



# 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. **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**

**E**s 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 hydrothermaler 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.“ Genauer gesagt: die Bakterien, die die Kiemen der Meeresmuschel *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 wegbeugen 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).



Fotos: Marum (links), Museum für Naturkunde, Berlin





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 verwerten 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 Meeresmuschel *Bathymodiolus puteoserpentis*.

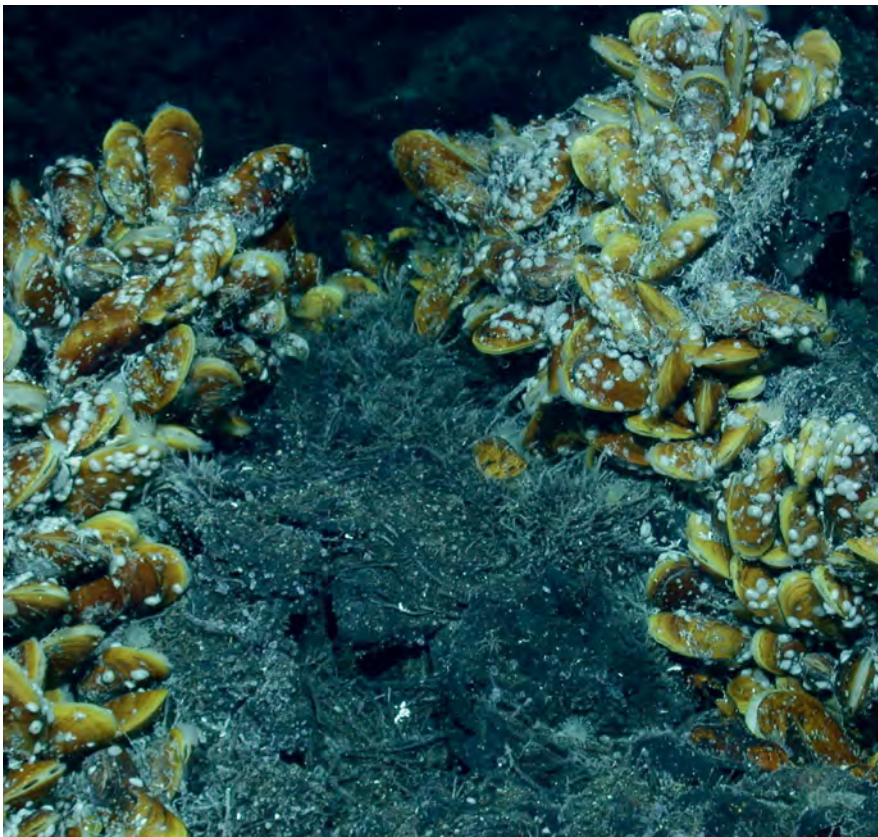
Auch die beherbergt zwei bakterielle Symbionten – einen Sulfidoxidierer

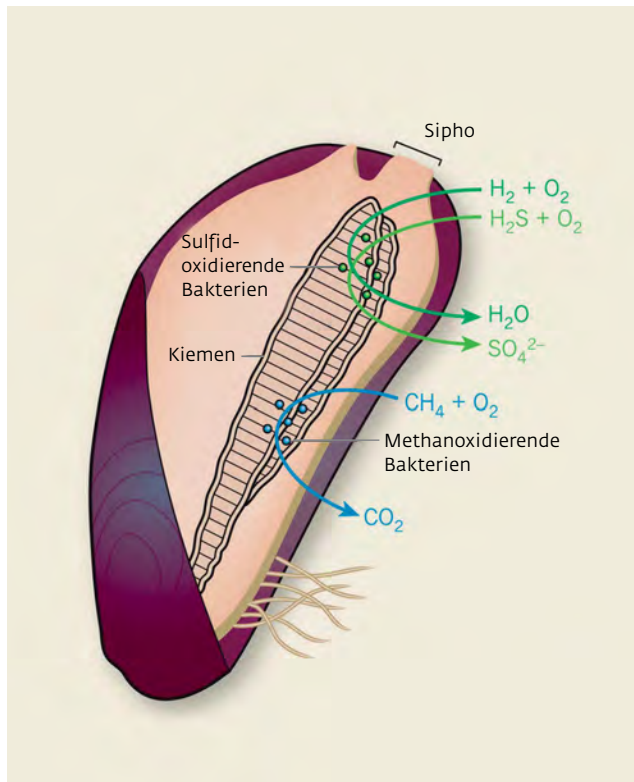
und einen Methanoxidierer, die allerdings unabhängig voneinander ihr Dasein innerhalb der Kiemenzellen des Tiers fristen. „Dass beide auch Wasserstoff als Energiequelle nutzen, vermuteten die Kollegen schon in den 1980er-Jahren“, sagt Nicole Dubilier. Denn zum einen ist Wasserstoff eine der besten Energiequellen 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 Tiefseemuschel *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 Sulfid-oxidierers 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.

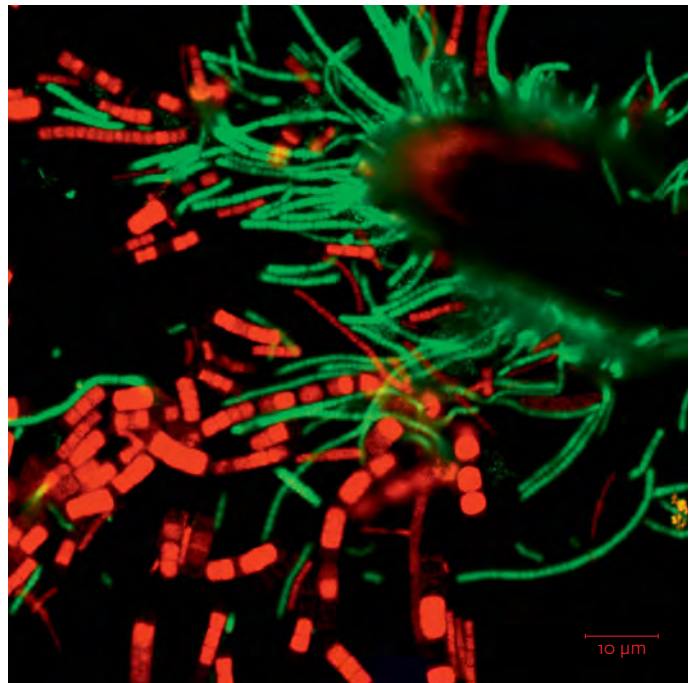
Mithin blieb kein Zweifel mehr: Die Mikroben und damit auch die vergesellschafteten Muscheln ernähren sich aus jener Energiequelle, die auch Menschen zu gern in großem Stil nutzen würden, bislang aber wenig effektiv. Ganz anders die mikrobiellen Untermieter der etwa

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





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](http://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](mailto:abo@verlag-jungewissenschaft.de)

Stichwort: „Vorteilsabo“

## Leseprobe anfordern!

[leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de](mailto: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](http://www.verlag-jungewissenschaft.de)