

Abb. 1: „Black Smoker“ am ostpazifischen Rücken in 2.800 m Tiefe. Aufnahme aus dem Tiefsee-U-Boot Alvin; unten rechts: Greifarm für Probenahmen.

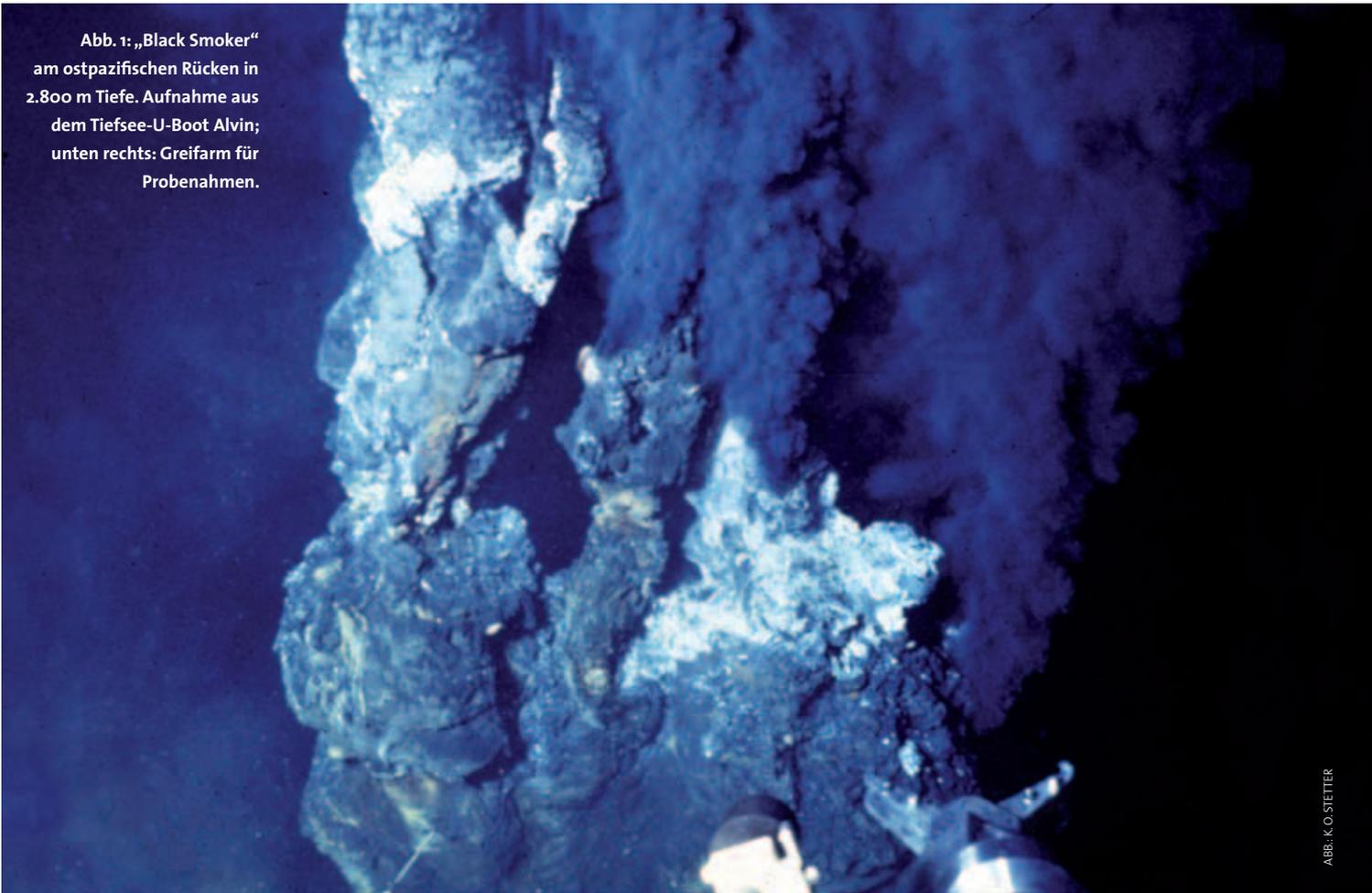


ABB.: K. O. STETTER

Neuerscheinung

Leben unter extremen Bedingungen

Ein Rundgespräch der Kommission für Ökologie befasste sich mit Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren, die dauerhaft „extreme“ Standorte besiedeln.

VON CLAUDIA DEIGELE

Im Verlauf der Evolution konnten alle erdenklichen Habitate unseres Planeten besiedelt werden. Was wir Menschen dabei als extrem ansehen, sind für Mikroorganismen, Pilze, Pflanzen und Tiere schlicht „normale“ Umweltbedingungen, an die sie bestens angepasst sind und ohne die sie teilweise gar nicht leben könnten, sei es wegen ihrer speziellen Stoffwechsellanpassungen oder aufgrund von Konkurrenzvorteilen, was Nahrung, Raum oder andere ökologische

Ressourcen angeht. In dem Berichtband zu dem Rundgespräch „Leben unter extremen Bedingungen“, das im Oktober 2010 stattfand, zeigen Experten, wie die dauerhafte Besiedelung derartiger Standorte möglich ist. Der folgende Beitrag stellt daraus beispielhaft einige Aspekte vor.

Extrem – für wen?

Für die verschiedenen Gruppen von Lebewesen gibt es kein einheitliches Optimum für den „Betrieb des Lebens“ und damit auch keinen Maßstab für Normalität. Selbst in unseren (klimatisch) „gemäßigten“ Breiten gibt es aus menschlicher Sicht extreme Habitate wie Hochgebirge oder „salzige“ Küstenstandorte. Gerade durch die Heterogenität der unbelebten Natur konnte im Lauf der Evolution erst die Lebensvielfalt (Biodiversität) entstehen, die im Wesentlichen aus der gewaltigen Vielfalt „niederer“ Organismen wie Archaeen, Bakterien oder Pilzen besteht. Darüber hinaus hat sich das Leben unter Bedingungen entwickelt, die über die meiste Zeit aus menschlicher Sicht „extrem“ sind, wie Abb. 2 am Beispiel des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre zeigt.

Leben in Hitze ...

An Stellen, an denen sich diese Bedingungen erhalten haben, finden wir heute noch Mikroorganismen aus den tiefen Abzweigungen im Stammbaum des Lebens. Hyperthermophile („große Hitze liebende“) Bakterien und Archaeen vermehren sich optimal bei 80 °C und mehr. Sie beziehen ihre Energie meist aus sehr einfachen anorganischen Verbindungen, wie *Methanopyrus kandleri*, der Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) zu Methan (CH₄) umsetzt und sich noch bei 110 °C vermehrt, oder wie Vertreter der Gattung *Igni-coccus* („Feuerbeere“), die Schwefel reduzieren. Zu finden sind Hyperthermophile zum Beispiel in den Wänden von Schwarzen Rauchern an den tektonischen Bruchzonen der Tiefsee (Abb. 1) oder in heißen Quellen auf Island. Vor einiger Zeit konnte aus heißen Schlammproben aus dem Yellowstone National Park eine Kultur von Zellen etabliert werden (*Korarchaeum cryptoflum*), deren Genom die Vermutung nahelegt, dass es sich dabei um Nachfahren einer sehr tiefen Abzweigung im Stammbaum innerhalb der Archaeen handelt.

... und am energetischen Limit

Während Organismen, die Sauerstoff verwerten können, vergleichsweise viel Energie für ihren Stoffwechsel zur Verfügung steht, müssen solche in anaerober, d. h. sauerstofffreier Umgebung, mit sehr geringen Energiespannen auskommen. Die bei anaeroben Stoffwechselreaktionen zur Verfügung stehende Energie ist oft nahe dem Minimum, das überhaupt noch die Bildung von

ATP, dem universellen Energiespeicher aller Zellen, erlaubt. Entsprechend lange dauert zum Beispiel der anaerobe Abbau von natürlich austretendem Erdöl und Erdgas in der Tiefsee: Bis größere Klumpen beseitigt sind, kann es Jahrhunderte dauern. Bei dem Unfall an der „Deep Water Horizon“-Bohrung im April 2010 (Abb. 3) sind an einem Tag etwa so viel Öl und Gas ausgetreten, wie in einem Jahrzehnt aus den natürlichen Quellen im Golf von Mexiko austritt. Inzwischen ist nachgewiesen worden, dass sich der größte Teil des damals ausgetretenen Öls in großen Wolken in der Tiefe verteilt hat, wo es nur über sehr langsam ablaufende biochemische Prozesse mit minimalen Energieausbeuten von Mikroorganismengemeinschaften abgebaut werden kann.

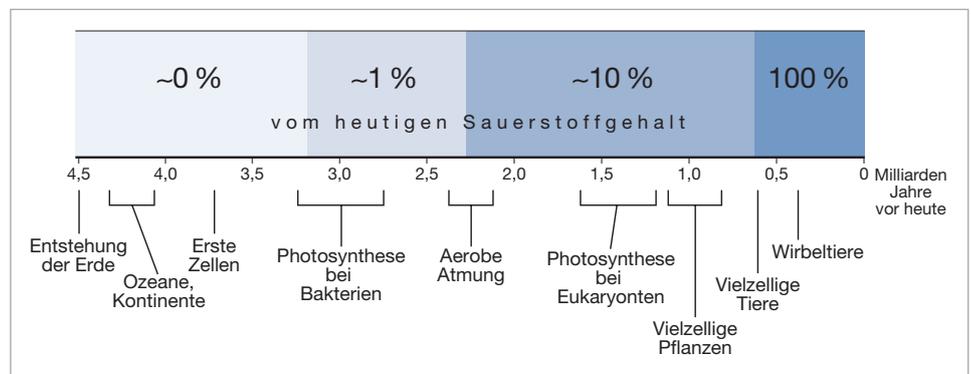
„Leben der hungernden Mehrheit“ ...

Zwar leben im Meeresboden in einem Kilometer Sedimenttiefe etwa 1.000-mal weniger Zellen als nahe der Meeresbodenoberfläche (ca. 10⁶ versus 10⁹–10¹⁰ Zellen/cm³), aber insgesamt entspricht die mikrobielle Biomasse in den Meeressedimenten 1/10 bis 1/3 der gesamten lebenden Biomasse auf der Erde. Dabei konnte bisher nur ein ver-

DIE AUTORIN

Dr. Claudia Deigele ist wissenschaftliche Sekretärin der Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Abb. 2: Relativer Sauerstoffgehalt der Atmosphäre und Geschichte des Lebens auf der Erde.



schwindend kleiner Anteil dieser Mikroorganismen kultiviert werden. Vor Neufundland wurden in einer Sedimenttiefe von 1.600 m (das entspricht einem Alter des Sediments von 110 Millionen Jahren) und einer Temperatur von 60–100 °C noch lebende Bakterienzellen nachgewiesen. Einer der Hauptprozesse zur Energiegewinnung in derartigen anaeroben Sedimenten ist die Reduktion von Sulfat (SO₄²⁻) zu Schwefelwasserstoff (H₂S). Die Sulfatreduktionsraten nehmen mit zunehmender Tiefe stark ab. Schon in 200 m Sedimenttiefe liegen die (berechneten) Verdopplungszeiten der Zellen aufgrund der geringen Energieerträge bei mehreren 1.000 Jahren.

... und Leben in der Dunkelheit

Für photosynthetische Bakterien kann die Verfügbarkeit von Licht zum begrenzenden Faktor werden. Im Schwarzen Meer leben Grüne Schwefelbakterien in der so genannten sulfidischen Zone, einer Grenzschicht, die sauerstoffhaltiges Süßwasser aus den Zuflüssen des Schwarzen Meeres von dem darunterliegenden, aufgrund fehlender Durchmischung sauerstofffreien Wasser marinen Ursprungs trennt. Sie oxidieren mithilfe von Lichtenergie Sulfid und assimilieren

stoffminimumzonen (Abb. 4) so genannte Anammoxbakterien entdeckt, die mithilfe von Nitrit (NO_2^-) unter anaeroben Bedingungen Ammonium (NH_4^+) oxidieren können: $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (anaerobe **Ammoniumoxidation**).

Dieser Prozess, der inzwischen in großtechnischen Klärwasseranlagen zur Entfernung von Stickstoffverbindungen getestet wird, trägt wesentlich zum Stickstoffkreislauf bei: Isotopenexperimente und molekularbiologische Untersuchungen zeigen, dass er für etwa die Hälfte des gesamten Stickstoffverlustes der Ozeane verantwortlich ist.

Pflanzen unter Stress: Trockenheit, Frostwechsel und hohe Salzkonzentrationen

So genannte Wiederauferstehungspflanzen werden in völlig ausgetrocknetem Zustand nach Wiederbewässerung innerhalb von weniger als 24 Stunden wieder voll physiologisch aktiv. Molekulare und biochemische Untersuchungen an *Craterostigma plantagineum* haben gezeigt, dass die Trockentoleranz ein komplexes Phänomen ist, bei dem eine Vielzahl von Genen während der Austrocknungsphase aktiviert wird. Ein großer Teil dieser Gene kodiert für Proteine, die die Zellen vor irreversiblen Schäden während des Austrocknens schützen, daneben spielen Zucker eine wichtige Rolle bei der Austrocknungstoleranz.

Pflanzen in tropischen Hochgebirgsregionen sind vielfältigen abiotischen Stressfaktoren ausgesetzt, z. B. einem ausgeprägten Tageszeitenklima mit Bodentemperaturen im Sommer von unter -10°C am Morgen bis über 70°C am Mittag. Als typische Wuchsformen treten Kugelsträucher und -polster in den trockenen und Rosettenpflanzen in den feuchten (sub)tropischen Hochgebirgen auf. Bei Letzteren sind die jungen Blätter im Zentrum in einem Konus zusammengepresst; tagsüber sind die Rosetten geöffnet, nachts schließen sie, sodass der Konus vor Frost geschützt wird (Abb. 5). Extratropische Gebirgspflanzen schützen sich durch Anpassungen in der Frosthärte, einem komplexen, vielschichtigen



Abb. 3: Brennendes Erdöl und Erdgas auf der Tiefsee-Bohrplattform Deep Water Horizon im Golf von Mexiko, April 2010.

CO_2 („anoxygene Photosynthese“) und können dabei dank ihrer speziell angeordneten Pigmente und anderer physiologischer Anpassungen mit geringsten Lichtmengen auskommen. Noch bei einer Lichtintensität von $1,4 \text{ nmol Quanten pro cm}^2$ und Sekunde, die für die CO_2 -Fixierung nicht mehr ausreicht, kann der ATP-Gehalt über knapp 30 Tage stabil gehalten werden. Dies entspricht bei ansonsten völliger Dunkelheit der Helligkeit eines brennenden Teelichtes in etwa 60 m Entfernung.

Neue Entdeckungen

In Ozeanen begrenzt in der Regel der Mangel an Stickstoff das Algenwachstum und beeinflusst damit entscheidend die Menge an biologisch gebundenem CO_2 . Biologisch verfügbarer Stickstoff wird dem Ozean entzogen, wenn Bakterien Nitrat (NO_3^-) zu Stickstoffgas (N_2) veratmen (Denitrifikation). Erst Ende der 1990er Jahre wurden in Sauer-

Abb. 4: Sauerstoffverteilung in 150 m Wassertiefe (grün, blau: Regionen mit hohem, rot: mit niedrigem Sauerstoffgehalt).

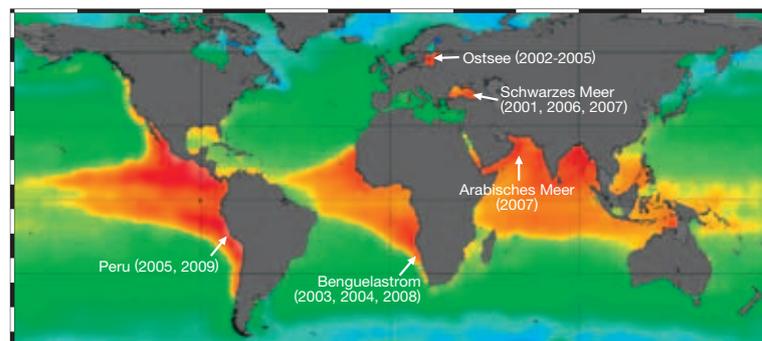




Abb. 5: *Lobelia telekii* auf dem Mt. Kenya in 4.200 m Höhe: Rosette in offener Tag- und geschlossener Nachtstellung.

Prozess. Hochgebirgspflanzen wie das Stängellose Leimkraut (*Silene acaulis*) könnten im Winter sogar flüssigen Stickstoff (−196 °C) überleben.

Halophyten sind Pflanzen, die salzhaltige Umgebung bevorzugen, aber auch in süßwasserhaltiger Umgebung überleben und dabei sehr effizient mit Wasser umgehen. Verschiedene Stoffwechselwege und biochemische Schutzmechanismen tragen zum erfolgreichen Umgang der Pflanzen mit hohen Salzkonzentrationen bei. Aufgrund ihrer vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten als Nahrungsmittel oder Tierfutter, als Lieferanten von Rohstoffen für die Industrie, zum Küstenschutz und zur Bodenverbesserung gewinnen Halophyten zunehmend an Bedeutung. Besonders wichtig sind sie bei der Wiederherstellung und Nutzung von durch künstliche Bewässerung mit Meerwasser geschädigten Habitaten. Der sachgerechte Einsatz von Halophyten kann diese Zerstörung von Nutzflächen vermindern oder sogar verhindern.

**Heizen oder Energie sparen?
Ein tierisches Problem bei Kälte**

Die meisten Kleinsäuger bleiben auch im Winter aktiv und halten ihre Körpertemperatur durch einen hohen Grundstoffwechsel, durch Kältezittern und durch die so genannte zitterfreie Wärmebildung im braunen Fettgewebe aufrecht. Gerade im Winter, wenn wenig Nahrung vorhanden ist, wird der erhöhte Energiebedarf jedoch zum Problem. Über spezielle Maßnahmen wie u. a. verstärkte zitterfreie Wärmebildung und Tagesschlaflethargie (Torpor) während der Ruhezeiten gelingt es Dsungarischen Zwerghamstern, bis zu 85 % Energie einzusparen und bei Temperaturen von −52 °C zu leben. Dies liegt nur wenig unter der Einsparung durch Winterschlaf (95 %). Dass es auch bei höheren Temperaturen und bei

Primaten Winterschlaf gibt, wurde erst in den letzten Jahren entdeckt (Abb. 6).

Der Mensch und seine Tropennatur

Der Mensch ist nach heutiger Erkenntnis in der Savanne im innertropischen Bereich Afrikas entstanden und trägt seine „tropische Heimat“ nach wie vor mit sich. Nackt befindet er sich bei 27 °C Außentemperatur im thermischen Gleichgewicht mit der Umwelt. Wird durch Arbeit zusätzliche Wärme erzeugt, setzt Kühlung durch Schwitzen ein, bei äußerer Kälte müssen wir uns zusätzlich isolieren. Anstelle stoffwechselphysiologischer Anpassungen ermöglichen es dem Menschen technische Lösungen (wie der Ersatz des Fells durch Kleidung, die Verwertung energiereicher Nahrung und der Einsatz von Hilfsmitteln), sowohl arktische Kälte als auch große Hitze zu ertragen.

Neben den Organisatoren des Rundgesprächs, Wolfgang Haber (Weihenstephan) und Karl O. Stetter (Regensburg), trugen zu dem Band bei: Bernhard Schink (Konstanz), Bo Barker Jørgensen (Aarhus, DK), Antje Boëtius (Bremerhaven, Bremen), Jörg Overmann (Braunschweig), Marcel Kuypers (Bremen), Dorothea Bartels (Bonn), Erwin Beck (Bayreuth), Bernhard Huchzermeyer (Hannover), Hans-Werner Koyro (Gießen), Gerhard Heldmaier (Marburg) und Josef H. Reichholf (Neuötting).



Abb. 6: Winterschlaf bei Primaten wurde erstmals beim Fetteschwanzmaki (*Cheirogaleus medius*) nachgewiesen.



Literatur

Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), *Leben unter extremen Bedingungen* (Rundgespräche der Kommission für Ökologie 39), Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München 2011, 160 S., ISBN 978-3-89937-124-6, 25,00 Euro.

ABB.: E. BECK; K. H. DAUSMANN