Mark Feldmann

# Stromatolithe – Zeugen der Evolution des Lebens

*Stromatolithenlandschaft bei Santa Pola, SO-Spanien.*

***Es ist jedes Mal ein Wunder, wenn nach einer Operation am offenen Herzen, während der das Herz abgestellt war und seine Funktionen durch eine Maschine übernommen wurden, die Maschine wieder abgehängt wird und mit großer Spannung beobachtet wird, wie das Herz seine Funktion wieder aufnimmt.***

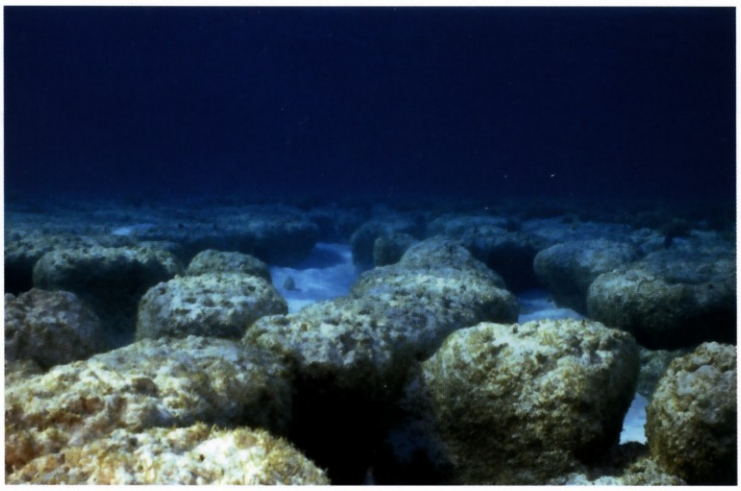
Meistens tut es dies und niemand weiß eigentlich, warum. Die Zeit des Herzstillstands und somit die Zeit des Sterbens war offensichtlich noch nicht gekommen. Wenn ein Mensch geboren wird, wenn er den Mutterleib verlässt und selbständig zu atmen beginnt, hat er seit seiner Zeugung im Mutterleib etwa 3,6 Milliarden Jahre menschliche Entwicklungsgeschichte durchlebt, in rund neun Monaten, und zwar jeder von uns. Und jeder Schritt unserer Entwicklungsgeschichte im Mutterleib ist ein biochemischer Versuch, wobei sich erst mit der Geburt herausstellen wird, ob wir leben. Meistens tun wir es. Und wir wissen nicht, warum. Die ganze menschliche Entwicklung ist biochemisch zwar eine logische Angelegenheit, aber dass wir nach unserer Geburt die Verantwortung über unser Leben übernehmen, ist alles andere als logisch. Wir könnten uns füttern lassen, solange es Futter gibt, aber kaum wäre das Futter aufgebraucht, wären wir das auch – das chemische Leben wäre zu Ende. Leben ist der aktive Teil, uns unser Futter zu besorgen, angefangen beim Suchen nach der Mutterbrust bis hin zum Besuch eines luxuriösen Restaurants.

Es wird viel investiert, um herauszufinden, ob es außerirdisches Leben gibt. Die Argumente für mögliches anderes Leben sind meist der Nachweis von Strukturen, die früheres Wasser hinterlassen hat, oder organische Verbindungen, wie sie im irdischen Leben verwendet werden. Aber den Nachweis von einst fließendem Wasser auf einem andern Planeten oder die Entdeckung einer Aminosäure in einem Meteoriten mit Leben gleichzusetzen, mag einer netten Vorstellung gleichkommen, die allein genommen für die Entwicklung eines Lebens, wie wir es auf der Erde haben, Lichtjahre entfernt ist. Wir haben trotz aller biochemischen Kenntnisse keine Vorstellung, woher der Impuls für den Beginn des Lebens auf der Erde kommt, der Impuls, der uns das Leben einhaucht.

## Stromatolithe

Ein Blick zurück in die biochemische Frühzeit der Erde, auch ohne das Verständnis des notwendigen Impulses, soll uns klar machen, dass es für die Entwicklung des modernen Lebens auf der Erde eine „Mise en Place" brauchte, die einiges mehr beinhaltete als fließendes Wasser und ein paar Aminosäuren. Stromatolithe, die ältesten Riffstrukturen der Erde, sind die Zeugen dieser Entwicklung. Bereits 1908 begründete der deutsche Geologe Ernst Kal-

kowsky (1851–1938) den Begriff „Stromatolith": „Stromatolith soll Kalkmassen bezeichnen, die eine feine, mehr oder minder ebene Lagenstruktur besitzen und organischem Ursprung zuzusprechen sind." Obwohl Kalkowsky noch nicht wusste, dass Bakterien mit Hilfe des Sonnenlichts die Stromatolithe erbauten, erkannte er die feine Lagenstruktur (1), die nur durch mikroskopisch kleine Lebewesen geschaffen werden konnte. Stromatolithe stellen die ältesten Riffstrukturen der Erde dar. Um zu verstehen, weshalb sie entstanden sind und vor allem, warum sie vereinzelt heute noch gebildet werden, dafür müssen wir sehr weit zurückblicken. „You are looking at a chain of life that stretches back 3.5 billion years!" so Bob Ginsburg zu Bob Dill, zwei amerikanische Geologen, nach der Entdeckung moderner Stromatolithe auf den Bahamas (2). Mit ihrem Erscheinen vor rund 3,5 Milliarden Jahren begann sich die Welt zu verändern.



*2: Subtidale Stromatolithenriffe in den Bahamas, die 1984 von Bob Dill entdeckt wurden.*

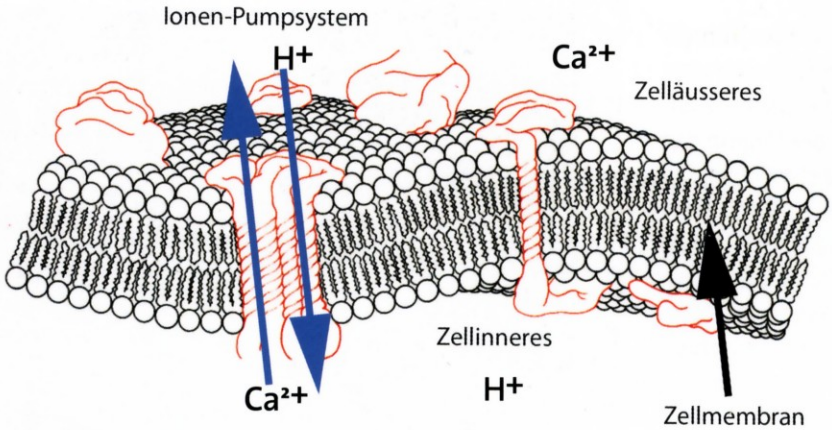
## Der Weg zum Leben

Die Elemente Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Helium (He) treten in kosmischen Nebeln am häufigsten auf. So liegt die Vermutung nahe, dass auch eine erste heiße Atmosphäre der Erde, die kurz nach ihrer Entstehung vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstand, sich aus diesen Elementen zusammensetzte. Die Kollision der frühen Erde mit dem Planeten Theia, der etwa die Größe des Planeten Mars hatte, war nicht nur die Ursache der Entstehung des Mondes, sondern veränderte auch die Atmosphäre. Die bei diesem Aufprall (Giant Impact) freigesetzte Energie führte vermutlich bei über 2000°C zu einem großräumigen Aufschmelzen der Erde und damit verbunden zu einer extremen Ausgasung von Kohlendioxid ($CO_2$) und Wasserdampf ($H_2O$).

Als sich die Erde auf etwa 200°C abgekühlt hatte, kondensierte der Wasserdampf der Atmosphäre. Es begann zu regnen, vielleicht mehrere tausend Jahre lang, und es entstanden die frühen Ozeane. Sie waren zu jener Zeit kaum sehr tief, da es noch keine Plattentektonik gab, welche zu Tiefseegräben führte. Vulkanismus und heisse, energiereiche Gasaustritte, die wir als „Schwarze Raucher" von den Nahtstellen der Erdplatten oder von den Geysiren des Yellowstone Nationalparks (USA) her kennen, gab es aber sehr wohl. Im Bereich dieser Gasaustritte dürfte wie heute ein sehr schwefliges Milieu geherrscht haben. Mit den Gasen gelangten unter anderen auch Stickstoffverbindungen in die Ozeane. Aus ihnen konnten Proteine, die Bausteine des Lebens, entstehen. Wegen der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Proteinen und dem schwefligen Ozeanwasser bildeten sich um die Proteine durchlässige Membranhüllen, die sie fortan von der flüssigen Umgebung trennten. Damit war eine chemische Barriere zwischen dem Innern und dem Äußern der Hülle geschaffen worden – eine Zelle hatte sich gebildet. Im abgeschlossenen Inneren sollten in der Folge biologische Funktionen ablaufen, aus denen sich das Leben zu entwickeln begann.

Zum Leben braucht es eine Zelle, die zunächst wächst und sich dann teilt und Energie, die dafür sorgt, dass das Wachstum und die Teilung überhaupt stattfinden. Um Leben entstehen lassen zu können, muss daher sichergestellt sein, dass immer genügend Energie in einer nutzbaren Form an dem Ort vorhan-

*1: Stromatolithische Lagenstruktur über einem rezenten Krebsgang in den Bahamas. Maßeinheit = 1 cm.*



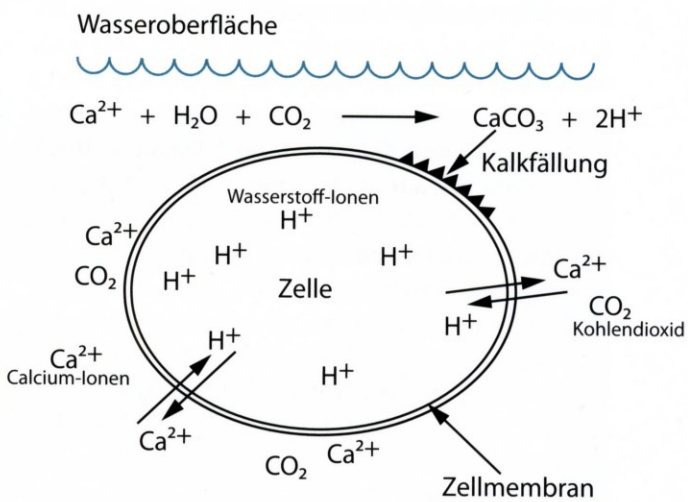

*3: Schematische Darstellung des Ausschnitts einer Zellmembran mit einem Pumpsystem für den Austausch von Wasserstoff-Ionen, die als Energieträger ins Zellinnere fließen, mit giftigen Calcium-Ionen, die nach außen transportiert werden.*

den ist, wo sie gebraucht wird. Aufgrund vieler Forschungsarbeiten liegt die Vermutung nahe, dass die urtümlichen Lebensformen in einem sauren, energiereichen Milieu in der Umgebung vulkanischer Gasaustritte entstanden sind. Unterschiedliche Mikroorganismen probierten wahrscheinlich verschiedene Stoffe als Energiespender aus, und zumindest eine dieser Lebensformen versuchte es in dieser heißen Umgebung mit freiem Wasserstoff, der aus dem Zerfall von Schwefelwasserstoff zu Wasserstoff und Schwefel entsteht. Freier Wasserstoff und Ammoniak waren zu der Zeit aber auch Bestandteil der Atmosphäre und so siedelten sich gewisse Organismen im Übergangsbereich von Wasser und Atmosphäre an, zum Beispiel in der Gezeitenzone, wo zu jener Zeit in der frühen Atmosphäre noch endlos Wasserstoff zur Verfügung stand. Trotzdem schienen die Tage jener Mikroorganismen gezählt, da Wasserstoff das einzige Element auf der Erde ist, das zu leicht ist, um von der Erdanziehung zurückgehalten zu werden.

## Der Anfang der Kalkbildung

Sämtliche bekannten Organismen auf der Erde benützen eine Art elektrochemische Pumpe, mit der geladene Teilchen (Ionen) durch die Zellmembran vom Zellinnern nach außerhalb der Zelle und umgekehrt transportiert werden. So kann man davon ausgehen, dass dieses Pumpsystem bereits als Produkt der chemischen Evolution in der Frühphase des Lebens entstand. Mikroorganismen, die Wasserstoff als Energiespender verwendeten, nützten das Austauschsystem, um Wasserstoff ins Zellinnere und störende Substanzen, wie zum Beispiel Calcium-Ionen, nach außen zu transportieren (3). Wenn Calcium-Ionen in organische Zellen gelangen, wirken sie als „Gift" für die Zellen. Ihre Konzentration muss im Zellinnern niedrig gehalten werden (< 0.1 µmol). Durch den Ionenaustausch von Wasserstoff und Calcium, das während der Frühzeit der Erde durch die Verwitterung von magmatischen Gesteinen in die Ozeane und mit dem Ozeanwasser in die Zellen gelangte, entstand innerhalb der Zelle eine erhöhte Wasserstoffkonzentration und außerhalb davon eine niedrigere. Chemisch gesprochen, wurde es innerhalb der Zelle „sauer" und direkt außerhalb der Zellmembran „alkalisch" (ob sauer oder alkalisch, wird durch den Wasserstoffgehalt definiert – den pH-Wert).

Falls durch diesen Austausch die Calcium-Ionen mit Kohlendioxid reagierten, das aus dem Erdinneren ins Meerwasser gelangt war, entstand in Form winziger Kristalle Calciumkarbonat – Kalk. Dadurch wurden die giftigen Calcium-Ionen neutralisiert und es lagerten sich kleinste Kalkkristalle auf der Außen-




*4: Schematische Darstellung einer Zelle, auf deren Membran durch den Austausch von Wasserstoff-Ionen und Calcium-Ionen Kalkkristalle ausgefällt werden.*

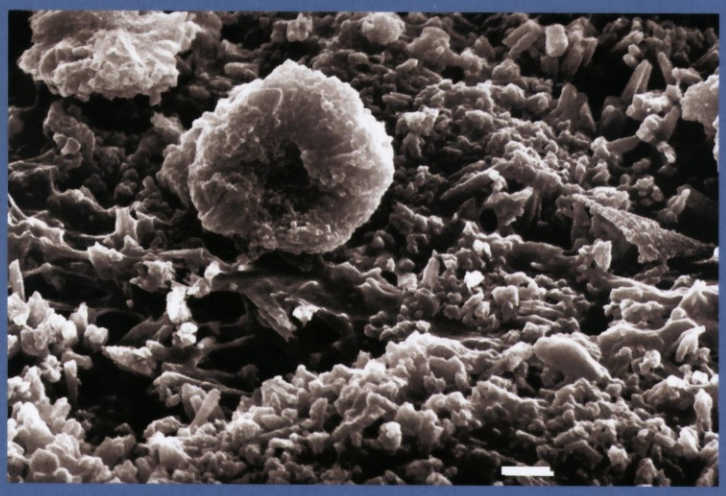
seite von Zellmembranen an (4), was dazu führen konnte, dass die Zelle ungewollt von einer Kalkkruste ummantelt wurde – inkrustierte – und abstarb (5). Mit solchen Mikroorganismen könnte der Beginn der Kalkproduktion auf der Erde stattgefunden haben.

## Photosynthese – unabhängiges Leben

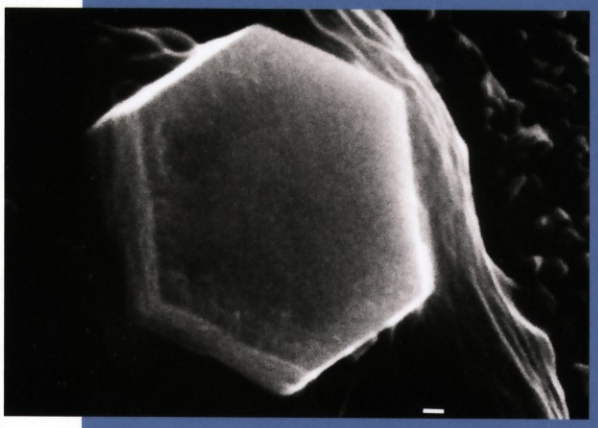
Mit dem zunehmenden Verlust von Wasserstoff in der Erdatmosphäre entstand eine weitere Atmosphäre mit Gasen wie Kohlendioxid und elementarem Stickstoff. Die Weiterentwicklung jenes Lebens auf der Erde, das auf der Basis der Wasserstoffenergie beruhte, hing nun davon ab, ob es einigen Organismen gelingen würde, von der „linearen" Ausbeutungswirtschaft zur „zyklischen" Wiedergewinnungswirtschaft überzugehen. Die Rettung beruhte auf der Erfindung der Photosynthese, mit der das Sonnenlicht als unerschöpfliche Energiequelle verwendet werden konnte.

Alle Atome enthalten Elektronen (negativ geladene Teilchen), die sich in einer Elektronenhülle um den Atomkern bewegen. Gewisse Atome möchten ihre Elektronen gerne abgeben, andere wiederum solche aufnehmen. Wenn das geschieht, fließt Strom; es entsteht Energie. Nur braucht es auch eine gewisse Energie, damit Elektronen ihre Hülle verlassen können. Wenn Photonen des Sonnenlichts auf Elektronen treffen, entsteht genügend Energie, um diese aus ihrer Hülle zu schleudern. Durch diesen photoelektrischen Effekt entsteht Strom, mit dem Wasserstoff, der an Moleküle wie z.B. Wasser gebunden ist, abgespalten werden kann. Auf diese Weise entstand in der Erdfrühzeit die erste Photovoltaikanlage des Lebens und Wasserstoff steht seither als Energieträger endlos zur Verfügung. Das Leben der „Wasserstoffnutzer" konnte sich auf der Erde weiter entwickeln, und sie wurden als autotrophe Organismen unabhängig von einer anorganischen Wasserstoffquelle.

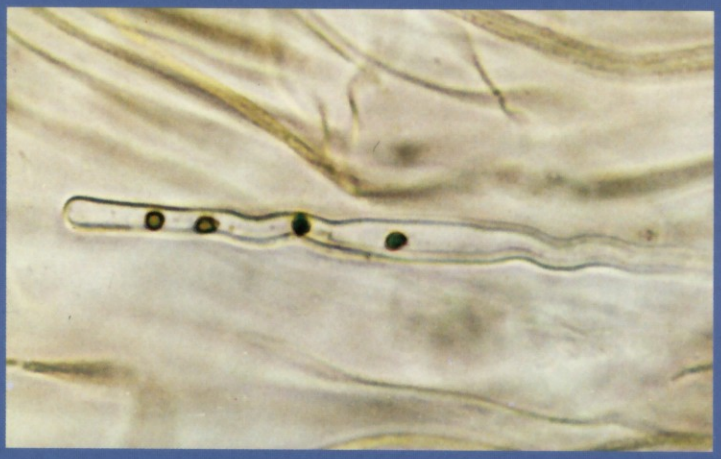
Unter den Gasen, die aus dem Erdinneren in die Ozeane gelangten, befand sich auch Schwefelwasserstoff, der sich über die Meeresböden ausbreitete, da er schwerer ist als Wasser. Unter hohen Temperaturen, wie sie bei Gasaustritten aus dem Erdinneren herrschen, zerfällt Schwefelwasserstoff in Wasserstoff und Schwefel. An solchen Stellen stand somit immer genügend Wasserstoff für die Mikroorganismen zur Verfügung. Mit zunehmendem Abstand von den heißen Gasaustritten wurde die Umgebung kühler und der Schwefelwasserstoff zerfiel nicht mehr in Schwefel und Wasserstoff. Gewisse Bakterien schaff-



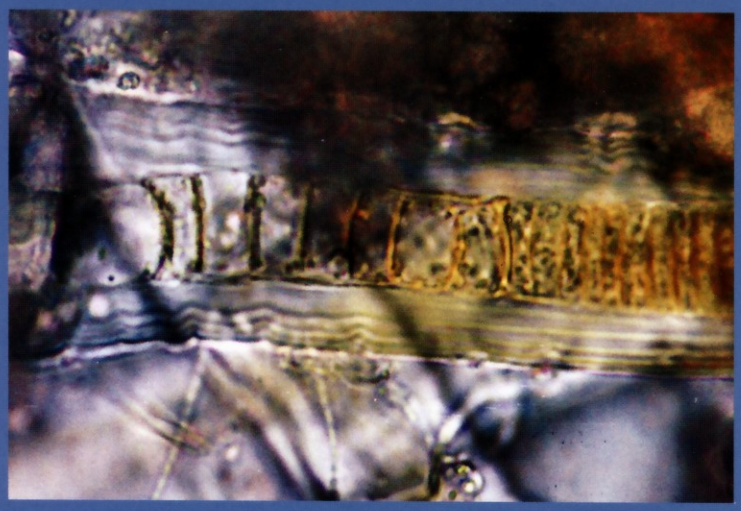
*5: REM-Aufnahme eines Einzellers, der durch die Ausfällung von Kalkkristallen komplett inkrustiert wurde. Die kleinen Aragonitkristalle im Vordergrund (hell) entstanden wahrscheinlich bei der Zersetzung von organischem Material (dunkel). Moderner Stromatolith, Bahamas. Maßstab = 1 Mikrometer.*



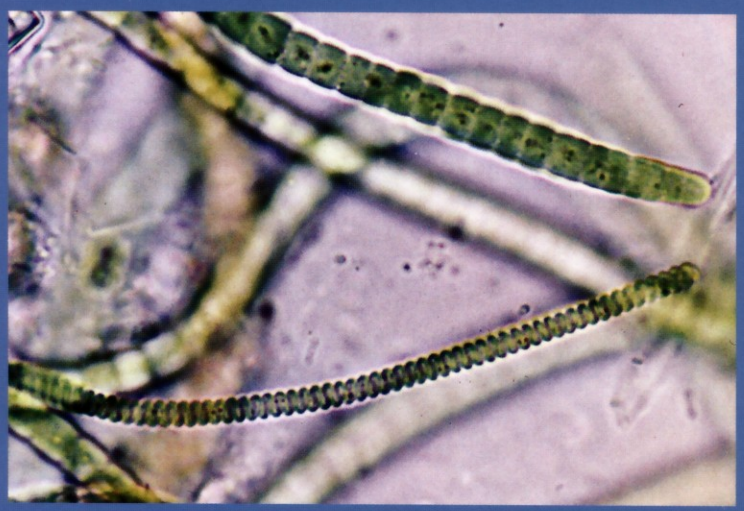
*6: REM-Aufnahme eines Schwefelkristalls aus einer organischen Lage mit Schwefelbakterien in einem modernen Stromatolithen, Bahamas. Maßstab = 100 Nanometer.*



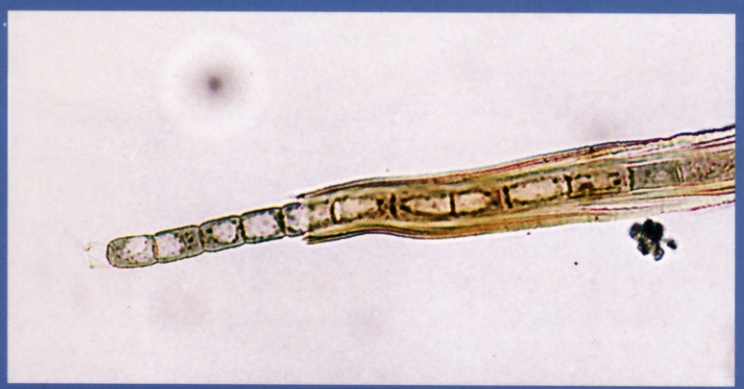
*7: Unbekanntes Schwefelbakterium mit Schwefelkristalleinschlüssen aus der organischen Lage eines modernen Stromatolithen, Bahamas. Ø des Bakteriums ca. 3 Mikrometer.*



*8: Cyanobakterienzellen mit einer gerundeten Heterocyste für die Stickstofffixierung (Bildmitte links). Ø der Zellen ca. 4 Mikrometer.*



*9: Cyanobakterien, die Erfinder der Sauerstoff-Photosynthese. Im oberen Bildbereich befindet sich ein Filament der Gattung Oscillatoria, im unteren ein Filament der Gattung Spirulina. In der Bildmitte befinden sich einige unbekannte kugelige Formen. Ihre grüne Farbe erhalten die Cyanobakterien durch den Farbstoff Chlorophyll. Ø von Oscillatoria ca. 4 Mikrometer.*



*10: Mehrzelliges Cyanobakterienfilament der Gattung Dichothrix. Durch die Photosynthese wird eine Exopolymerschicht produziert (rechts), die den Zellen als Schutzhülle dient. In ihr werden unter anderem Calcium-Ionen neutralisiert, damit diese nicht in die Zellen gelangen. Ø Dichothrix ca. 10 Mikrometer.*

ten es nun, die Energie der Photovoltaik so zu nutzen, dass Wasserstoff vom Schwefelwasserstoff abgespalten wurde, um ihn dann für ihren Stoffwechsel zu verwenden. Dies geschah in Form einer Photosynthese – der Schwefelphotosynthese. Schwefelwasserstoff reagierte dabei zusammen mit Kohlendioxid zu elementarem Schwefel (6) und extrazellulären Kohlenwasserstoffen (Exopolymere), die giftige Ionen wie Calcium neutralisierten und dadurch die Zellen schützten. Dieser Prozess wird heute noch von den Schwefelbakterien ausgeführt (7). Kalk, der ebenfalls Calcium-Ionen bindet, konnte in dieser sauren Schwefelwasserstoff-Umgebung nicht entstehen.

## Die globale Energiewährung ATP

Mit der Abspaltung des Wasserstoffs durch die Photosynthese entstand an den Membranwänden der Bakterienzellen eine neue Substanz – Adenosintriphosphat (ATP), welche bald als globale Energiewährung eingesetzt und die lebendige Welt revolutionieren würde. Alle Lebewesen, die sich nach den Bakterien entwickelten, verwenden seit ihrer Entstehung nicht mehr Wasserstoff, sondern ATP als Energieträger für ihren Stoffwechsel: die Pilze, die Pflanzen, die Tiere und damit auch der Mensch. Durch die sonderbare Tatsache, dass ein Organismus zur Sicherstellung seiner eigenen Energiequelle (des Wasserstoffs) unbeabsichtigt eine neue geschaffen hatte (das ATP), wurde der Grundstein für die Evolution des gesamten kommenden Lebens auf der Erde gelegt.

## Stickstofffixierung – die Verwendung von elementarem Stickstoff

Organismen wollen nicht nur ihren Motor am Laufen halten, sie wollen auch wachsen und sich vermehren. Das ist nur mit Hilfe von Proteinen möglich. Um genügend Proteine zu bilden, braucht es Stickstoff. Stickstoff muss aber in einer energiereichen Form wie Ammoniak vorhanden sein, damit er verwendet werden kann. Die Vermehrung und Ausbreitung der Organismen führte zu einem höheren Bedarf und es drohte, nicht mehr genügend Ammoniak zur Verfügung zu stehen. Um die Weiterentwicklung des Lebens garantieren zu können, musste der elementare Stickstoff in der Atmosphäre verwendet und in Ammoniak umgewandelt werden. Dies gelang mit der Produktion von energiereichem ATP, welches durch die Abspaltung von Wasserstoff mit Hilfe der Photosynthese entstand. Damit war die Stickstofffixierung geboren, die bis heute nur durch ein paar

wenige Bakterienarten ausgeführt werden kann. Cyanobakterien entwickelten zur Stickstofffixierung spezielle Zellen, die Heterocysten (8).

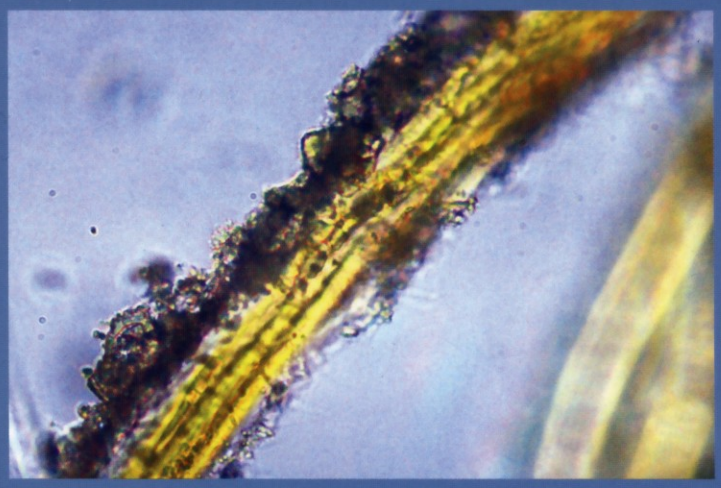
## Die Sauerstoff-Photosynthese

Lange währte die ATP-Produktion mit Hilfe der Schwefel-Photosynthese wohl nicht. Durch die weitere Abkühlung der Erdoberfläche kondensierten riesige Mengen Wasser und füllten zunehmend die Ozeanbecken. Da Wasser leichter ist als Schwefelwasserstoff, bildete sich eine wässrige Trennschicht zwischen der stickstoffhaltigen Atmosphäre und dem Schwefelwasserstoff-Milieu. Dadurch konnte mit der Schwefel-Photosynthese kaum mehr Stickstoff aus der Atmosphäre in Ammoniak umgewandelt werden. An der Grenze zwischen Ozean und Atmosphäre musste eine Photosynthese entstehen, die es erlaubte, Wasserstoff aus dem jetzt reichlich vorhandenen Wasser zu entnehmen. Mit Hilfe eines zusätzlichen Photosystems wurde die Photosynthese-Technik angepasst und es entstand die Sauerstoff-Photosynthese. Wasser und Kohlendioxid wurden nun zu Exopolymeren und freiem Sauerstoff synthetisiert. Die Organismen, die diesen Prozess bis heute bewerkstelligen, sind die Cyanobakterien (9).

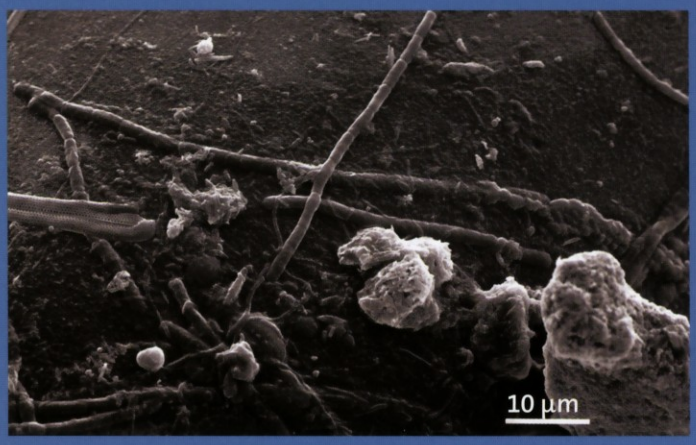
## Die Umwelt verändert sich

Mit der Einführung der Sauerstoff-Photosynthese wurde die schwerwiegendste Umweltveränderung in der Erdgeschichte eingeläutet. Sie war die „Mise en Place" zur Entwicklung des heutigen Lebens auf der Erde und vieler geologischer Erscheinungen auf der Erdoberfläche. Mit der Sauerstoff-Photosynthese wurde die ATP-Produktion optimiert, was zur Folge hatte, dass atmosphärischer Stickstoff in großem Stil in Ammoniak umgewandelt und in die Weltmeere eingebracht wurde. Der Energieträger für die Weiterentwicklung des Lebens war jetzt nicht mehr die Wärme aus dem Erdinnern, sondern die Sonne, die auf der gesamten Erdoberfläche zusammen mit Wasser und dem atmosphärischen Stickstoff bis heute fast grenzenlos zur Verfügung steht. Aber es dauerte noch rund 2,5 Milliarden Jahre, bis in den Meeren genügend gelöster Ammoniak vorhanden war, um die große Evolution des Lebens auszulösen.

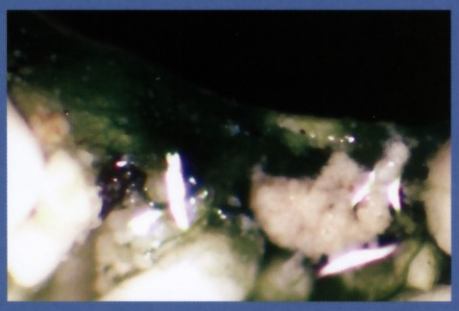
Mit der Sauerstoffproduktion durch die Photosynthese starben wahrscheinlich alle Organismen aus, die sich nicht in eine sauerstofflose Umgebung flüchten konnten. Auch die Geologie wurde verändert, indem über einen Zeitraum von zwei Milliarden Jahren alle oxidierbare Materie in den Weltmeeren



*11: Ausschnitt eines Cyanobakterien-Filaments der Gattung Dichothrix. Durch die Photosynthese wurden Calcium-Ionen aus den Zellen und Wasserstoff-Ionen in die Zellen gepumpt, was zu einem großen pH-Unterschied führte. Dadurch kam es im äußeren basischen Bereich zur Ausfällung von Kalkkristallen auf der Exopolymerschicht. Dicke der Kalklage ca. 10 Mikrometer.*




*12: Blick auf die Oberfläche eines Sandkorns. Oberhalb der Bildmitte befindet sich ein Cyanobakterienfilament, das sich über die gesamte Bildbreite ausdehnt. Links erkennt man noch die einzelnen Zellfragmente. In der Mitte wird das Filament von einem anderen Cyanobakterium überkreuzt und von vielen Mikroorganismen überlagert und zersetzt. Die Zellstrukturen sind nicht mehr erkennbar. Im rechten Bereich erkennt man Kalkkristalle, die durch die Zersetzung des organischen Materials und somit der Freisetzung der ursprünglich gebundenen Calcium-Ionen entstanden sind.*

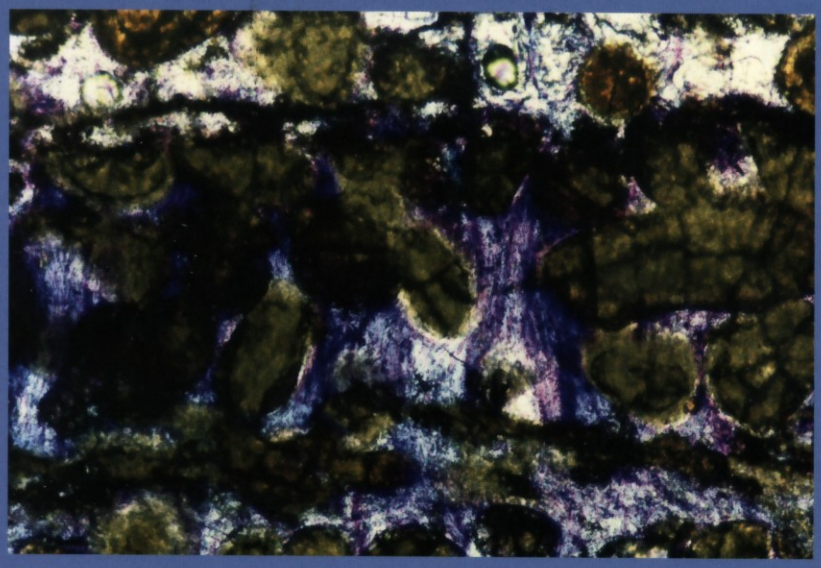


*13: Grüner Biofilm einer Cyanobakterienkolonie über einer Sandlage. In der grünen organischen Masse erkennt man einige weiße Kalkflecken, die bei der Zersetzung des Biofilms entstanden sind. Mit der Zeit überdecken diese Kalkausfällungen die gesamte Sandoberfläche und bilden damit eine neue stromatolithische Lage. Die weißen Sandkörner in der unteren Bildhälfte sind ca. 0.1 mm groß.*

oxidierte, was unter anderem zur Bildung der größten Eisenerz- und Uranlagerstätten der Welt führte. Erst anschliessend gelangte der Sauerstoff in die Atmosphäre, wo er allmählich die nötigen Bedingungen für die spätere Lebensentwicklung auf dem Festland schuf.

## Der Beginn der Kalkgeologie

Im Gegensatz zum sauren Schwefelwasserstoffmilieu der Schwefelbakterien herrschen jetzt im Meerwasser neutrale oder sogar leicht alkalische chemische Bedingungen. Mit der Sauerstoff-Photosynthese der Cyanobakterien werden weiterhin Exopolymere produziert, die giftige Calcium-Ionen neutralisieren (10). Diese werden, abhängig von den chemischen Bedingungen, in den Exopolymeren als Kalkkristalle ausgefällt (11) oder an organische Moleküle gebunden. Da Exopolymere in wässrigen Lösungen nicht ewig haltbar sind, zerfallen sie mit der Zeit in kleinere Bestandteile. Dadurch werden die Calcium-Ionen, die an Moleküle gebunden waren, freigesetzt und es bilden sich auf der Polymerhaut Kalkkristalle (12). Treten die Cyanobakterien in Kolonien auf, bilden sie einen Biofilm aus Exopolymeren, in dem die Kalkkristalle ausgefällt werden (13). Es entsteht eine feine Kalkschicht, eine erste stromatolithische Lage. Um weiterhin Photosynthese treiben zu können, müssen die Cyanobakterien nun wieder die Oberfläche der Kalkschicht besiedeln, um ans Licht zu kommen, und das Prozedere beginnt von vorne. Erneut wird sich eine Kalkschicht bilden (14). Auf diese Weise entwickelten sich Schicht für Schicht die ersten Stromatolithe – die ersten Riffe der Erdgeschichte, gebaut von Cyanobakterien. Damit begann die Kalkgeologie auf der Erdoberfläche, im Gezeitenbereich zwischen Ozean und Atmosphäre (15). Der Grund dafür war, dass nur in diesem Bereich elementarer Stickstoff von den Cyanobakterien als Energiequelle verfügbar gemacht werden konnte. Erst über 2 Milliarden Jahre später, als genügend gelöster Ammoniak in den Ozeanen vorhanden war, benutzten auch gewisse Cyanobakterien die bequemere Art der Energienutzung. Sie verwendeten lieber Ammoniak, als selbst den hohen Energieaufwand der Stickstofffixierung zu betreiben. Dadurch entstanden bis zur Entwicklung anderer Kalk produzierender Organismen auch in tieferen Bereichen des Meeres Stromatolithe, aber immer nur im lichtdurchfluteten Bereich des Meeres, da auch diejenigen Cyanobakterien, die keinen Stickstoff fixieren, Photosynthese betreiben müssen. So entstanden z.B. an den Kontinentalabhängen neue Formen, wie die spitz zulaufenden „*Conophyton*"-Stromatolithe (16). Mit der fortschreitenden Evolution durch den höheren Nährstoffgehalt in den



*14: Dünnschlifffoto einer Wechsellagerung von Sand- und stromatolithischen Kalklagen. Die eingefärbten Cyanobakterienfilamente (blau-violett) zeigen den Weg der Cyanobakterien, nachdem sie von einer Sandschicht überlagert wurden. Sie bewegten sich aufwärts und bildeten einen neuen Biofilm mit einer neuen Kalklage (dunkle, feinkörnige Schicht). Zuoberst erkennt man bereits frische Sandkörner, die sich auf der stromatolithischen Kalkschicht wiederum ablagerten. Ø Sandkörner ca. 0.1 mm. Die Risse in den Sandkörnern entstanden bei der Herstellung der Dünnschliffe.*

*15: Laminierter Stromatolith in der Gezeitenzone eines Strands auf den Bahamas. Die Löcher in den Lagenstrukturen entstanden durch Bioerosion, die Aktivität von kleinen Bohrschnecken oder Muscheln.*

*16: Spitz zulaufende Conophyton-Stromatolithe aus dem Proterozoikum (ca. 800 Millionen Jahre) im Death Valley, Kalifornien. Solche Stromatolithe bildeten sich im lichtdurchfluteten tieferen Wasser am Abhang eines Tiefseebeckens. Sie wurden von Cyanobakterien gebaut, die selbst keinen Luftstickstoff mehr fixierten, sondern bereits gelösten Ammoniak als Nährstoffquelle verwendeten.*

Meeren entwickelten sich weitere Organismen, die Kalk in Form von Skeletten und Schalen produzierten und auf diese Weise zum Aufbau größerer Kalkriffe beitrugen. Damit verschwanden die Stromatolithe allmählich im tieferen Wasser. Am Aufbau der heutigen bekannten Korallenriffe sind nicht nur Korallen beteiligt, sondern sämtliche kalkproduzierenden Organismen, die sich im Laufe der Erdgeschichte entwickelt haben, angefangen bei den Cyanobakterien.

Stromatolithe gibt es bis heute. Wie zu ihrer Geburtsstunde kommen sie an jenen Orten vor, an denen nicht genügend gelöster Ammoniak im Wasser vorhanden ist und wo er mit Hilfe der Photosynthese aus elementarem Luftstickstoff hergestellt wird – im Gezeitenbereich. Heute kennt man nur zwei Orte in marinen Systemen, an denen Stromatolithe vorkommen, die Shark Bay in Australien und die Exuma Cays, eine Inselkette in den Bahamas. An beiden Orten gibt es kaum eine Zufuhr von energiereichem Stickstoff durch Flüsse oder Bäche vom Festland her und somit offensichtlich ein Defizit an gelöstem Ammoniak im Meerwasser, was die ausgedehnte Entwicklung höherer Riffsysteme in Ufernähe verhindert.

Ein unscheinbares Cyanobakterium, das eigentlich nichts anderes wollte, als vom Wasser den Wasserstoff für seinen eigenen Stoffwechsel wegnehmen, hat die Welt verändert! Wegen ihm wechselte das Zentrum der Lebensevolution von den untermeerischen Gasaustritten in den Gezeitenbereich der Meere, wo Nährstoffe produziert wurden, die wiederum in die Meerestiefen zur Entwicklung weiteren Lebens gelangten. Für die Geologen hat es Riffe gebaut – Stromatolithe, die heute als einzige Zeugen dieser evolutionären Revolution erhalten geblieben sind.

**Literatur zum Thema:**


Dill, R. F., E. A. Shinn, A. T Jones, K. Kelly & R. P. Steinen (1986): Giant subtidal stromatolites forming in normal salinity water. Nature 324: 55–58.

Feldmann, M. (1997): Stromatolitic laminae formation and carbonate precipitation associated with microbial mats from modern Bahamian environments. Facies 36: 200–203.

Feldmann, M. (2013): The influence of the biological nitrogen cycle on stromatolite formation. 11th Swiss Geoscience Meeting, Lausanne. Abstracts.

Feldmann, M. & J. A. McKenzie (1997): Messinian stromatolite-thrombolite associations, Santa Pola, SE Spain: an analogue for the Palaeozoic? Sedimentology 44: 893–914.

Feldmann, M. & J. A. McKenzie (1998): Stromatolite-thrombolite associations in a modern environment, Lee Stocking Island, Bahamas. Palaios 13: 201–212.

Kalkowsky, E. (1908): Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. Z. Dtsch. Geol. Ges. 60: 68–125.

Krumbein, W. E. (1983): Stromatolites – The challenge of a term in space and time. Precambrian Research 20: 493–531.

Oschmann, W. (2016): Evolution der Erde. Haupt Verlag, Bern.

**Dr. Mark Feldmann** studierte und promovierte an der ETH Zürich. Nach einem Forschungsaufenthalt an der Harvard-Universität (USA) folgten Projekte an der ETH Zürich und der Universität Göttingen. Anschließend war er Dozent an der Universität Stuttgart, bevor er als praktizierender Geologe verschiedene Projekte in der Region Zürich leitete. Seit 2002 betreibt er sein eigenes Geologiebüro in Niederurnen (CH) und vermittelt Geologie in Form von Kursen, Vorlesungen und Führungen.