

# GEOFOKUS



# Submarine Hydrothermalquellen – Treffpunkte von Geologie, Geochemie und Biologie

Wolfgang Bach\*

Die Zirkulation von Meerwasser durch die Ozeankruste spielt im Stoff- und Wärmehaushalt unseres Planeten eine wesentliche Rolle. So ist etwa ein Drittel des globalen Wärmeverlustes unmittelbar an Meerwasserzirkulation geknüpft. Reaktionen zwischen Meerwasser und Ozeankruste sind für die Zusammensetzung der Ozeane ähnlich relevant wie Verwitterungs- und Abtragungsprozesse an Land. Zum Beispiel beeinflusst die Freisetzung von Kalzium aus der Ozeankruste maßgeblich den Silikat-Kohlensäure Kreislauf, der die Bilanz des Kohlendioxids in den Ozeanen und der Atmosphäre auf langen Zeitskalen bestimmt. Bei der Subduktion der Ozeankruste werden Elemente mit unterschiedlicher Effizienz in den Erdmantel zurückgeführt. Dabei spielen die durch hydrothermale Prozesse eingestellten mineralogischen und stofflichen Eigenschaften der Ozeankruste eine große Rolle. Somit sind submarine hydrothermale Vorgänge in Stoffkreisläufen der Erde von enormer Wichtigkeit.

Hydrothermale Reaktionen finden vielerorts im Meeresboden statt: an den Spreizungsachsen, in Rückenflanken, in Seebergen sowie vor und über Subduktionszonen (Abb. 1). Die physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen variieren in diesen Systemen sehr stark. In zunehmendem Maße erkennen Wissenschaftler, dass diese geochemischen und physikochemischen Bedingungen an Hydrothermalquellen sehr stark die Natur der assoziierten Mikro- und Makrofaunen beeinflusst. Diese enge Verknüpfung geht auf eine Bedingung zurück, die alle Lebewelten in der Tiefsee teilen: Dunkelheit!

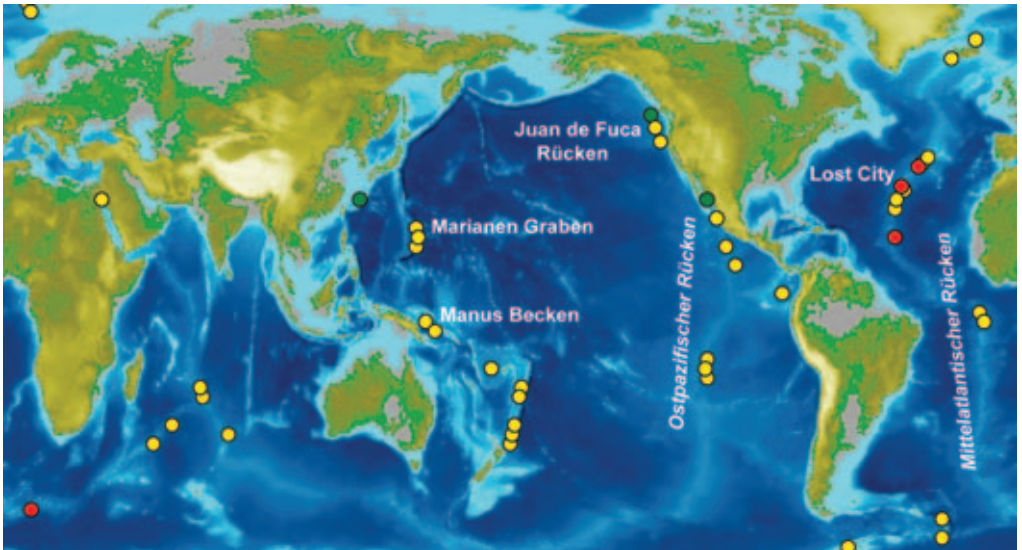
Die Isolation der Tiefsee von der Versorgung durch Sonnenenergie bedingt die Ausbildung einer besonderen metabolischen Strategie, der Chemosynthese (Bach et al., 2006). Bei der Chemosynthese nutzen Organismen die bei che-

mischen Reaktionen freigesetzten Energien aus. Anders als an der Erdoberfläche, wo quasi die gesamte Primärproduktion von Biomasse auf Photosynthese zurückgeht, kommt in der Tiefsee der Chemosynthese eine viel größere ökologische Bedeutung zu.

Obwohl in der globalen Bilanz langsam und unscheinbar ablaufende Austauschprozesse die größte Rolle spielen, ziehen uns die spektakulären *Black Smoker* Hydrothermalquellen in der Tiefsee in besonderem Maße an (siehe Foto auf Titelseite). Heiße Hydrothermalquellen stellen außerdem moderne Analogsysteme für hydrothermale Kupferlagerstätten, z.B. die auf Zypern, dar. Bei Temperaturen oberhalb von 350 °C werden Buntmetalle, Eisen und Sulfid-Schwefel im aufgeheizten Meerwasser gelöst und über einige Kilometer transportiert, bevor sie beim Vermischen mit Meerwasser am Meeresboden Metallsulfide ausfallen. Nicht nur Erze wachsen aus diesen Lösungen, sondern auch Mikroorganismen, die aufströmenden gelösten Schwefelwasserstoff oxidieren. Der Fluss von Schwefelwasserstoff ist derart hoch, dass die Bakterien im Verhältnis zu anderen Umgebungen in der Tiefsee unglaublich rasch wachsen können. So entstehen auf engstem Raum enorme Akkumulationen von Biomasse-Oasen des Lebens in der ansonsten kargen Tiefsee (Abb. 2). Symbiotische Beziehungen zwischen den schwefeloxidierenden Bakterien und Weichtieren spielen in den bis zu 80 °C heißen Biotopen eine besonders wichtige Rolle.

## Submarine Heiße Quellen: Nach 30 Jahren erneut im Rampenlicht

Schon bald nach ihrer Entdeckung im Jahr 1977 schienen die geologischen und geochemischen Prinzipien von Hydrothermalquellen am Meeresboden in ihren Grundzügen geklärt. An mittelozeanischen Spreizungsachsen wird neue, zunächst permeable Ozeankruste gebildet, und dabei treibt die Wärme von Magmensystemen



**Abb. 1:** Lage bekannter Hydrothermalsysteme an ozeanischen Spreizungszentren sowie in Backarc-Becken und submarinen Inselbögen. Gelbe Punkte markieren Systeme, die in Vulkaniten beherbergt sind. Grüne Punkte weisen auf den Einfluss sedimentärer Lithologien, rote auf die Präsenz ultramafischer Gesteine hin.



**Abb. 2:** Muschel- und Garnelenkolonien am Mittelatlantischen Rücken (Quelle: MARUM, Universität Bremen)

die Zirkulation von Meerwasser innerhalb der Kruste an. Das Meerwasser wird dabei stofflich sehr stark modifiziert, laugt unter anderem Sulfidschwefel und Metalle aus der basaltischen Kruste und tritt durch *Black Smoker* am Meeresboden aus.

Die ersten Hydrothermalquellen, die eingehend untersucht wurden, fand man im Pazifik – am Galapagos Spreizungsrücken und am Ostpazifischen Rücken 21° N. Der Chemismus der Hydrothermalfluide ließ sich rasch erklären, denn es gelang innerhalb weniger Jahre die erfolgreiche Erfassung wesentlicher hydrothermaler Vorgänge in Autoklavenexperimenten und geochemisch-theoretischen Berechnungen. Demnach verliert Meerwasser beim Aufheizen Magnesium und Sulfat durch die Ausfällung von Chlorit und Anhydrit. Dagegen werden die Fluide an Ca, Si und Alkalien angereichert und laugen bei Temperaturen über 350–400 °C auch Metalle wie Fe, Mn, Cu, Zn, Pb und Schwefel. Als dann Mitte der 80er Jahre auch am Mittelatlantischen Rücken südlich der Kane Fracture Zone Hydrothermalquellen mit Fluiden ähnlicher Zusammensetzung entdeckt wurden, schien für einige Geochemiker klar, dass diese Systeme einander grundsätzlich sehr ähnlich sein müssen. Alle Untersuchungen zum damaligen Zeitpunkt wiesen darauf hin, dass die Fluide etwa 350 °C heiß sind und eine einheitliche Zusammensetzungen haben, die sie sogar über viele Jahre hinweg beibehalten. Das interessanteste Phänomen an den heißen Quellen im Atlantik schien die andersartige Faunenzusammensetzung zu sein. Diese Entdeckung löste einen Wechsel in der Hydrothermalforschung aus, die fortan durch biologische Fragestellungen dominiert war. Es waren im Wesentlichen biogeografische Fragestellungen, welche die weitere Erkundung der Weltmeere auf der Suche nach neuen Hydrothermalquellen vorantrieben. Die dabei involvierten Geochemiker hatten hier nicht immer einen leichten Stand, denn die weitere geochemische Beschreibung von Hydrothermalquellen wurde mitunter als „Briefmarkensammeln“ belächelt. Es ist unter anderem deren Hartnäckigkeit zu verdanken,

dass wir heute neue Kapitel in der Hydrothermalforschung schreiben, in denen geochemische und biologische Ansätze sehr stark vernetzt sind.

Grund für diese Entwicklung ist die Entdeckung von Hydrothermalssystemen, die sich geochemisch sehr stark von den oben beschriebenen Basaltsystemen an mittelozeanischen Rücken unterscheiden. Im vergangenen Jahrzehnt wurden Hydrothermalquellen in den Flanken von Rückenachsen und über Subduktionszonen gefunden, die eine extreme Variation im Chemismus aufweisen. Vor allem sehr langsam spreizende Rückensegmente sind in den Vordergrund der Hydrothermalforschung getreten, denn dort kommt es lokal zur tektonischen Exhumierung des Erdmantels. Es stellte sich heraus, dass Segmente, an denen Peridotite – und nicht Basalte – am Meeresboden zu finden sind, besonders häufig hydrothermale Aktivität aufweisen. Die dort austretenden Fluide haben sehr hohe Konzentrationen von Wasserstoff und Methan, die bei der Serpentinisierung, d.h. der Reaktionen von Peridotit mit heißem Meerwasser, erzeugt werden. Aus Inselbögen ist inzwischen eine große Anzahl von Hydrothermalssystemen bekannt, die sich durch eine enorme Spannweite in den geochemischen und physikalischen Bedingungen auszeichnen.

Die Entdeckung und Erkundung neuer Hydrothermalquellen ist durch die Entwicklung von Tiefseetechnologien maßgeblich beschleunigt worden. Diese umfassen von Schiffen aus eingesetzte Sonden, die Anomalien in der Trübung des Wassers und der Temperatur messen und dadurch eine großskalige Erfassung von hydrothermalen Aktivität ermöglichen, ohne jedoch die Austrittsstellen genau zu lokalisieren. Somit war die Entdeckung von Hydrothermalquellen in der Vergangenheit oft dem Zufall überlassen, und einige dieser Systeme wurden in der Tat rein zufällig entdeckt, wie z.B. das *Lucky Strike* (deutsch: Glückstreffer) Feld südlich der Azorenplattform. Heute werden Schiffs-sonden und autonome Tauchroboter gestaffelt eingesetzt, um Hydrothermalquellen zu lokali-



**Abb. 3:** Der Tauchroboter Quest nach einem Einsatz an Bord des Forschungsschiffes Meteor  
(Quelle: MARUM, Universität Bremen)

sieren und dann mit ferngesteuerten Tauchrobotern oder bemannten Tauchbooten zu beproben (Abb. 3).

### Kopplungen von Geologie, Geochemie und Biologie

Geo- und Biowissenschaftler arbeiten gemeinsam an einer Vielfalt submariner Hydrothermalsysteme. Diese umfassen „alte Bekannte“ wie Hydrothermalquellen am Juan de Fuca Rücken im Nordwest-Pazifik, die schon seit zwei Jahrzehnten immer wieder bereit werden und die damit langfristige Zeitreihen-Untersuchungen zulassen. Am Ostpazifischen Rücken bei 9° N gelang in den 90er Jahren ein Durchbruch, als bei einer Tauchfahrt frisch entstandene Hydrothermalquellen lokalisiert werden konnten, deren Bildung in Zusammenhang mit einer kurz zuvor erfolgten vulkanischen Eruption standen. Die Zusammensetzung der Hydrothermalfluide zeigte sich ungewöhnlich arm an gelö-

sten Salzen und angereichert an gelösten Gasen wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$ . Nach einigen Monaten hatten sich *Black Smoker* gebildet und die Fluide zeigten erhöhte Salzgehalte, dagegen geringer Menge gelöster Gase aus zuvor. Diese Zeitreihe erlaubte erstmals die direkte Beobachtung eines Phänomens, das aus Experimenten und Untersuchungen von Flüssigkeitseinschlüssen schon bekannt war: Überkritische Phasenseparation. Was ist das und warum ist es von Relevanz? Anders als das Einstoffsystem  $\text{H}_2\text{O}$  hat Meerwasser (im Modell und Experiment in der Regel durch 3,2 gewichtsprozentuale NaCl-Lösung vereinfacht) jenseits der Dampfdruckkurve nicht nur eine sondern zwei Phasen, deren Zusammensetzung durch die pT-abhängige Lage der Solvi im System bestimmt ist. Entscheidend dabei ist, ob die Phasenseparation unterhalb oder oberhalb des kritischen Punktes von Meerwasser (bei ca. 300 bar und 405 °C) stattfindet (Abb. 4). Bei der unterkritischen Phasen-

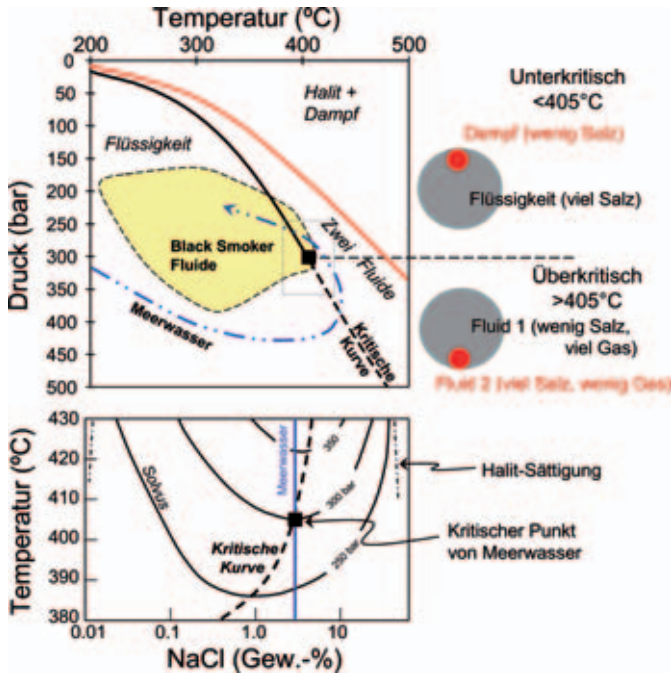


Abb. 4 oben: Druck-Temperatur Zustandsdiagramm mit der Zweiphasen-Kurve von Meerwasser. Hydrothermalfluide liegen i.d.R. im subkritischen Feld, in Ausnahmen jedoch am Siedepunkt bzw. am kritischen Punkt. Das untere Phasendiagramm  $H_2O-NaCl$  zeigt Solvus-Kurven für unterschiedliche Drücke. Je nach pT-Bedingung der Phasenseparation entstehen Fluide mit unterschiedlichen Gas- und Salzgehalten.

separation (Sieden) bildet sich neben einer kontinuierlichen Flüssigphase mit hohen Salzgehalten eine diskontinuierliche Wasserdampfphase mit geringen Salzgehalten. Zahlreiche *Black Smoker* Fluide treten in der Tat sichtbar siedend am Meeresboden aus. Im überkritischen Bereich treten zwei Fluidphasen auf, deren Zusammensetzungen von den Druck-Temperaturbedingungen abhängen. Eine Phase ist sehr viel dichter und salzreicher als die andere; sie kondensiert zu kleinen Tröpfchen, während die zweite, salzarme Fluidphase eine kontinuierliche Phase darstellt.

Die Phasengrenzen in Abbildung 4 sind univariant, d.h. Druck, Temperatur und Zusammensetzung der Fluide können nur in einer Kombination variiert werden, ohne die Phasenbeziehungen zu ändern. Ein schematischer Entwicklungstrend von aufgeheiztem Meerwasser bis hin zum *Black Smoker* Fluid ist in Abb. 4 eingezeichnet. Die meisten *Black Smoker* Fluide liegen im Einphasenfeld, obwohl sie aufgrund ihrer

vom Meerwasser stark abweichende Salzgehalte anzeigen, dass sie phasensepariert sind. Dieses Phänomen kann durch konduktives Abkühlen und durch Vermischung mit kaltem Meerwasser unter dem Meeresboden erklärt werden. Fluide, die genau am kritischen Punkt liegen, sind sowohl aus dem Pazifik als auch aus dem Atlantik bekannt. Phasenseparation ist in submarinen Hydrothermalsystemen die Regel und bestimmt den Transport von Metallen und Nährstoffen für Mikroorganismen maßgeblich. Dies wird in der Kopplung in den zeitlichen Entwicklungen von Fluidgeochemie und Biologie in Systemen vom Ostpazifischen Rücken 9° N eindrucksvoll deutlich. Als sich dort die Zusammensetzung der Hydrothermalfluide von zunächst gasreich und salzarm innerhalb weniger Jahre zu gasarm und salzreich änderte, reagierte die Faunenzusammensetzung ganz unmittelbar. Als anfangs gasreiche Fluide mit hohen  $H_2S:Fe$  Verhältnissen austraten, entwickelten sich rasch florierende Röhrenwürmerkolonien. Als dann

später die Fluide zunehmend gasärmer und salzreicher wurden, verkümmerten die Röhrenwürmerkolonien, denn im Fluid war nicht genug freier Schwefelwasserstoff für die sulfidoxidierenden Bakterien, mit denen die Würmer in Symbiose leben. Mit den später herrschenden sehr niedrigen  $H_2S:Fe$  Verhältnissen waren eisenoxidierende Bakterien bevorteilt, so dass ab etwa 1998 rote Bakterienrasen die abgestorbenen Röhrenwürmer übersiedeln. Vor einem Jahr allerdings wurde das System durch eine große Lavaeruption wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückgesetzt. Dieses Beispiel zeigt, wie eng und auf welchen kleinen Zeitskalen magmatische, hydrothermale und biologische Prozesse an mittelozeanischen Rücken aneinander gekoppelt sein können. In diesem Sinne stellen Hydrothermalquellen vielleicht einmalige Systeme auf der Erde dar.

### Plattentektonik und Mikroorganismen

Während am Ostpazifischen Rücken  $9^\circ N$  und in anderen in Basalten beherbergten Hydrothermalquellen Schwefelwasserstoff die wichtigste Energiequelle für Biomassenproduktion zu sein scheint, sind seit einigen Jahren Systeme bekannt, in denen Wasserstoff und Methan als Energiequelle dominieren. Zwei der bekanntesten sind das Lost City Hydrothermalfeld am Mittelatlantischen Rücken bei  $30^\circ N$  (Kelley et al., 2005) und die Serpentin-Schlammvulkane im Marianen-Vorbogen (Mottl et al., 2004). Diese Systeme zeichnen sich durch eine extrem hohe Alkalität aus; pH-Werte um 11 sind typisch und weisen auf eine Pufferung durch das Mineral Bruzit hin, mit dem die Fluide gesättigt sind. Höhere pH-Werte (bis zu 12,6) in manchen Quellen aus dem Marianen-Vorbogen gehen auf die Konvertierung von Karbonatalkalität in Hydroxidalkalität durch anaerobe methanoxidierende mikrobielle Ökosysteme in den Schlammvulkanen zurück. Die benötigten Karbonationen beziehen die Mikroorganismen aus Fluiden, die aus der subduzierten Platte freigesetzt werden. Hier sehen wir ein Beispiel dafür, wie plattentektonische Prozesse unmittelbare Auswirkung auf biologische Systeme haben können. Andernorts

strömt Schwefeldioxid aus subduktionsbezogenen Magmen aus und reagiert zu Schwefelsäure, die den pH-Wert in einigen Quellen, wie z.B. im östlichen Manus Becken, bis auf unter 0,9 fallen lässt. In Anbetracht solcher Phänomene wird klar, wie eng Biosphäre und Geosphäre der Erde tatsächlich verknüpft sind. Mikroorganismen müssen mit Protonen- und Elektronenaktivitäten umgehen, die über viele Größenordnungen variieren. Protonen- und Elektronentransfers durch Zellmembranen spielen eine zentrale physiologische Rolle, so dass es von großem Interesse ist herauszufinden, wie Mikroorganismen sich auf solche extreme Bedingungen einstellen.

### Bioenergetik – Thermodynamik an der Schnittstelle zwischen Bio- und Geosphäre

Mikroorganismen beuten Ungleichgewichte zwischen reduzierten und oxidierten Komponenten in ihrer Umgebung aus. Wie das genau vor sich geht, schauen wir uns am Beispiel des Wasserstoffs an. Molekularer Wasserstoff ist unter anaeroben Bedingungen von zentraler Bedeutung in seiner Rolle als Elektronendonator in Redoxreaktionen, die mikrobiell genutzt werden. Obwohl die freiwerdenden Energiebeträge bei der Umsetzung von Wasserstoff sehr hoch sind, laufen Redoxreaktionen mit Wasserstoff nicht spontan ab. Die meisten Leser kennen den Knallgas-Versuch, in dem die vehemente Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser erst durch Zufuhr von Energie in Form einer Flamme ausgelöst wird. Mikroorganismen haben Enzyme (hier: Hydrogenasen) entwickelt, welche Reaktionen wie die von Wasserstoff und Sauerstoff katalysieren. Mit derartigen Enzymen kontrollieren sie die Raten, mit denen kinetisch gehemmte Redox-Reaktionen ablaufen, und sie benutzen die Differenzen in den Gibbschen Energien (d.h. die vom System abgegeben nutzbare – also in Arbeit und Wärme überführbare – Energiemenge), um Biomasse zu fixieren. Wir unterscheiden dabei zwischen dissimilatorischem (die Energieverwertung der Redox-Reaktion) und assimilatorischem (die Synthese der Zellbausteine) Metabolismus, die so aneinander

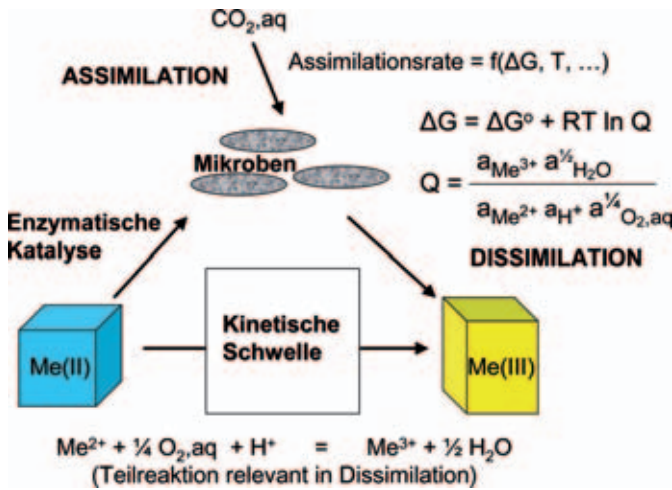


Abb. 5: Die Rolle der Gibbschen Energie in den Geo-Bio Beziehungen

gekoppelt sein müssen, dass genug Energie für Zellwachstum übrig bleibt. Selbst wenn kein Wachstum vorliegt, benötigt die Zelle eine gewisse Grundenergie für Wartung, z.B. um die Hydrolyse von Proteinen oder die Depurinierung von Nucleinsäuren zu verhindern. Wir unterscheiden bei der Assimilation zwei Quellen des Kohlenstoffs: gelöstes Kohlendioxid und organische Komponenten, in der Regel Zellprodukte. Wenn gelöstes  $\text{CO}_2$  von einer Zelle fixiert wird, spricht man von einem autotrophen Organismus, solche, die organische Substanz assimilieren, werden als Heterotrophe bezeichnet. Nur Autotrophe bezwecken eine Primärproduktion von Biomasse. An der Erdoberfläche wird dies quasi vollständig durch Grünpflanzen und Algen (Photoautotrophe) bewerkstelligt. In der Tiefsee herrschen wie bereits gesagt andere Verhältnisse, da dort in Ermangelung von Sonnenlicht, Chemoautotrophie die einzige Möglichkeit einer Primärproduktion darstellt.

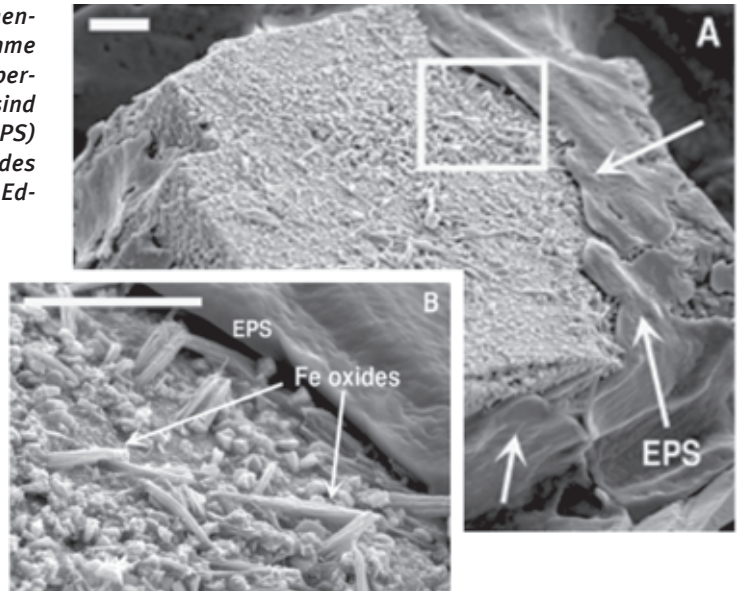
Man kann nun empirische Ansätze verwenden, um Relationen zwischen der anfallenden Gibbschen Energie und der Produktion von Biomasse herzustellen (Abb. 5). Über solche thermodynamisch-bioenergetische Ansätze kann man Beziehungen zwischen geochemischen Reaktionen und Zellwachstum bzw. -wartung herstellen.

Man kann außerdem vorhersagen, welche metabolischen Reaktionen in bestimmten Milieus bioenergetisch profitabel sind. Diese Betrachtungen können mit einer molekular-biologischen Erfassung der funktionellen Gene in den mikrobiellen Konsortien verbunden werden, um somit Verbindungen zwischen Geochemie und Biologie nachzugehen (z.B. Reysenbach und Shock, 2002).

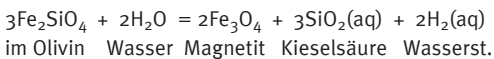
### Wasserstoff – ein Elixier des Lebens

Je mehr gelöster Wasserstoff im System vorliegt, desto geringer ist der Energieaufwand bei der Assimilation. Dies kann soweit gehen, dass die Bildungsreaktionen der Bausteine von Zellen (z.B. Lipide und Aminosäuren) sogar exergonisch sind (z.B. Amend und McCollom, 2005). Somit haben Mikroorganismen, die in stark reduzierenden Umgebungen leben, einen erheblichen metabolischen Vorteil gegenüber denen, die in oxischen Milieus ihr Dasein fristen. Wasserstoff wird auch bei der Fermentierung organischer Substanzen, bei der Entgasung von Magmen sowie durch Radiolyse erzeugt, so dass Wasserstoffmetabolismus in der prokaryontischen Lebewelt weit verbreitet ist. Selbst wir Menschen tragen wasserstoffoxidierende Mikroorganismen in uns.

**Abb. 6:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer oxidierten Pyritoberfläche. Die Skalenbalken sind 10 µm lang. Ein Biofilm (EPS) reguliert die Oxidation des Pyrits zu Ferrihydrit (aus Edwards et al., 2003).



Wasserstoff wird ganz bevorzugt bei der Serpentinisierung (der Umwandlung von Peridotit in Serpentin) gebildet. Die Bildung des Wasserstoffs lässt sich aufgrund der Hydrolyse von FeO in Silikatverbindungen erklären. Basalt enthält zwar noch mehr FeO als Peridotit, aber die Wasserstoff-Gehalte in Hydrothermallösungen in Basaltsystemen sind deutlich geringer. Dies liegt an der Natur der Phasengleichgewichte im Wasser-Gesteins System, maßgeblich der Orthokieselsäure-Aktivität in der Lösung, die bei der Serpentinisierung besonders niedrig ist. Eine dem Fayalit-Magnetit-Quarz Sauerstoffpuffer ähnliche Reaktion:



verdeutlicht diesen Zusammenhang, denn nur wenn die Kieselsäure-Aktivität auf der rechten Seite gering ist, kann thermodynamische Triebkraft für die Wasserstoffbildung generiert werden.

### Bio-Geo Interaktionen in der Tiefsee

Die Rückkopplungen zwischen geochemischen und biologischen Prozessen sind von faszinie-

render Vielfaltigkeit. Leben in sehr steilen und fluktuierenden Gradienten ist für Mikroorganismen, die in der Regel nur begrenzt mobil sind, nicht einfach. Sie behelfen sich durch die Schaffung von Bedingungen, die weniger harsch und besser kontrollierbar sind. Eine Strategie ist die Symbiose mit einem Wirtstier, das sich so bewegt, dass Temperatur und Aktivität der kritischen chemischen Spezies in zuträglichen Bereichen liegen. Freilebende Mikroorganismen behelfen sich anders: sie scheiden sehr effiziente Matrizen aus organischen Makromolekülen aus, in denen sie sich einnisten, bewegen und sogar miteinander kommunizieren. Durch die Ausscheidung dieser Biofilme schaffen sie Mikromilieus, in denen die geochemischen Bedingungen beeinflussbar sind. Ein gutes Beispiel stellen eisenoxidierende Bakterien am Meeresboden dar. An deren Existenz glaubte bis weit in die 90er Jahre hinein niemand, weil in sauerstoffreichen Wässern mit etwa neutralen pH-Werten (also z.B. im Tiefseewasser) die abiotische Oxidationsrate von gelöstem zweiwertigen Eisen enorm hoch ist. Es stellte sich allerdings heraus, dass Fe-oxidierende Bakte-

rien in der Tiefsee überaus häufig anzutreffen sind und zwar nicht nur an heißen Quellen (Edwards et al., 2005). Um die abiotische Oxidation z.B. von Sulfiden oder Basalt aufzuhalten überziehen die Bakterien die Oberflächen dieser Substrate zunächst mit einem Biofilm aus extrazellulären Polysacchariden (EPS) (Abb. 6). Unter dieser EPS-Schicht herrschen suboxische Bedingungen, unter denen die Oxidation von Fe(II) zwar thermodynamisch noch möglich ist, die abiotischen Oxidationsraten aber so langsam sind, dass die Bakterien die Oxidation enzymatisch kontrollieren können. Somit haben die Bakterien gezielt die Umwelt manipuliert, um ihrer Physiologie gerecht zu werden. Die EPS Lage und die Zellwände selbst hingegen beeinflussen Stoffaustausch- und Mineralisationsprozesse im System, indem sie als Sorbens bei der Elementverteilung und Nukleationskeim bei der Kristallisation fungieren.

## Ausblick

Die Art und Weise, wie geochemische Energie Ökosysteme in der Tiefsee versorgt, ist viel variantenreicher als dies noch vor wenigen Jahren vorstellbar war. Diese Erkenntnis hat zu einer neuen Explorationsphase in der Hydrothermalforschung geführt, in der Geochemiker und Biologen eng zusammenarbeiten. Jede Expedition zu heißen Quellen liefert neue Überraschungen und Erkenntnisse. Es bietet sich den Forschern die Gelegenheit, grundsätzliche Erkenntnisse über Zusammenhänge und Rückkopplungen zwischen Geochemie und Biologie zu gewinnen. Gemeinsam haben Geo- und Biowissenschaftler die Möglichkeit, einigen sehr spannenden Fragestellungen nachzugehen: Bedingt chemische Diversität mikrobielle Diversität? Gibt es eine Biogeografie von Mikroorganismen oder von Genen? Welche Rolle spielt der Genaustausch zwischen den Ozeanen und der subkrustalen Biosphäre? Wie können sich Mikroorganismen auf die extremen geochemischen Bedingungen einstellen und wie modifizieren sie dabei das geochemische Milieu? Welche geochemischen Reaktionen und metabolischen Strategien könnten auf der frühen

Erde bedeutsam gewesen sein? Gibt es zum Beispiel eine abiotische Bildung komplexer organischer Moleküle unter extrem reduzierenden Bedingungen? Nach einem Rückblick auf die Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts darf man als Meereswissenschaftler dem kommenden erwartungsvoll entgegen sehen.

## Literatur

- Bach W, Edwards KJ, Hayes JM, Huber JA, Sievert S, Sogin ML (2006): *Energy in the dark: fuel for life in the deep ocean and beyond*. - *Eos* **87**: 73, 78
- Edwards KJ, McCollom T, Konishi H, Buseck P (2003): *Seafloor bioalteration of sulfide minerals: results from in situ incubation studies*. - *Geochim Cosmochim Acta* **67**: 2843–2856
- Edwards KJ, Bach W, McCollom TM (2005): *Geomicrobiology in oceanography: mineral-microbe interactions in the deep-sea*. - *Trends Microbiol* **13**: 449–456
- Kelley DS, Karson JA, Früh-Green GL, Yoerger DR, Shank TM, Butterfield DA, Hayes JM, Schrenk M, O, Olson EJ, Proskurowski G, Jakuba M, Bradley A, Larson B, Ludwig K, Glickson D, Buckman K, Bradley AS, Brazelton WJ, Roe K, Elend ML, Delacour A, Bernasconi SM, Lilley MD, Baross JA, Summons RE, Sylva SP (2005): *A serpentinite-hosted ecosystem: the lost city hydrothermal field*. - *Science* **307**: 1428–1434
- McCollom TM, Amend JP (2005): *Energy requirements for biomass synthesis – A thermodynamic assessment of energy requirements for biomass synthesis by chemolithoautotrophic microorganisms in oxic and anoxic environments*. - *Geobiol* **3**: 135–144
- Mottl MJ, Wheat CG, Fryer P, Gharib J, Martin JB (2004): *Chemistry of springs across the Mariana forearc shows progressive devolatilization of the subducting plate*. - *Geochim Cosmochim Acta* **68**: 4915–4933
- Reysenbach A-L, Shock EL (2002): *Merging genomes with geochemistry in hydrothermal ecosystems*. - *Science* **296**: 1077–1082

**\*Fachbereich Geowissenschaften,  
Universität Bremen  
wbach@uni-bremen.de**