasser
- 31** Hart wie ein Haizahn

VERHALTENSFORSCHUNG

20 Auf der Jagd mit dem Weißen Hai
Über den größten aller Raubfische weiß die Wissenschaft bislang wenig. Das soll sich ändern: An der Küste Südafrikas sind Forscher dem Weißen Hai auf der Spur – mithilfe von Kameras, Hightech-Sendern und Teppich aus dem Baumarkt.

ZUM TITEL Die Ozeane werden gelegentlich als achter Kontinent bezeichnet – ein Kontinent, der noch längst nicht vollständig erforscht ist. Für die Erde ist er nicht nur wegen seines Einflusses auf das globale Klima von immenser Wichtigkeit. Die Meere sind auch ein Hort des Lebens – etwa das Midway Atoll im Nordpazifik. Das ringförmige Korallenriff besitzt einen Durchmesser von ungefähr zehn Kilometern. Zwei Hauptinseln sowie mehrere kleine Eilande dienen zudem Hunderttausenden von Seevögeln als Brutstätte.



48 Im Modell: Diese Momentaufnahme zeigt das simulierte Strömungsfeld des Ozeans in 75 Meter Tiefe.



54 Im Schmelztiegel: Hafenstädte bilden ein Netzwerk und dienen als internationale Kontakt- und Handelsräume.



62 Im Expeditionsmodus: Die Meeresbiologin Antje Boetius hat die Ausrüstung für die nächste Ausfahrt gepackt.

MEEREIS

32 Tauwetter im Klimarechner
Nirgendwo macht sich der Klimawandel so deutlich bemerkbar wie in der Arktis. Die Menge des Meereises hat hier in den vergangenen Jahrzehnten drastisch abgenommen. Welche Prozesse beeinflussen die Bildung und das Schmelzen des Eises?

SYMBIOSE

40 Kraftwerke auf dem Meeresgrund
Die Tiefen der Ozeane sind ein lebensfeindlicher Ort. Um den widrigen Bedingungen zu trotzen, haben sich viele Organismen zu Lebensgemeinschaften zusammengeschlossen. Die Wissenschaftler entdecken immer wieder neue Symbiosen, mit denen die Tiefseebewohner ihre Energieversorgung sicherstellen.

METEOROLOGIE

48 Das Gedächtnis des Klimas
Eine gigantische Wärmepumpe arbeitet im Atlantischen Ozean und versorgt Europa mit einem angenehm warmen Klima. Forscher haben diese Strömung berechnet und damit die Basis für ein verbessertes Klimamodell geschaffen.

ETHNOLOGIE

54 Ein Meer von Verbindungen
Schiffe waren lange Zeit die schnellsten Verkehrsmittel und sie konnten Menschen und Güter in großer Zahl transportieren. So wurden Meere zu einem Kontakt- und Handelsraum für unterschiedliche Nationen, und über das Wasser hinweg haben sich vielfältige Netzwerke entwickelt.

MIKROORGANISMEN

62 Der Tiefsee auf den Grund gehen
Zur Person: Antje Boetius

RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 71 Standorte**
- 71 Impressum**

2200

pH-Wert



Schlechte Prognosen: Nach Simulationen der Hamburger Max-Planck-Forscher liegt der pH-Wert des Oberflächenwassers im Jahr 2200 deutlich niedriger als 1950, erkennbar an der Farbverschiebung in den roten Bereich (links). Die Meere versauern.

Luft gibt dem Ozean **Saures**

Der Mensch hat mit der Industrialisierung ein bedrohliches Großexperiment gestartet, dessen Folgen längst noch nicht abzusehen sind. Mit dem massiven Ausstoß von Kohlendioxid heizt er der Erde ein. Aber nicht nur das: Die erhöhte Konzentration des Treibhausgases in der Luft lässt auch die Ozeane versauern. Welche Konsequenzen das haben könnte, erforschen **Tatiana Ilyina** und ihre Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Man nennt sie „Seeschmetterlinge“, denn sie schweben im Meer wie kleine Flügelwesen. Doch Pteropoden gehören zu den Schnecken. Ihre Gehäuse sind so klein wie die Fingernägel eines Babys. Mit seltsam transparenten Häutchen rudern sie durchs Wasser. Obwohl sie winzig sind, sind sie ungemein wichtig, denn es gibt Milliarden von ihnen. Fische und auch Wale verschlingen sie in rauen Mengen. Pteropoden gelten als ozeanische Knaberei. Amerikanische Zoologen nennen sie schlicht *potato chips of the seas*, Kartoffelchips der Meere.

Doch der Nachschub an Pteropoden, heißt es, ist gefährdet. In Zukunft dürfte ihnen der Klimawandel zu schaffen machen, genauer: die Ozeanversauerung.

Dass sich die Erde durch den Ausstoß von Kohlendioxid wie ein Treibhaus erwärmt, ist heute allgemein be-

kannt. Weniger bekannt ist, dass die steigende Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre auch dazu führt, dass das Meer langsam saurer wird. Denn die Ozeane nehmen einen großen Teil des Kohlendioxids aus der Atmosphäre auf. Das Gas bildet im Wasser, vereinfacht ausgedrückt, Kohlensäure. Je mehr Kohlendioxid die Menschheit in die Luft bläst, desto mehr löst sich im Wasser, und desto mehr Kohlensäure entsteht. Der pH-Wert, der angibt, wie alkalisch oder sauer das Wasser ist, sinkt. Und das wird für die Pteropoden und andere Lebewesen zum Problem, denn bei niedrigerem pH-Wert können sie kaum noch Kalk für den Gehäusebau erzeugen. Welche Konsequenzen das für das Leben und die Nahrungsketten im Meer hat, ist bislang noch weitgehend unbekannt.

Heute beträgt der pH-Wert des Wassers 8,1. Damit ist das Wasser streng genommen eine schwache Lauge und keine Säure. Der Begriff Versauerung trifft trotzdem zu, weil der pH-Wert seit Beginn der industriellen Revolution um etwas mehr als 0,1 in Richtung Säure ge-

» Indem das Meer Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, bremst es den Treibhauseffekt.

sunken ist. 0,1 klingt wenig. Da der pH-Wert logarithmisch gestaucht ist, entspricht das aber tatsächlich bereits einem um etwa 30 Prozent saureren Wasser.

MIT DEM COMPUTER AUF DER SUCHE NACH ANTWORTEN

Wenn Wasser mit Kohlendioxid reagiert, lässt sich das in einer einfachen chemischen Gleichung ausdrücken. Doch der Weg des Kohlendioxids und des in ihm enthaltenen Kohlenstoffs durch die Meere ist so komplex, dass Forscher bislang kaum abschätzen können, wie stark sich der Lebensraum Meer verändern wird. Wie schnell werden verschiedene Meeresgebiete versauern? Wie wirkt sich das viele Kohlendi-

oxid auf das Gedeihen des pflanzlichen Planktons aus, der mikroskopisch kleinen Algen, der Lebensgrundlage der Meeresbewohner? Wird sich die Aufnahme von Kohlendioxid künftig verlangsamen? All diese Fragen müssen erst noch beantwortet werden.

Tatiana Ilyina versucht, die Antworten mithilfe des Computers zu finden. Die Ozeanografin arbeitet am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, wo seit vielen Jahren Simulationen des Erdklimas und Berechnungen zum Klimawandel durchgeführt werden. Ilyina hat dabei vor allem den Weg des Kohlenstoffs von der Atmosphäre ins Meer und durch die Ozeane im Blick. Denn davon hängt der Klimawandel ganz entscheidend ab: Indem

das Meer Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, bremst es den Treibhauseffekt.

Ilyinas Spezialität ist die Simulation der Biogeochemie des Meeres. Darunter versteht man die chemischen Prozesse zwischen dem Wasser, dem Meeresboden und Stoffen, die Meereslebewesen abgeben und aufnehmen. Eine wichtige biogeochemische Komponente ist der Kohlenstoff. Und damit hat auch das Kohlendioxid einen entscheidenden Einfluss auf die Biogeochemie. In den vergangenen Jahren hat Ilyina viel Zeit damit verbracht, die biogeochemischen Prozesse in Rechenvorschriften umzusetzen und in die Klimamodelle ihrer Kollegen einzuarbeiten, insbesondere in das schon seit vielen Jahren etablierte



Seeschmetterlinge (*Limacina helicina*) sind räuberische marine Schnecken und gehören zu den wichtigsten Planktonorganismen. Saures Meerwasser wirkt ätzend auf ihre Kalkschalen.

Meereschemie-Modell HAMOCC. Inzwischen haben die Computer einige interessante Erkenntnisse ausgespuckt.

Für eine Simulation versuchen Forscher wie Tatiana Ilyina stets, die Realität zu vereinfachen und dennoch die wesentlichen Prozesse in ihr Modell einzubauen. Im Falle der Biogeochemie ist das anspruchsvoll, denn der Kohlenstoff geht viele Wege. Schon der Übergang des Kohlendioxids ins Meer ist komplex, weil von der Temperatur des Meerwassers abhängt, wie viel Gas sich im Wasser löst. Kaltes Wasser nimmt mehr Gas auf als warmes. Der arktische Ozean, so zeigen die Simulationen, dürfte in den kommenden Jahrzehnten infolgedessen deutlich schneller versauern als zum Beispiel die subtropischen und tropischen Meeresregionen.

KOHLENDIOXID MIT DEM GEWICHT VON 500 000 AUTOS

Ist das Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft ins Meer übergegangen, reagiert es mit Wasser (H_2O) zu Kohlensäure. Diese wiederum reagiert mit den natürlich im Wasser enthaltenen Carbonationen (CO_3^{2-}) zu Bicarbonat (HCO_3^-). Da sich das CO_2 recht schnell in Ionen verwandelt und damit quasi aus dem Wasser entfernt wird, können die Meere permanent große CO_2 -Mengen aufnehmen: Täglich schlucken die Ozeane CO_2 -Massen, die im Gewicht 500 000 Autos entsprechen. Die verschiedenen Ionen befinden sich in einem Gleichgewicht und können sich bei veränderten Umweltbedingungen ineinander umwandeln. Auch der pH-Wert beeinflusst dieses Gleichgewicht.

Ilyinas Simulationen haben ergeben, dass sich das Gleichgewicht durch die Versauerung in Richtung Bicarbonat verschiebt. Für manche Meerestiere dürfte der damit einhergehende Schwund der Carbonationen fatal sein, denn Carbonat ist ein wichtiger Baustein von Muschelschalen und Schneckengehäusen. Wenn mehr und mehr CO_2 in die Ozeane gelangt, könnte die Menge der Carbonationen so weit abnehmen, dass die Kalkproduktion gestört wird. Sinkt die Carbonatmenge noch weiter, können sich Kalkschalen sogar auflösen.

Die Ergebnisse von Ilyinas Gruppe waren für den letzten Bericht des Welt-

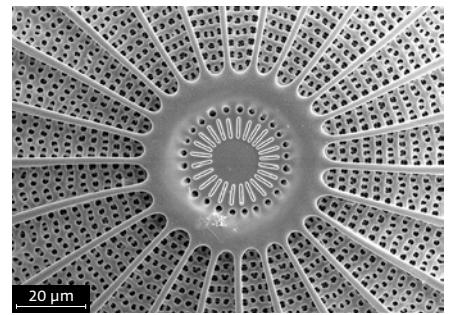
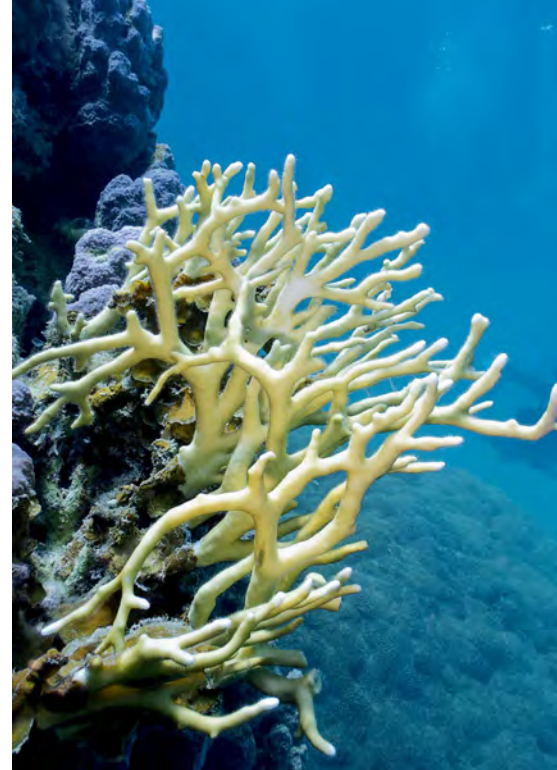
klimarates relevant. Denn das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg ist eine von etwa zwanzig Forschungseinrichtungen weltweit, deren Klimasimulationen die wissenschaftliche Basis für diesen Bericht bilden. Die verschiedenen Simulationen sind deshalb so wichtig, weil jede davon etwas andere Ergebnisse liefert.

Den Experten des Weltklimarates obliegt es, daraus eine Art wissenschaftlichen Konsens herauszulesen. „Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ (CMIP5) heißt dieses internationale Klimamodell-Vergleichsprojekt. Lange hatten Klimamodelle nur Strömungen und Temperaturen betrachtet. Doch nachdem der Weltklimarat den enormen Einfluss der Biogeochemie erkannte, machte er biogeochemische Berechnungen für den CMIP5 erstmals zur Pflicht. „Obwohl die Modelle zum Teil voneinander abweichen, sind wir uns darin einig, dass die Meere, global betrachtet, versauern“, sagt Ilyina.

Abweichungen gibt es meistens dann, wenn die verschiedenen Modelle einzelne Regionen betrachten, die räumliche Auflösung also feiner wird. Simulationen zeigen, dass es unter dem Phytoplankton Gewinner und Verlierer geben wird. Einige Berechnungen sagen für manche Meeresregionen wie die Arktis sogar voraus, dass Plankton insgesamt besser gedeihen wird als bisher. Der Grund: Durch das Schwinden des Eises gelangt mehr Sonnenlicht ins Wasser, das Planktonalgen genau wie Landpflanzen benötigen.

Die meisten Simulationen prognostizieren aber das Gegenteil: Demnach dürfte die Versauerung diesen Meeresorganismen unter dem Strich Nachteile bringen. Die Mechanismen dahinter sind bislang noch nicht völlig klar. Die Rechnungen zeigen aber, dass Algen Kohlendioxid nicht mehr so gut in Zucker und andere lebenswichtige Moleküle umwandeln können und ihr Wachstum beeinträchtigt wird. Folglich dürfte die Menge an Plankton in den kommenden Jahrzehnten abnehmen.

Hinzu könnte ein physikalischer Effekt kommen, durch den die Algen hungern: Durch die Erderwärmung wird sich das Oberflächenwasser in den Meeren weiter aufheizen. Dadurch bildet sich ein warmer Wasserkörper, der auf



Die Versauerung der Meere bedroht riffbildende Feuerkorallen (*Millepora spec.*, oben) oder die im Freiwasser lebenden, mikroskopisch kleinen Kieselalgen (*Arachnoidiscus spec.*, unten).

dem kalten Tiefenwasser schwimmt. Zwischen diesen Wasserkörpern gibt es kaum Durchmischungen, da die Grenze zwischen warmem und kaltem Wasser wie eine Trennschicht wirkt. Die Konsequenz: Der Transport von nährstoffreichem Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche wird unterbunden. Die Nährstoffe aber sind für das Wachstum des pflanzlichen Planktons essenziell. Auch die Daten aus Ilyinas Arbeitsgruppe deuten auf eine Abnahme des Phytoplanktons hin.

Die Abnahme der Phytoplanktonmengen wirkt sich nicht nur auf die Nahrungskette im Meer aus, sondern auch direkt auf den Kohlenstoffkreislauf. Das pflanzliche Plankton nimmt große Mengen an Kohlendioxid auf und wandelt dieses in Biomasse um. Sterben die Algen, sinken sie in die Tiefe ab. Damit werden letztlich große Mengen CO_2 aus den oberen Meeresschichten entfernt und auf lange Zeit dem Kohlen-

» Unsere Simulationen zeigen, dass die CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane in den kommenden Jahren tatsächlich abnehmen wird.«

stoffkreislauf entzogen. Klimaforscher sprechen vom Meer als Kohlenstoffsenke. Doch diese wird schrumpfen, wenn das pflanzliche Plankton abnimmt.

Dass künftig weniger CO₂ im tiefen Ozean unschädlich gemacht wird, liegt auch an der Physik. In einem relativ gleichmäßig temperierten Wasserkörper, wie ihn der Nordatlantik heute darstellt, finden starke Umwälzbewegungen und Durchmischungen statt. Dadurch wird CO₂ in großen Mengen in die Tiefe transportiert. Die strenge Schichtung von warmem und kaltem Wasser könnte diesen Transport künftig deutlich abschwächen.

EINE SCHWEFELVERBINDUNG ALS REGENMACHER

„Unsere Simulationen zeigen, dass die CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane in den kommenden Jahren tatsächlich abnehmen wird“, sagt Ilyina. „Nur leider wissen wir bislang nicht, welcher Faktor dabei die entscheidende Rolle spielt.“ Wie groß ist der Einfluss des Planktons und des biologischen CO₂-Transports in

die Tiefe? Wie stark wirkt sich der physikalische Transport aus? Welche Rolle spielen das Gleichgewicht der Ionen und der pH-Wert des Wassers?

Ilyina will nun versuchen, einzelne Aspekte aus ihren Simulationsrechnungen herauszunehmen, um festzustellen, wie sich das Meer und der Kohlenstoffkreislauf dann verändern. Das Problem: „Wenn wir bestimmte Parameter ausschalten, müssen wir sicherstellen, dass die Simulation die Wirklichkeit noch realistisch abbildet und plausible Ergebnisse liefert.“ Dafür ist Tatiana Ilyina die richtige Frau am richtigen Ort. Sie ist nicht nur Ozeanografin, sondern hat auch viele Jahre Modelliererfahrung. „Das Modellieren macht mir einfach Spaß“, sagt sie beinahe bescheiden. Die Klimaforscherin bringt also das richtige Handwerkszeug mit, um komplexe Aspekte wie die Biogeochemie in Algorithmen für Klimasimulationen zu verwandeln.

Wie wichtig die Biogeochemie ist, zeigt noch ein weiteres Experiment, das Ilyina gemeinsam mit ihrer Mitarbeiterin Katharina Six gemacht hat:

die Simulation der Zukunft von Dimethylsulfid-Gas. Wer schon einmal durch den Tang am Ostseestrand gestapft ist, kennt den Muff dieser Substanz. Sie entsteht, wenn sich tote Algen zersetzen. Dimethylsulfid gehört zu den Regenmachern. Es steigt über den Ozeanen hoch in die Atmosphäre auf und trägt dort über einige Zwischenschritte letztlich zur Wolkenbildung bei. Kurz: Dimethylsulfid ist eine der wichtigsten Schwefelverbindungen in der Atmosphäre.

Die Simulation zeigt, dass die Menge des Dimethylsulfids in der Atmosphäre mit der Versauerung der Ozeane weltweit abnimmt. Daher entstehen weniger Wolken, die das Licht der Sonne und zum Teil auch deren Wärmestrahlung reflektieren. Die Erde heizt sich in der Folge noch stärker auf.

Die Folgen der erhöhten CO₂-Konzentrationen im Meer sind momentan noch unüberschaubar. Inzwischen sprechen Forscher von den *evil twins*, den bösen Zwillingen Erderwärmung und Ozeanversauerung. Die Zusammenhänge werden noch verworrener, wenn

Carbonatsättigung (angegeben als Ω-Wert) im Ozean in den Jahren 1950 (links) und 2200 (rechts). Die blauen Regionen weisen eine Untersättigung auf, die roten Bereiche sind übersättigt. 1950 finden sich blaue Regionen, in denen sich Kalk auflöst, nur in den Tiefen des Pazifiks. Bis zum Jahr 2200 haben sich diese Gebiete stark ausgebreitet.



man bedenkt, dass der Kohlenstoffkreislauf im Meer auch andere Kreisläufe beeinflusst. Etwa den Stickstoffkreislauf. Der wird unter anderem von Cyanobakterien angetrieben, pflanzlichen Planktonorganismen, die früher als Blaualgen bezeichnet wurden.

Cyanobakterien gibt es seit vielen Hundert Millionen Jahren. Sie entwickelten sich zu einer Zeit, als in der Erdatmosphäre wenig Sauerstoff, aber viel CO₂ vorhanden war. Die Mikroben lieben CO₂ geradezu. Erhöhte CO₂-Konzentrationen treiben sie zu Höchstleistungen an. Cyanobakterien gehören zu den wenigen Lebensformen, die Luftstickstoff N₂ in andere Stickstoffverbindungen umwandeln können, beispielsweise in solche, die Pflanzen als Nahrung nutzen.

DIE FOLGEN EINER DÜNGUNG WÄREN NICHT ABSEHBAR

Mehr CO₂ bedeutet damit mehr Stickstoffverbindungen. Ob das für das Leben im Meer von Vorteil ist oder Nachteile mit sich bringt, kann noch niemand mit Gewissheit sagen. Zweifellos profitieren die Cyanobakterien davon, dass es mehr CO₂ in den Meeren gibt. Vor allem aber zeigt das Beispiel, wie schwierig es ist, die biogeochemischen Prozesse zu erfassen und in eine Simulation zu übertragen.

Das gilt auch für die Rechnungen, die Tatiana Ilyinas Gruppe zu der Idee anstellte, die Versauerung künstlich aufzuhalten. Als Vorbild dient dabei ein natürlicher Prozess: Carbonationen, die im Meer nicht aus gelöstem CO₂ beziehungsweise Kohlensäure entstehen, sondern durch die Verwitterung etwa von Kalkstein, gehen nicht mit einer Versauerung des Wassers einher, sondern mit dem genauen Gegenteil. Aus abgebautem Gestein entstandene Carbonationen und andere alkalisch wirkende Ionen neutralisieren Säure und puffern damit den CO₂-Effekt ab. Dies geschieht seit Millionen von Jahren. Seit Jahren wird nun diskutiert, ob sich die Ozeanversauerung abbremsen ließe, wenn man das Meer zusätzlich mit alkalischen Verbindungen wie etwa Calciumhydroxid, gelöschtem Kalk, düngte.

Derartige Methoden zur künstlichen Bekämpfung des Klimawandels




Simulieren die Zukunft der Ozeane: Tatiana Ilyina (links) und Katharina Six besprechen ihre neuesten Ergebnisse.

bezeichnen Forscher als Geoengineering. Ilyina hat überprüft, ob das überhaupt machbar wäre. Die Ergebnisse der Simulation sind ernüchternd: Man müsste weltweit die 200-fache Menge der durch natürliche Verwitterung entstehenden Ionen ins Meer kippen. Insgesamt bräuchte man etwa 70 bis 100 Milliarden Tonnen Kalkstein. Das ist unbezahlbar.

Vor allem aber würde an den Stellen, an denen man die Substanzen ins Meer streut, der pH-Wert auf bis zu 8,7 ansteigen, bis sich die Substanzen durch Strö-

mungen verteilt haben. Das wäre zu viel des Guten und ein massiver Eingriff in die Ökosysteme. Die Konsequenzen für die Lebewesen wären unabsehbar. Eine globale Düngung hält Ilyina deshalb für Unsinn. Zumal ihre Forschung eines klarmacht: Das Beziehungsgeflecht von Biogeochemie und Klima ist zu komplex, als dass der Mensch die Wirkung kontrollieren könnte, wenn er einzelne Prozesse wie den Kohlenstoffkreislauf aus dem Gleichgewicht bringt. ◀

 www.max-wissen.de/136269

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Seit die Konzentration an Kohlendioxid in der Atmosphäre steigt, verändert sich nicht nur das Klima, auch die Ozeane versauern.
- In Wasser mit niedrigerem pH-Wert sinkt die Konzentration an Carbonationen, so dass alle Lebewesen mit einer Kalkschale ihre Gehäuse schlechter aufbauen können.
- Die Ozeanversauerung bewirkt Rückkopplungen, die den Treibhauseffekt verstärken können.
- Modellsimulationen zeigen, dass die Menge an Plankton in den Meeren infolge der Versauerung und der Erderwärmung abnehmen dürfte und die Ozeane weniger CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Gleichzeitig geben die Meere weniger Dimethylsulfid ab, wodurch die Wolkenbildung beeinträchtigt wird und mehr Wärmestrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche trifft.
- Die Versauerung mit Geoengineering zu bremsen wäre extrem teuer und hätte unabsehbare Folgen für die Biogeochemie, die Ökologie der Meere und das Klima.

GLOSSAR

CMIP5: Im „Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ ermitteln Klimaforscher für die Berichte des Weltklimarates IPCC aus den Ergebnissen von Klimasimulationen, die an 20 Institutionen weltweit vorgenommen wurden, einen wissenschaftlichen Konsens.

Phytoplankton: Mikroorganismen der Meere wie etwa Grünalgen, Kieselalgen und Blaualgen, die wie Pflanzen durch Fotosynthese die Energie des Sonnenlichts nutzen. Phytoplankton steht am Anfang der Nahrungskette in den Ozeanen.



Das Meer als Genpool

Die Ozeane sind voller Bakterien. Äußerlich sehen diese nahezu gleich aus, doch es gibt viele verschiedene Arten mit unterschiedlichen Lebensweisen. Daher analysieren **Hanno Teeling**, **Bernhard Fuchs** und **Frank Oliver Glöckner** vom **Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie** in Bremen die Bakterienvielfalt in den Ozeanen mithilfe der Metagenomik. Dabei werfen sie zunächst das gesamte bakterielle Erbgut in einen Topf, entschlüsseln die DNA-Moleküle und ordnen den Genmix dann wieder einzelnen Bakteriengruppen zu.

Vor nährstoffreichen Küsten wie den Badestränden in Nord- und Ostsee leben Millionen Bakterien in einem einzigen Liter Meerwasser. Unter dem Mikroskop lassen sich kaum Unterschiede erkennen, ihr ringförmiges Erbgut offenbart jedoch die unterschiedlichen Lebensweisen.

TEXT NILS EHRENBURG

Ein Becherglas mit Meerwasser wirkt auf den ersten Blick langweilig. Erst unterm Mikroskop eröffnet sich ein eigenes Universum aus Formen und Farben – die Welt des Kleinstplanktons. Vor allem Kieselalgen und Strahlentierchen sind unter dem Mikroskop echte Hingucker: Von Kreisen, Ovalen, Dreiecken und Quadraten bis hin zu filigranen Sternen finden sich zahllose geometrische Formen.

„Die größeren Einzeller sind zwar oft spektakulär, der weitaus größere Teil des Planktons besteht aber aus kleineren Bakterien“, sagt Frank Oliver Glöckner, Leiter der Arbeitsgruppe „Mikrobielle Genomik und Bioinformatik“ am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie. „Diese Bakterien lassen sich unter dem Mikroskop zwar kaum voneinander unterscheiden, sie sind aber tatsächlich in ihren Lebensweisen noch vielfältiger.“

Den Wissenschaftlern war die Artenvielfalt im Plankton lange Zeit ein Rätsel, stand sie doch im Widerspruch zu den gängigen Theorien der Ökologie. Denn im Gegensatz zu tropischen Regenwäldern mit ihren vielen ökologischen Nischen und jeweils unterschiedlichen Lebensbedingungen bieten die Ozeane lediglich riesige, vermeintlich eintönige Wasserkörper ohne klare räumliche Struktur. Als ökologische Nische werden sämtliche Faktoren aus

»» Das Erbgut ist das einzige sichere Unterscheidungsmerkmal zwischen Bakterienarten.

der belebten und unbelebten Umwelt bezeichnet, die ein Organismus zum Überleben braucht.

Gemäß dem Konkurrenzausschlussprinzip können Arten, die um dieselbe ökologische Nische konkurrieren, nicht dauerhaft koexistieren: Früher oder später setzt sich die stärkere Art durch und

verdrängt alle schwächeren Mitkonkurrenten. Wie kann also ein gleichförmiger Lebensraum wie der Ozean eine so große Artenvielfalt beherbergen? Warum wird das Plankton nicht von wenigen Arten dominiert?

„Dieses Planktonparadoxon wollen wir mit unserer Forschung lösen“, sagt

Frank Oliver Glöckner. „Davor müssen wir jedoch die Biodiversität des Bakterioplanktons überhaupt erst einmal vollständig erfassen. Wir wollen wissen, welche Arten es gibt, wie häufig sie sind und welche Funktion sie im Ökosystem haben.“

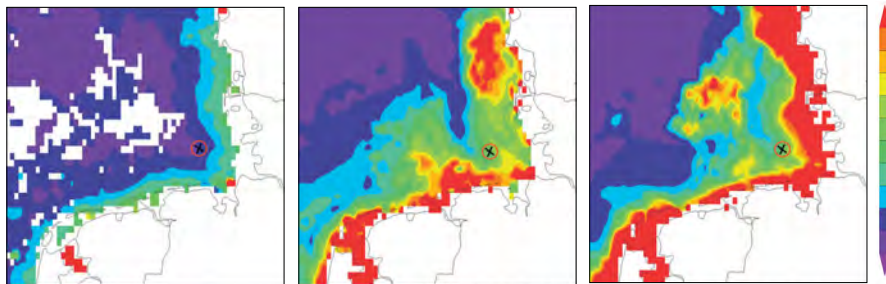
Der Wissenschaftler des Bremer Max-Planck-Instituts setzt dabei auf neueste genomische und computerbasierte Techniken. Weil sich die Bakterien unter dem Mikroskop so stark ähneln, eignen sich nur die Unterschiede im Erbgut als sicheres Identifikationsmerkmal für einzelne Arten.

EXPERIMENTE, MODELLE, GENANALYSEN

Glöckner arbeitet am Bremer Institut mit Forschern aus unterschiedlichen Disziplinen zusammen, mit Bioinformatikern, Genetikern, Mikrobiologen und Ökologen. Der Ökologe Bernhard Fuchs untersucht in Experimenten, was die Bakterien fressen, wie sie sich aneinander oder an Algen heften. Ganz anders sein Kollege Hanno Teeling: „Mir verrät die Computeranalyse eines Bakteriengenoms, wozu die Zelle in der Lage und mit welchen enzymatischen Werkzeugen sie ausgestattet sein sollte.“

Beide Wissenschaftler legen gerade wegen ihrer gegensätzlichen Blickwinkel großen Wert auf den gegenseitigen Austausch. „Ich arbeite am Computer mit Organismen, die ich nie gesehen habe“, erklärt Teeling, „die einzelne Zelle wird irgendwann abstrakt. Dank Bernhard Fuchs weiß ich, ob die Zellen auch wirklich das tun, was ich anhand meiner Daten vorhergesagt habe.“

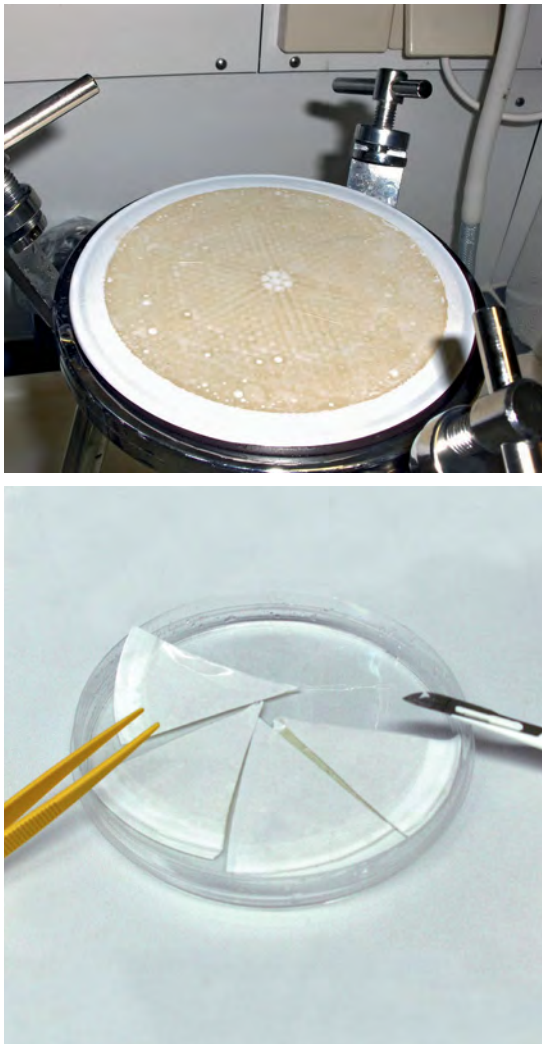
Zusammen mit Wissenschaftlern des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung, der Bremer Jacobs University sowie der Universität



Oben Chlorophyll in der Nordsee im Februar (links), März (Mitte) und April 2009. Der Chlorophyllgehalt ist ein Maß für die Menge an Algen und damit für die Produktivität einer Meeresregion. Blaue Regionen weisen geringe Algenkonzentrationen auf, rote dagegen hohe. Das Kreuz gibt die Lage der Insel Helgoland an.

Unten Im Vordergrund die Hauptinsel Helgoland, dahinter die Insel Düne. Im Kanal zwischen den beiden Inseln liegt die Meeresstation *Kabeltonne*, an der die Forscher ihre Proben entnommen haben.





Frank Oliver Glöckner filtert die Bakterien mithilfe eines Polycarbonatfilters (links oben) aus dem Meerwasser. Dieser wird dann in kleinere Teile zerschnitten, um daraus die DNA für weitere Analysen zu gewinnen (unten).

Greifswald haben Teeling, Fuchs und Glöckner eine Algenblüte in der Nordsee untersucht und die Ergebnisse vor Kurzem im Fachmagazin *SCIENCE* veröffentlicht. „Sobald im Frühjahr die Sonneneinstrahlung ein bestimmtes Niveau überschreitet, können sich einzellige Algen wie beispielsweise Kieselalgen binnen weniger Tagen massenhaft vermehren“, erklärt Frank Oliver Glöckner. So eine Algenblüte endet dann häufig genauso schnell, wie sie begonnen hat: Die im Wasser gelösten Nährstoffe werden knapp, und das Wachstum wird gehemmt.

Am Ende werden die Algen vom Zooplankton – etwa millimetergroßen Krebsen – aufgefressen, oder sie werden durch Virenbefall getötet. Und jetzt schlägt die große Stunde der Bak-

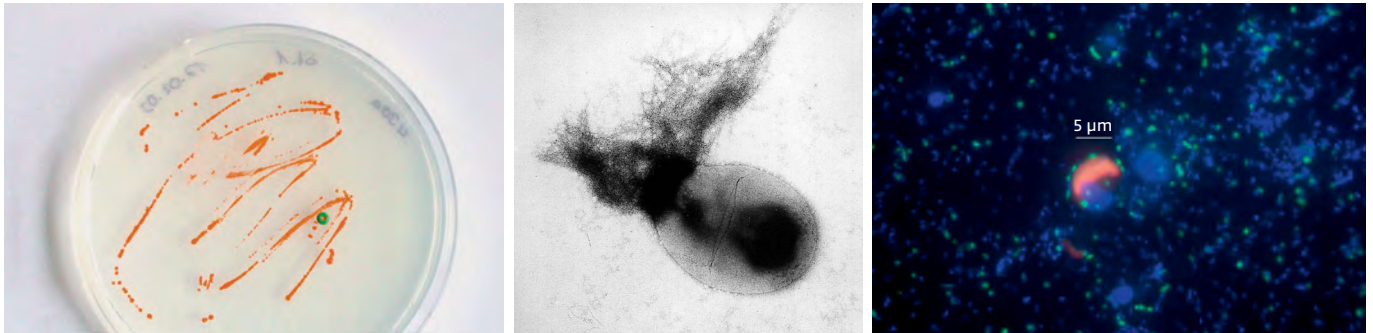
terien, die sich auf dieses Festmahl aus Algenresten stürzen. „Nach einer Algenblüte verändert sich das Bakterioplankton dramatisch“, sagt Bernhard Fuchs. „Wir glauben, dass dieses Phänomen ein Aspekt zur Lösung des Plankton-Paradoxons ist.“

WÖCHENTLICHE MESSUNGEN IN DER NORDSEE

Die Proben für ihre Studie haben die Meeresforscher auf der Langzeitstation *Kabeltonne* der Biologischen Anstalt Helgoland gesammelt, die im schmalen Kanal zwischen der Hauptinsel und der bei Badeurlaubern beliebten Düne liegt. Seit 1962 messen Forscher vor der Insel wöchentlich Umweltparameter wie Salzgehalt und Temperatur des Wassers

– wichtige und in dieser Regelmäßigkeit weltweit einzigartige Vergleichsdaten nicht nur für das Bremer Team. Im Sommer 2009 hat sogar Craig Venter, einer der Pioniere der Genomforschung, der einzigen deutschen Hochseeinsel einen Kurzbesuch abgestattet, um wie das Bremer Team Proben für Erbgutanalysen zu nehmen.

Das ganze Jahr 2009 hindurch sind die Wissenschaftler zweimal pro Woche zu der Forschungsstation gefahren und haben jedes Mal bis zu 500 Liter Nordseewasser aus einem Meter Tiefe entnommen. In den Laboren der Biologischen Anstalt Helgoland haben sie dann den Salzgehalt, die Konzentration an Nährstoffen wie Phosphat, Silicat und Nitrat gemessen sowie den Gehalt des grünen Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll



Links Kolonien von *Pirellula*-Bakterien aus der Ostsee auf einer Kulturplatte. Die Bakterien können Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen verwerten und organisches Material wie abgestorbene Algen abbauen. An die Reste heften sie sich mit Haftfäden (Mitte).
Rechts Flavobakterien (grün) auf Algen der Gattung *Phaeocystis* (rot).

A – ein Maß für die Anzahl der Algen im Wasser. Schließlich trennten sie die Bakterien Algen und Viren.

Zurück am Max-Planck-Institut in Bremen war es dann an Bernhard Fuchs, die genaue Zusammensetzung dieser Bakterienpopulation zu bestimmen. Mit der Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) schleust der Ökologe DNA-Sonden in die Zellen, die an das Erbgut der Bakterien binden und dieses mithilfe eines fluoreszierenden Farbstoffs zum Leuchten bringen. Da jede Sonde nur die DNA einer bestimmten Gruppe von Bakterien erkennt, kann Fuchs diese Gruppe in der Wasserprobe sichtbar machen und die einzelnen Zellen mithilfe eines automatischen Mikroskops zählen. Mit einem artspezifischen Marker gen lassen sich darüber hinaus sogar einzelne Arten in der Probe identifizieren.

EXPLOSIONSARTIGE VERMEHRUNG

„So konnten wir genau bestimmen, wie sich die Zusammensetzung der Bakterienpopulation im Wasser während der Algenblüte entwickelt“, sagt der Ökologe. In der Zeit vor der Algenblüte dominieren demnach Alphaproteobakterien im Wasser. Doch sobald sich die Algen innerhalb weniger Tage massenhaft vermehren, ändert sich diese Gemeinschaft schlagartig. Flavobakterien namens *Ulvibacter* beginnen damit, sich rasant zu teilen, und vervierfachen ihre Zellzahl binnen einer Woche.

Nur wenige Tage später – die Algen werden bereits durch hungriges Zooplankton und Virenbefall dezimiert – bricht die *Ulvibacter*-Population schlagartig ein, und *Formosa*-Flavobakterien treten an ihre Stelle. Auch sie vermehren sich zunächst massenhaft, doch schon eine Woche später reduziert sich ihre Zahl drastisch.

„So setzt sich das weiter fort, eine Gruppe vermehrt sich explosionsartig, geht nach wenigen Tagen wieder zugrunde und wird dann von einer anderen Gruppe abgelöst“, erklärt Bernhard Fuchs. „Erst einige Wochen nach der Algenblüte pendelt sich die Situation wieder auf den von Alphaproteobakterien dominierten Status ein.“ In dieser Phase lassen sich die meisten der Kurzzeit-Emporkömmlinge kaum oder gar nicht mehr im Wasser nachweisen.

Wie lässt sich dieser Wirbel in der Bakteriengemeinschaft erklären? „Die genetische Ausstattung der Bakterien bestimmt, wie sie auf Umweltveränderungen reagieren“, sagt Hanno Teeling. „Wir müssen also wissen, welche Gene die unterschiedlichen Arten besitzen und welche in den verschiedenen Phasen nach einer Algenblüte aktiv sind.“ Deshalb analysierten die Wissenschaftler das vollständige genetische Material der gesamten Bakteriengemeinschaft aus ihren Wasserproben – das Metagenom. Mit Computerprogrammen sucht Teeling darin zunächst nach den Genen, denn nicht alle DNA-Abschnitte liefern auch die Vorlage für ein Protein.

Das Analyseprogramm muss dabei eine ganze Reihe von Problemen lösen. Zum einen liefern die Sequenziermaschinen keine vollständigen Genome, sondern nur DNA-Bruchstücke. Der Computer muss deshalb berücksichtigen, dass ihm nur Teile von Genen vorliegen. Zum anderen unterlaufen den Sequenziermaschinen gelegentlich Fehler beim Entziffern des DNA-Codes.

ÄHNLICHE DNA GEHÖRT ZUSAMMEN

Das wahre Kunststück aber besteht darin, die einzelnen DNA-Moleküle aus dem bunt zusammengewürfelten Erbgutmix den verschiedenen Bakterienarten zuzuordnen. „Die DNA-Schnipsel tragen natürlich kein Namensschild, sodass wir nicht wissen, zu welchem Bakterium sie gehören. Deshalb macht eines unserer Programme mit den gefundenen Genen auf den DNA-Molekülen eine umfangreiche Ähnlichkeitsanalyse“, sagt Hanno Teeling.

So sucht der Computer etwa nach dem ähnlichsten schon bekannten Gen einer bekannten Bakterienart oder identifiziert charakteristische Muster in der Abfolge des DNA-Codes, die nur bei einer bestimmten Gruppe auftreten. Schließlich sortiert er jeden Schnipsel mitsamt den darin enthaltenen Genen auf virtuelle Häufchen. „Auf diese Weise können wir ziemlich genau sagen, welche Gene zu einer bestimmten Bakteriengruppe gehören“, sagt Teeling.

» Die Klimaerwärmung hat die Artengemeinschaft der Bakterien in den Meeren bislang nicht verändert.

Die Aufgabe der an der Studie beteiligten Wissenschaftler aus Greifswald war es nun, das Metaproteom, also sämtliche Proteine, aus den Proben herauszufischen und zu identifizieren. Da sich Proteine mittels spezieller Algorithmen ihren zugehörigen Genen zuordnen lassen und die Gene der verschiedenen Bakteriengruppen dank der Bremer Metagenom-Analyse bekannt waren, konnten die Forscher genau sagen, welches Protein zu welcher Bakteriengruppe gehört.

Jetzt besaß das Team um Teeling, Fuchs und Glöckner alle Informationen, die es benötigte: die genaue Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaft in verschiedenen Phasen vor, während und nach der Algenblüte; die Genausstattung einzelner Gruppen; die Proteine sowie die zeitliche Entwicklung der Umweltbedingungen. Die Forscher setzten nun all diese Daten miteinander in Beziehung. „Wenn nach der Algenblüte etwa ein bestimmter Zucker aus den Algenresten freigesetzt wird

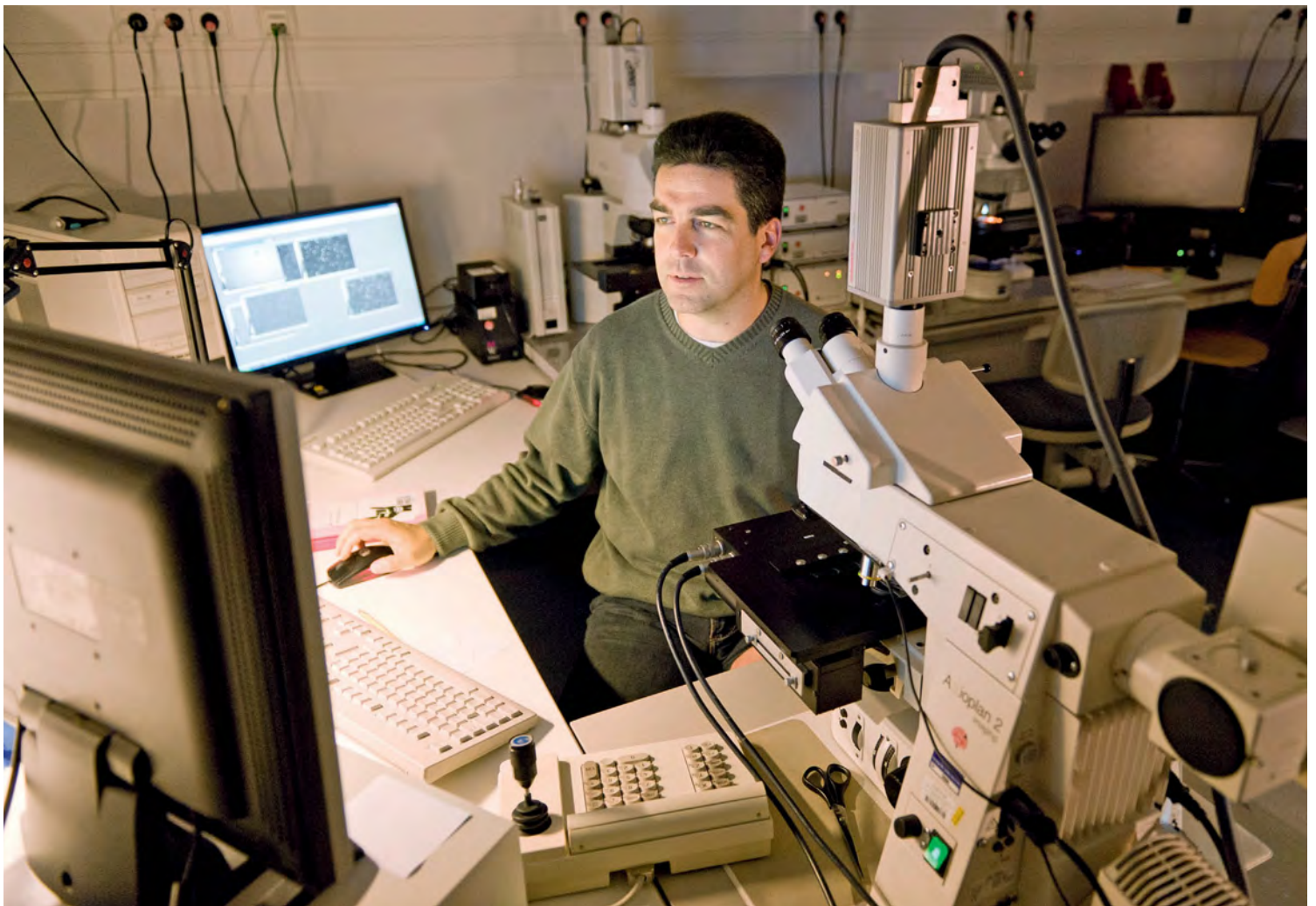
und gleichzeitig in einer Bakteriengruppe bestimmte Gene aktiviert werden, ist das ein starker Hinweis auf ein Schlüsselprotein, das der betreffenden Gruppe bei der Aufnahme dieses Zuckers hilft“, sagt Hanno Teeling.

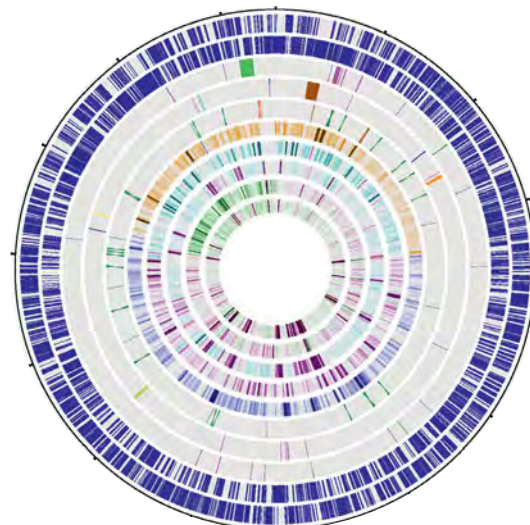
PROTEINE ZUM ZUCKERABBAU

Eine ganze Reihe dieser Schlüsselproteine konnte das Bremer Team identifizieren und damit endlich auch die rätselhafte Dynamik in der Bakterienpo-

Foto: Bastian Ehl

Kein ungewöhnlicher Arbeitsplatz für einen Ökologen: Bernhard Fuchs untersucht Bakterien mit einem Fluoreszenzmikroskop.





Hanno Teeling fügt die unzähligen DNA-Schnipsel am Computer wieder zusammen. In dieser Darstellung des Erbguts von *Congregibacter litoralis* zeigen die äußeren beiden Kreise potenzielle Gene an, die inneren Kreise beinhalten Gene für verschiedene Stoffwechselwege.

pulation lösen. Der erste große Gewinner der Algenblüte, das Flavobakterium *Ulvibacter*, produzierte große Mengen sogenannter TonB-abhängiger Transportproteine, die große Moleküle direkt ins Zellinnere bringen.

Zur selben Zeit fanden die Wissenschaftler vermehrt Enzyme zum Abbau komplexer Algen-Kohlenhydrate wie Laminarin. Bei den Nachzüglern unter den Gewinnern dominieren dagegen Transportproteine für kurze Proteinstücke sowie Transporter für den Nährstoff Phosphat und Einfachzucker.

ZEITLICH GETRENNTE NISCHEN

„Offensichtlich verfolgen die Bakterien völlig unterschiedliche Nahrungsstrategien“, erklärt Bernhard Fuchs. Manche Alphaproteobakterien können kleinere Nährstoffe sehr effizient nutzen, da sie auf niedrige Nahrungskonzentrationen spezialisiert sind. Deshalb dominieren sie die Phasen zwischen den Algenblüten.

Ulvibacter dagegen kann mit seiner Enzymausstattung das reichhaltige Angebot an Algenüberresten direkt nach der Blüte nutzen und baut als Erster die langkettigen Kohlenhydrate ab. Die Gruppen danach konzentrieren sich hingegen auf immer kleinere Moleküle

und verwerten die Reste. „Das ist wie in der Serengeti – erst kommen die Löwen, dann die Hyänen, die Schakale und zum Schluss die Geier“, sagt Teeling.

Die Bakterien besetzen im Meer also ökologische Nischen, die nicht wie im Regenwald räumlich, sondern zeitlich voneinander getrennt sind. Durch ihre Spezialisierung auf verschiedene Phasen nach der Blüte gehen sie der Konkurrenz aus dem Weg. Plötzlich erscheint auch das Plankton-Paradoxon gar nicht mehr so paradox, denn durch die zeitliche Trennung bleibt eine hohe Artenvielfalt im Bakterioplankton erhalten.

„Unsere Studie ist die erste zeitlich hochauflösende Analyse einer mikrobiellen Gemeinschaft auf Gattungsebene“, sagt Frank Oliver Glöckner. „Möglich ist das allein durch den außerordentlichen Sprung, den die Sequenzierungstechnologie in den vergangenen Jahren gemacht hat.“ Tatsächlich arbeiten die Hochleistungssequenzierer heute in völlig anderen Sphären als noch zu Zeiten des Human Genome Project. „Für die Sequenzierung des ganzen menschlichen Genoms hat man damals zehn Jahre gebraucht, heute könnte man sie in nur 14 Minuten schaffen“, sagt der Biologe.

Glöckner arbeitet bereits mit Hochdruck daran, diese Technologie weiterzuentwickeln und seine bioinformatischen Werkzeuge auch für andere Wissenschaftler nutzbar zu machen. Zwischen 2012 und 2015 koordinierte Frank Oliver Glöckner das Projekt Micro B3 (Biodiversität, Bioinformatik, Biotechnologie), ein internationales Konsortium aus 32 akademischen und industriellen Partnern. „Im Rahmen des Projekts fand schon dreimal der Ocean Sampling Day (OSD) statt. An diesem Tag werden weltweit Wasserproben mit einheitlichen Methoden genommen und zentral analysiert. Die Ergebnisse werden in verschiedenen Datenbanken veröffentlicht. So lernen wir viel über die bakterielle Diversität in den Weltmeeren.“

Solche Untersuchungen könnten etwa den Einfluss des Klimawandels auf die Bakteriengemeinschaften der Meere aufklären. Im Großen sind die Folgen der Erwärmung des Nordseewassers um 1,2 Grad Celsius seit 1962 schon offensichtlich: Kälteliebende heimische Fische wie der Kabeljau ziehen ins Nordmeer, während sich südliche Arten wie Streifenbarben und Sardellen in der Deutschen Bucht zunehmend wohler fühlen.

Doch die große Völkerwanderung unter den eingeborenen Mikroben blieb bisher aus. „Auf der Ebene der Bakterien hat die Erwärmung gegenwärtig keinen Einfluss, hier ist die Artengemeinschaft konstant“, sagt Bernhard Fuchs.

ENZYME FÜR DIE INDUSTRIE

Die Bremer Wissenschaftler wollen mit der Metagenomik aber nicht nur die Zusammensetzung der Artengemeinschaften im Ozean untersuchen. Die Gene und Proteine, auf die sie bei ihren Analysen stoßen, könnten auch dabei helfen, neue Wirkstoffe oder Materialien zu entwickeln. Glöckner setzt bei seiner Forschung auf eine enge Kooperation mit Partnern aus der Biotechnologiebranche: „Enzyme haben viele Anwendungsmöglichkeiten, denn sie beschleunigen chemische Reaktionen und senken den Energieverbrauch.“

Deshalb arbeiten die Max-Planck-Forscher mit verschiedenen Unterneh-

men zusammen, die neue Enzyme, die sie in den Bakteriengenomen gefunden haben, testen und dann unter Umständen zur Herstellung von Medikamenten oder Waschmitteln nutzen könnten.

Denn noch sind große Teile der zu meist aus 3000 bis 8000 Genen bestehenden Bakteriengenome kaum erforscht. Von 30 bis 40 Prozent wissen die Experten sehr genau, für welche Proteine sie codieren und was genau diese Proteine tun. „Das sind vor allem

Enzyme aus dem Grundstoffwechsel, den jede Bakteriengruppe zum Überleben braucht. Bei einem weiteren Drittel können wir grob sagen, zu welcher Gruppe ein Gen gehört, etwa ob es für eine Lipase codiert, die Fette abbauen kann“, sagt Glöckner. Doch das letzte Drittel ist völlig unbekannt und besteht aus Genen, von denen die Forscher lediglich vermuten, dass es sie gibt. Diesen Schatz aus Genen wollen die Forscher nun heben. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Das Wasser der Ozeane bietet Organismen nur wenige räumlich voneinander getrennte Lebensräume. Trotzdem beherbergen die Meere unzählige Mikroorganismen (Plankton-Paradoxon).
- Die Bakterien im Meer verfolgen unterschiedliche Nahrungsstrategien. Sie können zeitlich getrennte Nischen besetzen und auf diese Weise der Konkurrenz mit anderen Arten aus dem Weg gehen.
- Nach einer Algenblüte dominieren für kurze Zeit immer neue Bakterienarten, die das jeweils zur Verfügung stehende Nahrungsangebot optimal verwerten können.



**Start im
September 2016**

RWTH Forschungsmanger/in
Expert Zertifikatsprogramm

 | RWTH
Forschungsmanger/in
Connecting Excellence.

Berufsbegleitendes Weiterbildungsprogramm der RWTH Aachen für Fach- und Führungskräfte an der Schnittstelle von Forschung und Management.

weiterbildung.rwth-aachen.de/rwth-forschungsmanger



Auf der Jagd mit dem Weißen Hai

Über den größten aller Raubfische weiß die Wissenschaft bislang wenig. Das soll sich ändern: **Martin Wikelski**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Ornithologie** in Radolfzell, und sein Kollege **Taylor Chapple** von der **Stanford University** sind dem Weißen Hai (*Carcharodon carcharias*) auf der Spur. An der Küste Südafrikas erforschen sie sein Jagdverhalten – mithilfe von Kameras, Hightech-Sendern und Teppich aus dem Baumarkt.

TEXT **ELKE MAIER**

In Hollywood ist ein Weißer Hai 470 Millionen Dollar wert. So viel soll zumindest Steven Spielbergs gleichnamiger Film eingebracht haben, der im Jahr 1975 in den Kinos lief. Dass darin statt eines echten Hais eine reparaturanfällige Attrappe zum Einsatz kam, ist nebensächlich – zumal selbst das ausrangierte Fiberglas-Ungetüm kostenpflichtig bestaunt wurde.

Seinem Protagonisten bescherte das oscargekrönte Monsterfisch-Spektakel eine zweifelhafte Berühmtheit. Dabei liegt die wahre Lebensgeschichte von *Carcharodon carcharias* bis heute im Dunkeln: „Wo werden sie geboren, und wohin wandern sie? Wo sterben sie und warum? Wir wissen es nicht“, sagt Martin Wikelski, Direktor am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell. Auch über das Jagdverhalten der bis zu sechs Meter langen Knorpelfische ist bisher wenig bekannt.

Wikelski, der im Jahr 2008 aus Princeton an den Bodensee kam und seither die Vogelwarte Radolfzell leitet,

möchte das ändern. Der 50-jährige Verhaltensökologe ist Spezialist für die Besenderung von Tieren. Die kleinen Hightech-Geräte sind sein Handwerkszeug, um ihre Wanderwege und ihr Verhalten zu erforschen und so die ökologischen Zusammenhänge in der Natur zu entschlüsseln.

TIERBEOBACHTUNG IN DEN WEITEN DES OZEANS

Mithilfe von Satellitensendern begleiten er und seine Kollegen Störche auf deren Reise ins Innere von Afrika, beschatten Samen verbreitende Nager im Regenwald von Panama oder verfolgen Flughunde auf ihren nächtlichen Streifzügen durch den Busch von Ghana. Auf Sizilien besondern sie Ziegen, um sie als Warnsystem vor Vulkanausbrüchen zu erproben. Sogar Insekten statten die Forscher mit Miniatur-Fahrtenschreibern aus (siehe *MAXPLANCKFORSCHUNG* 2/2012, Seite 26 ff., und *MAXPLANCKFORSCHUNG* 1/2014, Seite 58 ff.).

„Die meisten Arten, die wir bisher beobachtet haben, sind an Land oder in der Luft zu Hause“, erzählt Martin Wikelski. „Wir wollten unsere Beobachtungen aber auch auf Wassertiere ausdehnen.“ So gesehen, war es eine glückliche Fügung, dass er vor einigen Jahren auf einem Kongress den Haispezialisten Taylor Chapple kennenlernte. Der junge Wissenschaftler war gerade dabei, an der University of California in Davis seine Doktorarbeit abzuschließen, in der er eine Methode zur Bestandsabschätzung bei Haien entwickelt hatte. 2010 ging Chapple für zwei Jahre als Postdoc an den Bodensee.

Mittlerweile forscht der Haiexperte an der Hopkins Marine Station der Stanford University in Kalifornien. Mit Radolfzell steht er weiterhin in engem Kontakt. Für ihr gemeinsames Projekt

Die Flosse eines Weißen Hais ist ein seltener Anblick. Die Tiere kommen weltweit in fast allen Meeren vor, ihre Bestände sind jedoch stark zurückgegangen.



» Um die Haie anzulocken, wenden die Forscher einen einfachen, aber wirkungsvollen Trick an: Sie ziehen eine selbst gebastelte Robbenattrappe hinter dem Boot her.

reichte Martin Wikelski einen Stipendienantrag bei der National Geographic Society ein. Die Idee, mithilfe von Satellitensendern und Kameras das Jagdverhalten der Haie zu erforschen, gefiel der Jury, und die beiden Forscher bekamen den Zuschlag.

Weißer Haie jagen dicht unter der Wasseroberfläche. Ihre bevorzugte Beute sind Robben. Bei der Jagd stimmen die hoch entwickelten Knorpelfische ihr Vorgehen flexibel auf die Situation ab. Häufig positionieren sie sich unter der Beute und warten auf eine günstige Gelegenheit, um blitzschnell zu attackieren. Bei ihren Überraschungsangriffen beschleunigen die bis zu zwei Tonnen schweren Räuber teils so stark, dass sie meterhoch aus dem Wasser schießen. Auf kurze Distanzen können sie Geschwindigkeiten von 40 Kilometern pro Stunde erreichen.

Wie genau gehen die Haie vor, um die extrem schnellen und wendigen Meeressäuger zu erbeuten? Wie schaffen sie es, ihre tonnenschweren Körper so weit aus dem Wasser zu wuchten? Wie viel Kraft müssen sie in den Schlag der Schwanzflosse stecken, und wie viel Energie wenden sie dafür auf? All diese Fragen sind noch offen. Bisher wissen die Forscher nicht einmal, wie oft die Haie überhaupt fressen müssen. „Mithilfe der Sender und der Kameras haben wir die Möglichkeit, bei der Jagd dabei zu sein“, sagt Taylor Chapple.

Das Studiengebiet der Wissenschaftler liegt an der Westküste Südafrikas rund um Dyer Island, nahe der kleinen Küstenstadt Gansbaai. Von dort aus sind es etwa zweieinhalb Stunden Autofahrt bis Kapstadt. Das flache Felsen-eiland ist nur rund einen Kilometer lang und unbewohnt. Berühmt ist die

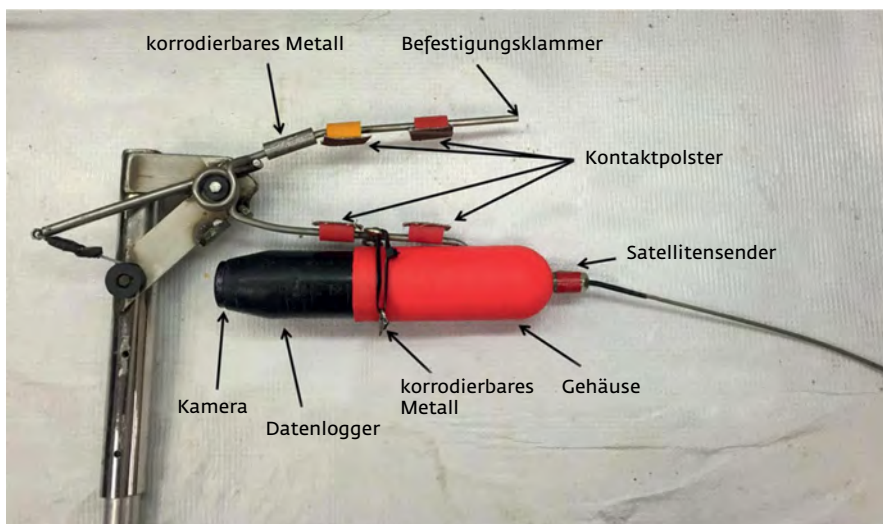
Insel für die vielen Brillenpinguine, die dort nisten; vor allem aber für die Weißen Haie, die sich im Meer ringsherum tummeln. Grund dafür sind Robben, genauer gesagt: Zehntausende Südafrikanische Seebären, die auf der winzigen Nachbarinsel Geyser Rock lagern.

TEPPICH STATT HOLZ, UM DIE ZÄHNE ZU SCHONEN

Ozeanografisch gesehen, befindet sich vor der Küste Südafrikas ein Auftriebsgebiet: Nährstoffhaltiges Tiefenwasser steigt auf und sorgt für ein reiches Nahrungsangebot an der Basis der marinen Nahrungsketten. Der daraus resultierende Fischreichtum lockt die Seebären an und damit auch die Haie. Diese wiederum haben eine anziehende Wirkung auf abenteuerlustige Touristen: Gansbaai gilt als Welthauptstadt der Weißen Haie und erste Adresse für Hai-tauchen im Käfig. Dass die Tiere hier an Boote und Menschen gewöhnt sind, ist für die Forscher von Vorteil, wenn es darum geht, sie mit Sendern und Kameras auszustatten.

Die Wasserstraße zwischen den Inseln wird Shark Alley genannt und ist vom Festland aus in einer halben Stunde zu erreichen. Um die Haie anzulocken, wenden die Forscher einen einfachen, aber wirkungsvollen Trick an: Sie ziehen eine selbst gebastelte Robbenattrappe hinter dem Boot her. „Wir verwenden dafür Teppichmeterware aus dem Baumarkt und schneiden daraus eine Robbe aus“, erklärt Taylor Chapple. „Anders als bei einem Holzbrett können sich die Haie daran nicht die Zähne ausbeißen.“ Um das Interesse der Tiere wachzuhalten, hängen die Forscher zusätzlich Fischköder ins Wasser. „Die Haie würden sonst wieder wegschwimmen,

In der Klemme: Ein raffiniertes System befestigt die Geräte an der Rückenflosse. Es besteht stellenweise aus korrodierbarem Metall, das sich mit der Zeit auflöst. Nach einigen Tagen fallen Gerätepack und Klammer von selbst ab.



Sender und Kamera ermöglichen es den Forschern, den Hai für mehrere Tage bei all seinen Aktivitäten zu begleiten (oben, Mitte). Das Anbringen erfordert Geschicklichkeit: Sobald der Hai nah genug am Boot ist, muss Taylor Chapple die Rückenflosse mit dem Stab treffen, an dessen Ende sich die Geräte befinden.

sobald sie merken, dass es nichts zu fressen gibt“, sagt der Wissenschaftler.

Sobald sich ein Hai an der Oberfläche zeigt, versuchen die Forscher, ihn mithilfe des Köders möglichst parallel zum Boot zu lotsen. Dann heißt es schnell sein: Oft bleiben nur Sekundenbruchteile, um vom schwankenden Boot aus die Rückenflosse des Hais anzuvisieren und mit der etwas über einen Meter langen Stange zu treffen, die dazu dient, die Geräte anzubringen. Dass er dabei auch mal einen Schwall Salzwasser oder gar einen Schlag mit einer Schwanzflosse abbekommt, schreckt Taylor Chapple nicht ab: „Die Daten sind es mehr als wert“, meint er.

Läuft alles nach Plan, schnappt der Klappmechanismus zu und hält die Geräte sicher an der Basis der Rückenflosse, sodass sie selbst bei rasanten Schwimmmanövern und Sprüngen nicht verloren gehen. Anders als bei sonst üblichen Verankerungsmethoden gelingt das, ohne die Haut des Tiers zu verletzen.

Damit der Hai sein Gepäck nach einigen Tagen auch wieder loswird, haben die Forscher ein raffiniertes Detail eingebaut: Teile des Befestigungssystems bestehen aus korrodierbarem Metall, das sich im Meerwasser nach und nach auflöst. Der Gerätepack fällt daraufhin ab und treibt an die Wasseroberfläche. Mit etwas Glück können die Forscher ihn dort orten und einsammeln, um die Daten später am Rechner





auszulesen. Das ausgeklügelte System hat das Team um Martin Wikelski und Taylor Chapple eigens entwickelt. Ihre Methode haben die Forscher im vergangenen Jahr im Fachblatt *ANIMAL BIOTELEMETRY* veröffentlicht.

Während der Beobachtungsphase zeichnen die kleinen Hightech-Geräte jede Bewegung des Hais auf. Sie messen, in welcher Tiefe er schwimmt und welche Beschleunigung er erreicht. Ein Gyroskop bestimmt seine Lage im Raum, ein 3D-Kompass misst die Richtung, in die er sich bewegt. Anhand der Daten können die Forscher später das Verhalten des Tiers genau rekonstruieren. Dabei hilft auch die Kamera, die es den Wissenschaftlern erlaubt, die Jagd aus der Perspektive des Hais mitzuerleben.

Die Datenauswertung wird innerhalb der nächsten Monate abgeschlossen sein, wissenschaftliche Veröffentlichungen sind in Vorbereitung. Martin Wikelski und Taylor Chapple hoffen, damit nicht nur Einblicke in das Verhalten der eleganten Meeressäuger zu liefern. Sie möchten auch dazu beitragen, die Tiere zu schützen.

Jedes Jahr werden Millionen Haie getötet. Sie enden als Beifang, werden

zum Schutz der Strände gejagt oder von Trophäenjägern erlegt. Die meisten aber sterben ihrer Flossen wegen: Haifischflossensuppe gilt in China als Prestigespeise, die sich mit wachsendem Wohlstand immer mehr Menschen leisten können. „Für die Flossen eines Weißen Hais sind manche Käufer bereit, extra viel Geld auf den Tisch zu legen“, sagt Chapple. Mehr als tausend Dollar soll angeblich ein einziges Tier einbringen.

DRASTISCHE FOLGEN FÜR DAS GESAMTE ÖKOLOGISCHES SYSTEM

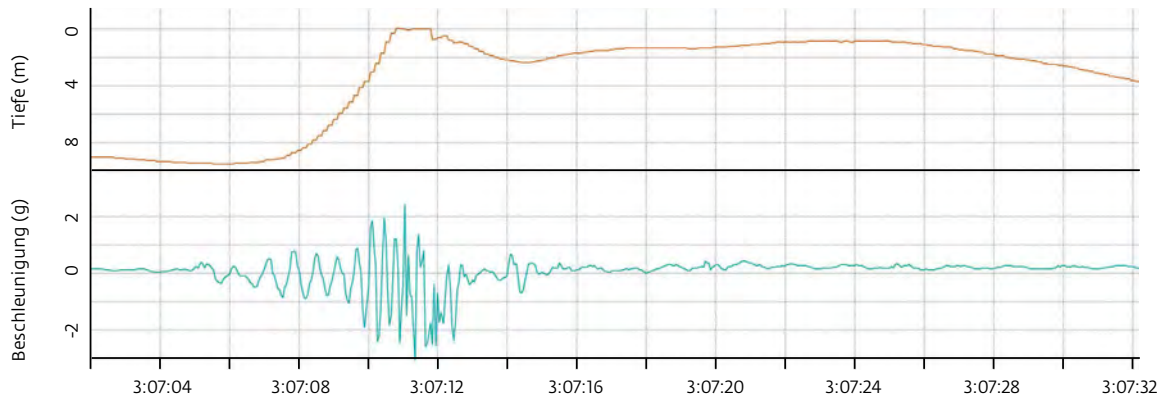
Dabei wirkt sich die Dezimierung des Bestands gerade bei *Carcharodon carcharias* fatal aus: Die Weibchen der Art sind lebend gebärend und bringen nur wenige Nachkommen zur Welt, und das erstmals im Alter von 33 Jahren. Weiße Haie können wahrscheinlich mehr als 70 Jahre alt werden.

Wie viele der Tiere es weltweit noch gibt, ist nicht bekannt. Taylor Chapple und seine amerikanischen Kollegen haben im Jahr 2011 eine Bestandsabschätzung veröffentlicht. Darin ermittelten sie für die gesamte kalifornische Küste

eine Zahl von nur 219 halbwüchsigen und erwachsenen Tieren. Im Nordwestatlantik sollen die Bestände innerhalb von 15 Jahren um fast 80 Prozent zurückgegangen sein. Der Weiße Hai wird auf der Roten Liste als gefährdet geführt.

Da Haie an der Spitze der marinen Nahrungsketten stehen, hat ihr Verschwinden mitunter drastische Folgen für das gesamte Ökosystem. An der amerikanischen Ostküste etwa ist die Muschelindustrie zusammengebrochen, nachdem dort die großen Haiarten verschwunden waren. Diese halten normalerweise die Rochen in Schach. Ohne Haie konnten sich die muschelfressenden Rochen explosionsartig vermehren, die Erträge aus dem Muschelfang gingen massiv zurück.

Wenn sich, so wie in Südafrika, zahlungskräftige Touristen für die Haie interessieren, könnte das zu deren Erhalt beitragen: Die Einnahmen bieten für die lokale Bevölkerung einen Anreiz, die Tiere zu schützen. Doch bisher weiß niemand, wie groß der Stress für die Tiere ist, den der Ansturm der Taucher verursacht. „Möglicherweise verbrennen sie mehr Energie und werden von der Jagd abgehalten“, sagt Chapple. Dies



Links Angriff aus der Tiefe: Bei der Robbenjagd schießen die tonnenschweren Tiere teils meterhoch aus dem Wasser. Doch längst nicht jeder Versuch ist erfolgreich.

Oben Während einer Attacke zeichnet das Messgerät die Schlagfrequenz der Schwanzflosse auf. Um 3:07:08 Uhr wendet sich der Hai steil nach oben, gleichzeitig erhöhen sich die Schlagfrequenz und damit die Beschleunigung der Flosse um den Faktor 6. Nur drei Sekunden später durchbricht der Hai die Wasseroberfläche. Er beschleunigt damit schneller als der jamaikanische Weltrekordsprinter Usain Bolt.

sind jedoch nur Spekulationen, denn systematische Studien fehlen. „Die Sender ermöglichen uns, diese Lücke zu schließen.“ Gegebenenfalls könnte dann etwa die Zahl der Taucher begrenzt werden, um die Haie zu schützen.

Um die entsprechenden Daten zu gewinnen, können die Forscher schon bald auf Hilfe aus dem All hoffen: Im Sommer 2017 soll ICARUS (International Cooperation for Animal Research Using Space) starten, eine Initiative zur globalen Erforschung von Tierwanderungen. Mithilfe einer eigens dafür an der *Internationalen Raumstation (ISS)* angebrachten Antenne wollen die Forscher künftig Tausende Probanden gleichzeitig observieren – vom wenige Zentimeter großen Monarchfalter bis zum sechs Meter langen Weißen Hai.

„Mit ICARUS ist es möglich, weit mehr Information zu übermitteln als bisher, und das mit viel kleineren Sendern“, sagt Martin Wikelski, der das Projekt leitet. „Die Sender gehen mit diesem Ortungssystem auch nicht mehr so oft verloren wie bisher.“ Alle Daten aus dem Projekt werden zentral gespeichert und stehen Interessierten weltweit zur Verfügung.

Schon heute gibt es eine frei erhältliche Animal-Tracker-App, mit der nach dem Start von ICARUS jeder „seinen“ Hai auf dem Smartphone oder Tablet verfolgen kann, bei Bedarf

sogar vom Liegestuhl am Strand aus. Dann braucht auch niemand mehr nach der berüchtigten Haifischflosse Ausschau zu halten – ein kurzer Blick aufs Handy genügt. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Weißer Haie sind die größten Raubfische der Welt. Zu ihrer bevorzugten Beute zählen Robben. Bei der Jagd gehen sie je nach Situation unterschiedlich vor.**
- **Martin Wikelski vom Max-Planck-Institut für Ornithologie und sein Kollege Taylor Chapple von der Stanford University statten Weiße Haie vor Südafrika mit Sendern und Kameras aus, um ihr Jagdverhalten zu erforschen. Sie haben ein Befestigungssystem entwickelt, das es ermöglicht, die Geräte an der Rückenflosse anzubringen, ohne die Haut des Tiers zu verletzen.**
- **Weltweit sind die Haibestände drastisch zurückgegangen. Schuld ist vor allem die steigende Nachfrage nach Haifischflossen.**

GLOSSAR

Gyroskop (Kreiselinstrument): Gerät, das Informationen über die Lage von Objekten liefert. Es besteht ursprünglich aus einem schnell rotierenden Kreisel, der drehbar in einer Lagerung aufgehängt ist. Aktuell wird der Begriff *Gyro* für verschiedene Drehratensensoren verwendet, die zwar keine Kreisel enthalten, aber den gleichen Zweck erfüllen wie ein Gyroskop. Das Handy stellt damit etwa fest, ob es hoch oder quer gehalten wird.

Internationale Raumstation (International Space Station, ISS): Bemannte Raumstation, die in internationaler Kooperation betrieben wird. Die ISS kreist in rund 400 Kilometern Höhe um die Erde. Sie ist das bislang größte Technologieprojekt und bietet als „fliegendes Labor“ Raum für wissenschaftliche Experimente.

Australier mit Migrationshintergrund

Lange vor der europäischen Besiedlung wanderten Menschen vom indischen Subkontinent in Australien ein und vermischten sich mit den Aborigines



Vor 4000 Jahren war Australien nicht mehr mit dem Festland verbunden, so wie während der Eiszeit. Neuankömmlinge vom indischen Subkontinent kamen also per Schiff über das Meer.

Australien ist erst verhältnismäßig spät vom modernen Menschen besiedelt worden. Die frühesten archäologischen Belege für dessen Anwesenheit sind erst etwa 45000 Jahre alt. Damals lag der Meeresspiegel tiefer als heute, und Australien und Neuguinea bildeten eine gemeinsame Landmasse (Sahul). Lange Zeit war man der Ansicht, dass es vor dem Eintreffen der Europäer im 18. Jahrhundert keinen Kontakt mehr zwischen Australien und dem Rest der Welt gegeben hat. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig analysierten jedoch die genetische Variation innerhalb des Erbguts von australischen Aborigines, von Bewohnern Neuguineas und südostasiatischer Inseln und von Indern. Demnach kam es vor 4230 Jahren zu einem substanziellen Genfluss von Indien nach Australien. Es müssen also Menschen vom indischen Subkontinent in Australien eingewandert sein. Die Gendaten passen zu plötzlichen Veränderungen in archäologischen Funden. Offenbar haben die Einwanderer neue Techniken zur Verarbeitung von Pflanzenteilen und zur Herstellung von Steinwerkzeugen mitgebracht. Zudem taucht in dieser Zeit erstmals der Dingo in Australien auf, eine schon vor Jahrtausenden verwilderte Hundeform.

(www.mpg.de/6816021)

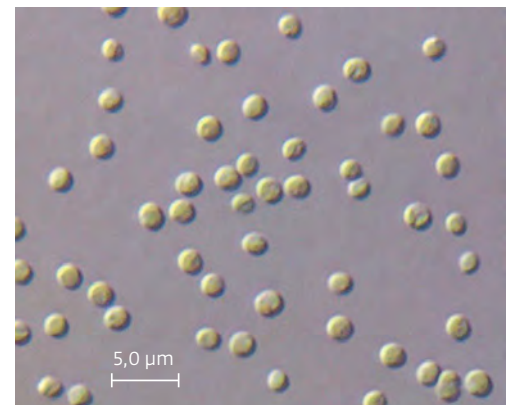
Tauschgeschäft im Ozean

Symbiose sorgt für Stickstoffdüngung der Meere

Stickstoff ist ein unverzichtbarer Nährstoff für das Zellwachstum. Doch nur wenige Organismen können den Stickstoff gasförmig in der Atmosphäre oder gelöst im Wasser nutzen. Ein vor Kurzem entdecktes Cyanobakterium besitzt wie zahlreiche andere Vertreter dieser Mikroorganismen diese Fähigkeit. Ungewöhnlich für Cyanobakterien ist, dass der neu gefundene Einzeller nicht durch Fotosynthese Kohlenstoffverbindungen aufbauen kann – eine Fähigkeit, die wiederum die unzähligen Algen des Planktons besitzen. Es liegt also nahe, sich zusammenzutun. Forscher vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen haben eine Symbiose zwischen dem Bakterium und einzelligen Algen aus der Gruppe der Prymnesiophyten nachgewiesen.

Das Bakterium liefert der Alge Stickstoff und erhält im Gegenzug Kohlenstoffverbindungen. Dabei sitzt es vermutlich huckepack in einer Mulde auf der nur einen tausendstel Millimeter großen Alge. Während an Land verschiedene Pflanzenarten wie Erbse, Bohne oder Klee von Symbiosen mit stickstofffixierenden Bakterien profitieren, ist die neue Lebensgemeinschaft die erste bekannte ihrer Art im Meer. Sie spielt eine wichtige Rolle bei der Düngung der Weltmeere mit Stickstoffverbindungen. Außerdem ist sie ein mögliches Modell für die ersten Symbiosen von Zellen mit Cyanobakterien, aus denen die Chloroplasten in Pflanzenzellen hervorgegangen sind.

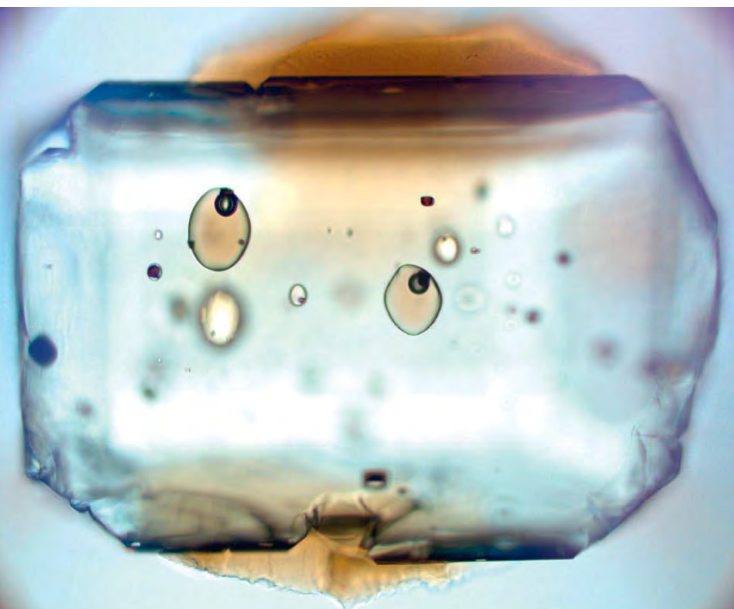
(www.mpg.de/6356201)



Algen der Gattung *Nannochloris*. Sie ähneln den Arten, mit denen manche Cyanobakterien eine Symbiose eingehen.

Vulkane als schnelle Recyclinganlagen

Abgesunkene Ozeankruste tritt bereits nach 500 Millionen Jahren wieder an die Oberfläche



Geo-Recycling läuft in Vulkanen viel schneller ab, als Wissenschaftler bislang annahmen. Gestein des Erdmantels, das am Ozeanrand wegen der Bewegung der Erdplatten ins Erdinnere absinkt, gelangt über Vulkane bereits nach rund 500 Millionen Jahren wieder an die Oberfläche – und nicht, wie bislang angenommen, erst nach zwei Milliarden Jahren. Das haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz anhand vulkanischer Gesteinsproben aus Hawaii festgestellt. Sie analysierten das Isotopenverhältnis von Strontium in den Resten von Meerwasser-Einschlüssen in Basalt. Da das Isotopenverhältnis davon abhängt, zu welcher Zeit das Wasser in den Stein gelangte, lässt sich daraus auch das Alter des Basalts bestimmen.

(www.mpg.de/4393883)

Zeuge der Erdgeschichte: In den knapp einen Millimeter breiten Olivinkristall gelangten bei seiner Entstehung geschmolzene Tropfen, die glasig erstarrten (braune Ovale). Bei den schwarzen Punkten handelt es sich um Gasblasen. In den glasigen Einschlüssen finden sich Isotopenverhältnisse von Strontium, wie sie im Meerwasser vor 500 Millionen Jahren vorkamen.

Giftige Wiedergänger in der See

In mittleren Meerestiefen kann die Konzentration gesundheits- und umweltschädlicher Chemikalien immer wieder ansteigen, obwohl deren Verwendung seit Jahrzehnten zurückgeht

Einige besonders üble Giftstoffe dürften der Umwelt und auch der Menschheit länger Probleme bereiten, als bislang angenommen. Wie Forscher des Max-Planck-Instituts für Chemie und der Universität Hamburg in einer Simulation festgestellt haben, zirkulieren DDT und polychlorierte Biphenyle (PCBs) in Tiefen von 200 bis 1500 Metern noch in beträchtlichen Konzentrationen durch die Ozeane. Und das, obwohl die Emission von DDT seit etwa 1966 und die der PCBs seit Beginn der 1970er-Jahre rückläufig sind. Auch die Belastung der Atmosphäre, der Böden und des Oberflächenwassers der Meere nimmt seit längerem ab, weil die Stoffe aus der Luft

zunächst ins Meer gelangen und dort von der Oberfläche in tiefere Schichten absinken. In diesen Tiefen bewirkte der Transport durch die Meeresströmungen beispielsweise, dass die Konzentration von PCB153 vor der Westküste Irlands in Tiefen von 700 bis 1200 Metern um 1985 und ein weiteres Mal um das Jahr 2000 vorübergehend stark anstieg. Über die Nahrungskette und die Tiefseefischerei können die Gifte, die unter anderem Krebs erregen können, die menschliche Gesundheit gefährden.

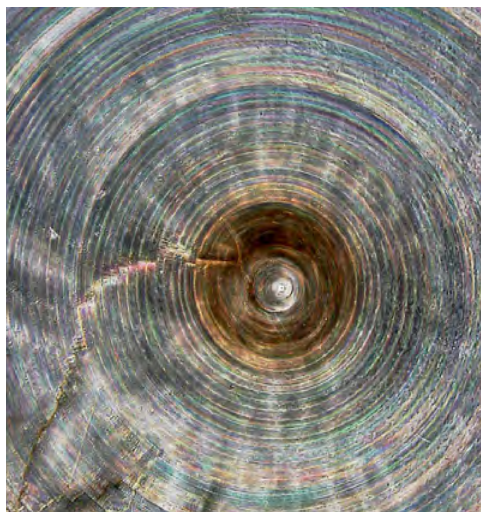
In den 1940er-Jahren demonstrieren US-Soldaten die Entlausung mit DDT. Inzwischen wird das Gift deutlich weniger verwendet.



(www.mpic.de/aktuelles/pressemeldungen/news/alte-giftstoffe-in-der-tiefsee-kehren-zurueck)

Klimaarchiv im Glasschwamm

11 000 Jahre alter Tiefseeschwamm erlaubt Rückschlüsse auf frühere Umweltänderungen im Meer



Klimaforscher haben ein neues Archiv historischer Meerestemperaturen erschlossen. Anhand des Skeletts eines Glasschwamms, der zur Art *Monorhaphis chuni* gehört und 11 000 Jahre im Ostchinesischen Meer lebte, fand ein internationales Forscherteam um Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Chemie heraus, dass sich die Temperatur in der Tiefsee in den letzten Jahrtausenden mehrmals veränderte. Das Skelett, das einen Zentimeter dick und zwei Meter lang ist, ähnelt einem Glasfaserstab. Der Schwamm, dessen Zellen den Glasstab zu Lebzeiten umgaben, ergänzte außen ständig neues Siliciumdioxid. Aus Isotopen- und Elementanalysen schlossen die Forscher nun, dass die Meer-

Ein Glasschwamm als Studienobjekt: In der linken Aufnahme ist ein einen Millimeter breiter Querschnitt durch das Skelett von *Monorhaphis chuni* zu sehen. Rechts das mehr als zwei Meter lange und an einen Glasfaserstab erinnernde Skelett aus Siliciumdioxid in den Händen der Forscherin Xiaohong Wang.

wassertemperatur in der Umgebung des Schwamms mindestens einmal von knapp zwei Grad Celsius auf sechs bis zehn Grad Celsius anstieg. Diese Temperaturveränderungen waren bisher nicht bekannt und sind auf Ausbrüche von Meeresvulkanen zurückzuführen.

(www.mpg.de/5591752)

Standfester Muschelfuß

Eisern halten sich Muscheln an Steinen und Felsen fest – und das ist durchaus wörtlich zu verstehen. Die Muschelseide, mit der die Schalentiere am Boden haften, verschleißt kaum, obwohl an ihr ständig die Brandung zerrt und sie immer wieder über Stein scheuert. Diese Widerstandskraft verdanken die Fasern Eisenatomen in ihrer Hülle, über die sich die Proteine des Muschelfußes vernetzen, wie Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam-Golm festgestellt haben. Dabei bilden sich an den Eisenatomen Bindungen, welche unter großer Belastung zwar teilweise brechen, damit sich das Material stärker dehnen lässt; doch da-



nach schließen sich die Brüche wieder. So schafft die Natur, was Materialwissenschaftlern kaum gelingt: einen Stoff gleichzeitig dehnbar und hart zu machen. Möglicherweise, so hoffen die Forscher, lassen sich nach dem Prinzip der Natur auch technische Materialien mit ähnlichen Eigenschaften herstellen.

(www.mpg.de/606633)

Halt für ein Leben in starker Strömung: Mit Muschelseide (Byssus) heften sich die Schalentiere am Meeresgrund fest. Eine eisenverstärkte Hülle macht die Fasern abriebfest.

Korallen in der Videoüberwachung

Neues Analysesystem erleichtert Untersuchung von Riffen

Der Klimawandel bedroht auch die Korallenriffe. Sie leiden beispielsweise unter steigenden Temperaturen und der zunehmenden Versauerung der Ozeane. Der Aufwand, die dadurch hervorgerufenen Veränderungen zu analysieren, ist so hoch, dass sich immer nur ein Bruchteil eines Korallenriffs untersuchen lässt. Forscher am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen haben daher den „HyperDiver“ entwickelt. Was nach einem Reinigungsgerät aus dem Verkaufsfenster klingt, ist in Wirklichkeit ein Beobachtungssystem, mit dem ein einzelner Taucher in kurzer Zeit den Zustand kompletter Riffe dokumentieren und auswerten kann. Die Forscher haben dafür eine Software programmiert, die sie darauf trainieren können, viele verschiedene Korallenarten zu identifizieren, ähnlich wie bei der automatisierten Personenerkennung bei der Videoüberwachung. Mit einer Spezialekamera und einer herkömmlichen Digitalkamera können die Forscher bis zu 40 Quadratmeter Riff pro Minute dokumentieren und von der Software auswerten lassen. Daraus können sie eine Karte erstellen, auf der die Artenvielfalt eines Korallenriffs erkennbar ist. Je mehr Korallenriffe die Wissenschaftler kartieren, desto besser kann das System die Vielzahl an Korallenarten unterscheiden lernen. So wird es in Zukunft wesentlich einfacher werden, Veränderungen eines Riffs zu beobachten.

(www.mpi-bremen.de/Das_digitalisierte_Korallenriff)



Mit dem neuen „HyperDiver“-System lässt sich der Zustand eines Korallenriffs wesentlich schneller und genauer erfassen als bisher. So können erstmals detaillierte Karten ganzer Unterwasserlandschaften erstellt werden.

Kohle im Meer

Rückstände von Waldbränden werden aus dem Boden gelöst und über Flüsse in die Ozeane transportiert



Im Kohlenstoffkreislauf der Erde war ein wichtiger Faktor bislang unberücksichtigt. Wie ein internationales Forscherteam um Thorsten Dittmar vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen berechnete, gelangen pro Jahr etwa 25 Millionen Tonnen Holzkohle über Flüsse aus dem Boden ins Meer.

Die Kohle entsteht an Land in großen Mengen, weil jedes Jahr Millionen Hektar Vegetation abbrennen. Bislang hatten Geoforscher an-

genommen, dass die Kohle im Boden bleibt. Wie die Gruppe um die Bremer Max-Planck-Wissenschaftler nachwies, macht Holzkohle weltweit allerdings zehn Prozent der Gesamtmenge an gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen in Gewässern aus. Diese Erkenntnisse helfen, den globalen Kohlenstoffzyklus besser zu verstehen, über den auch das Treibhausgas Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt.

(www.mpg.de/7111153)

Brand im borealen Nadelwald: Feuer vernichten jedes Jahr Millionen von Bäumen. Zurück bleibt Holzkohle, die – anders als bisher angenommen – teilweise ins Meer gelangt.

Begraben unter Sediment

Erosion in tropischen Küstenregionen setzt in Korallen tödliche Kettenreaktion in Gang

Bodenerosion durch fortschreitende Industrialisierung, Waldrodungen und intensive Landwirtschaft in küstennahen Gebieten spült nährstoffreiche Böden ins Meer und führt zum Ab-



sterben von Korallenriffen. Bremer Forscher vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie haben die Ursachen für den Tod der Korallen aufgeklärt. Demnach bewirkt der Abbau von organischen Nährstoffen in den Sedimentablagerungen durch natürlich vorkommende Bakterien Sauerstoffmangel und löst zusammen mit einer Versauerung der Umgebung eine Kettenreaktion aus. An deren Ende setzen Mikroorganismen beim Abbau von geschädigtem Korallengewebe Schwefelwasserstoff frei. Dieses Zellgift tötet dann die umliegenden Polypen innerhalb kürzester Zeit. Bereits geringe Mengen an organischem Material reichen aus, um die tödliche Wirkung auf die Korallen zu entfalten. Sedimente mit geringem organischem Gehalt, die vom Meeresboden durch Wind und Wellen aufgewirbelt werden, haben hingegen kaum Auswirkungen auf die Riffe.

(www.mpg.de/5810175)

Riffbildende Korallen im Großen Barriereriff vor der australischen Ostküste. Sie sind mit einer zwei Millimeter dünnen Sedimentschicht bedeckt, die von Flüssen ins Meer getragen wurde.

Tankstelle in der Tiefsee

Holzreste am Meeresboden dienen Lebewesen als Station zwischen nährstoffreichen Quellen

In der Tiefsee wachsen keine Bäume, und doch kann aus einem abgesunkenen Baumstamm am Meeresgrund eine Arche Noah des Tiefseelebens werden: Bis sein Holz vollständig zersetzt ist, liefert er den Tiefseebewohnern den Rohstoff für ihre Energieerzeugung, wie Forscher vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen herausgefunden haben. Schwefelwasserstoff und Methan aus heißen und kalten Quellen am Meeresgrund sind für viele Lebewesen aus der Tiefsee wie manche Muschelarten und Röhrenwürmer ein essenzieller Nährstoff. Die Quellen liegen aber zum Teil Hunderte von Kilometern auseinander. Um auf ihrer langen Reise nicht zu verhun-

gern, legen die Tiere an Holzresten am Meeresgrund offenbar einen Zwischenstopp ein. Die Wissenschaftler haben Baumstämme im östlichen Mittelmeer in 1700 Meter Tiefe versenkt und ein Jahr später die darauf lebenden Tiere und Mikroorganismen untersucht. Eine Muschelart – der Schiffsbohrwurm – dominiert den neuen Lebensraum und zersetzt das Holz mithilfe von Bakterien. Dabei entstehen Holzspäne, die von sulfatreduzierenden Mikroorganismen unter dem Verbrauch von Sauerstoff in Schwefelwasserstoff umgewandelt werden. Dieser dient dann wieder anderen Arten als Nahrung.

(www.mpg.de/6855646)



Schiffsbohrwürmer, eine besondere Muschelart, zerlegen mithilfe von Bakterien das Holz in der Tiefsee und bereiten so den Lebensraum für andere Organismen vor.

Bakterien entgiften Meerwasser

In überdüngten, küstennahen Regionen der Ozeane kann durch bestimmte Meeresbakterien Schwefelwasserstoff gebildet werden – eine übel nach faulen Eiern riechende, dazu aber auch äußerst giftige Verbindung: Sie führt schon in relativ niedrigen Konzentrationen bei höheren Lebewesen zum Atemstillstand und kann, indem sie Fische, Krabben oder Hummer tötet, die Küstenfischerei erheblich schädigen.

Ein internationales Forscherteam, darunter auch Wissenschaftler des Bremer Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie, hat Gegenspieler jener Bakterien entdeckt, die den tödlichen Schwefelwasserstoff bilden. Es handelt sich dabei ebenfalls um Bakterien, und zwar um sogenannte Nitrat-Atmer, die ihren Energiestoffwechsel nicht mit Sauerstoff, sondern mit Nitrat speisen. Und mithilfe des Nitrats können diese Bakterien den Schwefelwasserstoff als „Nahrungsmittel“ verarbeiten und ihn in harmlosen elementaren Schwefel umwandeln.

(www.mpg.de/558759)

Eine Giftspur auf einem Satellitenbild: Bakterien verwandeln giftigen Schwefelwasserstoff in ungiftigen Schwefel, der das Meer türkis färbt.



Hart wie ein Haizahn

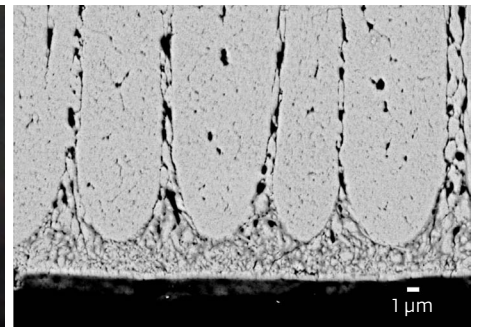
Zähne verschiedener Haiarten und des Menschen ähneln sich in ihren Materialeigenschaften

Haizähne sind nicht so einzigartig, wie manch schaurige Legende vermuten lässt – das gilt zumindest für ihr Material. Denn die Zähne des Menschen sind dank einer besonderen Struktur genauso hart wie die des gefürchteten Raubtieres, obwohl sie aus Hydroxylapatit und die Haizähne aus dem härteren Fluorapatit bestehen. Dies ist ein Ergebnis einer Studie, in der Wissenschaftler der Universität Duisburg-Essen und des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung die Zähne des Tigerhais und des Kurzflossen-Makos untersuchten. Demnach beißen sowohl die beiden Haie als auch der Mensch mit Zähnen, deren Materialeigenschaften sich sehr ähneln. Dabei unterscheiden sich die Bissstechniken auch der beiden Haie deutlich: Während der Tigerhai mit seinen wie Sägeblätter gezackten

Zähnen Stücke aus seinen Opfern herauschneidet, reißt der Kurzflossen-Mako mit seinen dolchartigen Zähnen Teile seiner Beute ab. Daraus schließen die Forscher, dass nicht das Material,

sondern ausschließlich die Form der Zähne für einen ganz bestimmten Zweck optimiert ist.

(www.mpg.de/5994924)



Für die Bissstechnik optimiert: Mit dolchartigen Zähnen (links) reißt der Kurzflossen-Mako Stücke aus den Beutetieren heraus. Der Tigerhai schneidet dagegen mit sägeblattartigen Zähnen in deren Fleisch. Im Zahnschmelz beider Haie bilden die Fluorapatit-Kristalle ovale Bündel (rechtes Bild). Die äußere Schicht (untere Bildhälfte) besteht aus ungeordneten Kristallen und lässt die Zähne glänzen.

Tauwetter im Klimarechner

Nirgendwo macht sich der Klimawandel so deutlich bemerkbar wie in der Arktis. Die Menge des Meereises hat hier in den vergangenen Jahrzehnten drastisch abgenommen. Diesen Schwund haben Klimamodelle lange nicht in seinem ganzen Ausmaß erfasst. Das ändert sich nun – nicht zuletzt, weil **Dirk Notz** und seine Forschungsgruppe am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg immer besser verstehen, welche Prozesse die Bildung und das Schmelzen des Meereises beeinflussen.

TEXT UTE KEHSE

Jedes Jahr, wenn sich die Polarnacht über den Arktischen Ozean senkt, wächst auf dem klirrend kalten Wasser eine hauchdünne, feste Kruste. Manchmal sind es auch nur einzelne Kristalle, die an der Oberfläche treiben und einen matschigen Brei mit der Konsistenz von Slush-Eis bilden. Nach und nach schließt sich diese Masse zu runden, pfannkuchenförmigen Gebilden zusammen, später entstehen meterdicke Schollen. Am Ende des Winters füllt das Eis fast den gesamten Arktischen Ozean aus, erstreckt sich von Kanada

bis nach Sibirien, schiebt sich durch die Beringstraße und die Baffin Bay, umschließt nahezu ganz Grönland und die Inselgruppe von Spitzbergen. Ende Februar bedeckt das arktische Meereis jedes Jahr rund 15 Millionen Quadratkilometer – eine Fläche, die 1,5-mal so groß ist wie Europa. Im Sommer dagegen schrumpft der weiße Deckel erheblich zusammen.

Und das immer mehr: Seit einigen Jahren ist das Eis stark auf dem Rückzug, 2012 etwa lag die Fläche des Sommerminimums erstmals seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 bei

weniger als vier Millionen Quadratkilometern. „In den vergangenen 35 Jahren haben sich Fläche und Dicke des arktischen Meereises im Sommer etwa halbiert. Drei Viertel des Volumens sind weg“, konstatiert Dirk Notz, Meereis-Experte am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Das Schmelzen hat dramatische Züge angenommen: Die Nordostpassage entlang der sibirischen Küste ist mittlerweile in den meisten Sommern schiffbar, die Eisgrenze verschiebt sich immer weiter nach Norden. Bis Mitte des Jahrhunderts könnte der Arktische Ozean im



Sommer eisfrei sein – das sagen die meisten Klimamodelle voraus.

Das hat erhebliche Folgen für das Weltklima. Obwohl Meereis nur wenige Meter dick ist, liegt es wie ein Deckel auf dem Ozean und verhindert somit weitestgehend, dass im Winter Wärme aus dem Wasser in die Atmosphäre gelangt. Im Sommer dagegen strahlt das helle Eis einen großen Teil des einfallenden Sonnenlichts wieder ins Weltall ab. Beide Effekte kühlen die Luft in den Polargebieten. Verschwindet das Eis, so erwärmen sich die hohen Breiten noch schneller als ohnehin schon. Dadurch

verringert sich der Temperaturunterschied zwischen mittleren und hohen Breiten – dies könnte wiederum für Wetterkapriolen in den gemäßigten Zonen sorgen.

Noch vor zehn Jahren kamen viele Klimamodelle zu dem Ergebnis, dass mit eisfreien Sommern in der Arktis frühestens Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen sei. Doch das Eis ging deutlich schneller zurück, als es die Simulationen vorhergesagt hatten. 2007 etwa schrumpfte die Eisfläche so stark, dass manche Forscher bereits vermuteten, ein Kipppunkt sei überschritten, jen-

Nicht aus-, sondern nur abgesetzt: Dirk Notz und Thorsten Heller, ein Mitglied der Schiffscrew, nehmen eine Probe auf einer Eisscholle. Bei der Expedition schlossen sie sich dem Polarforscher Arved Fuchs an, der aus nostalgischen Gründen mit dem Segelschiff *Ship of Opportunity* unterwegs war.

seits dessen das Eis binnen weniger Jahre komplett verschwinden könnte. In den folgenden zwei Jahren dehnte es sich jedoch wieder aus – was ebenfalls unerwartet war. Kurzum: Das Meereis verhielt sich so seltsam, dass Klimaforscher es in ihren Modellen nicht in den Griff zu bekommen schienen. >



Großes Kino am Himmel: Die Daneborg-Forschungsstation auf Grönland bot den Max-Planck-Forschern beste Aussichten auf Polarlichter.

Mittlerweile sind die Unterschiede zwischen Modellen und Wirklichkeit sowohl deutlich besser verstanden als auch deutlich kleiner geworden. Dies ist unter anderem Dirk Notz zu verdanken. Seit sieben Jahren leitet er die Forschungsgruppe „Meereis im Erdsystem“ am Hamburger Max-Planck-Institut. Er und seine Kolleginnen und Kollegen widmen sich der Frage, welche Zukunft dem Meereis rund um den Nordpol und auf der anderen Seite der Erde, in der Antarktis, bevorsteht.

NEUE MESSINSTRUMENTE FÜR FELDEXPERIMENTE

Das Team verfolgt einen sehr umfassenden Ansatz: Die Forscher haben einerseits das großräumige Auf und Ab des Meereises im Blick, werten Satellitendaten aus und modellieren diesen Rhythmus mit aufwendigen Computerprogrammen. Zusätzlich erforschen sie die Physik des Meereises aber auch im Kleinen: In ihrem Labor beobachten sie, wie sich das Eis verändert, wenn es gefriert oder schmilzt. Die physikalischen Prozesse beschreiben sie mit Modellen.

Sie entwickeln auch neue Messinstrumente und setzen diese bei Feldexperimenten ein. „Dass wir Untersuchungen im Labormaßstab mit globalen Studien und unterschiedliche Methoden kombinieren, ist ein Alleinstellungsmerkmal und die große Stärke unserer Gruppe“, sagt Dirk Notz. „Wir bringen die Welten der Modellierer und der Experimentalforscher zusammen.“

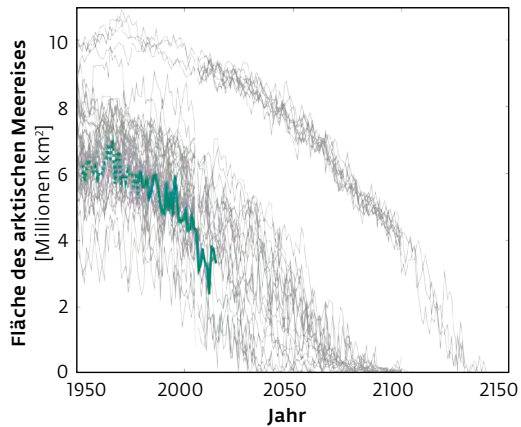
Auf diese Weise verbessern die Forscher die Simulationen der Klimamodelle, wie sich das Meereis global verändert. „Mit unseren Messungen können wir im Kleinen die Prozesse besser verstehen, die das Wachsen und Tauen von Meereis in der Natur beeinflussen“, erläutert Notz. Durch dieses Verständnis können die Forscher dann einschätzen, welche Prozesse in globalen Modellen unbedingt simuliert werden müssen, um vertrauenswürdige Antworten auf zentrale Fragen der Meereisforschung zu erhalten. „Dank unserer Arbeit wissen wir, welche Fragen wir sinnvoll mit unseren Modellen beantworten können, nämlich, zum Beispiel, warum das Meereis in der Antarktis zunimmt, in der Arktis aber schmilzt.“

Der Ort, an dem die Laborexperimente der Gruppe stattfinden, liegt einen kleinen Fußmarsch von Dirk Notz' Büro entfernt. Im 13. Stock des Nachbargebäudes, des Geomatikums der Uni Hamburg, haben Notz und seine Kollegen einen Kühlraum eingerichtet, nicht viel größer als eine Abstellkammer. Den größten Teil dieses Verschlags füllt ein knapp zwei Meter langer, gut einen Meter hoher Wassertank aus. Hier können die Forscher ihr eigenes Meereis züchten und untersuchen. Gleichzeitig testen sie Prototypen selbst entwickelter Messgeräte, die sie später im Feld einsetzen.

„Im Prinzip ist der ganze Raum ein großer Gefrierschrank“, erläutert Dirk Notz. Indem die Forscher die Luft auf bis zu minus 25 Grad herunterkühlen, bringen sie das grünliche Wasser im Tank innerhalb von drei bis vier Tagen von Zimmertemperatur auf Minusgrade. Nach einem weiteren Tag setzt sich auf der Oberfläche genügend Eis für alle möglichen Experimente ab. Mithilfe mehrerer Pumpen können die Forscher das Wasser zum Beispiel gleichmäßig im Kreis strömen lassen oder Wellen erzeugen. Mit Heizplatten an der Seite des Tanks simulieren sie Tauwetter. Schnee kommt aus gewöhnlichen Wassersprühflaschen, Wind von einem Ventilator.

DIE SENSOREN SIND MARKE EIGENBAU

Es wirkt alles ein bisschen improvisiert, doch das stört Dirk Notz nicht. „Es muss nicht schön aussehen, sondern funktionieren“, sagt er. Die gleiche Einstellung hat die Gruppe auch zu Messgeräten. Da es für viele der Größen, die die Forscher im Eis messen wollten, keine passenden Sensoren gab, musste das Team geeignete Messfühler selbst entwickeln. Dirk Notz kommen schon mal Wörter wie „basteln“ oder „hinfrickeln“ über die Lippen, wenn er die Entwicklungsarbeit an den Sensoren beschreibt. „Wir machen alle prakti-



schen Arbeiten selbst, das gehört dazu. Ein wenig praktische Intelligenz braucht man schon“, sagt er.

Die Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeit sind weltweit einzigartig. So verfügt die Hamburger Gruppe nun zum Beispiel über ein Messgerät, mit dem der Salzgehalt von Meereis in verschiedenen Tiefen gemessen werden kann. Der Sensor ähnelt einer Harfe. Die kleine Version, die im Experimentiertank zum Einsatz kommt, besteht aus einer Platine und einer Plexiglasplatte, aus

der jeweils im Abstand von einem Zentimeter acht Paare von Drähten herausragen. Zwischen den Drähten wird die elektrische Leitfähigkeit gemessen – woraus sich wiederum der Salzgehalt bestimmen lässt.

„Der Salzgehalt des Meereises ist eine schwer fassbare, aber enorm wichtige Größe zur Charakterisierung des Eises“, berichtet Dirk Notz. Gefriert Meerwasser bei minus 1,8 Grad Celsius, so werden Salz und andere gelöste Stoffe nicht ins Kristallgitter eingebaut, son-

Oben Die Modelle, die im jüngsten Weltklimabericht berücksichtigt wurden, kommen zu sehr unterschiedlichen Vorhersagen für die Bedeckung der Arktis mit Meereis. Die Messdaten von Schiffen und Flugzeugen (gestrichelte grüne Linie) sowie jene von Satelliten (durchgezogene Linie) liegen etwa in der Mitte der zuverlässigsten Simulationen.

Unten Im Hamburger Labor nimmt Dirk Notz (links) eine Eisprobe, während Niels Fuchs die Temperatur der Eisoberfläche misst.





Links Leif Riemenschneider (links im Bild) und ein Mitarbeiter des Teams installieren ein Messinstrument, mit dem sie über die Leitfähigkeit den Salzgehalt des Eises bestimmen, während dieses wächst. Sie tragen Überlebensanzüge für den Fall, dass sie einbrechen.

Rechts Um in möglichst jungem Meereis Experimente machen zu können, sind die Forscher in einem Fjord in Nordost-Grönland mit Hovercraft-Booten unterwegs, die über Eis und durch Wasser fahren.

dem bleiben als hochkonzentrierte Sole in winzigen Taschen und Kanälen innerhalb des Eises übrig, Meereis ist damit immer eine Mischung aus festem Süßwassereis und flüssiger Sole. Weil diese Sole eine höhere Dichte als Meerwasser besitzt, läuft ein Teil von ihr mit der Zeit aus dem Eis heraus und ergießt sich ins Meerwasser. Aus dem Salzgehalt des Meereises leiten die Forscher ab, wie viel Sole noch im Eis verblieben ist. Das ermöglicht wiederum Rückschlüsse auf nahezu sämtliche physikalischen Eigenschaften wie etwa die Wärmeleitfähigkeit und die mechanische Festigkeit des Meereises, die in den Simulationen der globalen Eisentwicklung berücksichtigt werden müssen.

Die Salzsole, die aus dem Meereis herausläuft, spielt zudem eine wichtige Rolle bei der weltweiten Umwälzung der Ozeane – der sogenannten thermohalinen Zirkulation. Die schwere Flüssigkeit erhöht die Dichte des Oberflächenwassers an einigen Stellen in den

Polargebieten immer wieder so sehr, dass dieses bis zum Grund absinkt und die Tiefsee mit kühlem und sauerstoffreichem Wasser versorgt. Das Auslaufen der Salzsole aus dem Meereis ist somit ein wichtiger Antrieb für diesen Kreislauf, der auch die Meeresströmungen an der Oberfläche in Gang hält.

WIE HÄNGT DER SALZGEHALT VOM ALTER DES EISES AB?

Gründe genug, die komplizierten Vorgänge, die den Salzgehalt des Meereises und die Menge der herausgelaufenen Sole beeinflussen, besser verstehen zu wollen. So war zum Beispiel lange unklar, wie der Salzgehalt vom Alter oder von der Dicke des Eises abhängt. Um diese und andere Zusammenhänge zu ergründen, untersuchten Dirk Notz und sein mittlerweile promovierter Doktorand Philipp Griewank den Salzgehalt nicht nur mit Experimenten, sondern entwickelten auch ein komplexes ein-

dimensionales Modell, um ihn zu beschreiben. Dabei bezogen sie sämtliche physikalischen Prozesse ein, die ihn verändern können. Denn die Struktur und damit der Salzgehalt des Eises entwickeln sich nicht nur beim Wachsen und Tauen, sondern auch wenn es schneit, regnet oder wenn Sonne auf die Oberfläche scheint. Mit ihrem Modell konnten Griewank und Notz gemessene Salzgehalte gut nachvollziehen.

Eine weitere Forschungslücke hat die Meteorologin Ann Kristin Naumann geschlossen. Sie untersuchte während ihrer Masterarbeit in dem Experimentiertank, wie Meereis gefriert, wenn das Wasser von Wellen aufgewühlt oder durch Wind und Strömungen in Bewegung gehalten wird. Über diese Vorgänge war vorher nur wenig bekannt. Naumann musste zunächst eine geeignete Methode finden, um den festen Anteil des breiartigen Eises zu messen, das sich in aufgewühltem Meerwasser heranbildet. Wie die Forscherin feststellte, er-



höht sich der feste Anteil des Matscheises mit der Zeit nicht, auch wenn die Eismasse im Tank insgesamt zunimmt. Solange Matscheis vorhanden ist, besteht nur ein Viertel davon aus festen Eiskristallen – ein Ergebnis, das wichtig ist, um das großräumige Verhalten von Meereis zu verstehen, und das nun in Klimamodelle eingebaut werden kann.

Dirk Notz und seine Kolleginnen und Kollegen haben in ihren Experimenten im Laufe der letzten Jahre zahlreiche weitere Meereisprozesse im Detail untersucht, so etwa das Auftauen und die Vorgänge an der Grenze zwischen Eis und Wasser. Außerdem beschäftigten sie sich mit der Wechselwirkung zwischen Schnee und Meereis. Sie untersuchen etwa, was genau passiert, wenn eine Schneeschicht das Meereis so weit hinunterdrückt, dass die Scholle mit Meerwasser geflutet wird. Das Wasser gefriert dabei und bildet Schneeeis, das in Teilen der Antarktis bis zu 40 Prozent der Meereismenge ausmacht. Ein weiteres Thema ist die Frage, wie Meereis den CO₂-Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst. Das ist von globaler Bedeutung, weil die Weltmeere bislang etwa ein Viertel der

menschlichen CO₂-Emissionen aufgenommen haben.

Einige dieser Prozesse wollen die Forscherinnen und Forscher demnächst auch in Feldexperimenten untersuchen. Dafür haben sie unter anderem eine größere Version der Salzmessvorrichtung gebaut, die im Meereis vergraben wird und anschließend über eine Satellitenverbindung Daten sendet. Ein erster Test in Grönland endete 2013 vorzeitig nach zwei Wochen, brachte aber bereits viele wertvolle Daten. „Jetzt wollen wir erstmals über eine längere Zeit beobachten, wie sich die Salinität im Meereis mit der Zeit entwickelt“, erläutert Notz. Bislang gibt es zum Salzgehalt von Meereis nur vereinzelte Messungen aus Eisbohrkernen.

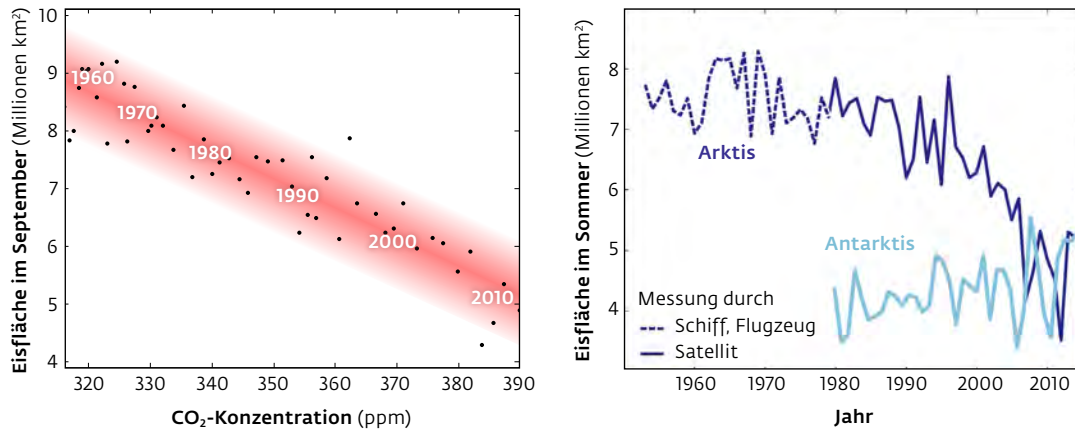
Dafür soll das Salzmessgerät so bald wie möglich zu einem längeren Praxiseinsatz in einem Fjord in Spitzbergen kommen. Außerdem will das Team dort im Eis noch weitere Sensoren platzieren. Sie sollen die Lichtverhältnisse, den pH-Wert, die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen in verschiedenen Eistiefen messen.

Die Hamburger Forscher tragen somit viele wichtige Details zusammen,

die dabei helfen, die Eigenheiten des Meereises besser zu verstehen – und somit letztlich auch sein großräumiges Verhalten besser simulieren zu können. Auch auf diesem Feld hat Dirk Notz indessen bereits einige Erfolge erzielt. „Indem wir scheinbare Widersprüche zwischen Beobachtungen und Modellsimulationen untersuchten, konnten wir in den letzten Jahren mehrere größere Lücken beim Verständnis von Meereis schließen“, sagt der Meteorologe.

EINE ERKLÄRUNG FÜR DAS ZUNEHMENDE ANTARKTISCHE EIS

Zusammen mit seinen Kollegen Hauke Schmidt und Alexander Haumann fand Dirk Notz zum Beispiel heraus, warum die Meereisfläche in der Antarktis derzeit leicht zunimmt – ein rätselhafter Effekt, der sich in Klimamodellen oft nicht zeigt. Das Ergebnis der Studie, die 2014 in den *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* erschien: Winde, die vom Land her wehen, haben sich am Rossmeer, einer Meeresregion an der pazifischen Seite der Antarktis, in den letzten Jahren verstärkt und treiben das Eis von der Küste weg. „Das Eis wird nach Norden gepus-



Oben Zwischen dem Schwund des arktischen Meereises und dem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre besteht ein linearer Zusammenhang (links). Alle anderen möglichen Ursachen für den Rückgang konnten Dirk Notz und seine Kollegen ausschließen. Während das Meereis der Arktis in den vergangenen 50 Jahren abgenommen hat, dehnt es sich in der Antarktis leicht aus (rechts).

Rechte Seite Dirk Olonscheck, Dirk Notz und Niels Fuchs (von links) diskutieren jüngste Messergebnisse und beraten über weitere Experimente.

tet, und der Ozean südlich davon friert wieder zu“, erläutert Notz. Vor allem im pazifischen Sektor der Antarktis nimmt die Meereisbedeckung aus diesem Grund zu – trotz der globalen Erwärmung.

In einer weiteren Studie fanden Dirk Notz und einige Kollegen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie 2011 heraus, dass es keinen Kipppunkt gibt, an dem das Meereis in der Arktis sommers unwiderruflich verschwindet. Zahlreiche Klimaforscher hatten vorher vermutet, dass der Arktische Ozean in einen neuen, im Sommer eisfreien Zustand übergeht, wenn die Eisfläche erst einmal unter eine bestimmte Grenze gesunken ist. Der Eisverlust könnte sich von selbst beschleunigen, so die Befürchtung, da Meerwasser im Sommer mehr Wärme aufnimmt als Eis.

Die Klimasimulation der Hamburger Forscher zeigte jedoch, dass sich das Meereis auch nach einem vollkommen eisfreien Sommer rasch erholt. Denn im Winter gibt der Ozean die zuvor aufgenommene Wärme schnell wieder an die Atmosphäre ab. „Verschiedene Rückkopplungsmechanismen sorgen dafür, dass sich nach ungefähr drei Jahren der alte Zustand wieder einstellt“, erläutert

Dirk Notz. Das bedeutet: Das Meereis in der Arktis passt sich relativ schnell an die herrschenden Klimabedingungen an – und es würde weitgehend stabil bleiben, wenn der Klimawandel gestoppt würde.

NUR DER CO₂-ANSTIEG ERKLÄRT DEN SCHWUND DES EISES

Allerdings wirken sich die zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen bereits jetzt ziemlich direkt auf das Meereis aus, wie eine Studie von Dirk Notz und Jochem Marotzke, Direktor am Hamburger Max-Planck-Institut, 2012 offenbarte. Die Forscher werteten dazu Messdaten zur Meereisbedeckung seit den 1950er-Jahren aus. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass der derzeitige Schwund durch natürliche Schwankungen nicht zu erklären ist – er muss eine äußere Ursache haben. Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche und andere Faktoren konnten die Forscher ausschließen. Nur die steigenden CO₂-Werte blieben als Ursache übrig. „Die Treibhausgase erhöhen die einfallende Wärmestrahlung in der Arktis, was sich unmittelbar auf den Wärmehaushalt des

Meereises auswirkt: Es schmilzt“, erläutert Notz. Die menschlichen Emissionen, das wiesen die beiden Forscher damit nach, sind die unmittelbare Ursache für den Schwund des Meereises.

Darüber hinaus hat sich Notz auch Gedanken darüber gemacht, wieso dieser Eisschwund in vielen Klimasimulationen deutlich langsamer verläuft als in Wirklichkeit. Diese Diskrepanz wird oft als Indiz dafür genommen, dass die Klimamodelle wichtige Prozesse nicht realistisch erfassen. In einem Fachartikel, der 2015 in der Zeitschrift *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS* der britischen Royal Society erschien, kommt Notz aber zu dem Schluss, dass die Modellsimulationen durchaus deutlich von den Messdaten abweichen können, ohne grundsätzlich falsch sein zu müssen. Er weist darin nach, dass die Ausdehnung des Meereises so stark von chaotischen natürlichen Schwankungen beeinflusst wird, dass selbst Modelle, die die zentralen physikalischen Prozesse realistisch beschreiben, deutlich von der tatsächlichen Entwicklung abweichen können.

Auch wenn die Klimamodelle den raschen Rückgang des Meereises in der Arktis teilweise nicht vorausgesagt ha-



ben und immer noch verbessert werden können, müssen sie also nicht prinzipiell falsch sein. „Ich halte diese Studie für eines der wichtigsten Ergebnisse unserer Arbeit, mit Konsequenzen weit über das Meereis hinaus“, erklärt Dirk Notz. Denn die Erkenntnisse, dass die natürlichen Schwankungsbreiten genaue Vorhersagen einer Entwicklung erschweren, lassen sich auch auf andere Größen des Erdklimas wie etwa die Niederschlagsmenge oder die Häufigkeit von Stürmen und Trockenheiten übertragen.

Für die Zukunft hat sich der Hamburger Forscher noch einiges vorgenommen. Er und seine Kollegen bauen die Erkenntnisse aus den Experimenten der Gruppe nun verstärkt in globale Erdsystemmodelle ein, damit diese die Eisbedeckung besser prognostizieren können. Ein anderer Schwerpunkt besteht darin, die Vorgänge an der Grenze zwischen Meereis und Meerwasser besser zu verstehen – etwa wie der Ozean Wärme an das Eis abgibt.

Derzeit macht ihr Forschungsobjekt es ihnen aber nicht gerade leicht: Einige Experimente, die das Team im Januar 2016 im Van Mijenfjord auf Spitzber-

gen geplant hatte, musste es mangels Eis absagen. Auf der arktischen Insel herrschte im Dezember und im Januar mehrere Wochen lang Tauwetter – und dies mitten in der Polarnacht. Vom Meereis, das die Insel im Winter gewöhnlich fest im Griff hat, war keine Spur zu sehen. Und gerade meldete der National Snow and Ice Data Service aus

den Vereinigten Staaten, dass die maximale Ausdehnung des arktischen Meereises im Winter seit Beginn der Messungen noch niemals so gering war wie in diesem Jahr.

Wie es aussieht, nimmt die große Schmelze weiter ihren Lauf. ◀

📄 www.max-wissen.de/136221

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In der Arktis ist das Meereis seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 stark zurückgegangen. Im Sommer gibt es dort heute sogar nur noch ein Viertel der damaligen Eismenge. Diesen starken Schwund haben Klimamodelle früher ebenso wenig wiedergegeben wie die Zunahme des Eises in der Antarktis.
- Dirk Notz und seine Forschungsgruppe „Meereis im Erdsystem“ verbessern die Simulationen der Klimamodelle, indem sie mit Labor- und Feldexperimenten sowie Modellen alle Prozesse im Großen wie im Kleinen untersuchen, die sich auf die Eismenge in der Arktis und in der Antarktis auswirken. Eine wichtige Größe ist dabei der Salzgehalt des Eises, der von verschiedenen Faktoren abhängt.
- So haben die Forscher festgestellt, dass es für das arktische Meereis keinen Kippunkt gibt, jenseits dessen das Meereis im Sommer dauerhaft verschwindet. Zudem haben sie herausgefunden, warum das Meereis in der Antarktis zunimmt: Stärkere Winde vom Land her treiben das Eis von der Küste weg, sodass sich dort neues bildet.
- Einer weiteren Studie zufolge können Klimasimulationen aufgrund von chaotischen natürlichen Schwankungen der Meereismenge deutlich von Beobachtungen abweichen, ohne notwendigerweise falsch zu sein. Diese Erkenntnis lässt sich auf andere Klimagrößen wie etwa die Niederschlagsmenge oder die Häufigkeit von Stürmen und Trockenheiten übertragen.



Kraftwerke auf dem Meeresgrund

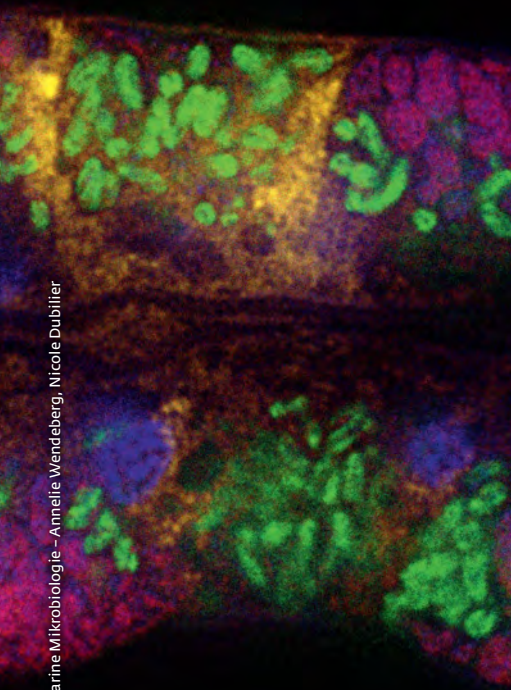
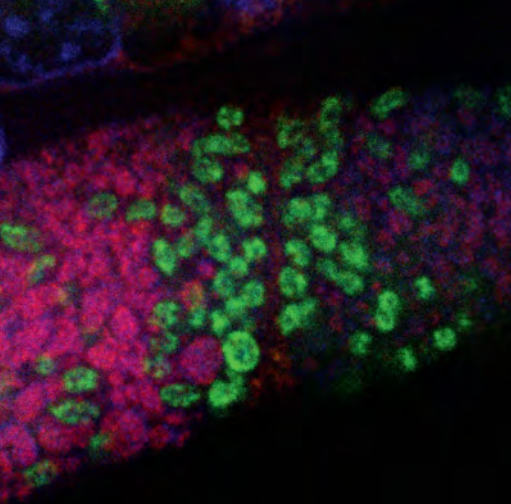


Foto: MPI für marine Mikrobiologie - Annelie Wendberg, Nicole Dubilier

Die Tiefen der Ozeane sind ein lebensfeindlicher Ort. Um den widrigen Bedingungen zu trotzen, haben sich viele Organismen zu Lebensgemeinschaften zusammengeschlossen. **Nicole Dubilier** und ihre Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie** in Bremen entdecken immer wieder neue Symbiosen, mit denen die Tiefseebewohner ihre Energieversorgung sicherstellen.

TEXT **KLAUS WILHELM**

Es war der 15. Mai 2005, als Nicole Dubilier die Idee mit dem Wasserstoff kam. „Ich war bester Laune“, erinnert sich die Biologin vom Bremer Max-Planck-Institut, „völlig unbekümmert.“ Die Hochstimmung hatte ihren Grund: Nach acht Jahre währendender Pause war sie erstmals wieder auf großer Fahrt und schipperte mit dem Forschungsschiff *Meteor* über den Mittelatlantischen Rücken, einen untermeerischen Gebirgszug im Atlantik.

3000 Meter tiefer, am Grund des Ozeans, liegt ein großes Areal hydrothermalen Quellen, auf die es die Forscher abgesehen hatten: das Logatchev-Feld. Der vom Schiff aus ferngesteuerte Tauchroboter *Marum-Quest* hatte bereits erste Flüssigkeitsproben der heißen Quellen an Bord gebracht, die auch im Schiffslabor von Thomas Pape landeten. In der flüssigen Ernte vom Meeresgrund hatte der Geochemiker von der Universität Bremen immense Mengen Wasserstoff gemessen. „Ich hab ihm einfach gesagt: Komm, lass uns mal testen, ob die Muscheln von da unten den Wasserstoff verbrauchen.“ Genaue gesagt: die Bakterien, die die Kiemen der Meeressmuschel *Bathymodiolus puteoserpentis* bewohnen, einer Verwandten der Miesmuschel.

Bakterien als Bewohner eines Tiers!? Das deutet entweder auf Parasitismus hin – was in diesem Falle nicht zutrifft.

Oder auf eine Symbiose – eine enge, meist dauerhafte Zweckgemeinschaft verschiedener Organismen zum beiderseitigen Nutzen. Nicole Dubilier leitet am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie seit 2007 die Arbeitsgruppe „Symbiose“.

WASSERSTOFF ALS ENERGIEQUELLE

Das Bremer Team und seine kooperierenden Kollegen veröffentlichten im August 2011, gut sechs Jahre nach der Idee auf der *Meteor*, im renommierten Wissenschaftsmagazin *NATURE* den Nachweis, dass Symbiosen an Hydrothermalquellen tatsächlich Wasserstoff als Energiequelle nutzen, um sich zu ernähren. Es war einer der begehrten großen „Artikel“ in *NATURE*, nicht nur einer der üblichen kurzen „Briefe“. Und zugleich die Titelgeschichte der Woche. Beides unterstreicht den Wert der wissenschaftlichen Entdeckung und die Bedeutung der Symbiosen in der Welt der Biologie. „Ohne Symbiosen hätte sich das Leben auf der Erde anders entwickelt“, sagt Dubilier.

Für die Bremer Experten ist diese Erkenntnis fast banal. Schon vor Jahrmilliarden hat die Symbiose zwischen Bakterien und primitiven Einzellern die Ausbreitung und Evolution pflanzlicher und tierischer Zellen befeuert. Noch heute beherbergt nahezu jede pflanz-

Querschnitt durch zwei Kiemenfilamente der Tiefseemuschel *Bathymodiolus puteoserpentis*. Die symbiotischen Bakterien befinden sich in speziellen Zellen, die im Wechsel mit bakterienfreien Zellen angeordnet sind. Unter dem Fluoreszenzmikroskop werden das Muschelgewebe (gelb), die Zellkerne der Muschel (blau), sulfid- und wasserstoffoxidierende Bakterien (rot) sowie methanoxidierende Bakterien (grün) sichtbar.

»» Ohne Symbiosen hätte sich das Leben auf der Erde anders entwickelt.

liche, tierische und menschliche Zelle mit ihren winzigen Energiekraftwerken, den Mitochondrien, die Nachfahren früherer bakterieller Symbionten – ohne Mitochondrien könnten wir nicht atmen. Im menschlichen Darm gedeihen unzählige Bakterien, die sich für die Rundum-Versorgung revanchieren, indem sie die Verdauung unterstützen und das Immunsystem stärken. Unser Wohlbefinden hängt also von ihnen ab, und sie beeinflussen sogar die Wirkung von Medikamenten.

Wohin man auch blickt: Symbiosen, Symbiosen, Symbiosen mit Mikroorganismen. Auch an den hydrothermalen Quellen oder Schwarzen Rauchern am Meeresboden – jenen Schloten, die sich vor allem dort finden, wo sich die Platten der Erdkruste voneinander weg bewegen oder sich eine Erdplatte unter eine andere schiebt. Dort steigt Magma in die obere Erdkruste auf und kommt in Kontakt mit dem Seewasser. An diesen bis 400 Grad Celsius heißen Quellen spuckt die Erde dann Mineralien und Nährstoffe in den stockdunklen

Ozean, aber auch eine Art Höllensuppe, die mit für fast alle Tiere tödlichem Schwefelwasserstoff (Sulfid) angereichert ist – jenem Gas, das faule Eier so übel stinken lässt. Kohlenmonoxid strömt aus, Methan ebenso und nicht zuletzt Wasserstoff. Sulfid und Kohlenmonoxid bedeuten für Tiere vor allem eines: Gift.

ENTGIFTER UND VERSORGER ZUGLEICH

Trotzdem gedeiht hier eine muntere Fauna aus Würmern, Muscheln und Krabben. Die Tiere trotzen der tödlichen Gefahr durch einen Trick: Sie haben sich irgendwann in ihrer Evolution Bakterien einverleibt, die den Schwefelwasserstoff oder das Methan chemisch umsetzen und damit unschädlich machen. Mit dem Vorgang gewinnen diese „Sulfidoxidierer“ und „Methanoxidierer“ Energie, die sie wie alle Organismen zum Leben brauchen, um damit aus Kohlendioxid Kohlehydrate zur Ernährung aufzubauen. Die Mikroben entgif-

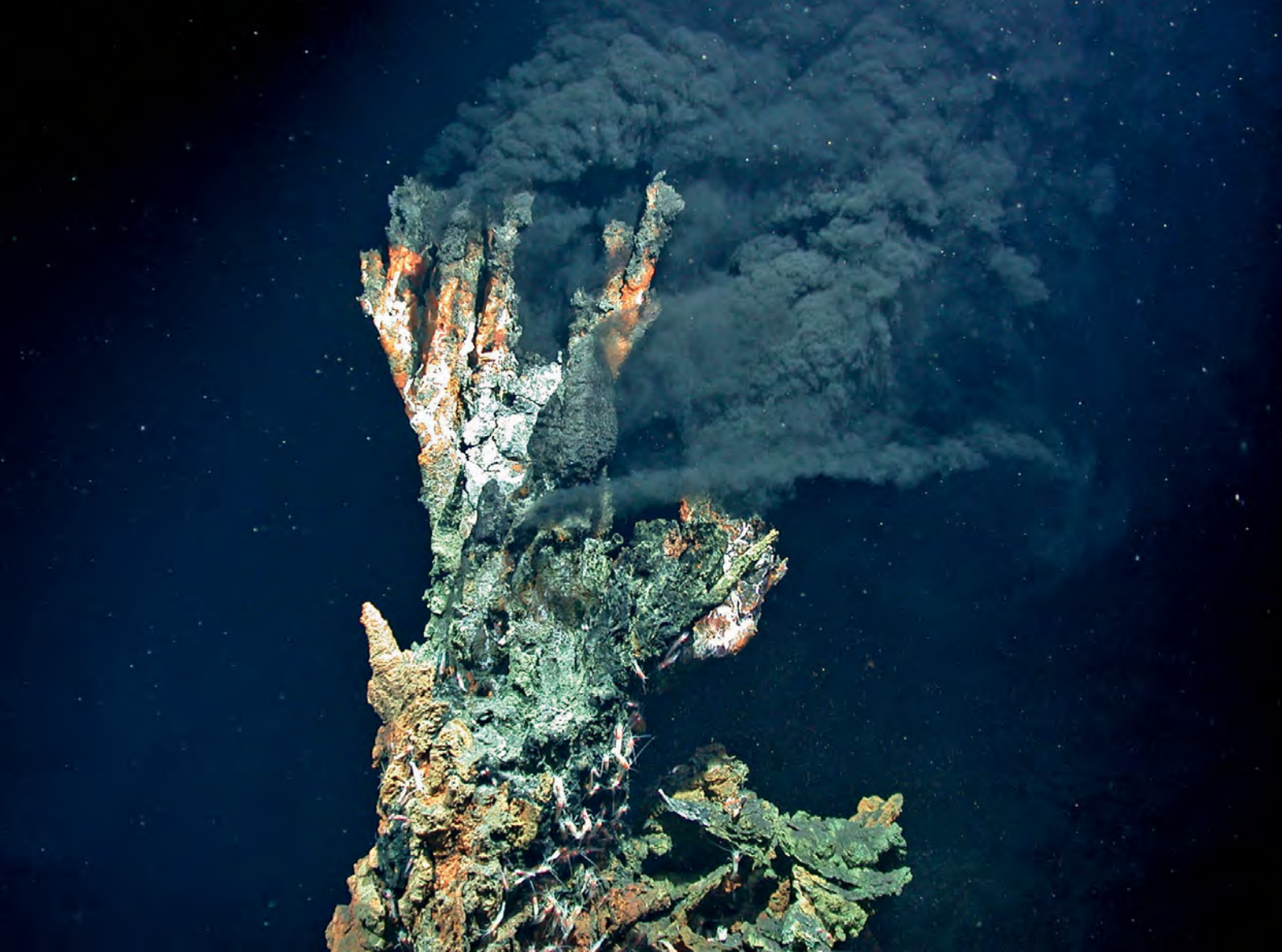
ten für ihre Wirte nicht nur die Umwelt, sondern geben auch einen Teil der organischen Nährstoffe an sie ab. Die Tiere garantieren ihren Dauergästen im Gegenzug die stete Nähe zur Nahrungsquelle. Eine Gemeinschaft also, von der beide Partner profitieren.

Manchmal nützt die Symbiose sogar drei Lebewesen, wie Nicole Dubilier und ihre Kollegen Anfang des Jahrtausends erstmals nachwiesen. Die Biologin fokussiert sich schon seit Langem unter anderem auf einen ganz bestimmten Meereswurm: Der „Wenigborster“ *Olavius algarvensis* ist garantiert keine Vorzeigart der Meereswelt, nicht so imposant wie ein Wal, nicht so erheiternd wie ein Delfin. Aber gewöhnlich ist er nicht. Der Exot, gerade mal ein bis zwei Zentimeter lang, durchwühlt das obere Sediment im sandigen Meeresboden flacher Küstengewässer, beispielsweise vor der Mittelmeerinsel Elba.

Unter dem Mikroskop erscheint sein Körper milchig weiß und gewunden wie die Röhren eines Tauchsieders.

Der Tauchroboter *Quest* des Bremer Zentrums für Marine Umweltwissenschaften (Marum) kann in Tiefen bis 4000 Meter vorstoßen (links). Im oberen Teil befinden sich Tauchtechnik und Steuerung, darunter die wissenschaftlichen Messgeräte. Mit *Quest* untersuchen die Wissenschaftler auch die bis zu 1,70 Meter großen Riesenröhrenwürmer (*Riftia pachyptila*), die in 3000 Meter Tiefe an heißen Hydrothermalquellen siedeln (rechts).





Der Schwarze Raucher „Kandelabra“ in 3300 Meter Wassertiefe am Logatchev-Hydrothermalfeld am Mittelatlantischen Rücken. Aus solchen Hydrothermalquellen tritt bis zu 400 Grad heißes Wasser aus, das im Erdinneren mit verschiedenen Mineralien wie Eisen-, Mangan- und Kupfersalzen angereichert wurde. Beim Kontakt mit dem kühlen Meerwasser fallen diese Mineralien aus. Ist das austretende Wasser reich an Eisensalzen, entsteht die schwarzgraue Fahne eines Schwarzen Rauchers. Gips, Siliciumdioxid oder Anhydrit bilden die helle Wolke eines Weißen Rauchers.

Mit seinen 0,2 Millimetern Durchmesser gilt *Olavius* als echtes Magermodell der Würmerwelt. Er ist verwandt mit dem schnöden Regenwurm, was seiner Besonderheit kaum gerecht wird. Denn der marine Wurm frisst nicht einen Bissen und lebt doch ausgezeichnet. Er hat weder Mund noch Magen noch Darm noch After. Der komplette Verdauungstrakt fehlt ebenso wie nierenartige Organe für die Ausscheidung von Abfallstoffen wie Ammonium und Harnstoff.

Anfang dieses Jahrtausends entschlüsselte Nicole Dubilier die sogenannten 16s-rRNA-Gene der Einzeller des Wurms. Diese Gene gelten unter den Experten als eine Art molekularer Personalausweis einer Bakterienart. Heraus kam eine für die Symbioseforschung bahnbrechende Entdeckung: eine harmonische Ménage-à-trois. Ein Wirt mit

zwei Symbionten – und alle profitieren. Weil kein oder zu wenig Schwefelwasserstoff im Sediment vorkommt, hat sich *Olavius algarvensis* eine Schwefelwasserstoffquelle einverleibt – ein Bakterium, das aus Sulfat Sulfid herstellt und über diesen Prozess Energie gewinnt. Den Schwefelwasserstoff wiederum verwenden die altbekannten sulfidoxidierenden Bakterien als Energiequelle.

BAKTERIEN DIENEN ALS MUND, DARM UND AFTER

So entsteht ein erst mit dem Tod des Wirts endender Kreislauf, in dem die beiden Bakterienarten ihre Stoffwechselprodukte untereinander austauschen. Dieses biologische Konstrukt funktioniert so prächtig, dass die Bakterien aus Kohlendioxid einen Überschuss organi-

scher Kohlenstoffverbindungen produzieren und den Wurm damit ernähren. Die Mikroben nehmen ihrem Tier auch alle lästigen Abfallprodukte ab, welche dieses sonst ausscheiden müsste. „Einfach genial“, findet Nicole Dubilier. Der Wurm macht sich weitgehend unabhängig von externen Energiequellen und kann neue Lebensräume ohne hohe Sulfidvorkommen besiedeln.

Inzwischen hat ihr Team zusammen mit internationalen Partnern das Wurm-Biotop noch genauer untersucht und bis zu fünf verschiedene Bakterienarten aufgespürt, eine *ménage à plusieurs*. Zwei Sulfatreduzierer, zwei Sulfidoxidierer und eine weitere Bakterienart. Überraschenderweise fixieren vier der fünf Symbionten Kohlendioxid. Warum die Redundanz? „Ich vermute, dass die unterschiedlichen Symbionten in

» Wahrscheinlich können viele Bakterien in den Lebensgemeinschaften der heißen Quellen Wasserstoff nutzen.

verschiedenen Tiefen aktiv sind“, so Dubilier. „In den sauerstoff- und nitratreichen oberen Sandschichten fixieren die Schwefeloxidierer Kohlendioxid, in den tiefen Sedimentschichten werden die Sulfatreduzierer aktiv.“

SYMBIOSEN ALS MODELLSYSTEM

Klar aber ist: Der Wurm hat ein regelrechtes symbiotisches Kraftwerk im Körper eingebaut. „*Olavius algarvensis* zeigt, wie Organismen begrenzte Ressourcen nutzen können, indem aufeinander abgestimmte Mikrobengemeinschaften zusammenwirken.“ So könnte die Wurm-Bakterien-Symbiose ein Modell für eine sich fast selbst erhaltende Biosphäre sein – ein System, wie es die Raumfahrt im großen Maßstab für lange Expeditionen wie etwa zum Mars braucht.

Derlei Dinge vermerkt Nicole Dubilier auf die immer wieder gestellte Frage, wozu ihre Symbiosenwissenschaft denn taugt. Dann erzählt sie vom Kohlenstoffhaushalt der Meere und davon, wie der Zustand der Ozeane unmittelbar von der Artenvielfalt abhängt. Außerdem könnten viele Prozesse der symbiotischen Bakterien auch für die Infektionsforschung wichtig sein. Aber eigentlich will die im besten Sinne notorisch Neugierige am liebsten nur in unbekanntes Terrain vorstoßen – und verstehen. Den Blick offen halten für das Unerwartete, weitgehend frei von den Fesseln angewandter Forschung. So wie bei der Entdeckung symbiotischer Bakterien in der Meeresschnecke *Bathymodiolus puteoserpentis*.

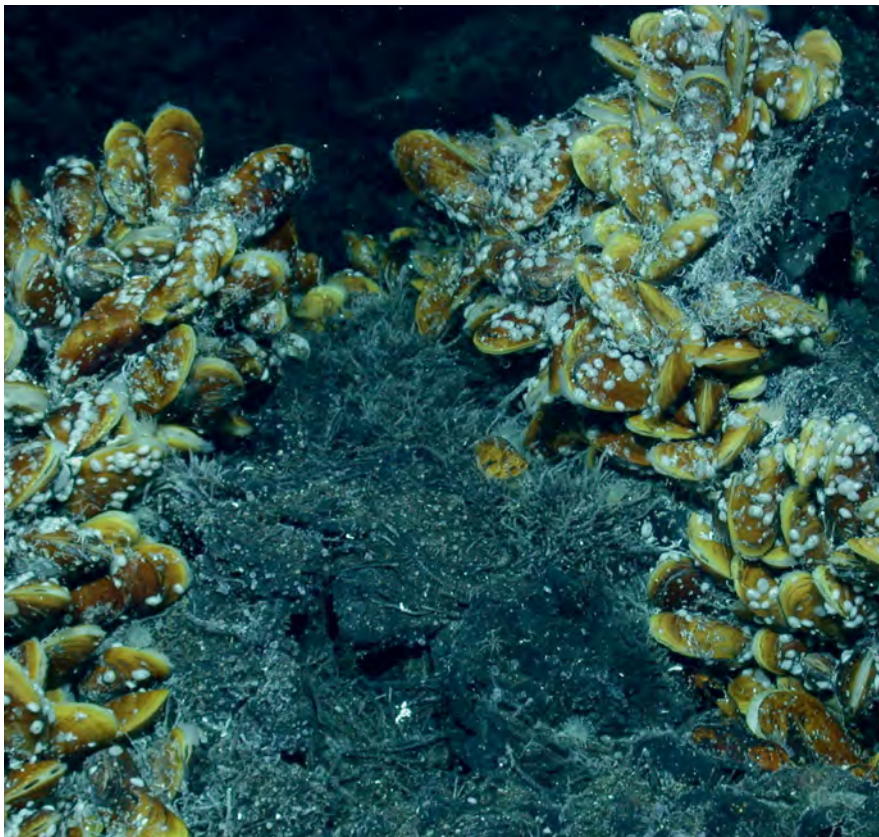
Auch die beherbergt zwei bakterielle Symbionten – einen Sulfidoxidierer

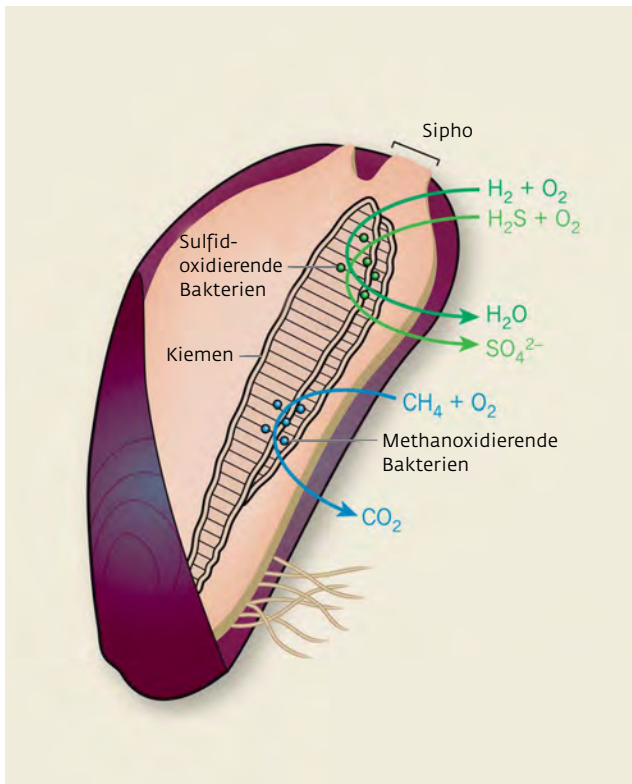
und einen Methanoxidierer, die allerdings unabhängig voneinander ihr Dasein innerhalb der Kiemenzellen des Tiers fristen. „Dass beide auch Wasserstoff als Energiequelle nutzen, vermuteten die Kollegen schon in den 1980er-Jahren“, sagt Nicole Dubilier. Denn zum einen ist Wasserstoff eine der besten Energiequellen schlechthin. Nach den Berechnungen der Max-Planck-Forscher bringt die Oxidation von Wasserstoff an den Hydrothermalquellen des Logatchev-Feldes siebenmal mehr Energie als die Methan- und 18-mal mehr Energie als die Sulfidoxidation. Zum anderen nutzen frei lebende Bakterien folgerichtig Wasserstoff immer dann, wenn er vorhanden ist. Das bedeutet auch: Viele Bakterien haben die für die Oxidation des einen und anderen Gases notwendige Ausrüstung in ihrem Erbgut gespeichert, nutzen aber, je nach Angebot in der Umwelt, nur eines der Systeme.

Niemand weiß allerdings, wann genau die Mikroben von einem auf das andere System umschalten. Genauso wie niemandem zuvor der Nachweis der Wasserstoffverbrennung durch die Tier-Bakterien-Symbiose am Meeresgrund gelungen ist. Zu ungünstig die Bedingungen da unten, zu flüchtig das Gas, als dass sich im Labor ein Verbrauch mit der jeweils üblichen Technik hätte messen lassen – jedenfalls bis in die jüngste Zeit.

„Wir hatten zunächst einmal das Glück, dass am Logatchev-Feld des Mittelatlantischen Rückens die Wasserstoffkonzentration sehr hoch ist“, sagt Nicole Dubilier, „das erleichtert den Nachweis.“ So konnte der Geochemiker Thomas Pape in einer Nachtschicht an Bord an jenem Tag im Mai 2005 tatsächlich hieb- und stichfest ermitteln:

Oasen des Lebens in der Finsternis: Rund um heiße Quellen am Boden des Ozeans haben sich ungewöhnliche Lebensgemeinschaften angesiedelt. Die Tiefseeschnecke *Bathymodiolus puteoserpentis* beispielsweise lebt in Symbiose mit mehreren Bakterienarten.





Links *Bathymodiolus puteoserpentis* beherbergt in ihren Kiemen verschiedene symbiotische Bakterien. Manche gewinnen Energie, indem sie Methan zu Kohlendioxid (blauer Pfeil) oxidieren. Andere gewinnen Energie aus der Umwandlung von Schwefelwasserstoff zu Sulfat (hellgrüner Pfeil) und – wie erst seit Kurzem bekannt – von Wasserstoff zu Wasser.

Rechts Nicole Dubilier hat zusammen mit Kollegen diese Art der Energiegewinnung am Meeresboden entdeckt.

Die Muscheln aus Logatchev – in ihrem natürlichen Biotop sind es bis zu 2000 Tiere pro Quadratmeter – konsumieren Wasserstoff. „Die haben es wegge-lutscht wie blöd“, soll Pape seinerzeit gesagt haben. Doch blieben viele Fragen offen. Konsumieren beide Bakterienarten Wasserstoff? Oder nur einer der Symbionten und, falls ja: welcher?

VOM OZEANBODEN INS LABOR

Fünf lange Jahre und weitere zwei Ausfahrten ans Logatchev-Feld hat es gedauert, bis das Rätsel gelüftet war. Immer wieder nahm der Tauchroboter Proben vom Grund des Ozeans und beförderte sie ans Tageslicht, wo sie schon an Bord des Forschungsschiffs und später in Bremen analysiert wurden. Fünf Jahre, in denen Nicole Dubilier und ihre Kollegen ihre Geldgeber von der Deutschen Forschungsgemeinschaft immer wieder überzeugen mussten, dass noch eine weitere teure Ausfahrt an das Logatchev-Feld nötig sei. Tägliche Kosten: 35 000 Euro.

Aber auch fünf Jahre mit Innovationen in Messtechnik und Molekularbiologie. „So haben sich immer mehr Indizien angesammelt, die letzten Endes für einen Artikel in NATURE gereicht ha-

ben“, erklärt die Biologin. So haben die Forscher entdeckt, dass das sogenannte *hupL*-Gen für die Wasserstoffoxidation ausschließlich in der sulfidoxidierenden Art vorkommt. Sie konnten daraufhin belegen, dass dieses Gen in Anwesenheit von Wasserstoff tatsächlich aktiv ist und ein Enzym für die Wasserstoffoxidation produziert wird. Die komplette Entschlüsselung des Genoms des Sulfidoxidierers ergab: Alle Gene, die für die Wasserstoffoxidation gebraucht werden, liegen eng beieinander, und zwar in direkter Nachbarschaft zu den Genen für die Sulfidoxidation.

Und schließlich konnten die Forscher mit einem neuen Gerät gelöste Gase unter den Hochdruckverhältnissen in der Tiefsee messen. Am Tauchroboter angebracht, hat dieses Gerät direkt an der heißen Quelle Messungen vorgenommen: In den Flüssigkeiten in unmittelbarer Nähe der Muscheln ist deutlich weniger Wasserstoff gelöst als dort, wo sie die Erdkruste verlassen.

Mithin blieb kein Zweifel mehr: Die Mikroben und damit auch die vergesellschafteten Muscheln ernähren sich aus jener Energiequelle, die auch Menschen zu gern in großem Stil nutzen würden, bislang aber wenig effektiv. Ganz anders die mikrobiellen Untermieter der etwa

500 000 Muscheln am einige Hundert Quadratmeter großen Logatchev-Feld: Stündlich setzen sie bis zu 5000 Liter Wasserstoff um. Die Wasserstoff verbrauchenden Symbiosen spielen damit eine wesentliche Rolle als Primärproduzenten von organischer Masse.

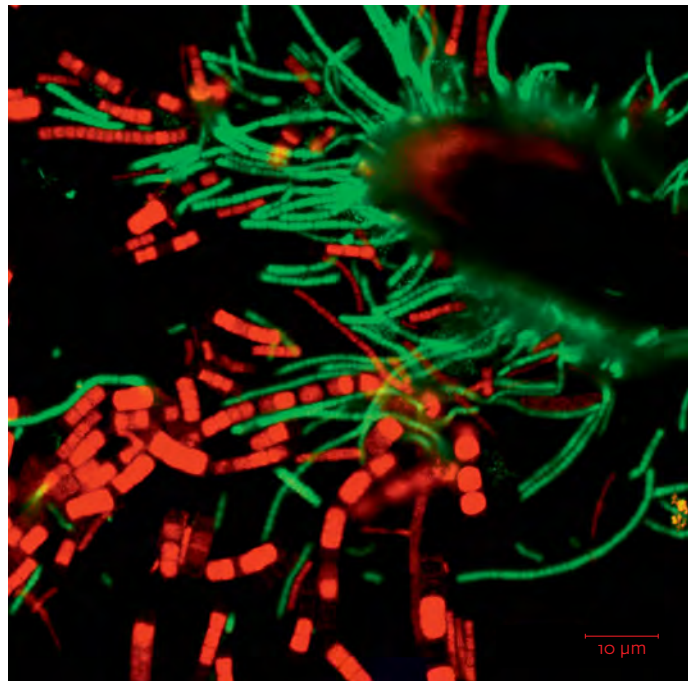
KEIN EINZELFALL IN DER TIEFSEE

Auch die Symbionten anderer Tiere an den Hydrothermalquellen besitzen das *hupL*-Gen, wie die MPI-Forscher nun wissen – etwa der Röhrenwurm *Riftia pachyptila* oder die Garnele *Rimicaris exoculata*. „Wahrscheinlich können viele Bakterien in den Lebensgemeinschaften der heißen Quellen Wasserstoff nutzen“, glaubt Nicole Dubilier, selbst dort, wo aus den Quellen nur wenig Wasserstoff ausströmt wie an den südlich von Logatchev gelegenen Hydrothermalfeldern Wideawake und Lilliput. Da verbrauchen die Bakterien der Muscheln zwar von Haus aus weniger Wasserstoff. „Wenn wir denen aber im Labor ordentlich was anbieten, kommen die auf Touren“, schwärmt die Biologin. „Entlang des Mittelozeanischen Rückens existiert so etwas wie ein Wasserstoff-Highway mit Zapfstellen für die symbiotische Primärproduktion – das sind die



Links Der mit dem Regenwurm verwandte *Olavius algarvensis* hat zwar weder Mund noch Magen, Darm oder After, verhungern muss er aber nicht. Das verdankt der zwei Zentimeter kurze Wurm zwei Bakterienarten, die ihn mit Energie versorgen.

Rechts Die rund um Hydrothermalquellen lebende Garnele *Rimicaris exoculata* überlebt ebenfalls mithilfe zweier symbiotischer Bakterienarten (rot, grün). Diese heften sich auf bislang unbekannte Weise an die Mundwerkzeuge der Garnele.



Hydrothermalquellen“, sagt Jillian Petersen von der Bremer Arbeitsgruppe und Erstautorin des NATURE-Artikels.

BAKTERIEN IM ZELLKERN

Interessanterweise haben Dubilier und ihre Kollegen in der Tiefsee auch Muscheln gefunden, deren Zellkern von Bakterien infiziert ist. Doch dringen diese Bakterien nur in Kerne von Zellen ein, die keine symbiotischen Bakterien enthalten. „Deshalb vermuten wir, dass die Symbiose irgendwie vor der Infektion schützen kann“, sagt Nicole Dubilier. Jüngst haben ihre Mitarbeiter derlei Zellkerninfektionen sogar bei handelsüblichen Muscheln nachgewiesen. Das immerhin macht die Erforschung des Phänomens weniger beschwerlich, denn an Flachwassermuscheln ist leichter heranzukommen als an ihre Verwandten in der Tiefsee.

Auch wenn es aufwendig ist: Für fast alle Mitarbeiter des Symbiose-Teams bedeuten die Exkursionen auf den Forschungsschiffen Höhepunkte ihres Berufslebens. Für sie ist es ein Privileg, zumindest einmal im Jahr hinauszufahren und sich ein paar Wochen lang den Wind um die Ohren wehen zu lassen. Dabei stoßen sie immer wieder auf Überraschungen. Auf einer der jüngsten Ausfahrten mit der *Meteor* entdeckten die

Wissenschaftler in der Nähe der Azoren ein neues Hydrothermalfeld, „obwohl die Gegend als gut erforscht gilt“, wie Nicole Dubilier sagt. Mit einem neuen Fächerecholot war es gelungen, die Wassersäule bis zum Meeresboden unglaublich genau abzubilden und so eine Fahne von Gasbläschen zu orten. Nach der anschließenden Tauchfahrt des Unterwasserroboters und der Analyse der nach oben transportierten Proben stand fest: Dort findet sich die für heiße Quellen typische Fauna samt Symbionten.

Die Ausmaße des Feldes sind allerdings viel kleiner als üblich. Inzwischen wurden fünf weitere Stellen mit ähnlichen Gasblasen gefunden, ein Teil sogar in Gebieten, wo bisher keine hydrother-

male Aktivität bekannt war. „Vermutlich gibt es am Mittelatlantischen Rücken viel mehr solch kleiner Felder“, betont die Leiterin der Symbiose-Arbeitsgruppe, „was hieße, dass wir den Beitrag hydrothermalen Aktivität zum Wärmebudget der Meere neu überprüfen müssen.“ Der Fund könnte der Schlüssel sein, um eine umstrittene Frage zu klären: Wie haben sich die Tiere zwischen den oft Hunderte bis Tausende Kilometer voneinander entfernten großen Hydrothermalquellen verteilen können? Vermutlich, so Dubilier, „indem sie die aktiven kleineren Zonen als Zwischenstationen genutzt haben“.

 www.mpg.de/5550839

GLOSSAR

Oxidation: Bezeichnung für den Verlust von Elektronen während einer chemischen Reaktion. Während der Zellatmung werden Elektronen so zwischen verschiedenen Molekülen verschoben, dass Energie frei wird. Energiereichere Moleküle wie Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Methan können dabei mit geeigneten Reaktionspartnern in energieärmere Stoffe wie Wasser, Sulfat und Kohlendioxid umgewandelt werden. Die dabei frei werdende Energie kann die Zelle für den Stoffwechsel nutzen.

Wasserstoff: Das Element entsteht in großen Mengen an manchen Hydrothermalquellen durch Reaktionen des Erdmantels mit Seewasser. Wasserstoffmoleküle bestehen aus zwei Wasserstoffatomen, die über eine energiereiche chemische Bindung zusammenhängen. Wasserstoff enthält pro Gewichtseinheit mehr Energie als jeder andere chemische Brennstoff. So ist die Energiedichte von einem Kilogramm Wasserstoff etwa 2,5-mal so groß wie die von einem Kilo Benzin.

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler
- und solche, die es werden wollen:

Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

Vorteilsabo sichern!

abo@verlag-jungewissenschaft.de
Stichwort: „Vorteilsabo“

Leseprobe anfordern!

leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de
oder per Fax 0211 / 74 95 64-29

Vorteilsabo

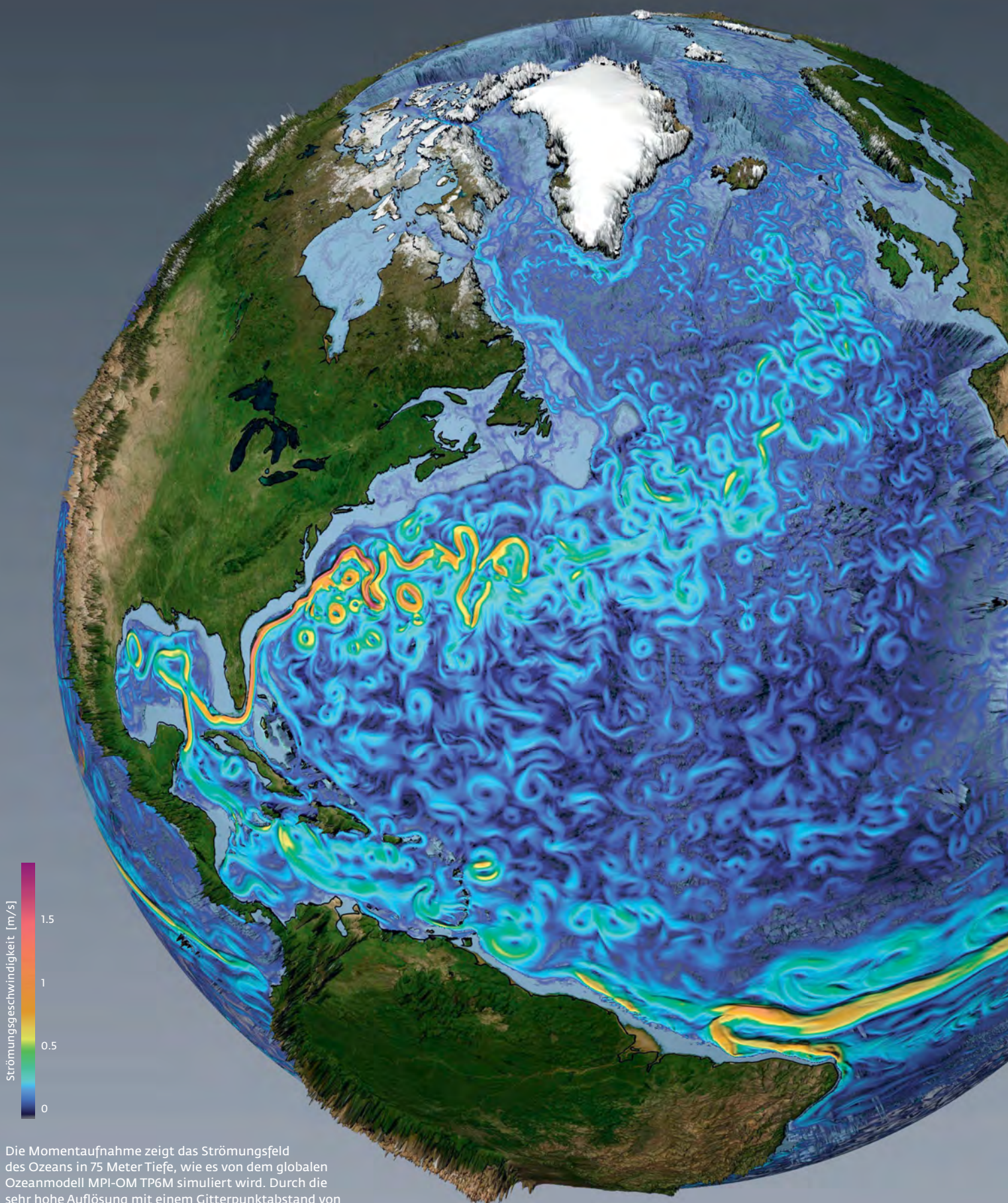
nur

20,-€*

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer
(4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)*

*zzgl. Versandkosten

www.verlag-jungewissenschaft.de



Die Momentaufnahme zeigt das Strömungsfeld des Ozeans in 75 Meter Tiefe, wie es von dem globalen Ozeanmodell MPI-OM TP6M simuliert wird. Durch die sehr hohe Auflösung mit einem Gitterpunktabstand von zehn Kilometern lassen sich die Verwirbelungen des Golfstroms als wichtiger Teil der atlantischen Umwälzbewegung gut erkennen. Die Simulation wurde im Rahmen des STORM-Projekts berechnet.

Das Gedächtnis des Klimas

Im Atlantischen Ozean arbeitet eine gigantische Wärmepumpe: Tropische Wassermassen strömen gen Norden und versorgen Europa mit einem angenehm warmen Klima. **Jochem Marotzke**, Direktor am Hamburger **Max-Planck-Institut für Meteorologie**, hat diese Strömung berechnet und damit die Basis für ein verbessertes Klimamodell geschaffen.

TEXT **NICOLA WETTMARSHAUSEN**

Wenn vom Ozean die Rede ist, denken wohl die meisten Menschen ans Tauchen oder Segeln, an Strände und unendliche Weiten. Jochem Marotzke hat ein anderes Bild vor Augen: ein riesiges Strömungsband aus Wasser. Es beginnt am Äquator; von hier wälzen sich warme Wassermassen bis in den hohen Norden, dort kühlen sie ab, versinken und fließen als kaltes Tiefenwasser langsam wieder nach Süden.

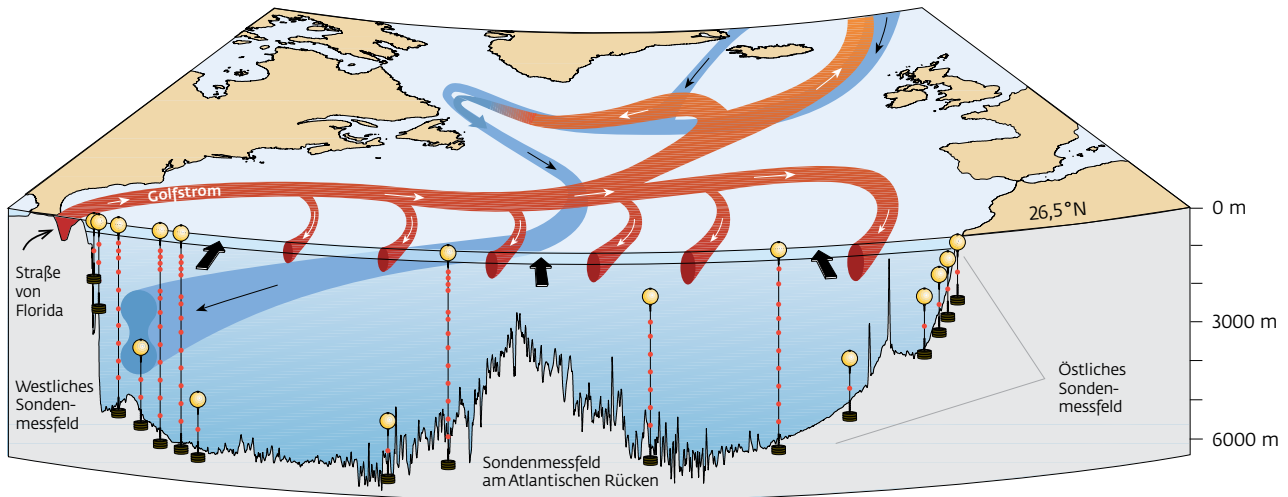
Die atlantische meridionale Umwälzbewegung (Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC), wie Forscher sie nennen, ist Teil eines riesigen Strömungsbandes, das alle Weltmeere durchzieht. Dabei befördert die Meeresströmung gewaltige Mengen Wärme von einem Erdteil in den anderen und beeinflusst so entscheidend das Klima.

Um diese Meeresströmungen kreist die Forschung Jochem Marotzkes. Seit Jahren arbeitet der Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg an einer Vorhersage für die AMOC, um letztlich das Klima perfekt zu modellieren.

„Wenn wir die Prozesse im Ozean nicht verstehen, wird uns die Klimamodellierung nicht gelingen“, sagt er und sieht die Atmosphäre als ein „flüchtiges Etwas“ an, das Zustände nicht über einen längeren Zeitraum konservieren kann. Temperatur- oder Druckwerte können sich im Medium Luft rasend schnell ändern. Weil Wasser aber eine hohe Wärmekapazität hat, kann es Wärme länger speichern. Dadurch reagiert der Ozean insgesamt viel träger auf Veränderungen als die Atmosphäre. Physiker Jochem Marotzke hält ihn deshalb für „das Gedächtnis des Klimas“.

STRÖMUNGSSCHWANKUNGEN WIRKEN SICH DEUTLICH AUS

Die AMOC ist ein gigantisches Phänomen: Durchschnittlich 18 Millionen Kubikmeter Wasser wälzen sich pro Sekunde durch das 7000 Kilometer weite atlantische Becken. Doch im Lauf eines Jahres kann die Stärke der AMOC extrem schwanken: Mal transportiert sie mehr als 30 Millionen Kubikmeter Wasser, mal nur zehn Millionen. Ursache sind saisonale Winde, die sich mit einer



Entlang der Linie von 26,5 Grad nördlicher Breite werden Messsonden über den Atlantik platziert (RAPID/MOCHA-Projekt). Einige der Sonden messen das gesamte vertikale Profil bis in 6000 Meter Tiefe, andere nur die tieferen Strömungsschichten.

Zeitverzögerung von mehreren Monaten auf die trägen Ozeanströmungen auswirken. Aber auch innerhalb eines Monats oder sogar eines Tages variiert der Strom erheblich. Wegen ihrer starken Schwankungen gilt die AMOC daher als schwer berechenbar.

Forscher versuchen schon lange, die Veränderungen der AMOC und damit das Klima über einen Zeitraum von fünf bis zehn Jahren vorherzusagen. Doch alle Versuche hatten bisher wenig Erfolg. Das Team um Jochem Marotzke möchte das ändern. Denn die AMOC spielt nicht nur für Europa eine Rolle, ihre Schwankungen wirken sich – mehr als bisher gedacht – auch auf Dürren im Sahel und auf die Hurrikan-Aktivität im Nordatlantik aus.

Für wissenschaftlich fundierte Voraussagen brauchten die Forscher zu-

nächst Messdaten. Anhand der Werte können sie prüfen, ob ihr Modell die Realität richtig simuliert.

Doch wie kann man die Strömung eines Ozeans messen, der 7000 Kilometer breit ist? Jochem Marotzke hat dafür eine Lösung: „Wir zerlegen die AMOC bei 26,5 Grad Nord einfach in drei verschiedene Komponenten.“

ALTE TELEFONKABEL MESSEN STRÖMUNGEN

Dazu betrachten die Forscher zunächst den Golfstrom, der über eine Breite von 100 Kilometern durch die Straße von Florida nach Norden verläuft. Er ist die am schnellsten fließende Strömung. Die zweite Komponente ist die durch Wind und Corioliskraft beherrschte Ekman-Strömung, die in den oberen

100 Metern des Ozeans verläuft. Das Wichtigste aber ist die mittelatlantische Strömung, die in 100 bis 1000 Meter Tiefe quasi unter der Ekman-Strömung liegt und sich über die gesamte Breite des atlantischen Beckens erstreckt. „Wir messen zunächst alle drei Komponenten separat, und später addieren wir dann die Werte“, sagt Marotzke.

Der Breitengrad 26,5 Nord ist nicht zufällig gewählt: Bestimmte Messreihen sind hier schon vorhanden. Die Veränderungen der windgetriebenen Ekman-Strömung etwa werden seit den 1990er-Jahren direkt über *QuikSCAT* erfasst – ein Satellit, der die Meeresoberfläche mithilfe von Mikrowellen scannt und Auskunft über Oberflächenwellen und Windstärke gibt.

Auch für den Florida-Golfstrom existieren Daten. Er wird mithilfe alter Telefonkabel gemessen, die am Grund des Meeresbeckens liegen. „Eine pfiffige Methode“, findet Daniela Matei, die in Marotzkes Abteilung forscht. „Das Verfahren basiert auf der Tatsache, dass die im Wasser vorhandenen Salzionen stromabwärts fließen, sich dabei durch das Magnetfeld der Erde bewegen und auf diese Weise ein elektrisches Feld erzeugen. Dieses Feld induziert in den Unterseekabeln eine Spannung, die regelmäßig aufgezeichnet wird.“ Schon seit dem Jahr 1982 sammeln amerikanische Forscher diese Daten und stellen sie ihren Kollegen auf der ganzen Welt zur Verfügung.

KLIMAMODELLE IM STRESSTEST

Welches Klimamodell das bessere ist, lässt sich nur durch den Vergleich herausfinden. Darum hat die internationale Klimaforschungsgemeinde ein Vergleichsprojekt für koordinierte Experimente gestartet. Das Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) soll das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) unterstützen. Damit wollen die Fachleute aktuelle Fragen zu den Mechanismen und den Charakteristiken der Klimaänderung erforschen: Sie erstellen Klimaprojektionen für den Zeitraum bis 2300, untersuchen die Rolle des Kohlenstoffkreislaufs für Klimaänderungen oder entwickeln dekadische Vorhersagen. Zu diesen Themen arbeiten weltweit etwa 20 Forschergruppen – auch Wissenschaftler aus dem Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie – an standardisierten Experimenten.

So weit wäre alles relativ einfach, gäbe es nicht ein kleines Problem: Für die große mittelatlantische Strömung existieren bislang keine längeren Messreihen, sondern lediglich sporadische Einzelmessungen, die von Schiffen aus gemacht wurden. „Die Schiffe haben sechs Wochen gebraucht, um einmal über den Atlantik zu fahren“, sagt Jochem Marotzke. „Während der Fahrt hat die Crew zwar mehrmals täglich gemessen, aber für den Zeitraum davor oder danach gibt es natürlich keinerlei Daten.“ Außerdem seien solche Forschungsausfahrten extrem teuer und würden deswegen nicht regelmäßig unternommen.

TIEFENSTRÖMUNGEN DURCH DICHTEUNTERSCHIEDE

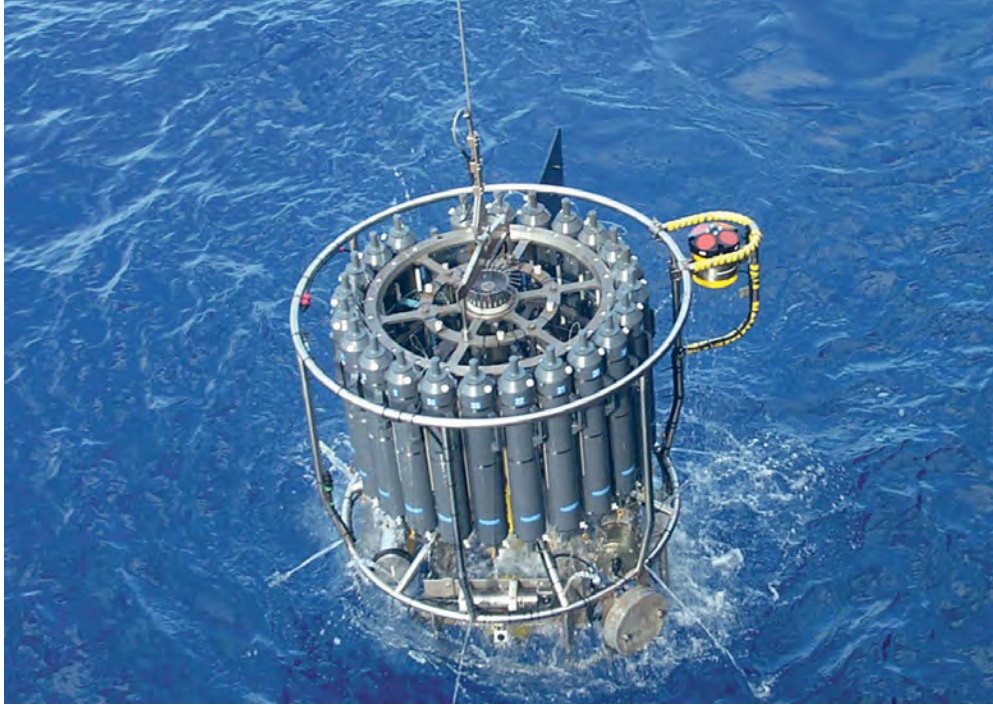
Dem Klimamodellierer und Theoretiker Marotzke blieb damals nichts anderes übrig, als die benötigten Daten selbst zu sammeln. Dazu startete er im Jahr 2003, als er am National Oceanography Centre Southampton (NOCS) arbeitete, mit amerikanischen und englischen Kollegen das RAPID/MOCHA-Projekt. „Ich wollte nicht bloß kontinuierlich Daten sammeln, sondern den Prototyp eines neuen Monitoringsystems entwickeln“, erklärt Marotzke. „Nur so können wir die AMOC in den nächsten zehn Jahren genau unter die Lupe nehmen.“

Schon 2004 stach der Forscher in See. Auf der ersten Ausfahrt verankerten er und seine Kollegen 19 Messsonden im atlantischen Becken entlang der Linie von 26,5 Grad nördlicher Breite. Bis in 5000 Meter Tiefe registrierten die Sonden Temperatur, Salzgehalt, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung. Über die gesamte Meerestiefe hin-

Oben Ein Messgerät wird ins Meer hinabgelassen und schickt Leitfähigkeits-, Temperatur- und Druckdaten über das Kabel nach oben. Die grauen Flaschen sammeln Wasserproben, mit denen der Salzgehalt bestimmt wird.

Mitte Auch das kommt vor: Diese Sonde muss geborgen werden, weil sie durch den enormen Druck in der Tiefsee implodiert ist. Normalerweise wird die Sonde von den gelben Auftriebskörpern gehalten und an einem Seil auf und ab bewegt, um ein kontinuierliches Profil aufzunehmen.

Unten Wissenschaftler an Bord des Forschungsschiffes legen eine eineinhalb Tonnen schwere Verankerung am Meeresboden aus. Der gelbe Auftriebskörper hält das Seil mit den Messsonden senkrecht.



weg zeichnen diese ein vertikales Dichteprofil auf; eine Kampagne, die vier Jahre dauerte.

„Jetzt hatten wir eine gute Datenbasis“, sagt Johanna Baehr von der Universität Hamburg, die mit Jochem Marotzke und Daniela Matei an der Auswertung arbeitete. Aus den Dichtemessungen kalkuliert das Team die Stärke der AMOC: „Meerwasser hat unterschiedliche Dichtewerte. Die hängen von der Temperatur und vom Salzgehalt des Wassers ab“, so Baehr. Dadurch entsteht im Ozean ein Dichte- und somit ein Druckgefälle. Weil das Wasser immer zum Punkt ge-

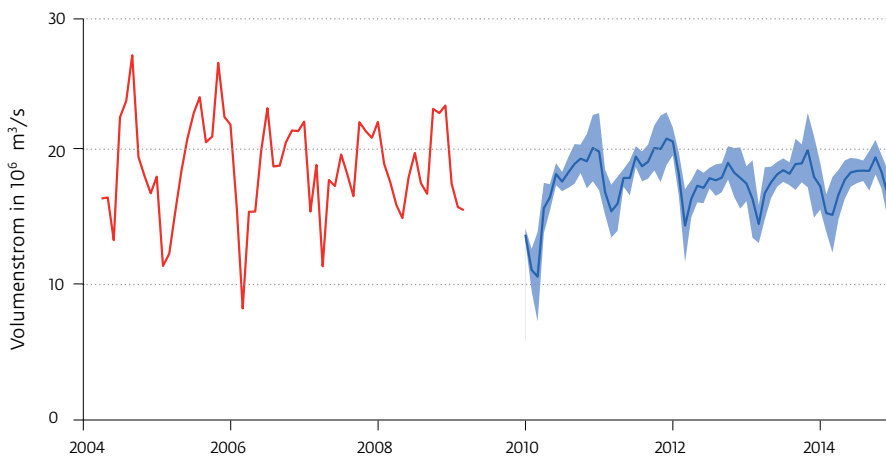
ringerer Dichte fließen möchte, erzeugt das Druckgefälle eine Strömung. Die Geschwindigkeit dieser Strömung konnte das Team mithilfe der Messungen über die gesamte Tiefe und Breite des Atlantiks berechnen – von den Bahamas bis zur afrikanischen Küste entlang von 26,5 Grad nördlicher Breite. Auf diese Weise erhielten die Forscher ein genaues Bild davon, wie stark die Atlantikzirkulation zwischen den Jahren 2004 und 2008 schwankte.

Als Nächstes errechneten sie die Schwankungen der AMOC für den gleichen Beobachtungszeitraum in einer

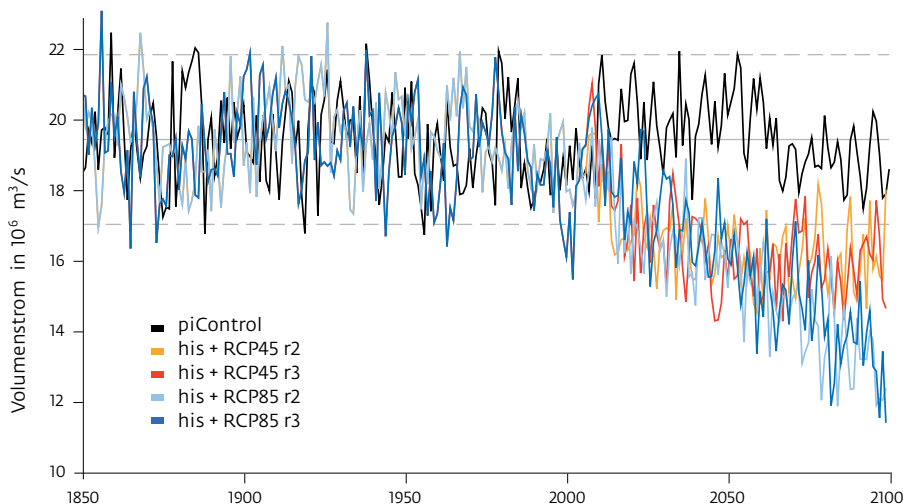
Computersimulation und verglichen diese Ergebnisse mit den gemessenen Daten. So entstand ein „Hindcast“ – eine retrospektive Vorhersage, mit der sich die Qualität eines Modells testen lässt.

Für die Simulation verwendeten die Forscher das gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Klimamodell ECHAM5-MPI-OM. Dieses wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelt und für die Klimaszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendet. Mit ECHAM5 simulieren die Wissenschaftler Vorgänge in der Atmosphäre, mit MPI-OM jene im Ozean. Beide Modelle werden normalerweise miteinander gekoppelt. So beeinflusst die simulierte Atmosphäre das Verhalten des Ozeanmodells – und umgekehrt.

Die rote Kurve zeigt das gemessene Strömungsvolumen der atlantischen meridionalen Umwälzbewegung (AMOC). Die Vorhersage (blau mit Fehlerintervall) zeigt, dass die AMOC bis ins Jahr 2014* (siehe Anmerkung Seite 53) stabil bleiben wird (hellblau: Ensemble aus mehreren Rechnungen, dunkelblau: Mittelwert).



Durch die Erderwärmung wird sich die AMOC langfristig abschwächen. Die orangefarbenen Graphen geben die Entwicklung für einen mittelstarken menschlichen Einfluss auf das Klima wieder, die blauen Kurven beschreiben einen starken Einfluss. Die schwarze Linie sagt voraus, wie sich die AMOC ohne menschliche Eingriffe ins Klima entwickeln würde.



MESSDATEN MACHEN DAS MODELL PRÄZISER

Doch Daniela Matei änderte das Programm und fütterte die Ozeansimulation laufend mit echten atmosphärischen Daten, mit Wind- und Luftdruckwerten, die die National Centers for Environmental Prediction (NCEP) über einen Zeitraum von 50 Jahren gesammelt haben. Und in der Tat: Die eingebauten Windmesswerte machen die Ozeansimulation viel realitätsnäher. Doch ist das neu programmierte Modell wirklich so gut, dass es auch in die Zukunft schauen kann?

Wochen- und monatelang arbeiten die Prozessoren im Deutschen Klimarechenzentrum. Dann zeigte sich: Das verbesserte Ozean-Klimamodell ist gut und hält, was es verspricht. „Die gemessenen und gerechneten Daten stimmen recht passabel überein, der Hindcast-Vergleich sieht gut aus“, sagt Jochem Marotzke stolz. „Mit diesen aktuellen Klima-Modellrechnungen ist es uns erstmals gelungen, die nordatlantische Meeresströmung genau vorzuberechnen – und zwar für kurze Zeitskalen, bis zu vier Jahre in die Zukunft.“ Und das ist viel schwieriger, als Prognosen bis ins Jahr 2100 zu treffen.

Denn bei langfristigen Prognosen werden die Daten gemittelt und Kurven dadurch geglättet. So lassen sich langjährige Trends wie die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beschriebene Schwächung der AMOC erkennen. Betrachten die For-



Die nähere Zukunft im Blick: Johanna Baehr, Jochem Marotzke und Daniela Matei interessieren sich dafür, wie sich das Klima in den nächsten zehn Jahren verändern wird.

scher hingegen einen Zeitraum von nur wenigen Jahren und zoomen in die Kurve hinein, zeigen sich große natürliche Schwankungen immer deutlicher – und diese überlagern mögliche Trends.

Aber wie lautet die Vorhersage für die AMOC? „Die Stärke der atlantischen Umwälzbewegung bleibt, allen Zweiflern zum Trotz, stabil“, sagt Marotzke. „Wir können jetzt auch mit Zuversicht sagen, dass es sich bei der Abschwächung der Atlantikzirkulation im März 2010 nur um ein kurzzeitiges Phänomen handelte.“

Darin sahen manche bereits Anzeichen einer dauerhaften Abschwächung, die immer wieder als mögliche Folge des Klimawandels diskutiert wird. Ein Szenario wie in Roland Emmerichs Film *The Day After Tomorrow*, bei dem die AMOC ganz versiegt und die Nordhalbkugel unter einer dicken Eisschicht erfriert, wird es nicht geben, da ist sich der Ozeanforscher sicher – „auf jeden Fall nicht vor 2014*“.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die atlantische meridionale Umwälzbewegung (AMOC) befördert gewaltige Mengen Wärme von einem Erdteil in den anderen und beeinflusst so entscheidend das Klima in Europa.
- Das Verständnis der AMOC ist essenziell für eine zuverlässige Klimamodellierung.
- Max-Planck-Forscher haben die nordatlantische Meeresströmung genau vorausberechnet. Ergebnis: Sie bleibt mindestens bis zum Jahr 2014* stabil.

GLOSSAR

Corioliskraft: In der physikalischen Ozeanografie spielt die Corioliskraft eine wichtige Rolle: Durch die Erdrotation befinden sich die Wassermassen in einem rotierenden Bezugssystem. Dadurch werden sie auf der Nordhalbkugel nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt. Durch den Einfluss der Corioliskraft entstehen auch in der Atmosphäre Hoch- und Tiefdruckgebiete.

Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ): Das DKRZ ist praktisch das Labor aller deutschen Klimaforscher, die ihre Ergebnisse auf der Basis der Modellierung des Klimas erzielen. Dabei hängt die Genauigkeit eines Klimamodells von der Leistungsfähigkeit des Supercomputers ab, ist aber auch durch sie limitiert. Das liegt an der Komplexität und Dynamik des Klimas sowie an der enormen Datenmenge, die berechnet und ausgewertet werden muss. Das DKRZ ist eines der weltweit wichtigsten Rechenzentren für Klimasimulationen. Sein Datenarchiv hat ein momentanes Volumen von 20 Petabyte, das sich mit jeder neuen Rechnergeneration vervielfacht.

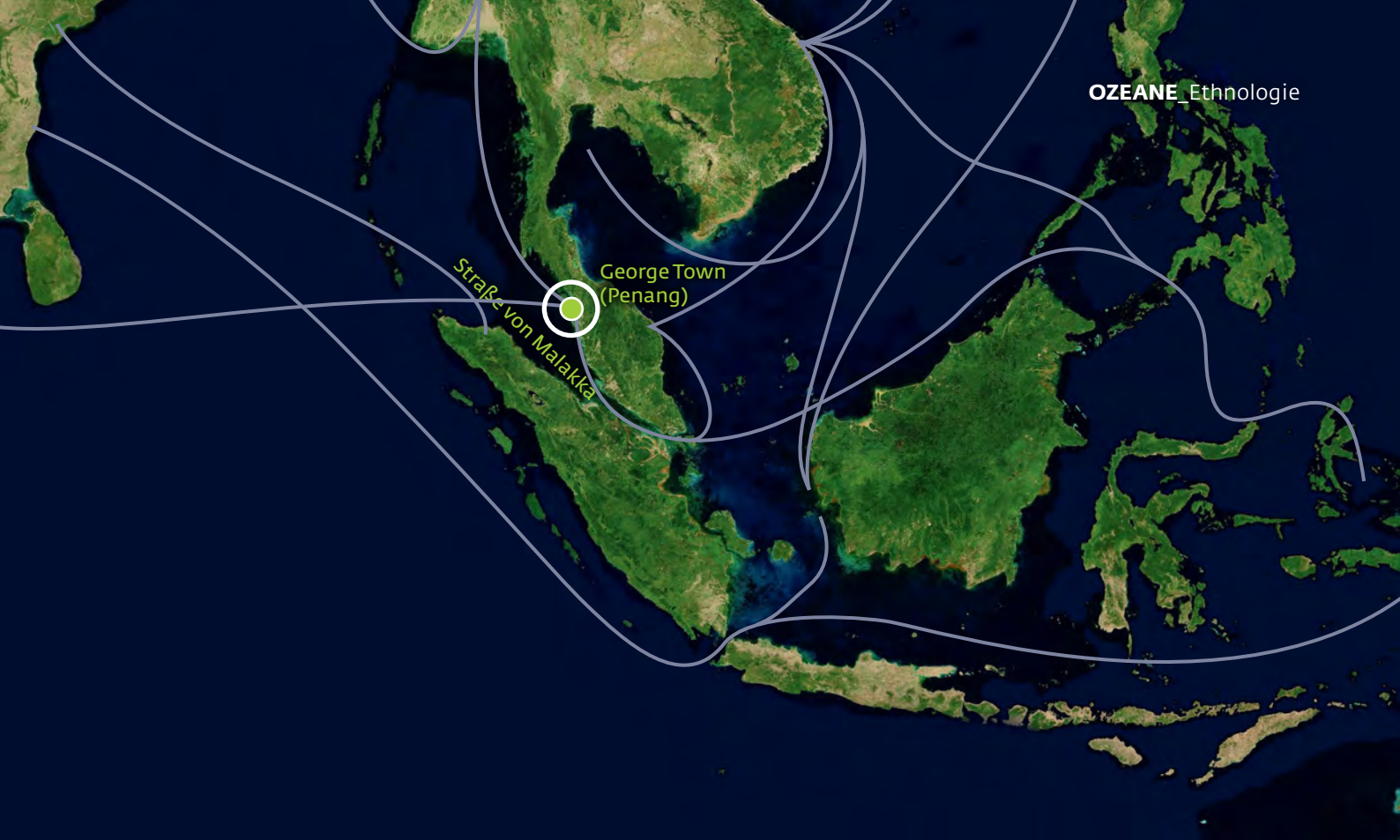
RAPID/MOCHA-Projekt: Nach seiner ersten Phase von 2004 bis 2008 wird die AMOC bis zum Jahr 2014 im Rahmen des RAPID-WATCH-Projekts beobachtet. Die kontinuierliche Messung von Daten über einen Zeitraum von zehn Jahren ist wichtig für eine permanente Angleichung und Verbesserung des MPI-Ozeanmodells.

* Dieser Artikel stammt aus dem Jahr 2012, es wurden lediglich einige redaktionelle Änderungen vorgenommen. Aus heutiger Sicht kann festgestellt werden: Die AMOC hat sich bis 2014 tatsächlich nicht abgeschwächt – die Vorhersage der Forscher hat sich also bestätigt.



Ein Meer von Verbindungen

Schiffe waren lange Zeit die schnellsten Verkehrsmittel, und sie konnten Menschen und Güter in großer Zahl transportieren. So wurden Meere zu einem Kontakt- und Handelsraum für unterschiedliche Nationen. Hafenstädte dienen noch heute als Knotenpunkte und bilden Schmelztiegel verschiedener Kulturen. Am Beispiel des Indischen Ozeans erforschen **Burkhard Schnepel** und sein Team am **Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung**, wie sich über das Wasser hinweg vielfältige Netzwerke entwickelt haben.



TEXT TINA HEIDBORN

Wasser auf rund 70 Millionen Quadratkilometern, annähernd 15 Prozent der Erdoberfläche: Der Indische Ozean verbindet im Süden das afrikanische Kap der Guten Hoffnung und Perth an der australischen Westküste mit dem pakistanischen Karatschi und Kalkutta, Indien, im Norden. Dazwischen Inseln und Inselgruppen in der Weite des drittgrößten Ozeans der Welt. Es ist nicht gerade ein kleines Untersuchungsgebiet, das sich Burkhard Schnepel vorgenommen hat. Schnepel ist Professor für Ethnologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Fellow am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung, wo er die Arbeitsgruppe „Connectivity in Motion: Port Cities of the Indian Ocean“ leitet.

Burkhard Schnepel interessiert am Indischen Ozean vor allem das, was das Wasser möglich macht: „Seit 3000 Jahren befahren Menschen diesen Raum“, sagt er. „Er hat nicht nur eine riesige Fläche, sondern auch eine lange Geschichte.“ Der Indische Ozean ist für den Ethnologen und seine Projektmitarbeiter ein Begegnungsraum.

Aufgrund der regelmäßigen Monsunwinde – nach dem Muster Südwest-Monsun im Sommer, Nordost-Monsun im Winter – war der Indische Ozean schon im Zeitalter der Segelschifffahrt gut navigierbar. Man kann ihn, historisch und ethnologisch betrachtet, als einen in der Geschichte geschaffenen Kontakt- und Handelsraum auffassen, als „maritime Seidenstraße“. Als die Europäer ab dem 16. Jahrhundert verstärkt dort aufkreuzten, waren diese Handelsmöglichkeiten ein Hauptfaktor: ein Meer voller Routen, die sich zwischen Afrika und Asien erstrecken. Burkhard Schnepel hat bereits über beide Kontinente gearbeitet. So hat er seine Doktorarbeit an der Universität Oxford über das Volk der Schiluk im Südsudan geschrieben, bevor er sich in seinen nächsten Feldforschungen und Projekten Ostindien zuwandte. Und jetzt also der übergreifende Ansatz der „Indian Ocean Studies“. Der Ozean gibt den Untersuchungsrahmen vor, doch um den Bewegungen auf ihm nachzugehen, müssen sich die Wissenschaftler auf einzelne Punkte konzentrieren und die Details ins Auge fassen: Kleine Inseln und Hafenzentren sind ein Schwerpunkt in dem Projekt. >



Der Ethnologe Burkhard Schnepel (ganz rechts) erforscht die Insel Mauritius als Hub, also als Knotenpunkt: Hier sammelt sich Wissen verschiedener Kulturen etwa über die Wirkung von Kräutern (links). Zuwanderer schufen eigene Traditionen wie den Tanz- und Musikstil Sega (rechts). Heute ist die Ebene Cybercity südlich der Hauptstadt Port Louis eine Schnittstelle für schnelle Glasfaserkabel (rechte Seite, Mitte).

Burkhard Schnepel beschäftigt sich mit einer Insel, die im Westen vor allem als Urlaubsziel wahrgenommen wird: Mauritius. Für seine Feldforschungen besucht der Wissenschaftler den Inselstaat seit Jahren regelmäßig, genauer gesagt: die Hauptinsel Mauritius und deren Haupt- und Hafenstadt Port Louis. Entscheidend ist dabei für ihn der Aspekt des wichtigen Knotenpunkts – „Hub“ ist die dafür übliche, aus dem Englischen entlehnte Bezeichnung.

Was aber macht eine Insel zu einem Hub? Ein wichtiger Faktor ist die Lage: Angefangen hat Mauritius als eine unbewohnte, aber für Seefahrer nützliche Insel im Nichts des Indischen Ozeans, auf der Strecke zwischen Ostafrika im Westen und Indien im Osten. Auch wenn die Insel auf Karten arabischer Seefahrer schon ab dem 10. Jahrhundert verzeichnet gewesen sein soll, waren die ersten Europäer, die Mauritius „entdeckten“, zu Anfang des 16. Jahrhunderts die Portugiesen. Hier konnten sie frische Nahrung an Bord ihrer Schiffe nehmen und Wasser auffüllen, der Besatzung ein bisschen Erholung gönnen und die Ausrüstung wieder auf Vordermann bringen.

Erst die Niederländer ließen sich 130 Jahre später als Kolonialherren nieder, später siedelten sich die Franzosen

an, noch später eroberten die Briten die Insel. Mit der Zeit wuchs die Bedeutung von Mauritius als Umschlagplatz: Es war Zwischenstation für Textilien und Gewürze aus Indien und für Porzellan aus China ebenso wie für Sklaven und Elfenbein aus Afrika, wichtig für die jeweiligen Ostindien-Kompanien der europäischen Kolonisatoren. Die Schiffe transportierten jedoch nicht nur Menschen und Waren über den Indischen Ozean. „Sie brachten auch Ideen mit, Sprachen, kulturelle und religiöse Einflüsse und bestimmte Vorstellungen“, sagt Burkhard Schnepel.

ZUCKERROHR WURDE EINST AUF DIE INSEL GESCHMUGGELT

Und das ist ein weiterer Grund, warum sich Mauritius zu einem Hub entwickelte: In den letzten knapp 300 Jahren kamen Menschen aus den verschiedensten Kulturen auf die Insel. Sie begründeten eine ungewöhnlich große Vielfalt auf engem Raum, Ethnologen wie Politiker bezeichnen dies gern als *unity in diversity*: Bis heute existieren verschiedene Religionen und Kulturen mehr oder weniger eigenständig nebeneinander. Sprachen und Dialekte aus Nord- und Südindien oder China sind auf der Insel ebenso zu hören wie – bei

offiziellen Anlässen – Französisch und Englisch. Hauptverständigungssprache der Mauritier untereinander jedoch ist Morisyen, eine ganz eigene Kreolsprache, die sich auf Basis des Französischen und der anderen hier miteinander in Kontakt getretenen Sprachen entwickelt hat. Bis heute ist die Vielsprachigkeit eine Art Standortvorteil des Eilands.

Nach Burkhard Schnepels Überzeugung zeichnen sich Hubs außerdem durch eine hohe Energie aus, sie verändern die Dinge, die sie weiterleiten, transformieren sie und werten sie auf. Der Ethnologe Schnepel kann dafür historische und aktuelle Beispiele geben: Bis Ende der 1960er-Jahre war das Hauptexportgut der Insel Zucker. Doch Zuckerrohrpflanzen kamen ursprünglich auf Mauritius gar nicht vor – sie waren von Südasien auf die Insel geschmuggelt worden. Nur aus diesem Grund konnte Mauritius überhaupt anfangen, Zucker auszuführen. Hinzu kommt: Hier wurden die ertragreichsten Sorten kultiviert und damit transformiert, bevor sie die Insel wieder verließen. Seit ihrer Unabhängigkeit im März 1968 hat die Insel einen beachtlichen wirtschaftlichen Wandel durchlaufen. Die traditionelle Auffassung, die Gesellschaft auf Mauritius sei durch



die seit Jahrhunderten betriebenen Zuckerrohrplantagenwirtschaft definiert, teilt der Hallenser Ethnologe nicht. „Mittlerweile versteht sich Mauritius selbst als ein Hub und vermarktet sich auch so. Nicht mehr nur im maritimen Sektoren, sondern davon ausgehend auch in anderen Bereichen“, sagt er.

Ein wichtiger Faktor des insularen Wirtschaftslebens ist mittlerweile die Textilverarbeitung: Stoffe aus Indien und Bangladesch werden hierher importiert. Förderlich ist dabei, dass zwei Drittel der Mauritier indischstämmig sind. Hilfreich ist auch, dass die Regierung ganz gezielt gute Rahmenbedingungen für die Weiterverarbeitung geschaffen hat – eine steuerlich extrem begünstigte Exporthandelszone. Das Geld für den Aufbau der Textilfabriken stammt überwiegend von reich gewordenen französischen bzw. französischstämmigen Zuckerbaronen – Franko-Mauritier stellen rund zwei Prozent der Bevölkerung. Dazu kommen Investitionen von außerhalb – wieder einmal übers Meer. In den 1970er-Jahren suchten Hongkong-Chinesen einen sicheren Hafen für ihr Geld abseits der Kronkolonie, da für 1997 deren Unabhängigkeit bevorstand. Auf Mauritius halfen ihnen die traditionellen Verbindungen zu Sino-Mauritiern – also Ein-

wohnern mit chinesischen Wurzeln, die ungefähr drei Prozent der Bevölkerung stellen.

Amerikanische und europäische Hersteller finden auf der Insel also gute Bedingungen und auch das notwendige Know-how vor, um hier auf hohem Niveau Textilien weiterverarbeiten zu lassen. So wird aus den importierten Stoffen Luxuskleidung namhafter internationaler Marken – gefertigt ausschließlich für den Export in den Westen. Die einheimischen Arbeitskräfte können sich die Textilien und Accessoires, die sie produzieren und veredeln, jedenfalls nicht leisten. Es sind oftmals indo-mauritische Frauen und Kreolinnen, also Nachfahrinnen afrikanischer Sklaven, aus den ärmsten Bevölkerungsschichten.

Auf seine traditionellen Stärken – gute Verflechtung und Kommunikation in viele verschiedene Richtungen – setzt Mauritius auch im sich schnell wandelnden Zeitalter der Digitalisierung. „Dort, wo jetzt die neue sogenannte Ebene Cybercity steht, waren im Jahr 2000 noch Zuckerrohrplantagen“, erzählt Schnepel. Heute führen einige der schnellsten Glasfaserkabel zu der kleinen Insel im Indischen Ozean. Der Bereich „International Communication Technology“ hat rund 12.000 Arbeitsplätze in den

letzten Jahren geschaffen, die Profilierung als „International Financial Service Hub“ seit Anfang der 1990er Jahre sogar rund 15.000 neue Jobs. Vor allem Inder nutzen den wichtigen Bankensektor des Landes für ihre Transaktionen und Geschäfte mit Afrika. Aber auch für europäische und amerikanische Firmen ist die Insel ein guter Ausgangspunkt für Geschäfte in beide Hauptrichtungen über das Meer. „Sicher gibt es Missstände, aber Mauritius ist seit der Unabhängigkeit eine Demokratie mit freier Presse und politischen Kontrollmechanismen“, erläutert der Ethnologe Burkhard Schnepel. So hat sich Mauritius auch im 21. Jahrhundert als temporärer Ankerplatz und Umschlaghafen für globale Geschäfte behauptet.

HAFENSTÄDTE ENTSTANDEN AUS DER VERNETZUNG

Von Mauritius 5.500 Kilometer weiter Richtung Nordosten über die riesige Wasserfläche nach Südostasien: immer noch derselbe Ozean, jedoch eine andere Region, in die sich seit dem Herbst 2014 Mareike Pampus vertieft. Sie promoviert bei Burkhard Schnepel im Rahmen des Forschungsprojekts „Connectivity in Motion“. Aber ist es tatsächlich möglich, den riesigen Raum



des Indischen Ozeans als eine Einheit zu betrachten und unter dieser Prämisse zu erforschen?

„Man kann sich natürlich fragen, ob es nicht sinnvoller wäre, die einzelnen maritimen Regionen gesondert zu betrachten, denn rund um den Ozean kommen sehr viele unterschiedliche Sprachen, Kulturen, Staaten vor“, räumt der Ethnologe Burkhard Schnepel ein. Es gebe sogar Wissenschaftler, die aus diesem Grund davon abraten, von dem *einen* Indischen Ozean zu sprechen. Doch wer den Blick auf die Verknüpfungen und Verbindungen richtet, wen das Meer als eine von Menschen geschaffene Kontaktzone interessiert, der muss vom Meer aufs Land blicken. Vom Ozean aus auf unterschiedliche Küsten- und Kulturräume, an denen man anlanden kann. Es geht Burkhard Schnepel in seinem Forschungsansatz auch darum, in dieser „maritimen“ Dimension einen neuen Blickwinkel auf die angrenzenden Landflächen zu eröffnen.

Mareike Pampus hat ihren persönlichen Anknüpfungspunkt gefunden: Sie arbeitet über die Hafenstadt George Town auf der Insel Penang, heute ein Teil des Staates Malaysia. „In unserem Projekt sind Hafenstädte deshalb wichtig, weil sie oft durch Austausch und

Vernetzungen entstanden sind“, sagt sie. „Das Neue an unserem Ansatz ist, dass wir sie nicht so stark als Ausgangspunkt für Verbindungen sehen – das schon auch –, aber vor allem als Ergebnis von Vernetzungen.“

FÜNF MUSKATNÜSSE WAREN EIN GANZES HAUS WERT

Die Briten verstanden den Indischen Ozean als *mare liberum*, als freies Meer, das allen Zugang bietet und grade nicht aufgeteilt sein sollte in abgesteckte Zugehörigkeiten der Anrainer. Um sich in diesem auf Offenheit beruhenden wirtschaftlichen Wettkampf gut zu positionieren, sicherten sie sich im Osten des Indischen Ozeans strategisch wichtige Handelsplätze: Zum Beispiel siedelte sich Ende des 18. Jahrhunderts an der nordöstlichen Spitze der Insel Penang die britische Ostindien-Kompanie an: in Person des Kaufmanns und Seefahrers Francis Light. Er gründete dort mit George Town zunächst weniger eine Stadt als vielmehr einen Freihafen mit angeschlossener kleiner Siedlung, um hier am äußerst lukrativen Gewürzhandel teilzuhaben. „Für fünf Muskatnüsse konnte man sich zur damaligen Zeit ein Haus in London kaufen“, erzählt Mareike Pampus.

Die Insel Penang liegt am nördlichen Ende der Straße von Malakka, damals wie heute eine der meistbefahrenen Wasserstraßen der Welt. Bereits zu antiken Zeiten verband diese maritime Route China und Indien. Im 16. Jahrhundert kamen als erste Europäer die Portugiesen, wenig später Holländer, Franzosen und Briten, um sich ebenfalls in dieses gewachsene Austauschgeflecht hineinzubegeben und die Verbreitungs- und Transportwege für die kostbaren Güter Südostasiens weiter nach Westen auszudehnen. In das bereits vorhandene Netzwerk fügten sie neue, eigene Anknüpfungspunkte ein – beispielsweise George Town.

Andere folgten: „Das Vorbild George Town lässt sich bis nach Singapur und sogar bis an die Küste Australiens verfolgen“, erklärt Doktorandin Mareike Pampus. Rund 600 Kilometer von George Town entfernt legte einige Jahrzehnte später, Anfang des 19. Jahrhunderts, ebenfalls ein Angestellter der britischen Ostindien-Kompanie eine weitere wichtige Hafenstadt an: Singapur. Stadtgründer Thomas Stamford Raffles war zuvor Generalgouverneur von George Town gewesen. Eine ähnliche historische Linie lässt sich von George Town bis nach Australien ziehen: Der Sohn des George-Town-Gründers Francis

George Town auf der malaysischen Insel Penang ist ein Schmelztiegel der Religionen: In der als „Street of Harmony“ bekannten Straße finden sich auf wenigen Hundert Metern unter anderem eine Moschee, ein Hindutempel und eine christliche Kirche (linke Seite, von links). Zusätzlich wird gelegentlich eine Statue der von Taoisten und Buddhisten verehrten Göttin der Barmherzigkeit, Kuan Yin, aufgestellt, um Spenden zu sammeln (rechts).



Light, William Light, der die ersten sechs Jahre seines Lebens in George Town verbrachte, gründete mit Adelaide eine weitere Hafenstadt am Indischen Ozean. „So bewegt sich die Vorstellung von einer Stadt über das Meer“, sagt Mareike Pampus.

Natürlich waren es nicht die Briten im Alleingang: In George Town siedelten sich mit den europäischen Kolonialherren vor allem Chinesen an; noch heute sind 80 Prozent der Einwohner von George Town chinesischstämmig. Aber sie kamen meistens nicht direkt aus China, sondern hatten vorher zum Beispiel in dem unweit gelegenen Handelszentrum Malakka oder aber in Indonesien gelebt, ganz ähnlich wie die hinzuziehenden Inder. Auch George Town ist wie so viele andere Kontaktorte am Indischen Ozean vielfältig in Sprache, Kultur und Religion. Auch hier findet sich wieder *unity in diversity*, die sich sprachlich bis heute hält und sich sogar in speziellen Begrifflichkeiten abbildet: Beispielsweise gehören zu den Bewohnern George Towns „Jawi Peranakan“ mit südindisch-malaiischen Vorfahren. Das Wort für „Kind“ (*anak*) steckt in dieser Bezeichnung. Ein über Jahrhunderte nachvollziehbares Heiratsmuster lässt sich ethnologisch so beschreiben: Einheimische Frauen be-

kommen Nachkommen mit Männern, die als Handelsleute aus fremden Regionen hinzuziehen.

Ein Sonderfall in George Town sind die „Baba-Nyonya“, im Englischen ist die Bezeichnung „Straits Chinese“ gebräuchlich. Diese besondere Gruppe geht auf eine Umstrukturierung der britischen Kolonialverwaltung zurück: Im Jahre 1826 fassten die Briten ihre drei Kolonialbesitzungen an der Wasserstraße von Malakka – George Town, Malakka und Singapur – zu den „Siedlungen entlang der Wasserstraße“ zusammen, den „Straits Settlements“.

KULTURELLE VIELFALT GILT ALS UNESCO-WELTERBE

Chinesen, die in diesen Straits Settlements geboren waren und sich mit dieser Herkunft sehr stark identifizierten, hatten oft eine britische Schulbildung durchlaufen und waren britisch sozialisiert. Das prädestinierte sie dafür, als Geschäftsleute besonders erfolgreich mit den Engländern der Ostindien-Kompanie zu kooperieren. „Auch wenn sie aussahen wie Chinesen, waren sie doch in hohem Maße westlich geprägt“, erzählt die Ethnologin Mareike Pampus. Noch heute sind die Baba-Nyonya eine eigene Gruppe inner-

halb der Bevölkerung George Towns, mit einer eigenen kulturellen Identität und Kreolsprache.

Wer bin ich? Wer waren meine Vorfahren, woher und wie sind sie hierhergekommen? Wie sehe ich mich selbst und meine kulturelle Prägung? Diesen und ähnlichen Fragen geht Mareike Pampus bei ihren Forschungsaufenthalten in George Town nach, nun zum zweiten Mal für sechs Monate. Sie versucht, mit den Einheimischen ins Gespräch zu kommen, führt lange Interviews, manchmal mehrfach mit denselben Personen. Es geht weniger um Abfrage als vielmehr um das Erzählenlassen individueller Geschichten. Ziel ist ein genauer Blick auf die ganz spezielle Situation, auf die Menschen in einer Hafenstadt im Indischen Ozean mit ihrem kulturellen und historischen Erbe.

Die Auseinandersetzung mit den vielgestaltigen Wurzeln und Verbindungen erlebt im Raum des Indischen Ozeans gerade einen Aufschwung. George Town ist 2008 ebenso wie Malakka in die Weltkulturerbe-Liste der UNESCO aufgenommen worden als herausragendes Zeugnis der mehr als 500 Jahre alten Handels- und Kulturverflechtungen, die sich entlang der Wasserstraße von Malakka entwickelt haben. Die vielfältigen Einflüsse aus Asien



Für ihre Promotion führt Mareike Pampus (großes Bild, links) im malaysischen George Town Gespräche mit Einwohnern unterschiedlicher Herkunft, um deren jeweilige kulturelle Prägung zu erforschen. Eine wichtige Gruppierung sind die „Baba-Nyonya“, Nachkommen chinesischer Einwanderer, die ihre eigenen Traditionen pflegen (kleines Bild).

und Europa hätten zu einem einzigartigen multikulturellen Erbe in diesen Städten beigetragen, so die Begründung der UNESCO. Reiseführer von George Town beschreiben buddhistische Tempel neben hinduistischen Schreinen, Kirchen neben Moscheen.

Auf Mauritius ist Burkhard Schnepel gerade bei einem Forschungsaufenthalt im Frühling einem inseltypischen Musikstil und Tanz nachgegangen: dem Sega. Tourismus-Anbieter bewerben ihn gern als Ausdruck des heiteren Lebensgefühls auf Mauritius. Ursprünglich auf die Insel gebracht haben ihn afrikanische Sklaven, die im 18. Jahrhundert auf den Zuckerrohrplantagen schufteten. Wurde er früher nur heimlich und hauptsächlich von kreolischen Mauritiern gesungen und getanzt, identifizieren sich heute alle Insulaner, also auch die Franko-, Sino-, und Indo-Mauritier, übergreifend mit ihm. Mehr als 20 verschiedene Ausprägungen haben sich entwickelt, die Burkhard Schnepel ethnologisch erforscht: moderne ebenso wie traditionelle Varianten, die auch in der Schule unterrichtet werden, Mischformen wie Seggae (aus Sega und Reggae) oder auch jene Variante, die als

landestypisch gilt: Sega tipik oder Sega typique. Dieser traditionellere Sega ist vor Kurzem von der UNESCO zum Teil des immateriellen Weltkulturerbes erklärt worden – eine Tradition, die der Austausch zwischen und das Zusammenleben von Menschen im Indischen Ozean hervorgebracht haben.

Auch wenn der drittgrößte Ozean der Welt überwiegend auf der Südhalbkugel liegt und, von Deutschland aus gesehen, weit weg ist – Burkhard Schnepel hat den Eindruck, dass die Region auch hierzulande verstärkt ins Bewusstsein rückt. Zumindest die deutsche Politik zeigt ein zunehmendes Interesse. „Für

Deutschland und Europa ist es höchste Zeit, die Region des Indischen Ozeans genauer in den Blick zu nehmen“, befand der deutsche Außenminister Frank-Walter Steinmeier im Juni 2015 auf einer von ihm organisierten Konferenz in Berlin. Das Tagungsthema lautete: „The Indian Ocean – A Maritime Region on the Rise“. Gute Zeiten also für den Ethnologen Burkhard Schnepel und sein Team am Max-Planck-Institut in Halle, um die riesige Region im Aufwind genauer in den Blick zu nehmen und ihr Forschungsgebiet, die „Indian Ocean Studies“, in der deutschen Wissenschaftslandschaft zu verankern. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Betrachtet man den Indischen Ozean als Einheit, lassen sich sogenannte Hubs identifizieren: Orte, die als Knotenpunkte unterschiedliche Anrainer und deren Kulturen verbinden.
- Kennzeichnend für einen Hub sind die Lage – etwa an einem Kreuzungspunkt wichtiger Schifffahrtsrouten –, eine große Vielfalt an Sprachen und Kulturen sowie die Eigenschaft, Waren vor dem Weiterleiten zu transformieren und aufzuwerten.
- Die Hallenser Wissenschaftler erforschen als Beispiele unter anderem die Insel Mauritius und die malaysische Hafenstadt George Town.

Neues kommt von Newjex

jugend  forscht 2016
schüler experimentieren



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

www.jugend-forscht.de

Der Tiefsee auf den Grund gehen

Ihre Leidenschaft sind die Ozeane, der Meeresboden ist ihre Laborbank. **Antje Boetius** vom **Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie** in Bremen verfolgt dafür immer mehrere Ziele gleichzeitig: von Entdeckung bis Vorsorgeforschung, von Technologieentwicklung bis Wissenschaftskommunikation. Ein Tanz auf vielen Hochzeiten – in Gummistiefeln und Stiletto.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Vorträge im Ausland, Papierkram für die Expeditionsvorbereitung, Teambesprechungen, Kommissionen. „Wenn wir uns bald treffen wollen, dann kommen Sie doch am besten gleich – sonst wird das in den nächsten zwei Wochen sicher nichts mehr“, sagt Antje Boetius am Telefon. „Wie wäre es um fünf?“ Freitag, 17 Uhr – viele andere sind dann schon im Wochenende. Sie aber schiebt vor dem Feierabend noch das Interview dazwischen, denn sie glaubt an den Wert von Wissenschaftskommunikation und hat sich vorgenommen, Anfragen immer sofort zu beantworten.

„Ja, ich arbeite ziemlich viel“, sagt sie später, „ungefähr 14 Stunden am Tag. Und am Wochenende schreibe ich dann gern an Manuskripten – wirklich.“ Boetius betont das „wirklich“, als wolle sie keinen Zweifel daran aufkommen lassen, dass ihr die Arbeit Spaß macht. Doch man glaubt es ihr auch so. Es geht gegen Abend, und sie wirkt so frisch, als habe die Woche gerade angefangen. Kein Zweifel: Antje Boetius brennt für ihre Forschung.

Wenn man erzählen will, was sie alles macht, kommt man auf eine lange Liste. Die Meeresbiologin ist Leiterin der Brückengruppe „Tiefseeökologie

und -Technologie“ zwischen dem Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen und dem Alfred-Wegener-Institut (Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung) in Bremerhaven. Außerdem ist sie Professorin für Geomikrobiologie an der Universität Bremen und Vizedirektorin des Exzellenzclusters „The Oceans in the Earth System“ des Bremer Marum – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften. Sie tanzt also auf mindestens drei Hochzeiten zugleich – und das mit Erfolg.

ARTENVIELFALT IM MEERESBODEN

Leitthema ihrer Forschung ist die Rolle des Meeresbodens und seiner Bewohner innerhalb des Erdsystems. Ein großes Thema, denn der Meeresboden macht zwei Drittel der Erde aus, und die Vielfalt seiner Lebewesen übertrifft die an Land. Entsprechend vielfältig sind die Fragestellungen, mit denen Boetius sich beschäftigt. „Ungefähr alle fünf Jahre wechsle ich die Schwerpunkte – mal geht es um einen biogeochemischen Prozess wie den Verbrauch des Klimagases Methan, mal um die Biodiversität am Meeresboden, mal um die Reaktion mariner Ökosysteme auf die Meereisschmelze oder menschliche Eingriffe.“

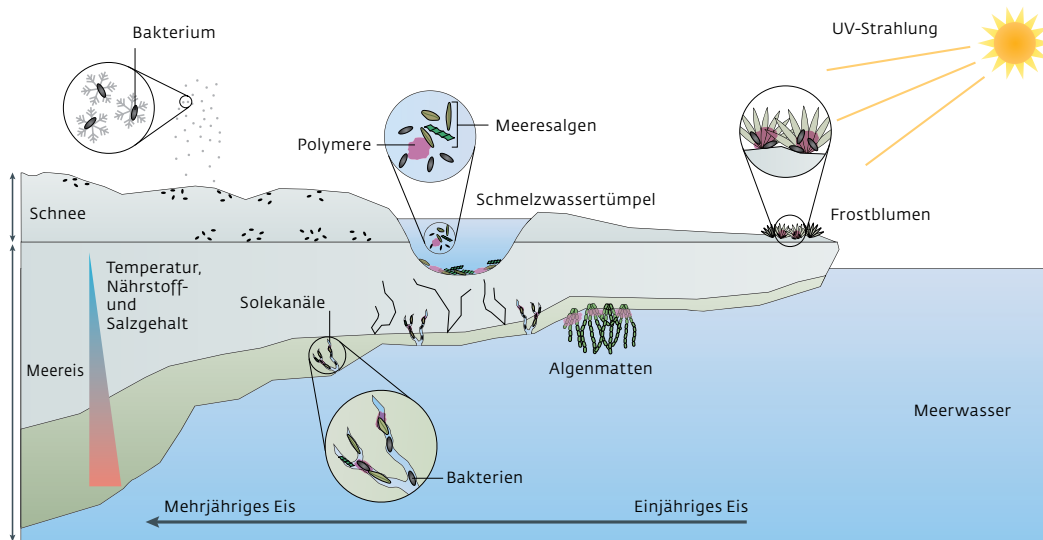
Aber egal, worum es geht, Boetius will möglichst viel draußen auf dem Meer unterwegs sein und Beobachtungen direkt in der Natur machen. Alles in allem hat sie mehrere Jahre ihres Lebens auf Forschungsschiffen verbracht. Wenn sie erzählt, klingt es wie die Sehnsucht eines alten Seebären nach dem Meer. „Ich sehe zu, dass ich wenigstens einmal im Jahr mit dem Schiff auf Expedition bin.“

Boetius ist Tiefseeforscherin und schon Dutzende Male mit Tauchbooten in das ferne Dunkel hinabgeglitten – im Atlantik, im Mittelmeer und im Indischen Ozean, im Pazifik und in den Polarmeeren. Im Licht der Scheinwerfer hat sie bleiche Tiefseefische, bunte Seegurken, bizarre Riesenwürmer und filigrane Schlangensterne gesehen. Am meisten aber interessiert sie sich für die kleinsten Lebensformen – die Bakterien. Die sind zwar winzig, doch ungemein wichtig. Denn mit ihrem Stoffwechsel setzen sie ungeheure Mengen an Substanzen um und beeinflussen damit sogar das Klima der Erde.

Boetius ist in Frankfurt am Main geboren und in Darmstadt aufgewachsen, weit weg von der See. Doch die Distanz zum Wasser macht sie mit ihrer Fantasie wett. Sie ist das erste Kind ihrer Eltern. Die Mutter ist Lehrerin und bringt ihr früh das Lesen bei – mit drei Jahren



Antje Boetius im Expeditions-Outfit: In der Expeditionshalle des Bremer Max-Planck-Instituts wird die Ausrüstung für die nächste Ausfahrt in Kisten gepackt. Links im Bild ein „Tiefseelander“, ein Freifallgerät, das in der Tiefsee die Atmung von Bakterien misst und auch Proben entnehmen kann. Die Forscher haben es zum ersten Mal unter geschlossener Eisdecke in der Nähe des Nordpols eingesetzt.



Mikroorganismen in der Atmosphäre bilden Kondensationskeime für Schneekristalle und gelangen so ins Eis der Arktis (links oben). Bakterien und einzellige Algen besiedeln Schnee, Eis, Schmelzwassertümpel und die sogenannten Frostblumen, obwohl sie dort starker UV-Strahlung durch die Sonne ausgesetzt sind. Die Mikroorganismen im Eis scheiden komplexe Moleküle (Polymere) aus, mit denen sie auch die Eisbildung beeinflussen. Wenn Meereis gefriert, werden das Salz und andere gelöste Stoffe als hochkonzentrierte Sole in winzigen Kanälen innerhalb des Eises eingeschlossen. Die Solekanäle, Schmelzwassertümpel und besonders auch die Unterseite des Meereises sind besondere Lebensräume für Mikroorganismen. Die Kieselalge *Melosira arctica* kann dicke Biofilme unter dem Eis bilden.

schon fängt sie an zu lesen, als Jugendliche schmökert sie am liebsten in Büchern. Piratenromane, *Die Schatzinsel*, *Moby Dick* und alles von Jules Verne. Das liebt sie.

Sie sieht kaum fern, und wenn, dann die Tauchfilme von Hans Hass und seiner Frau Lotte sowie die Abenteuer von Jacques-Yves Cousteau. „Das war toll. Expeditionen als Beruf, Leben auf Jachten, Forschung im Bikini, Abenteuer unter Wasser, all das hat mich begeistert.“ In dieser Zeit trennen sich ihre Eltern. Doch für die Ferien kommt die Familie wieder zusammen. Antje, die Geschwister, die Mutter und der Vater mit seiner neuen Lebensgefährtin fahren gemeinsam ans Meer, meist an den Atlantik – nach Irland, Frankreich oder Norwegen. Sie campen wild, paddeln mit dem Schlauchboot am Ufer entlang, suchen im glasklaren Wasser nach Tieren.

Als sie zwölf ist, bekommt sie von ihrem Vater eine kleine Naturforscher-Ausrüstung: eine Wetterstation, ein Binokular, eine Stereolupe und eine kleine Zentrifuge. Sie weiß früh, was sie will: studieren in Hamburg, wo viele Schiffe sind und das Meer zum Greifen nah ist. Sie will das Meer erleben, als Forscherin.

Boetius hat sich ihren Berufswunsch erfüllt. Heute ist sie vor allem in der Arktis unterwegs, oft mit dem deutschen

Forschungseisbrecher *Polarstern*, der ihr ermöglicht, das eisbedeckte Nordmeer zu erkunden. Sie will verstehen, wie der Klimawandel das Leben verändert: die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Eis, die Algenproduktion im Wasser und damit auch die Nahrung für Tiefseegemeinschaften, die Ablagerungen im Sediment.

EISSCHMELZE IN DER ARKTIS

Als sie 2012 in der Arktis unterwegs war, schmolz das arktische Meereis stärker, als Forscher es je zuvor beobachtet hatten. Das Eis war dünn und übersät mit Schmelzwassertümpeln, dadurch war es unter dem Eis besonders hell. Die Meeresalge *Melosira arctica* konnte unter diesen Bedingungen besonders gut wachsen und dichte, tangartige Wälder unter dem Eis bilden. Doch bei der starken Erwärmung schmolz das Eis, und die Algen sanken in faustgroßen Klumpen in die Tiefe.

Boetius und ihre Kollegen schickten Kameras zum Meeresboden, die erstaunliche Bilder lieferten: Der sonst eher wüstenartige Grund der zentralen Arktis war mit einem grünen Algenteppich bedeckt. Nur wenige Seegurken und Schlangensterne konnten etwas mit den *Melosira*-Klumpen anfangen.

Die Tiefseemessungen des Max-Planck-Instituts zeigten, dass vor allem Bakterien die Nahrung verwerten und lokal den Sauerstoff im Boden aufzehren. Diese unerwartete Reaktion des arktischen Ökosystems auf die Eisschmelze konnten die Forscher schon an Bord in einer Veröffentlichung beschreiben.

2014 folgte die nächste Arktis-Expedition zu einem ganz anderen Thema. Diesmal war Boetius mit einem Team unterwegs, um den Gakkelrücken nördlich von Grönland zu erkunden. Hier wurden an einem Seeberg heiße Quellen und besondere Lebensgemeinschaften am Meeresboden vermutet, vier Kilometer unter dem Eis. Solche Quellen sind von den mittelozeanischen Rücken bekannt, wo neue Erdkruste gebildet wird und die Ozeanplatten auseinanderdriften. Das Meerwasser dringt dort tief in den Boden ein, wird an Magmakammern aufgeheizt, reagiert mit dem Gestein und schießt voller Energie und Mineralien wieder in den Ozean. So liefern heiße Quellen eine Nahrungsgrundlage für Bakterien und diese wiederum für höheres Leben. Dort blüht das Leben wie sonst an kaum einem Ort in der Tiefsee.

In der Arktis hatte allerdings bislang niemand das Leben an den heißen Quellen beobachtet, weil das Meereis den Weg versperrte. Seit 2001 gab es

Hinweise auf erstaunlich starken Hitzeausstoß und Rauchfahnen im Meer, doch keine Bilder von diesen extremen Lebensräumen im eiskalten Polarmeer. Boetius und ihr Team aber hatten einen Plan – und jede Menge Glück: Von der *Polarstern* aus konnten sie Unterwasserfahrzeuge auch bei voller Eisbedeckung einsetzen und den Boden absuchen. Am letzten Tag der Expedition klappte es: Kleine Schlote kamen ins Bild, sogenannte Schwarze Raucher, umgeben von fremdartigen Gärten aus weißen Glasschwämmen. Das internationale Team arbeitet gerade die Ergebnisse auf. Sie wollen beweisen, dass die Spreizung des Arktischen Ozeans anders funktioniert als angenommen. Es sind solche Entdeckungen, die Antje Boetius begeistern.

Ihre ersten Schritte in die Wissenschaft macht sie schon früh: Der Biologieunterricht in der Schule mit all den Beschreibungen von Pflanzen und Tieren langweilt sie zwar, doch als sie 1986 das Abi in der Tasche hat, geht sie nach Hamburg, um Meeresbiologie zu studieren. Ein Verwandter schlägt ihr vor, sich am Hamburger Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft bei dem Tiefseeforscher Hjalmar Thiel zu melden.

Thiel gehört zu den Wissenschaftlern, die damals das Leben auf den Manganknollenfeldern am Grunde des Pazifiks untersuchen. Es gibt erste Überlegungen, die Knollen großflächig abzubauen. Im internationalen Projekt DISCOL pflügen die Wissenschaftler um Hjalmar Thiel und Gerd Schriever einige Quadratkilometer Meeresboden, um zu untersuchen, wie das Leben in der Tiefsee auf einen solchen Eingriff reagiert. Der Abbau von Manganknollen scheint damals kurz bevorzustehen, aber es fehlt an ökologischen Untersuchungen zu den Folgen.

Thiel lädt die Abiturientin zu einem Gespräch ein. Zuerst rät er ihr, als Basis Biologie in aller Breite zu studieren und sich nicht zu früh festzulegen. Doch Antje Boetius weiß schon jetzt, dass sie



Auf einer Expedition mit dem Forschungsschiff *L'Atalante* ins Mittelmeer untersuchte Boetius im Jahr 2003 Tiefsee-Schlammvulkane.

eigentlich nur aufs Meer will. „Er sagte mir, dass ich mich wieder bei ihm melden könne, wenn ich das Vordiplom in der Tasche habe.“ Antje Boetius ist Jahrgang 1967, ein Babyboomer-Jahrgang. Die Hörsäle und Praktika sind rappellvoll, für die interessanten Kurse gibt es lange Wartelisten. Sie muss für ihr Stu-

dium Geld verdienen und jobbt als Kellnerin in einer Pizzeria und als Sekretärin in einer Versicherung – „eine eigenartige Welt“, sagt sie, „in der sich alles um Geld dreht“. Der Höhepunkt im Grundstudium ist eine erste kleine Schiffsreise, die sie endgültig überzeugt: Sie gehört auf ein Forschungsschiff. >

Mit Beginn des Hauptstudiums 1989 kann sie sich endlich auf die Meeresforschung konzentrieren. Sie besucht alle Vorlesungen, die etwas mit Wasser zu tun haben, auch die Tiefsee-Vorlesung von Thiel. Dann sucht er Hilfskräfte für eine größere Reise mit dem Forschungsschiff *Meteor* in den Nordostatlantik, zu ihrer Freude erhält sie einen Platz. Doch bevor die Fahrt beginnt, wartet Thiel mit einer Überraschung auf. Er fragt, ob sie an einem Austauschprogramm teilnehmen wolle – ein Platz am Scripps-Institut für Ozeanografie in den USA sei frei. Scripps in La Jolla, eines der weltweit bekanntesten Meeresforschungsinstitute, direkt am Surfstrand! Gleich nach der ersten großen Reise mit der *Meteor* für ein Jahr ins Ausland gehen, die Jobs aufgeben und das Studium unterbrechen? Boetius denkt nicht lange nach und packt die Koffer für die Reise in die USA.

Eine Entscheidung, die sie nicht bereut. Sie ist begeistert von der direkten Ansprache und der Zuwendung, mit der die Forscher dort den Studenten begegnen. Boetius belegt so viele Praktika und Kurse, dass ihr die Zeit am Scripps in Hamburg komplett als Hauptstudium angerechnet wird. Jetzt muss sie nur noch ihre Diplomarbeit schreiben. Sie nimmt dafür gleich an mehreren

Forschungsfahrten teil, auf einer davon lernt sie ihren späteren Lebensgefährten kennen, einen Bootsmann aus Bremerhaven. Boetius packt die Erkenntnisse von über vier Monaten Expedition in ihrer Diplomarbeit zusammen. „Das war knapp kalkuliert, aber ich habe so viel gelernt.“

BREMERHAVEN STATT USA

Ihr ist längst klar, dass sie in der Forschung bleiben will und dass als Nächstes die Doktorarbeit folgen muss. Sie hat sich auf den Forschungsfahrten bereits in die Mikrobiologie des Meeresbodens eingearbeitet. Nur weiß sie noch nicht, wo sie ihre Doktorarbeit schreiben soll. Sie sehnt sich nach den USA, der Atmosphäre an den Instituten in Kalifornien. Andererseits hat sie ihren Freund in Bremerhaven. Die Entscheidung fällt, als ihr Mentor vom Scripps ihr den entscheidenden Rat gibt: Wenn sie in Sachen Tiefsee-Mikrobiologie vorankommen wolle, dann gebe es keinen besseren Platz als bei Karin Lochte am Alfred-Wegener-Institut, der heutigen Direktorin des Helmholtz-Zentrums. So bleibt Boetius in Bremerhaven.

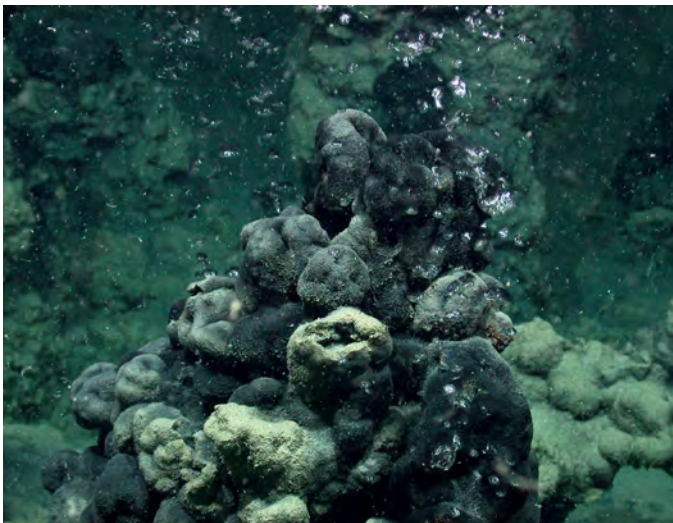
Für ihre Doktorarbeit gelangt Boetius 1993 das erste Mal mit der *Polarstern* an den sibirischen Kontinental-

rand. Sie nimmt Proben aus der eisbedeckten Tiefsee und analysiert, wie der Nahrungsmangel die Aktivität der Bakterien am Meeresboden beeinflusst. „Meine Doktorarbeit war noch kein Knüller“, sagt sie. „Aber heute sind die Proben von damals ein Schatz für neue Untersuchungen. Niemand konnte sich damals vorstellen, dass wir hier nur 20 Jahre später in völlig eisfreien Gefilden arbeiten werden.“ So sind ihre Daten heute eine wichtige Referenz, wenn es um die Frage geht, wie sich die arktischen Bakteriengemeinschaften mit dem Klimawandel verändern.

„Ich war in dieser Zeit fast die Hälfte des Jahres auf See und habe nur in Expeditionen gedacht. Ich wollte einfach nur draußen sein und hatte weniger meine Karriere im Blick“, sagt sie heute selbstkritisch. Dabei ist es wichtig, als Forscherin auch die Rahmenbedingungen für Wissenschaft im Blick zu haben, neue Methoden kennenzulernen, sich sein eigenes Forschungsgebiet zu erschließen. „Das sage ich heute meinen Doktoranden, denn es ist noch schwieriger geworden, früh selbstständig zu werden.“

Zunächst geht sie als Postdoktorandin zusammen mit Karin Lochte an das Institut für Ostseeforschung in Warne-

Im Schwarzen Meer besiedeln Bakterien Gasquellen in 260 Meter Tiefe und bilden mehrere Meter hohe Türme; diese werden im Innern von Kalk gestützt (links). Mit einer Gasglocke messen die Forscher in 850 Meter Tiefe den Gasausstoß an einer kalten Quelle im Schwarzen Meer (rechts).





Boetius und ihr Kollege Torben Kluge vor einer Tauchfahrt. Mit dem Forschungs-U-Boot *Jago* untersuchten die Wissenschaftler im Jahr 2010 sauerstofffreie Zonen im Schwarzen Meer. Im Hintergrund das deutsche Forschungsschiff *Maria S. Merian*.

münde, arbeitet einige Zeit im Indischen Ozean. Zu dieser Zeit, Mitte der 1990er-Jahre, kommen gerade neue molekularbiologische Techniken auf, mit der Forscher aus dem Erbgut von Bakterien deren Verwandtschaftsbeziehungen herauslesen können, besonders durch den Vergleich der Nukleinsäuren der Ribosomen (16S-rRNA-Gensequenzierung). Die Meeresmikrobiologen nutzen die Methoden und bestimmen damit die Vielfalt unbekannter Mikroorganismen sowie deren Verteilung und Aktivität.

1999 wechselt Boetius deshalb ans Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie und lernt dort neue Methoden der Meeresmikrobiologie kennen. Damals werden gerade die Methanvorkommen im Meer ein großes Thema. Methanhydrat – auch Gashydrat genannt – ist eine feste, eisähnliche Verbindung zwischen Meerwasser und Methan, die sich in großer Tiefe bei niedrigen Temperaturen bildet. Solche Hydrate gibt es an vielen Stellen in den Ozeanen. Weltweit sind Wissenschaftler fasziniert, denn Hydrate könnten

einerseits eine interessante Energiequelle darstellen, aber auch Hangrutschungen und Tsunamis verursachen. Außerdem tobt an ihnen das Leben: seltsame Würmer, Muscheln und unbekannte Mikroorganismen.

METHAN ALS NAHRUNGSQUELLE

Aber niemand weiß, wovon sich die Tieransammlungen an Gashydraten ernähren, denn bislang ist kein Lebewesen bekannt, das Methan direkt nutzen kann. Es gibt allerdings die Vermutung, dass Organismen aus dem Reich der Archaeen das Methan abbauen und so Energie gewinnen könnten. Boetius kann an einer Ausfahrt des GEOMAR zum pazifischen Hydratrücken teilnehmen und untersucht Sedimentproben. Sie kombiniert dabei die 16S-rRNA-Sequenzierung mit einer weiteren Nachweismethode, der sogenannten Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH). Mit dem FISH-Verfahren lassen sich die in einer Probe vorkommenden Bakterienarten anhand ihres genetischen Fingerabdrucks mikroskopisch unter-

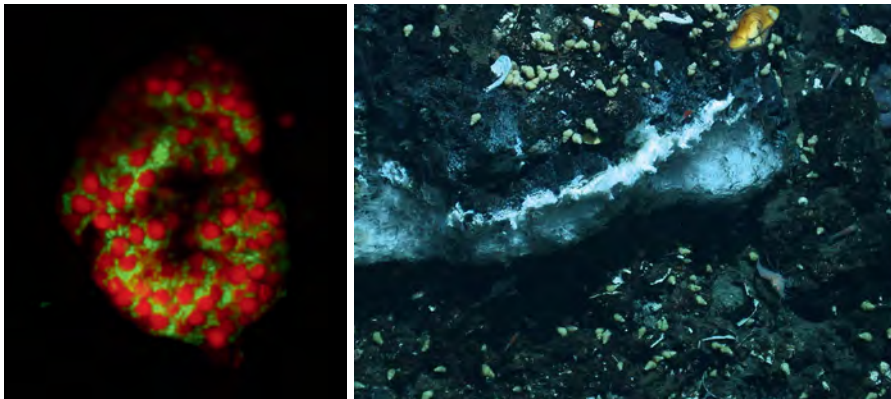
scheiden. Dabei docken mit Fluoreszenzfarbstoffen markierte spezifische Nukleinsäure-Moleküle an den Ribosomen bestimmter Bakterien an und bringen diese zum Leuchten.

Merkwürdigerweise scheinen unter Boetius' Mikroskop immer zwei Zelltypen auf, die aneinander festzuwachsen scheinen: Bakterien, die Schwefelverbindungen verarbeiten, und Mikroben aus dem Reich der Archaeen. Schließlich dämmert es ihr: Das Methan im Meeresboden wird von beiden gemeinsam verarbeitet. Die Lösung für das Rätsel um das Leben auf den Hydraten ist Kooperation! Die Bakterien verschaffen den Archaeen die richtigen energetischen Bedingungen für die Methanatmung und profitieren im Gegenzug von deren Abbauprodukten.

Das angesehene Fachmagazin *Nature* veröffentlicht die Geschichte um die Archaeen-Bakterien-Symbiose, die erste Hinweise auf die „anaerobe Methanoxidation“ an Gashydraten gibt. Sie stößt auf großes Interesse in den Lebens- und Erdwissenschaften, denn Methan ist ein starkes Treibhausgas. >

Links Leuchtendes Duo: Eine Ansammlung methanoxidierender Archaeen (rot) und ihrer Symbiosepartner (grün). Die Farben werden durch Nukleinsäuren erzeugt, die mit fluoreszierenden Farbstoffen markiert sind.

Rechts Methanhydrat im Golf von Mexiko in fast 3000 Meter Wassertiefe. Mikroorganismen ernähren sich vom darin enthaltenen Methan und dienen wiederum Würmern, Schnecken und Krebsen als Nahrung.



Seit Jahrzehnten fragt sich die Fachwelt, warum der gasreiche Ozean so wenig Methan in die Atmosphäre entlässt und wie sich das Klima verändern wird, wenn sich die Methanhydrate durch die Erwärmung des Meeres auflösen sollten.

SPRUNG AUF DER KARRIERELEITER

Boetius hat einen Volltreffer gelandet. Noch als Postdoktorandin kann sie am Max-Planck-Institut ein großes Projekt zur Erforschung der Mikrowelt auf den Hydraten starten, das vom Bundesforschungsministerium gefördert wird und an dem sich alle Abteilungen des Bremer Instituts beteiligen. Dann geht es Schlag auf Schlag. Weitere Projekte folgen. 2003 übernimmt sie am Bremer Max-Planck-Institut die Arbeitsgruppe „Mikrobielle Habitate“. Im selben Jahr wird sie Professorin an der International University Bremen, dem Vorläufer der Jacobs University.

Sie startet etliche neue Projekte zur Tiefseeforschung, viele in Kooperation mit Forschern aus anderen Ländern. 2008 baut sie die Brückengruppe zwischen dem Max-Planck-Institut und dem Alfred-Wegener-Institut auf und erhält eine Professur für Geomikrobiologie an der Universität Bremen. Neben den Projekten zur Entdeckung ex-

tremer Lebensräume und der Funktion des Methanabbaus kommen auch wichtige Fragen der Vorsorgeforschung hinzu. Was geschieht, wenn das Meer versauert? Wie reagieren mikrobielle Gemeinschaften auf Sauerstoffmangel und Überdüngung? Wann erholt sich der Meeresboden nach der Entnahme von Manganknollen?

„Ich habe einfach immer Lust auf neue Aufgaben“, sagt Antje Boetius. „Man muss dem Zufall eine Chance geben, einen zu finden.“ So wie damals, als sie bei Thiel anklopfte. Oder während des Studiums, als sie zur Platzvergabe für die Forschungsreise antrat, obwohl sie eigentlich kaum Chancen auf einen Platz hatte.

Eigeninitiative verlangt sie heute auch ein Stück weit von ihren mehr als 60 Mitarbeitern. „Wir arbeiten in wechselnden Teams an Projekten, jeder Doktorand und Techniker hat mehrere Ansprechpartner – und ich bin immer per E-Mail zu erreichen.“ Und noch etwas ist ihr wichtig: „Wenn wir gemeinsam auf eine Forschungsfahrt gehen, lernt man sich in allen Lebenslagen kennen. Das schafft Vertrauen.“

Seit 2006 ist Boetius regelmäßig Fahrleiterin. Sie koordiniert die wissenschaftlichen Aufgaben an Bord und stimmt die Forschungsarbeit mit dem Kapitän und der Mannschaft ab. Denn

auf einem großen Forschungsschiff sind meist Forscher vieler Fachrichtungen zusammengewürfelt, die ganz verschiedene Experimente und Fragestellungen haben. Als Fahrleiterin folgt sie ihrem Vorbild Hjalmar Thiel und dessen Kollegen. „Ich habe damals gelernt, dass man an Bord hart arbeiten muss, damit alle Einsätze und Probennahmen in der kurzen Zeit klappen – dass man Pausen aber auch zum Feiern und Tanzen nutzen sollte, denn mit guter Stimmung geht alles besser.“ Dafür hat sie neben Gummistiefeln auch immer Pumps an Bord.

Als Fahrleiterin ist sie von früh bis spät auf den Beinen, geregelte Zeiten gibt es nicht, denn das Schiff arbeitet rund um die Uhr. Wichtig ist der gute Kontakt zur Mannschaft. „Als Forscher sind wir ja nur Gäste an Bord. Ich bin auf die Mannschaft angewiesen, denn diese Leute haben die langjährige Erfahrung mit Schiff, Wetter und unseren Forschungsgeräten.“ Sie achtet zum Beispiel darauf, dass die Bilder, die gerade von einem Unterwasserroboter aus der Tiefe zum Schiff geschickt werden, auch auf der Brücke zu sehen sind und die Mannschaft die Forschungsaufgabe versteht. „Damit alle teilhaben können.“

Doch auch jenseits der Expeditionen hat Boetius vielfältige Leitungsfunktionen übernommen, beispielsweise Vorsitzende der Wissenschaftlichen Kommission des Wissenschaftsrats der Bundesregierung und Leiterin des Ausschusses „Forschungsbauten“. Das Gremium bewertet jedes Jahr Anträge zum Bau von Forschungsgebäuden an Hochschulen, mit einer Gesamtsumme von 450 Millionen Euro im Jahr. Boetius ist immer wieder begeistert von dem Vertrauen, das in sie und die anderen Mitglieder des Wissenschaftsrats gesetzt wird, die besten Konzepte auszuwählen. „Immerhin entscheiden wir ja über Anträge aus den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen.“ Sie freut sich über das positive Echo, das sie



Im Sommer 2012 tritt Boetius mit den Moderatoren Willi Weitzel (links) und Guido Cantz (Zweiter von rechts) in der ARD-Sendung *Tietjen und Hirschhausen* auf. Mit solchen Auftritten will sie Interesse für Wissenschaft und den Ozean wecken.

in allen Gremien erfahren hat, und die Vielfalt der Erlebnisse und Kontakte. „Manchmal wundere ich mich selbst – eben noch im Ölzeug an Bord, dann im Cocktailkleid beim Bundespräsidenten. Aber ich bin mir sicher: Auch im Wissenschaftsmanagement kommen mir meine Erfahrungen mit steifen Brisen, starkem Seegang und dem allzeit weiten Horizont zugute.“

Auch die Wissenschaftskommunikation ist Boetius wichtig. Derzeit ist sie Leiterin des Lenkungsausschusses von „Wissenschaft im Dialog“, einer Initiative der deutschen Forschungsorganisationen. Fernsehen, Radio, Podcasts und Zeitungsartikel – sie beantwortet alle Anfragen, vor allem von Kindern, die sie fragen, wie sie Meeresforscher werden können und wie viel Geld man damit verdient. Die Kinderbriefe sammelt sie in einem Aktenordner. Sie liebt die Gespräche mit den Kleinen, nicht nur weil die sie an ihre eigenen Anfänge als Wissenschaftlerin erinnern, sondern „weil diese Grundneugier auf alles in der Welt doch so entscheidend und für mich als Forscher noch immer Antrieb ist“.

„Entdeckungsforschung“ nennt sie das, was sie heute tut. Sie will die Vielfalt von Ökosystemen und die räumli-

che Verteilung von Lebewesen in unbekannteren Regionen der Tiefsee verstehen, nicht zuletzt um auch zu sinnvollen Schutzkonzepten für das Meer zu kommen. Entdeckungsforschung im Sinne von Humboldt? Sie lacht: „Nein, eher im Sinne von Maria Sibylla Merian, der

Frankfurter Naturforscherin aus dem 17. Jahrhundert. Es gab ja auch einflussreiche Entdeckerinnen.“ Wahrscheinlich steckt in ihr aber nicht nur der Geist Maria Merians. So wie sie strahlt, wenn sie von ihrer Arbeit erzählt, könnte auch ein wenig Lotte Hass mit dabei sein. ◀

GLOSSAR

16S-rRNA-Gensequenzierung: Die 16S-ribosomale RNA ist eines von drei RNA-Molekülen, die in den Ribosomen von Bakterien die Bildung von Proteinen kontrollieren. Das 16S-rRNA-Gen verändert sich nur sehr langsam durch Mutation. Es eignet sich daher sehr gut dafür, verwandtschaftliche Beziehungen zwischen Bakterien zu bestimmen. Mit der Analyse von 16S-rRNA-Genen können Forscher nicht nur die Artenvielfalt in einer Probe identifizieren, sondern auch, wie häufig die einzelnen Arten darin vorkommen.

Archaeen: Archaeen sind Einzeller ohne Zellkern. Früher wurden sie auch als Archaeobakterien oder Urbakterien bezeichnet. Ihre Zellen sind aber deutlich anders aufgebaut als Bakterienzellen, deshalb werden sie inzwischen neben den Bakterien und Organismen mit Zellkern als eine dritte Domäne des Lebens geführt. In manchen Eigenschaften stehen sie den Zellen mit Kern sogar näher als die Bakterien. Viele Arten sind an extreme Umweltbedingungen angepasst, man findet sie zum Beispiel in heißen Quellen der Tiefsee oder in Salzseen.

Methanhydrat: Methanhydrat, auch Gashydrat genannt, besteht aus Methan, das in Wasser eingelagert ist. Im Meer bildet es sich im methangesättigten Porenwasser des Meeresbodens, wo der Druck hoch und die Temperatur niedrig genug ist: in der Arktis schon in etwa 300 Metern. Die Umgebung von Methanhydraten ist besonders artenreich, da einige Mikroorganismen das Methan zur Energieerzeugung nutzen können. Ihre Abfallprodukte wie Schwefelwasserstoff werden wiederum von anderen Mikroben sowie Muscheln, Würmern und Krebsen genutzt, die mit Bakterien in Symbiose leben. Offenbar gibt es weit mehr Methanhydrat auf der Erde als Erdöl und Erdgas. Der Abbau und die Nutzung zur Energiegewinnung sind jedoch technisch schwierig und daher noch nicht wirtschaftlich.

Wissen Sie, wie man „Berufungsliste“, „Blockseminar“ oder „Präsenzstudium“ ins Englische übersetzt? Oder welche Entsprechung der Ausdruck „die Anerkennung von Studien- und Prüfungsleistungen beantragen“ im Englischen findet? Dirk Siepmann | **Wörterbuch Hochschule | Forschung, Lehre und Management | Deutsch – Englisch | Englisch – Deutsch**



Gebundene Ausgabe, 2. unveränderte Auflage 2016, 476 S., 19,90 € (D) inkl. Porto, für DHV-Mitglieder zum Sonderpreis von 17,90 € inkl. Porto | **Zu bestellen über:** Deutscher Hochschulverband, Rheinallee 18–20, 53173 Bonn, Tel. 0228 9026666, Fax 0228 9026680 oder per Mail: dhv@hochschulverband.de

Dirk Siepmann ist Professor für Fachdidaktik des Englischen an der Universität Osnabrück. Er verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung in Fremdsprachendidaktik, Übersetzungswissenschaft und Lexikographie.

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**

Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Impressum

MAXPLANCKFORSCHUNG wird herausgegeben von der Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin.
ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8
80539 München
Telefon: 089 2108-1719 / -1276 (Fax: -1405)
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpf-mobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

Redaktion

Dr. Elke Maier (Biologie, Medizin; -1064)
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)
Mechthild Zimmermann (Kultur, Gesellschaft; -1720)

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Ostertag
Voßstraße 9
81543 München
Telefon: 089 2781 8770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho

KSA Media GmbH
Zeuggasse 7
86150 Augsburg

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Beatrice Rieck
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg
Telefon: 0931 4600-2721 (Fax: -2145)
E-Mail: beatrice_rieck@vogel-druck.de

MAXPLANCKFORSCHUNG berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MAXPLANCK-RESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 85 000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MAXPLANCKFORSCHUNG** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 83 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 22 200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6 000 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2016 umfasst insgesamt 1,6 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

MAXPLANCKFORSCHUNG wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council® (FSC®)



Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft
als ePaper: www.mpg.de/mpf-mobil

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!

