

Heißes Leben im Verborgenen

„Unendlich groß ist die Rolle des unendlich Kleinen in der Natur“, schrieb der französische Mikrobiologe Louis Pasteur bereits vor mehr als hundert Jahren. Daran hat sich bis heute nicht viel geändert. „Die Bedeutung der Mikroorganismen für die Umwelt“ hieß das Symposium, zu dem die Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am 30. April nach München eingeladen hat.

stoff mit Sulfat als Oxidationsmittel Methan oxidiert. „Lebende Fossilien“ nennt Dr. Wolfgang Ludwig von der Technischen Universität München die rRNA-Moleküle beziehungsweise ihre Gene heutiger Lebewesen.

„rRNA-Gene wurden im Laufe der Evolution der Organismen nur in einigen Stellen, den variablen Bereichen, verändert. Andere Stellen sind seit sehr langer Zeit gar nicht modifiziert worden“, erläuterte der Wissenschaftler. Somit codieren diese Gene in den wenig von Veränderungen betroffenen Bereichen Informationen zu früheren, länger zurückliegenden evolutionären Ereignissen. Die variablen Bereiche tragen dagegen Informationen zum späteren evolutionären Geschehen. Mithilfe bestimmter Software-Werkzeuge und Sequenz-Datenbanken können Forscher der stammesgeschichtlichen Entwicklung der Mikroorganismen auf die Spur kommen.

Inmitten von Vulkanausbrüchen, giftigen Schwefelschwaden, Blitzen und heißer Lava entwickelten sich möglicherweise vor mehr als 3,5

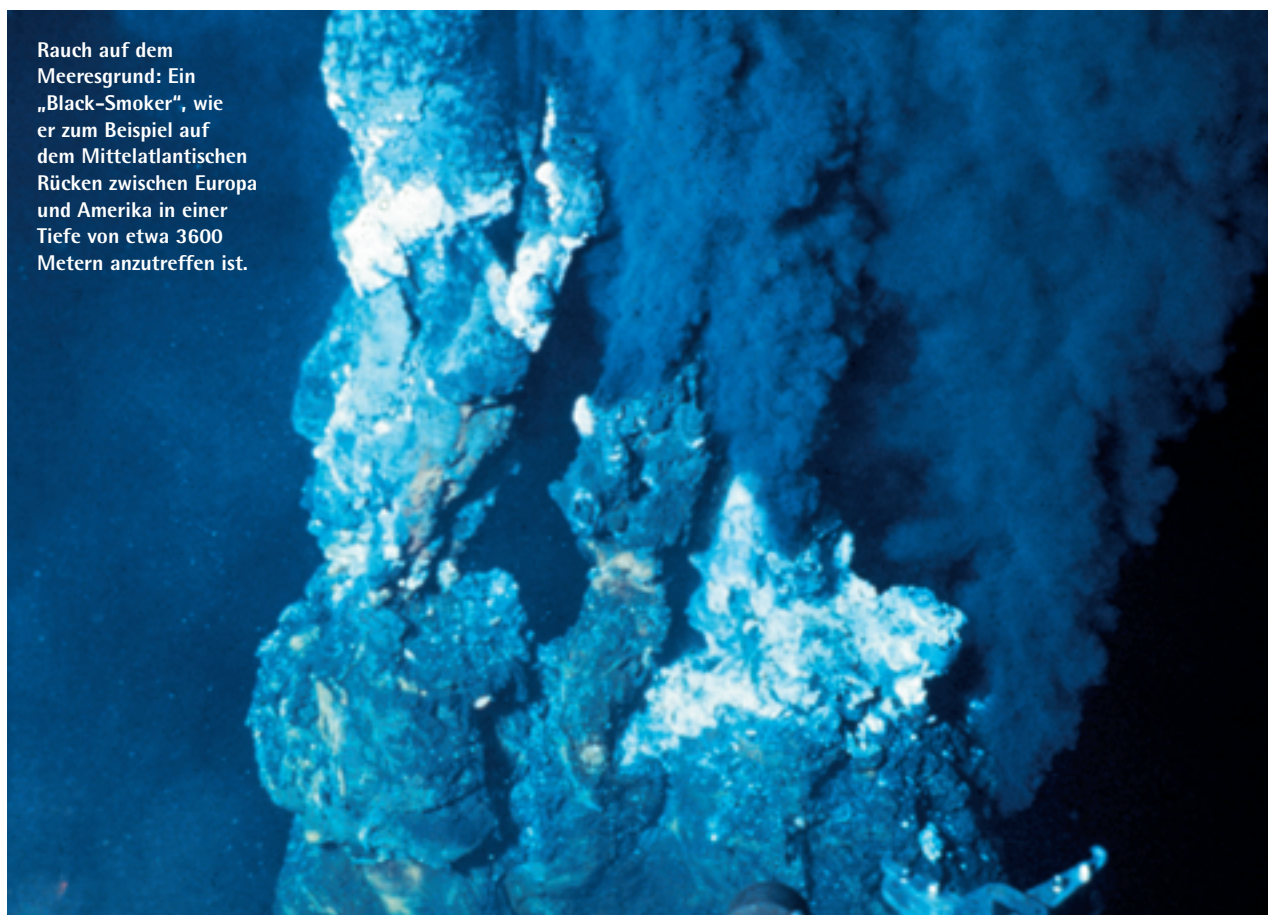
wer sie sind, woher sie kommen oder wie sie leben. Mehr als 99 Prozent aller in der Umwelt vermuteten Bakterien wurden bisher noch nicht im Labor gezüchtet. Das wäre jedoch notwendig, um sie ausgiebig untersuchen zu können. Ein Grund für diese Schwierigkeiten: Mikroorganismen leben in der Natur oft in enger Kooperation mit anderen Arten und benötigen Wachstumsbedingungen, die im Detail noch nicht verstanden sind. „Wir haben momentan höchstens ein Prozent aller existierenden Bakterienarten erfasst“, sagte PD Dr. Rudolf Amann vom Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie. Zum Vergleich: Von den Höheren Pflanzen sind bereits mehr als 80, bei Wirbeltieren mehr als 90 Prozent beschrieben.

DEN LEBENDEN FOSSILIEN AUF DER SPUR

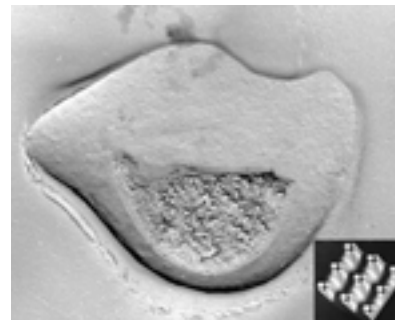
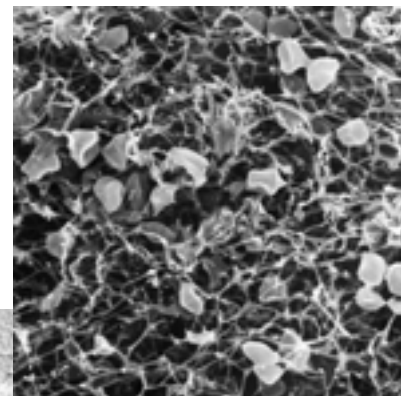
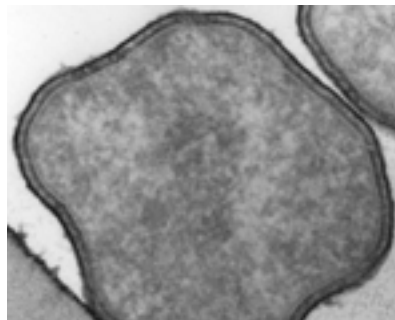
In den vergangenen Jahren haben molekularbiologische Methoden dazu beigetragen, mehr über die große Vielfalt der Mikroorganismen herauszufinden. „Eine Schlüsselstellung nimmt dabei die vergleichende Analyse der ribosomalen Ribonukleinsäuren, kurz rRNA, und ihrer Gene ein“, so Amann. Mit molekularbiologischen Tricks können Wissenschaftler diese als genetische Fingerabdrücke aus den meisten Lebensräumen gewinnen und Mikroorganismen identifizieren, ohne sie vorher züchten zu müssen. Ein Beispiel dafür ist ein Konsortium aus Bakterien und Archaeen, das ohne Sauer-

Zellkernlose Mikroorganismen, die *Bacteria* und *Archaea*, sind mit dem bloßen Auge nicht sichtbar und können sowohl an Vulkanen bei Temperaturen von mehr als 100 Grad Celsius als auch in kilometerdicken Eisschichten der Antarktis leben. „Allenfalls Schlagzeilen über neue Killerbakterien oder Fäkalkeime im Münchner Bier oder in Badeseen rücken sie ins Zentrum des öffentlichen Interesses“, sagte Prof. Karl-Heinz Schleifer von der Technischen Universität München in seinem Eröffnungsvortrag. Kaum jemand käme darauf, dass diese Lebewesen mehr als die Hälfte der auf der Erde vorkommenden Biomasse ausmachen, unentbehrlich zur Herstellung vieler Therapeutika, Medikamente und Genussmittel sind und bereits vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren auf der Erde gelebt haben. Selbst der gesunde menschliche Körper ist voll von ihnen: Zehn bis hundert Mal mehr Bakterien als eigene Zellen trägt jeder Mensch Tag für Tag mit sich herum.

Zellkernlose Mikroorganismen (Prokaryoten) gibt es überall dort, wo die physikalischen und chemischen Gegebenheiten prinzipiell die Existenz von Leben erlauben. Umgeben von riesigen Drücken, absoluter Dunkelheit und auch mal ohne Sauerstoff – in jeder dem Menschen noch so lebensfeindlich erscheinenden ökologischen Nische tummeln sie sich. Vieles im Reich der Prokaryoten liegt jedoch noch im Dunkeln, da Bakterien und Archaeen nicht anzusehen ist,



Rauch auf dem Meeresgrund: Ein „Black-Smoker“, wie er zum Beispiel auf dem Mittelatlantischen Rücken zwischen Europa und Amerika in einer Tiefe von etwa 3600 Metern anzutreffen ist.



Pyrolobus fumarii heißt der derzeitige „Temperatur-Weltrekordler“ unter den Mikroorganismen; sein Temperaturmaximum beträgt 113°C, sein Minimum liegt bei 90°C. Das Bild ganz rechts zeigt die Rekonstruktion des Oberflächenreliefs der Zelle.

Das Archaeobakterium *Pyrodictium abyssii* sowie das extrazelluläre Netzwerk aus langen Eiweißröhren, das die Zellen in ein großes Netz einbindet.

Nördlich von Island lebt in hundert Meter Tiefe *Ignicoccus islandicus*. Das Archaeobakterium wächst mit elementarem Schwefel und Wasserstoff zur Energiegewinnung und produziert Schwefelwasserstoff.

FOTOS: REINHARD RACHEL, UNIVERSITÄT REGENSBURG

Milliarden Jahren die ersten Lebewesen der Erde. „Das waren paradisi-sche Bedingungen für hyperthermo-phile, also Hitze liebende Organismen“, sagte Prof. Karl Otto Stetter von der Universität Regensburg. Er untersucht „kochfeste“ Bakterien und Archaeen, die an Temperaturen zwischen 80 und 113 Grad optimal angepasst sind; einige überleben sogar stundenlanges Kochen bei 121 Grad. Das sind Temperaturbereiche, in denen Zellbausteine wie Nukleinsäuren, Ribosomen und Enzyme normalerweise innerhalb von Sekunden zerstört werden.

Nicht so bei den hyperthermophilen Organismen. Je nach Art wach-

wicklungsgeschichtlich zweigen die hyperthermophilen Organismen häufig tief im rRNA-Stammbaum des Lebens ab, was auf einen heißen Ursprung des Lebens verweist“, meinte Stetter. Theoretisch könnten derartige Organismen sogar auf anderen Planeten existieren, denn sie sind nicht auf Sonnenlicht angewiesen und haben minimale Ansprüche an ihre Nahrung. Ohne Mikroorganismen wäre der vollständige Abbau von organischen Stoffen in anorga-

rien auch die hartnäckigsten Strukturen: Abgestorbene Pflanzen und Tiere zersetzen sie im Nu – selbst Erdöl wird langsam aber kontinuierlich verspeist. Da molekularer Sauerstoff durch die Wassersäule nur begrenzt nachgeliefert werden kann und der Transport im Sediment nur noch über Diffusion verläuft, kommt es im Sediment schnell zu einer vollständigen Aufzehrung des Sauerstoffs. Die Bakterien leben dann von alternativen, anaeroben Abbaupro-

zum Beispiel das Gas Kohlendioxid. Im globalen Kohlenstoff-Kreislauf wird anorganisch gebundener Kohlenstoff in Biomasse umgewandelt und diese vorwiegend durch Bakterien wieder zu Kohlendioxid abgebaut. Sulfat reduzierende Bakterien setzen in Meeresedimenten rund die Hälfte der verwertbaren Biomasse in Kohlendioxid um. „Die biochemischen Leistungen von Bakterien beeinflussen somit global wichtige biogeochemische Kreisläufe und das Klimageschehen auf der Erde“, erklärte Prof. Friedrich Widdel vom Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie.

Könnten bestimmte Mikroorganismen wie die Cyanobakterien als „Kohlendioxid-Fänger“ dazu beitragen, den Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre zu reduzieren? Zur Beantwortung der Frage haben Wissenschaftler in Experimenten Teile des Ozeans mit Eisen „gedüngt“. Normalerweise gibt es dort nur sehr wenig Eisen, was das Wachstum der Mikroorganismen begrenzt. Eine stärkere Vermehrung von Cyanobakterien und Algen im Ozean hätte zur Folge, dass große Mengen freien Kohlendioxids in die Lebewesen eingebaut und für lange Zeit der Atmosphäre entzogen würden. Erste Ergebnisse scheinen die Überlegungen zu bestätigen. Widdel dazu: „Die Erforschung der Meeresorganismen liefert daher nicht nur Informationen über das Stoffgleichgewicht im Meer und zwischen Meer und Atmosphäre, sondern ermöglicht auch Aussagen darüber, wie sehr der Mensch in globale Stoffkreisläufe eingreift.“

Eine große Anzahl von Mikroorganismen lebt in enger Gemeinschaft (Symbiose) mit Pflanzen und Tieren, die für beide Partner profitabel ist. Jeder Partner liefert Stoffe, die der andere alleine nicht produzieren kann. Einige Tausend Meter tief auf dem Meeresgrund, in den zentralen Tälern der Mittelozeanischen Rücken, haben Wissenschaftler heiße Quellen entdeckt, die mit Temperaturen von mehr als 300 Grad aus Spalten im Meeresboden hervorschießen. Der gewaltige Druck in dieser Tiefe

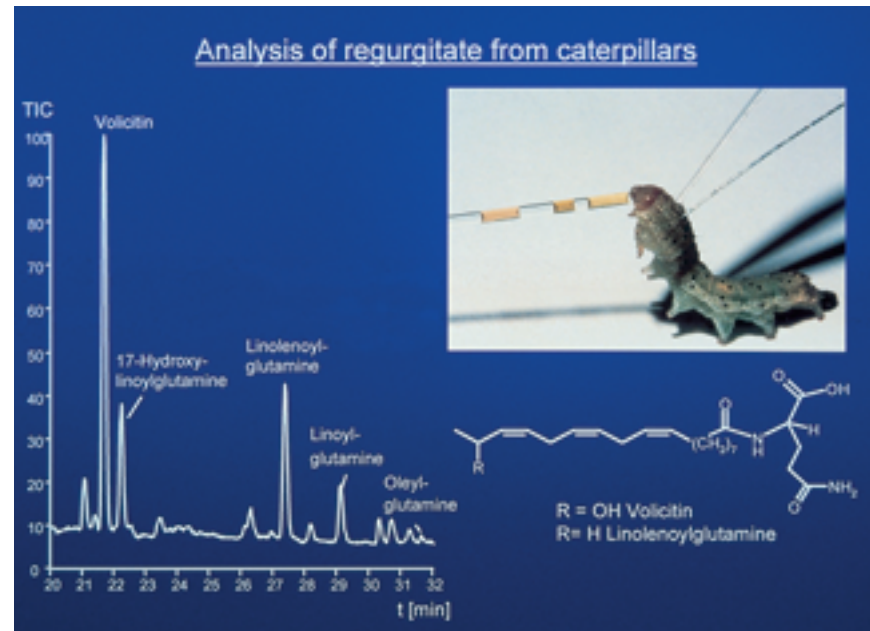
bewirkt, dass Wasser selbst bei so hohen Temperaturen nicht verdampft. Die heißen Flüssigkeiten enthalten viel Schwefelwasserstoff, der für Tiere normalerweise giftig ist. Für einige Bakterien ist diese nach faulen Eiern stinkende Verbindung jedoch ein Leckerbissen, der ihnen die Bindung von Kohlendioxid zu organischem Material ermöglicht. Rund um die heißen Quellen leben Tiere, von denen viele mit Schwefelbakterien vergesellschaftet sind. „In der absoluten Finsternis der Tiefsee beherbergen meterlange mund- und darmlose Röhrenwürmer symbiotische Mikroorganismen und versorgen sie über ein hoch entwickeltes Blutgefäßsystem mit Schwefelwasserstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid“, berichtete Prof. Jörg Ott, Institut für Ökologie und Naturschutz, Universität Wien.

SYMBIOSEN IN HÜLLE UND FÜLLE

Die Bakterien finden sich im Wurm nur in speziellen Organen, dem Trophosom. In einem vom Sonnenlicht unabhängigen Prozess, der Chemosynthese, oxidieren sie dort den vom Blut des Wurmes herantransportierten Schwefelwasserstoff zu Sulfat und reduzieren Kohlendioxid zu Biomasse. Im Gegensatz zur Photosynthese, bei der grüne Pflanzen Licht als Energiequelle benötigen, gewinnen die Bakterien hier ihre Energie durch Oxidation anorganischer Verbindungen. Die Symbiose ist so effektiv, dass Röhrenwürmer mit die höchsten Wachstumsraten aufweisen, die man von wirbellosen Tieren bisher kennt. Ähnliche Gemeinschaften fanden Forscherteams um Jörg Ott auch im Seichtwasser in nahezu allen Sandböden des Meeres. Dort grenzt eine wenige Millimeter dünne sauerstoffhaltige Oberflächenschicht an eine schwefelwasserstoffhaltige Sedimentlage.

Genau an der Grenze zwischen beiden Schichten leben mikroskopische Fadenwürmer, deren Haut mit Schwefelbakterien überzogen ist. Die beweglichen Würmer kriechen im Sediment umher und transportieren

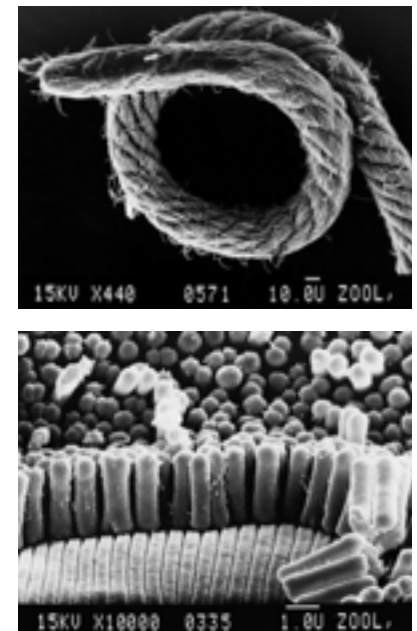
Die Körperoberfläche des marinen Nematoden *Eubostrichus topiarius* ist mit regelmäßig angeordneten bogenförmigen Bakterien von etwa 30 µm Länge bedeckt, die dem Wurm das Aussehen eines gedrehten Seiles geben. Auf der geringelten Kutikula von *Laxus oneistus* stehen aufrechte stäbchenförmige Bakterien dicht an dicht. Die hohe Ordnung wird durch die ungewöhnliche Längsteilung der Stäbchen aufrechterhalten.



Die Grafik zeigt die Analyse des Verdauungssekrets einer Schmetterlingslarve (*Heliothis virescens*) mit Fettsäurekonjugaten der Aminosäure Glutamin. Die Konjugate dienen vermutlich als Emulgatoren zur Verdauung der Nahrung; einige von ihnen wirken als Auslöser der pflanzlichen Duftproduktion.

sen sie bei Temperaturen unter 60 bis 80 Grad erst gar nicht. Zusammen mit anderen Faktoren macht sie besonders die Zusammensetzung ihrer Zellmembran resistent gegen Hitze. Eine wichtige hitzestabilisierende Rolle spielen auch spezielle Eiweiße in der Zelle. Temperatur-Spitzenreiter ist *Pyrolobus fumarii*, dessen Zellen sich selbst bei Temperaturen über 113 Grad unbekümmert teilen. „Ent-

nische Substanzen nicht möglich. Es gibt keine natürlichen Verbindungen, die nicht von Mikroorganismen umgewandelt werden können. „Ort des Geschehens ist meist der Boden an Land oder das Sediment im Wasser, denn dort leben rund 95 Prozent aller Mikroorganismen“, sagte Prof. Bernhard Schink von der Universität Konstanz. Bereits in einer Tiefe von einigen Millimetern knacken Bakte-



zessen. Als Endprodukte entstehen vor allem Schwefelwasserstoff und Methan, die wiederum von anderen Mikroorganismen verwertet werden können.

SCHALTSTELLEN FÜR GLOBALE STOFFKREISLÄUFE

Bakterien leben im offenen Ozean oft als „Hungerkünstler“ mit erstaunlich geringen Konzentrationen von Nährstoffen. Dennoch bilden oder verbrauchen sie weltweit jährlich Milliarden von Tonnen natürlicher Kohlenstoffverbindungen, wie



Im Gespräch vertieft (von links): Prof. Gerhard Drews, Universität Freiburg, PD Dr. Rudolf Amann vom Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie und Prof. Heinrich Nöth, Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.



Dialog unter Kollegen: Prof. Jörg Ott, Institut für Ökologie und Naturschutz, Universität Wien, und Prof. Karl-Heinz Schleifer vom Lehrstuhl für Mikrobiologie, TU München.



dabei ihren Bakteriengarten zwischen Oberfläche und tieferen Schichten. Sie versorgen so ihre Bakterien mit dem für die Chemosynthese notwendigen Schwefelwasserstoff und Sauerstoff. Der gegenseitige Nutzen beider Partner liegt darin, dass die Bakterien alle Stoffe bekommen, die sie zum Wachstum benötigen und der Wurm sich regelmäßig an ihnen satt frisst.

Eine symbiotische Gemeinschaft, in der ein ausgeklügeltes Wechselspiel verschiedener Bakterien eine entscheidende Rolle spielt, hat Dr. Nicole Dubilier vom Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie entdeckt: Hier versorgen ein

ge Substanzen wie Ammonium oder Nitrat aus dem Boden konsumieren. Besser haben es da viele Mikroorganismen, die den in Hülle und Fülle vorhandenen Stickstoff direkt aus der Luft nutzen können. Biologische Stickstofffixierung heißt dieser biochemische Prozess, in dem sie den gasförmigen Stickstoff reduzieren und in Verbindungen umwandeln, mit denen sie ihren Bedarf an dem lebenswichtigen Element decken.

Moderne Reissorten kooperieren normalerweise nicht mit Stickstoff fixierenden Bakterien. Anders ist es zum Beispiel beim Zuckerrohr: Hier übernehmen Bakterien bereits 50 bis 70 Prozent der Stickstoffversorgung.

Stickstofffixierung, Nitrogenase, produzieren. Eine Reihe von Genen sorgen dafür, dass Nitrogenase gebildet wird. Ein Gen davon haben die Forscher im Labor mit einem fremden Gen gekoppelt, das aus einer Tiefseequalle stammt. Dieses Gen hat eine sehr praktische Eigenschaft. Wird es aktiv, dann sorgt es für die Produktion von Eiweißen, die grün-bläulich leuchten.

Mithilfe dieses „Reportergens“ können die Wissenschaftler herausfinden, ob in den Wurzeln Nitrogenase gebildet wird. Denn das Quallen-gen wird dann automatisch aktiv, und die Wurzeln beginnen zu leuchten. Barbara Reinhold-Hurek: „Wir

eine Wespe den Weg zum Pflanzenschädling und vertilgt ihn. Eine entscheidende Rolle bei diesen Prozessen spielen Bakterien, die im Darm von Insekten leben; denn sie produzieren die verräterischen Substanzen, auf die Pflanzen mit der Herstellung von Duftstoffen reagieren.

Die Mikroorganismen bauen diese Auslösestoffe, vorwiegend Aminosäurekonjugate von Fettsäuren, nicht ohne fremde Hilfe: Das Insekt liefert die Aminosäure Glutamin, die Fettsäure stammt aus der pflanzlichen Nahrung und die Bakterien knüpfen die Peptidbindung. Diese Substanzen können so spezifische Duftmuster auslösen, dass Wissenschaftler einzelne Raupenarten anhand des Geruchs unterscheiden können. „Die Beteiligung von Mikroorganismen an der Biosynthese von derartigen Verbindungen im Darm von Insekten macht deutlich, dass bei der Interaktion von Pflanze und Insekt auch die Ebene der Mikroor-

ganismen berücksichtigt werden muss“, sagte Prof. Wilhelm Boland vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena.

KEIN LEBEN OHNE MIKROORGANISMEN

Mikroorganismen haben vor langer Zeit die Voraussetzung für die Entstehung von Tieren und Pflanzen geschaffen, indem sie freien Sauerstoff produzierten. Sie beeinflussen globale Stoffkreisläufe, können jede natürliche Verbindung abbauen und sind auch an der Kommunikation zwischen Pflanzen und Tieren beteiligt. Durch Kombination aus molekular- und mikrobiologischen Methoden wollen Wissenschaftler in Zukunft noch mehr über die Funktion und Bedeutung der Mikroorganismen für die Umwelt erfahren. Karl-Heinz Schleifer: „Ohne unsere kleinen Freunde wäre das Leben auf der Erde so wie wir es heute kennen nicht möglich.“

ARND PRILIPP

ÖKOLOGIE IM BRENNPUNKT

Die Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften wurde im Jahr 1986 gegründet. Ihr Ziel ist es, aktuelle oder möglicherweise aktuell werdende Probleme ökologischer Art aufzugreifen und zu diskutieren sowie die betreffenden Mitarbeiter in der Bayerischen Staatsregierung und in den Staatsministerien zu beraten. Zu diesem Zweck veranstaltet die Kommission der Ökologie jährlich ein bis zwei Rundgespräche, bei denen anerkannte Experten aus den Gebieten der Wissenschaft, Verwaltung, Politik und Industrie den aktuellen Kenntnisstand in dem jeweiligen Fachgebiet vermitteln. Die Fachleute bieten – wenn möglich – Lösungsvorschläge für bestehende Probleme und diskutieren sie mit den eingeladenen Gästen. Sowohl die Referate als auch die Diskussionen werden in der Reihe „Rundgespräche der Kommission für Ökologie“, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, veröffentlicht und sind im Buchhandel zu beziehen.



© Weitere Informationen im Internet unter www.badw.de oder per E-Mail: oekologie@lrz.badw-muenchen.de

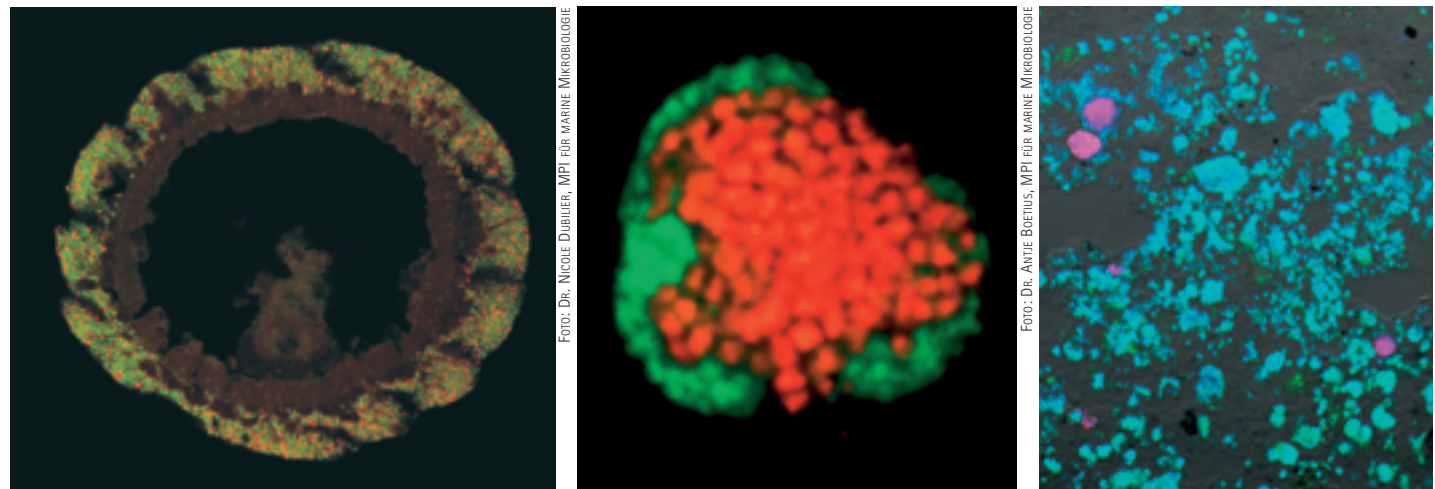


Foto: Dr. Nicole Dubilier, MPI für marine Mikrobiologie

Foto: Dr. Antje Boetius, MPI für marine Mikrobiologie

Foto: Dr. Armin Gieseke, MPI für marine Mikrobiologie

Sulfid oxidierende Bakterien (grün) und Sulfat reduzierende Bakterien (rot) in der Kutikula („Haut“) eines marinen Wurms (links). Konsortium von Archaeobakterien (rot) und Sulfat reduzierenden Bakterien (grün), das ohne Sauerstoff mit Sulfat als Oxidationsmittel Methan oxidiert (Mitte). Verschiedene Populationen nitrifizierender Bakterien aus einem Abwasser-Biofilm (rechts).

Sulfat reduzierendes und ein Schwefel oxidierendes Bakterium einen marinen Wurm.

TIEFSEEQUALLE BRINGT GRAS ZUM LEUCHTEN

Die atmosphärische Luft enthält mehr als 75 Prozent gasförmigen Stickstoff, den Tiere und Pflanzen zum Beispiel zum Aufbau von lebenswichtigen Eiweißen benötigen. Sie können den Stickstoff jedoch nicht aus der Luft konsumieren. Tiere müssen stickstoffreiche Nahrung fressen und Pflanzen stickstoffhaltige

„Eine direkte symbiotische Beziehung zwischen einer Reisart und Stickstoff fixierenden Bakterien als natürlicher Düngelieferant wäre ideal“, sagte Prof. Barbara Reinhold-Hurek von der Universität Bremen. Sie untersucht das Zusammenwirken von Bakterien und Pflanzen in Wurzeln einer Grasart aus Pakistan: dem Kallargras. Mit molekularbiologischen Methoden konnte die Forscherin tief im Wurzelgewebe der Pflanze verborgene Bakterien der Gruppe *Azoarcus* nachweisen, die das Schlüsselenzym der biologischen

wollen mehr über die molekularen Zwiegespräche zwischen Bakterien und Pflanze erfahren. Denn wenn Bakterien an Kultursorten von Reis eine ähnliche Symbiose leisten könnten, wie wir sie bei Kallargras gesehen haben, bräuchten Reisbauern in Zukunft viel weniger Stickstoffdünger.“

Mikroorganismen sind für Pflanzen nicht nur als Düngelieferant nützlich, sondern auch an der Interaktion zwischen Pflanzen und Insekten beteiligt. Beißt ein Insekt in eine Pflanze, löst sein Speicheldrüsensekret über interne Signalkaskaden bei der Pflanze die Produktion bestimmter Duftstoffe aus. Von den Gerüchen angelockt, findet dann zum Beispiel