

# ENTSTEHUNG DES LEBENS

Vom Molekül zur  
komplexen Zelle

## **Astrochemie**

Die Jagd nach  
außerirdischen Molekülen

## **Präbiotische Evolution**

Der Ursprung  
irdischen Lebens

## **Endosymbiose**

Kraftwerke für  
die Zelle



Antje Findekleer  
E-Mail: [findekleer@spektrum.de](mailto:findekleer@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
unser Blauer Planet ist etwas ganz Besonderes. Zumindest ist er bisher der einzige uns Menschen bekannte, auf dem sich Leben entwickelt hat. Doch wie ging das damals vor sich, vor Milliarden Jahren? Welche Umweltbedingungen herrschten, wie liefen die ersten Schritte ab von einzelnen Molekülen hin zu ersten lebenden Organismen? Und welche Rolle spielten Einträge aus dem All?

Eine spannende Entdeckungsreise in die Vergangenheit wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 25.07.2016

Folgen Sie uns:

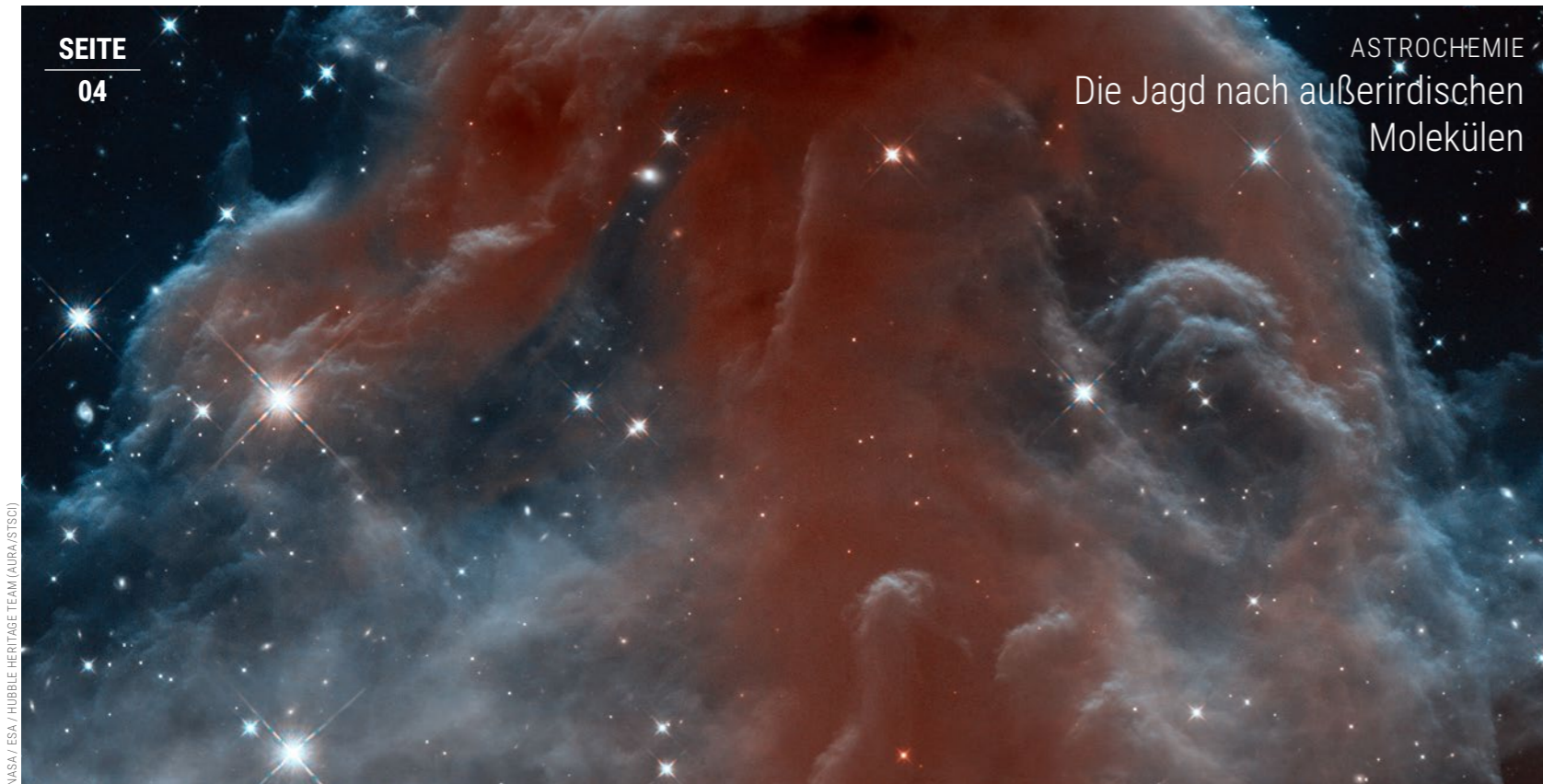


**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGERIN DIGITAL:** Antje Findekleer  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



SEITE  
04

ASTROCHEMIE  
Die Jagd nach außerirdischen  
Molekülen

NASA / ESA / HUBBLE HERITAGE TEAM (AURA/STSC)

- 14 CHIRALITÄT  
Asymmetrische Moleküle aus dem All
- 16 UMWELTBEDINGUNGEN  
Warm trotz schwacher Sonne
- 40 CHEMISCHE EVOLUTION  
Schöne, alte RNA-Welt?
- 46 LAND ODER MEER?  
Die Hydrothermalquelle in uns
- 60 MIKROBIOLOGIE  
Entscheidendes Bindeglied in der Evolution  
des Lebens
- 65 UR-ÖKOSYSTEME  
Kein Mangel auf der frühen Erde
- 67 ATMOSPHÄRE  
Dünne Luft



SEITE  
18

PRÄBIOTISCHE EVOLUTION  
Der Ursprung irdischen Lebens

FOTOLIA / DENCHIK



HERKUNFT DES WASSERS  
Als die Meere vom Himmel fielen


SEITE  
30



ENDOSYMBIOSE  
Der Schritt zum komplexen Leben

SEITE  
51

ISTOCK / WIDOMAN



ASTROCHEMIE

# Die Jagd nach außerirdischen Molekülen

von Clara Moskowitz

Astrochemiker entdecken im Kosmos viele Verbindungen, die auf der Erde nicht existieren können. Moleküle im Weltall könnten dazu beitragen, eine der grundlegenden Fragen des Universums zu beantworten: Wie entstand das Leben?

**S**eltsames verbarg sich im Pferdekopfnebel. Der nach seiner Silhouette benannte »Nebel« ist eigentlich eine gewaltige Wolke aus Gas und Staub, in der Sterne entstehen, 1500 Lichtjahre von der Erde entfernt. Das unverwechselbare Himmelsobjekt ist wissenschaftlich gut untersucht. Forscher des französischen Instituts für Millimeter-Radioastronomie IRAM richteten 2011 erneut ihr 30-Meter-Teleskop in der spanischen Sierra Nevada auf das Objekt. Es ging ihnen nicht um ein weiteres Bild des Pferdekopfs – sie wollten sein Spektrum. Die Strahlung, aufgebrochen nach Wellenlängen, verrät den Forschern die chemische Zusammensetzung eines Objekts. Auf dem Bildschirm ähnelt ein solches Spektrum Ausschlägen eines Herzmonitors. Jeder Ausschlag deutet auf ein Molekül, das Strahlung einer bestimmten Wellenlänge emittiert.

Jedes Molekül im Universum erzeugt seine eigenen charakteristischen Ausschläge, in Abhängigkeit von seinem Aufbau aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Die meisten Ausschläge konnten die Forscher problemlos bekannten chemischen Stoffen wie Kohlenmonoxid, Formaldehyd oder

neutralem Kohlenstoff zuordnen. Doch da gab es auch eine kleine, nicht identifizierbare Linie bei einer Frequenz von 89,957 Gigahertz. Sie stellte die Astronomen vor ein Rätsel – es musste sich um ein bis dahin völlig unbekanntes Molekül handeln.

Sofort nachdem sie die Daten gesehen hatten, begannen Evelyne Roueff von der Sternwarte Paris und andere Chemiker des Teams theoretische Überlegungen darüber anzustellen, welche Art von Molekül ein solches Signal erzeugen könnte. Sie kamen zu dem Schluss, dass es sich um ein lineares Molekül handeln müsse – eine Substanz, deren Komponenten in einer geraden Kette angeordnet sind. Nur eine bestimmte Art eines linearen Moleküls könnte, so die Überlegung der Forscher, das beobachtete spektrale Muster erzeugen. Bei der Durchsicht von Listen geeigneter Moleküle stießen sie auf  $C_3H^+$ , Propynylidynium. Dieses molekulare Ion war noch nie beobachtet worden. Es gab genau genommen nicht einmal einen Beweis dafür, dass es überhaupt existiert. Wenn es sich bilden würde, dann wäre es hochgradig instabil. Auf der Erde würde es sofort mit irgendeinem anderen Stoff reagieren und sich damit in eine beständigere Substanz umwan-

deln. Doch im Weltraum, wo der Druck niedrig ist und Moleküle selten auf potenzielle Bindungspartner treffen, könnte  $C_3H^+$  möglicherweise doch überleben.

### Detektivarbeiten identifizieren neues Molekül

Roueff und ihre Kollegen untersuchten, ob der Pferdekopfnebel die richtigen Zutaten und Bedingungen für die Entstehung des Moleküls bereithält. Im Jahr 2012 veröffentlichten sie einen Artikel in der Fachzeitschrift »Astronomy & Astrophysics« mit der Schlussfolgerung, die bislang nicht identifizierbare Linie gehöre zu  $C_3H^+$ . »Ich war mir selbst zwar ziemlich sicher«, sagt Roueff, »aber es dauerte zwei bis drei Jahre, um alle anderen davon zu überzeugen, dass wir die korrekte Identifikation hatten.«

Prompt traten Kritiker auf den Plan: Wenn  $C_3H^+$  niemals zuvor beobachtet worden war, wie konnte man dann diese Linie sicher dem Molekül zuordnen? Der Beweis wurde 2014 geliefert, als es Forschern der Universität Köln gelang,  $C_3H^+$  im Labor zu erzeugen – wenn auch nur für kurze Zeit. Das Experiment zeigte nicht nur, dass  $C_3H^+$  existiert, es erlaubte den Forschern auch,

das Anregungsspektrum des Moleküls zu messen – und es stimmt mit dem im Pferdekopfnebel sichtbaren Spektrum überein. »Es ist eine tolle Sache, ein neues Molekül zu finden, an das man vorher nicht einmal gedacht hat«, sagt Roueff. »Man muss wie ein Detektiv arbeiten, um es über eine logische Kette zu identifizieren.«

Ein rätselhaftes Molekül ist also identifiziert – aber es gibt noch viel mehr zu tun. Denn der Pferdekopfnebel ist keine Ausnahme. Egal wohin die Astronomen blicken – wenn sie nur genau genug hinschauen, sehen sie neue, nicht identifizierbare Spektrallinien. Die Stoffe, die der Mensch bisher geschaffen hat, sind nur ein Bruchteil dessen, was die Natur erzeugt hat. Nach Jahrzehnten der Entwicklung theoretischer Modelle und Computersimulationen sowie der Durchführung von Laborexperimenten zur Erzeugung neuer Moleküle können Astrochemiker heute endlich Namen an viele der zuvor nicht identifizierbaren Linien schreiben.

### **Der interstellare Raum ist alles andere als leer**

Noch bis in die 1960er Jahre hinein zweifelten die meisten Wissenschaftler daran, dass

im [interstellaren Raum](#) überhaupt Moleküle existieren könnten: Sie dachten, die Strahlung sei dort zu stark, als dass außer Atomen und einigen wenigen freien Radikalen etwas bestehen könnte. Trotzdem begann Charles Townes von der University of California in Berkeley 1968, nach Molekülen im Weltall Ausschau zu halten. »Ich hatte den Eindruck, viele Astronomen in Berkeley hielten meine Idee für etwas verrückt«, erinnerte sich der 2015 verstorbene Forscher [in einem Bericht für die »Astronomical Society of the Pacific«](#). Doch Townes ließ sich nicht beirren und baute einen neuen Verstärker für die sechs Meter große Antenne des [Creek Radio Observatory](#) in Kalifornien – und entdeckte Ammoniak in der Wolke Sagittarius B2. »Wie einfach – und wie aufregend!«, schrieb er. »Sowohl die Presse als auch die Wissenschaftler fielen geradezu über uns her.«

[Seither haben Astronomen mehr als 200 Moleküle im Weltall gefunden.](#) Viele davon unterscheiden sich erheblich von den auf der Erde bekannten Stoffen. »Wir betreiben Chemie üblicherweise basierend auf den Bedingungen, die auf der Erde herrschen«, erläutert Ryan Fortenberry, Astrochemiker an der Georgia Southern University in den



»Ein Molekül kann Jahr um Jahr umherfliegen, bevor es im interstellaren Raum auf ein anderes Molekül stößt«

[Timothy Lee]



ESO/APEX & MSX/IPAC/NASA

USA. »Wenn wir uns von diesem Paradigma entfernen, gibt es keine Grenzen mehr dafür, welche Chemikalien erzeugt werden können. Wenn man von einem Molekül träumt, egal wie bizarr, gibt es eine endliche Wahrscheinlichkeit dafür, dass es im Verlauf von Äonen und in den gewaltigen Weiten des Alls irgendwo existiert.«

Der Weltraum ist im wahrsten Sinne des Wortes eine außerirdische Umgebung. Die

Temperaturen sind dort stellenweise sehr viel höher sein als auf der Erde, etwa in der Atmosphäre eines Sterns, andererseits aber auch viel niedriger, etwa im relativ leeren interstellaren Raum. Ganz ähnlich erreicht der Druck viel höhere oder viel niedrigere Werte als auf der Erde. Deshalb können sich im Weltall Moleküle bilden, die es auf unserem Planeten nicht geben kann – und sie bleiben erhalten, selbst wenn sie hochgra-

## **DIE GASWOLKE SAGITTARIUS B2 IM ZENTRUM DER GALAXIS**

**Im Jahr 1968 spürten Astronomen Ammoniak in der Gaswolke Sagittarius B2 auf. Seither haben Forscher mehr als 200 Moleküle im Weltall gefunden. Viele davon unterscheiden sich erheblich von den auf der Erde bekannten Stoffen.**

dig reaktiv sind. »Ein Molekül kann Jahr um Jahr umherfliegen, bevor es im interstellaren Raum auf ein anderes Molekül stößt«, sagt Timothy Lee, Astrophysiker am Ames Research Center der NASA. »Wenn es sich zudem in einer Region ohne Strahlung aufhält, kann es für lange Zeit existieren, selbst wenn es nicht stabil ist.«

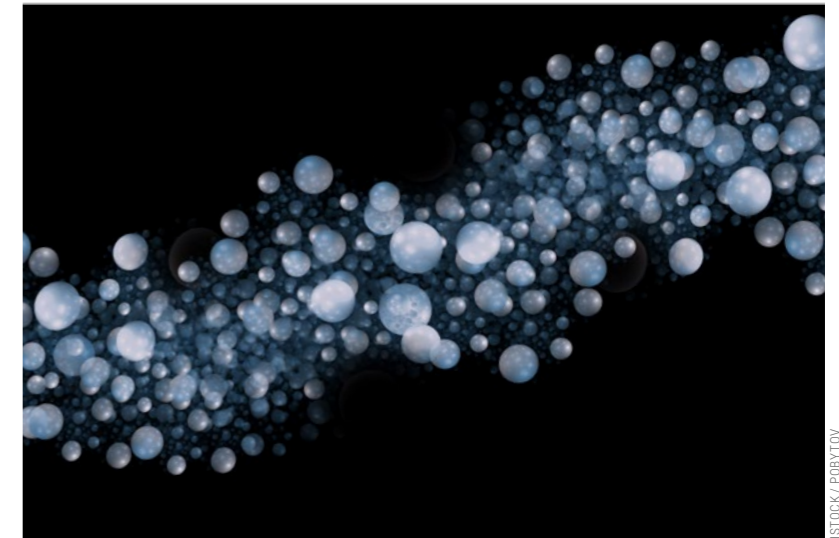
Von diesen Weltraummolekülen können wir eine Menge lernen, sobald sie identifiziert sind. Manche könnten sich als nützlich erweisen, wenn Wissenschaftler erst lernen, sie im Labor herzustellen und ihre Eigenschaften zu nutzen. Andere Moleküle helfen vielleicht dabei, [den Ursprung der organischen Stoffe zu erklären](#), aus denen auf der Erde das Leben entstanden ist. Und alle gemeinsam zeigen uns auf, was chemisch im Universum möglich ist.

### **Bahnbrechende Teleskope beschleunigen neue Entdeckungen**

Mit der Inbetriebnahme neuer, leistungsfähiger Teleskope, die selbst sehr schwache Spektrallinien beobachten können, hat sich die Erforschung der fremdartigen Moleküle beschleunigt. »Wir leben heute in einer Blütezeit der Astrochemie«, freut sich Susanna Widicus Weaver, Leiterin einer Astroche-

miegruppe an der Emory University in einem Vorort von Atlanta im US-Bundestaat Georgia. Die jetzt verfügbaren Daten, so die Forscherin, stellen eine gewaltige Verbesserung gegenüber der Situation vor einem Jahrzehnt dar, als sie ihre Doktorarbeit abschloss. Das an Bord einer Boeing 747SP installierte [Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy SOFIA](#) der NASA begann 2010 mit Beobachtungen im Infrarot- und Mikrowellenbereich. Auf denselben Bereich ist auch das 2009 gestartete [Herschel Space Observatory der ESA](#) ausgerichtet.

Den größten Fortschritt stellt jedoch das 2013 eingeweihte multinationale [Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array ALMA](#) dar. Es besteht aus 66 Schüsselan-  
tennen auf dem 5200 Meter hoch gelegenen Chajnantor-Plateau, einer marsähnlichen Ebene in der chilenischen Wüste Atacama, der trockensten Region der Welt. Sich im Gleichtakt drehend, sammeln die Antennen die Strahlung kosmischer Objekte. Der extrem dunkle und klare Himmel und die von Feuchtigkeit nahezu freie Luft verleihen dem Teleskop eine zuvor unerreich-  
te Empfindlichkeit und Genauigkeit bei Wellenlängen vom Infrarot- bis zum Radio-  
bereich. ALMA erzeugt sowohl ein Bild als



»Wir leben heute in einer  
Blütezeit der Astrochemie«

[Susanna Widicus Weaver]



W. GARNIER, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

auch Spektren für jeden Pixel des Bilds – und liefert damit Zehntausende von Spektrallinien für jede Himmelsregion, die es beobachtet. »Es ist zugleich erstaunlich und überwältigend«, sagt Weaver. »Die Datenmengen sind so groß, dass wir sie häufig auf Flash-Speichern an die Wissenschaftler schicken müssen – sie sind zu umfangreich, um sie herunterzuladen.« [Die Datenflut enthält haufenweise neue Spekt-](#)

[rallinien für die Astrochemiker](#). Doch ähnlich wie bei nicht identifizierten Fingerabdrücken an einem Tatort sind diese Linien nutzlos, solange die Forscher sie nicht Molekülen zuordnen können.

### **Suche nach der Verbindung**

Um zu den Linien passende Substanzen zu finden, haben die Wissenschaftler mehrere Möglichkeiten. Wie im Fall von  $C_3H^+$  kön-

### **ALMA-OBSERVATORIUM IN CHILE** **Das Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array ALMA in Chile.**

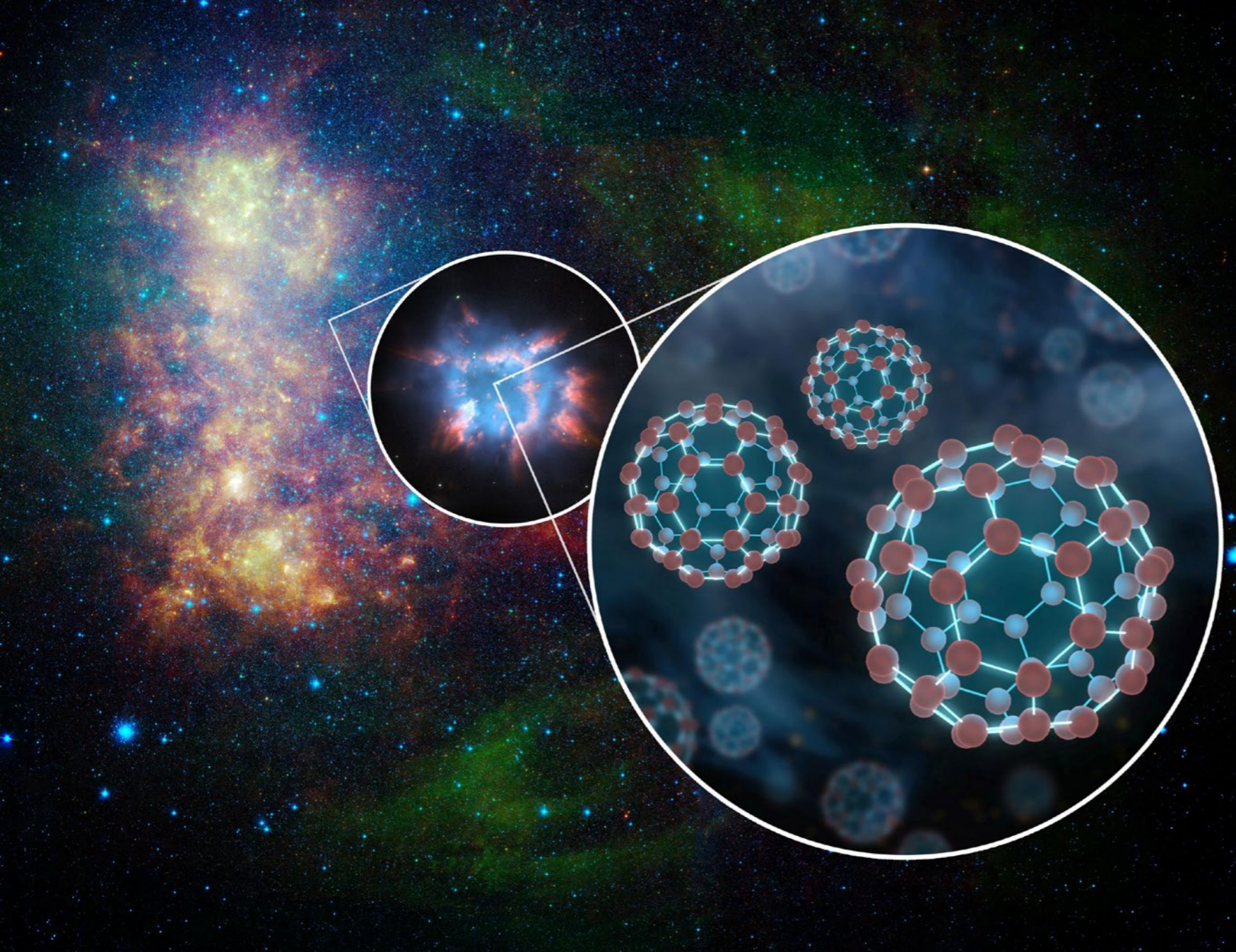
nen die Astrochemiker mit der Theorie beginnen – also anhand des Spektrums versuchen zu erraten, was für eine Art von Molekül die Ursache sein könnte. Ein anderes Verfahren, die [Ab-initio-Quantenchemie](#),

## TAURUS-MOLEKÜLWOLKE

Die Taurus-Molekülwolke, aufgenommen von APEX, dem Atacama Pathfinder Experiment.

erlaubt es den Forschern – die lateinische Bezeichnung deutet es an –, bei der reinen Quantenmechanik anzufangen und die Eigenschaften von Molekülen aus den Bewegungen seiner Protonen, Neutronen und Elektronen abzuleiten. Mit Hilfe eines Supercomputers können die Wissenschaftler diese Berechnung mehrfach mit leichten Änderungen der Struktur des Moleküls und der Anordnung seiner Bestandteile wiederholen und so die optimale Geometrie der chemischen Verbindung finden. »Dank der Quantenchemie sind wir nicht länger auf das beschränkt, was wir synthetisieren können«, sagt Fortenberry. »Nur noch die Größe der Moleküle setzt uns eine Grenze. Wir benötigen große Mengen an Computerzeit, um die Berechnungen durchzuführen.«

Natürlich können die Forscher auch nach harten Beweisen für neue Moleküle suchen, indem sie diese im Labor erzeugen und dann direkt ihr Spektrum messen. Ein übliches Verfahren nutzt eine mit Gas gefüllte Kammer, durch die ein elektrischer Strom geleitet wird. Elektronen des Stroms können dann mit Gasmolekülen kollidieren, deren chemische Bindungen aufbrechen und so die Entstehung neuer



## BUCKYBALLS

**Die Herstellung von Buckyballs – Molekülen aus 60 Kohlenstoffatomen – gelang zunächst im Labor, erst danach entdeckten Astronomen diese Moleküle auch im Weltall.**

Moleküle einleiten. Bei solchen Experimenten muss der Gasdruck niedrig sein, damit neu entstehende Moleküle die Gelegenheit haben, sich eine Weile frei zu bewegen, bevor sie auf ein anderes Molekül stoßen und mit ihm reagieren. Die Forscher durchleuchten die Kammer dann mit Licht unterschiedlichster Wellenlän-

gen, um die Spektren der in der Kammer enthaltenen Stoffe zu bestimmen. »Es kann passieren, das man so im Labor tatsächlich dasselbe Molekül erzeugt, das man im All gesehen hat – aber immer noch nicht weiß, worum es sich bei diesem Molekül handelt«, sagt Michael McCarthy, Physiker am Harvard-Smithsonian Center

for Astrophysics im amerikanischen Cambridge. »Dann muss man versuchen, seine Zusammensetzung mit Hilfe verschiedener Laborexperimente mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen zu ermitteln.«

McCarthy und seine Kollegen erzeugten 2006 das negativ geladene Molekül  $C_6H^-$  und bestimmten sein Spektrum. Kurz darauf fanden sie die Spektrallinien dieses Moleküls in der **430 Lichtjahre entfernten Taurus-Molekülwolke**. Frühere Suchaktionen nach negativ geladenen Molekülen im All waren alle erfolglos verlaufen, daher bezweifelten viele Wissenschaftler, dass solche Moleküle überhaupt in signifikanten Mengen existierten. »Das führte uns zu einer ganzen Reihe von Entdeckungen, bei

denen wir ähnliche Moleküle zunächst im Labor erzeugten und dann im Weltraum aufspürten«, so McCarthy. Inzwischen hat das Team  $\text{C}_6\text{H}^-$  in über einem Dutzend Quellen gefunden. Bei ihren Versuchen, neue Chemikalien herzustellen, stießen Wissenschaftler 1980 auf einen seltsamen, auf der Erde normalerweise nicht vorkommenden Stoff aus Wasserstoff und dem Edelgas Argon. [Und 2013 fanden Astronomen mit Hilfe von ALMA dieses Argonium  \$^{36}\text{ArH}^+\$](#)  zunächst im Krebsnebel und später auch in einer fernen Galaxie. Verbindungen, die Edelgase enthalten, können nur unter sehr speziellen Bedingungen entstehen. Möglicherweise stoßen im Weltraum hochenergetische Teilchen der kosmischen Strahlung mit Argonatomen zusammen, schlagen Elektronen heraus und ermöglichen so die Bindung an Wasserstoff. Wenn Wissenschaftler in einer Region Argonium sehen, gehen sie deshalb davon aus, dass diese Region stark von kosmischer Strahlung durchflutet ist. »Es handelt sich um einen sehr spezifischen Indikator für solche Bedingungen, die tatsächlich eine wichtige Rolle im Weltall spielen«, sagt der Leiter des Entdeckerteams, Holger Müller von der Universität Köln.

## **Fremde Moleküle riechen vermutlich stark**

Viele der in Sternen und Gaswolken verborgenen Moleküle sind extrem fremdartig. Es ist sinnlos, danach zu fragen, wie diese Stoffe aussehen oder sich anfühlen würden, wenn man sie in der Hand hielte – denn das ist nicht möglich, sie würden sofort reagieren. Würde man tatsächlich mit ihnen in Kontakt kommen, so wären sie mit ziemlicher Sicherheit giftig und Krebs erregend. Allerdings – so seltsam es klingt – haben die Wissenschaftler trotzdem eine grobe Vorstellung davon, wie diese Moleküle riechen würden. Denn viele der bislang entdeckten Moleküle zählen zu den [aromatischen Verbindungen](#), die mit Benzol  $\text{C}_6\text{H}_6$  verwandt sind und ihre Bezeichnung ursprünglich auf Grund ihres starken Geruchs erhielten.

Einige der neuen Stoffe zeigen überraschende atomare Strukturen, und die elektrischen Ladungen sind zwischen ihren Atomen in oft unerwarteter Weise verteilt. Mitunter stellen sie die gegenwärtigen Theorien der molekularen Bindungen in Frage. Ein Beispiel aus jüngerer Zeit dafür ist das [Molekül  \$\text{SiCSi}\$ , 2015 in einem sterbenden Stern entdeckt](#). Es besteht aus zwei Silizi-

umatomen und einem Kohlenstoffatom, die auf überraschende Weise miteinander verbunden sind. Das resultierende Molekül ist weich und biegsam und erzeugt ein von den Vorhersagen einfacher theoretischer Modelle abweichendes Spektrum.

Moleküle im Weltall könnten dazu beitragen, eine der grundlegenden Fragen des Universums zu beantworten: [Wie entstand das Leben?](#) Bislang wissen die Wissenschaftler nicht, ob Aminosäuren, also die Bausteine des Lebens, zuerst auf der Erde oder zuerst im All entstanden – und dann von Kometen und Meteoriten auf unseren Planeten transportiert wurden. »Die große Frage ist: Entstehen sie in Molekülwolken, wenn dort Sterne entstehen?«, so Weaver. »Oder entstehen sie auf einem Planeten oder anderen Brocken aus Gestein, wo chemische Reaktionen auf der Oberfläche möglich sind?« Von der Antwort hängt es ab, ob [Aminosäuren](#) im Universum häufig vorkommen und damit überall verfügbar sind, um Leben auf den Myriaden von Exoplaneten zu säen. Oder ob die chemischen Reaktionen, aus denen wir entstanden sind, isolierte Ereignisse in unserer planetarischen Krippe waren. [Astrochemiker sind bereits auf Anzeichen für Aminosäu-](#)

ren im Weltall gestoßen – und ebenso auf Moleküle, aus denen sich Aminosäuren bilden könnten.

Manche seltene Arten von Molekülen könnten sich auch als nützlich für uns erweisen, wenn man sie nur in ausreichenden Mengen herstellen und unter kontrollierten Bedingungen erhalten könnte. »Die große Hoffnung der Astrochemie ist es, Moleküle mit völlig neuen Eigenschaften zu finden, die wir zur Lösung von Problemen auf der Erde gebrauchen können«, sagt Fortenberry.

Ein Beispiel dafür sind »Buckyballs«, fußballförmige Moleküle aus 60 Kohlenstoffatomen. Sie wurden 1985 erstmals im Labor nachgewiesen – und brachten ihren Entdeckern den Nobelpreis ein. Knapp ein Jahrzehnt später stießen Astronomen im interstellaren Gas auf Spektrallinien, die mit jenen positiv geladener Buckyballs übereinzustimmen schienen.

Der Verdacht bestätigte sich im Juli 2015: Forschern gelang es, die beobachteten Spektrallinien unter weltraumähnlichen Bedingungen im Labor zu reproduzieren. »Wir finden dieses Molekül nun überall in der Galaxis und überall im Universum«, sagt Harold Kroto, einer der Buckyball-Ent-

decker, der jetzt als Professor für Chemie an der Florida State University tätig ist. Und inzwischen hat sich gezeigt, dass Buckyballs nicht nur eine weitere seltsame Molekülspezies im All sind, sondern nützliche Werkzeuge für die Nanotechnologie. Mit ihnen lassen sich Materialien verstärken und Solarzellen verbessern, selbst im pharmazeutischen Bereich finden sie Anwendung.

Derzeit untersuchen Astrochemiker erst die flachen Küstenregionen des großen Meeres kosmischer Moleküle. Ihre Entdeckungen haben uns bereits daran erinnert, dass unsere kleine Ecke des Kosmos eben genau das ist – ein unbedeutender, nicht unbedingt repräsentativer Ausschnitt dessen, was im Universum möglich ist. Vielleicht sind die Molekülarten, mit denen wir auf der Erde vertraut sind, in Wahrheit die Exoten. Und die Buckyballs, das  $C_3H^+$  im Pferdekopfnebel und all die anderen, noch unbekannten Molekülarten repräsentieren die kosmische Normalität. ↩

(Spektrum.de, 18. Januar 2016)

Der ganze Kosmos:  
Auf Ihrem Bildschirm.



## DAS STERNE UND WELTRAUM **DIGITALABO**

Erfahren Sie alles über Astronomie und Raumfahrt – direkt aus den Forschungslaboren der Welt.  
Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,-;  
ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

**HIER ABONNIEREN**

CHIRALITÄT

# ASYMMETRISCHE MOLEKÜLE AUS DEM ALL

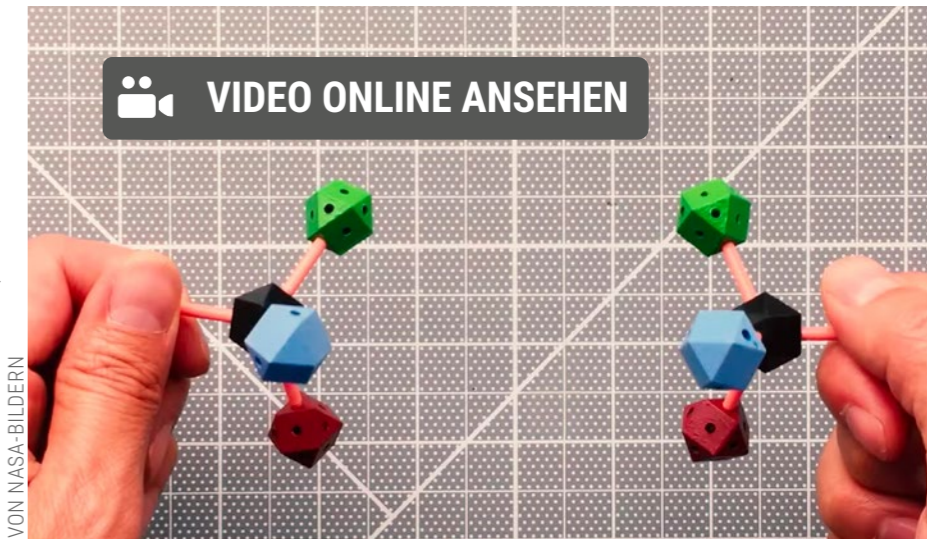
von Philipp Hummel

Mit Propylenoxid konnten Forscher erstmals ein chirales Molekül außerhalb des Sonnensystems nachweisen. Für die Bausteine von Leben, wie wir es kennen, ist diese Symmetrieeigenschaft äußerst wichtig.

Man kennt sie aus vielen biochemischen Prozessen, und man hat sie auch schon in Meteoriten auf der Erde und in Kometen im All entdeckt. Nun ist es Forschern erstmals gelungen, einen Vertreter so genannter **chiraler Moleküle außerhalb unseres Sonnensystems im interstellaren Raum zu finden**. Fündig wurden die Wissenschaftler um Brett A. McGuire und P. Brandon Carroll vom California Institute of Technology mit Hilfe des Green-Bank-Teleskops in West Virginia. Seine Aufnahmen einer Molekülwolke nahe dem Zentrum der Milchstraße wiesen Propylenoxid nach. Ergänzt wurden die Messungen durch Analysen am Parkes-Radioteleskop in Australien. Propylenoxid kommt in zwei beinahe identischen Varianten vor. Die chemische Zusammensetzung ist dabei gleich, und das Spiegelbild der einen Form lässt sich mit der anderen Form zur Deckung bringen – vergleichbar mit Schrauben, die sich entweder nach links oder nach rechts winden, oder den geometrischen Eigenschaften der linken und der rechten Hand. Diese spezielle Form von spiegelverkehrten Molekülvarianten wird von Che-

mikern als Chiralität bezeichnet. Die Entdeckung sei ein bahnbrechender Schritt für das Verständnis der Entstehung von Leben im Universum aus seinen Vorläufermolekülen, begeistern sich die Forscher. Denn die chiralen Varianten haben zwar dieselben chemischen und physikalischen Eigenschaften wie etwa Schmelz- oder Gefrierpunkt. Für die Entstehung und die Funktion von Leben ist die Chiralität vieler Biomoleküle jedoch entscheidend. So bilden alle bekannten Organismen nur aus einer der beiden Formen des Zuckermoleküls Ribose das molekulare Rückgrat ihrer DNA. Die »falsche« Form eines chiralen Moleküls kann mitunter sogar gefährlich sein, wie man beim Contergan-Skandal erleben musste, wo eine Mischung der beiden Symmetrievarianten des Wirkstoffs zu Schädigungen bei Embryonen führte.

Woher diese Homochiralität kommt, also die Bevorzugung einer chiralen Variante, ist nicht bekannt. Es könnte auch Zufall sein, dass sich in der Biologie sehr oft eine der beiden Formen unter dem Druck der Evolution durchgesetzt hat. Der spektroskopische Fingerabdruck, den die spezifischen Rotationen der Propylenoxidmoleküle in den Radaraufnahmen aus der Mo-



## CHIRALE MOLEKÜLE AUS DEM ALL

lekülwolke Sagittarius B2 in der Nähe des Zentrums unserer Galaxie nun liefern, reichen zwar noch nicht, um dieses Rätsel zu lösen. Bisher gelang lediglich der Nachweis des als chiral bekannten Moleküls anhand drei seiner Spektrallinien. Welche Variante wie stark vertreten ist, konnten die Forscher daraus nicht ermitteln. Das wird aber nun der nächste Schritt ihrer Arbeit sein. Schließlich wollen sie herausfinden, wo und wie die Moleküle entstehen, bevor sie ihren Weg zu Meteoriten und Kometen finden, und welche Rolle solche Moleküle für die Entstehung von Leben spielen. ↩

(Spektrum.de, 14. Juni 2016)



UMWELTBEDINGUNGEN

# WARM

TROTZ SCHWACHER SONNE

von Daniel Lingenhöhl

**T**rotz schwächerer Energiezufuhr von unserem Zentralgestirn war die Erde wohl schon in jungen Jahren ausreichend warm. Zwei an sich eher träge Gase waren wohl die Ursache. Während der ersten zwei Milliarden Jahre ihrer Existenz war die Erde wärmer, als es die Sonneneinstrahlung eigentlich erlaubt hätte: Unser Zentralgestirn feuerte nur mit 70 Prozent seiner heutigen Leistung – zu wenig, um beispielsweise flüssiges Wasser und damit die Entwicklung von Leben zu ermöglichen. Stattdessen sollte unsere Heimat als Eisplanet durchs All kreisen. Dennoch wissen Geologen aus fossilen Belegen, dass es damals geregnet hat und erste Ozeane über den Planeten schwappten. Robin Wordsworth und Raymond Pierrehumbert von der University of Chicago liefern nun eine neue Erklärung für dieses paradoxe Phänomen: Zahlreich zusammenstoßende Wasser- und Stickstoffmoleküle in der frühen Erdatmosphäre sorgten dafür, dass von der Erdoberfläche reflektiertes Sonnenlicht in Form von Infrarot »geschluckt« wurde und die Luft hülle aufheizte – ein sehr früher Treibhauseffekt. Gesteinsanalysen zeigen laut den Wissenschaftlern, dass vor 3,8 Milliarden

Jahren im Erdzeitalter des Archaikums mindestens fünf bis zehn Prozent der Atmosphäre aus Wasserstoff bestanden; heute ist das Gas dagegen mit 0,55 ppm (parts per million) nur in winzigsten Spuren vorhanden: Vulkane setzten damals große Mengen an Wasserstoff frei, der jedoch nur langsam zu Wasser oder anderen Verbindungen umgesetzt wurde. Zudem habe auch die Konzentration an Stickstoff höher gelegen als gegenwärtig, so die Forscher weiter. Erst später wurde er biogeochemisch gebunden und so der Luft entzogen, bis die heutigen Werte erreicht waren. Das in früheren Theorien als potenzieller Verursacher genannte Kohlendioxid **scheidet dagegen aus**: Statt des prognostizierten 30-prozentigen Anteils an der Atmosphäre betrug er nur ein Promille – zu wenig, um damals eine nachhaltige Erwärmung zu garantieren.

Den Temperaturanstieg führten stattdessen die kollidierenden Stickstoff- und Wasserstoffmoleküle herbei, die sich eigentlich relativ reaktionsträge verhalten, da sie symmetrisch aufgebaut sind und keine Ladung aufweisen. Auf Grund ihrer hohen Konzentrationen in der Atmosphäre kam es damals jedoch sehr häufig zu Zusammenstößen, aus denen Dimere hervorgingen.

Wenn Infrarotstrahlung auf diese trifft, beginnen sie zu schwingen und speichern dabei die Energie der Photonen. Laut den Berechnungen von Wordsworth und Pierrehumbert reichte das aus, um einen Treibhauseffekt zu bewirken, der die frühe Erde um bis zu zehn Grad Celsius aufheizte – genug, damit der Planet nicht einfrore. Erst als frühe methanogene Mikroben (vor allem Archaea) Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan umsetzten und damit dem System Wasserstoff entzogen, kühlte sich das System wieder etwas ab, bevor sich nach und nach die Sonnenstrahlung verstärkte und sich die heutige Atmosphäre mit ihrer Treibhauswirkung herausbildete.

Die Erkenntnisse der beiden Geologen interessieren auch Exoplanetenforscher. Denn sie legen nahe, dass sich lebensfreundliche Bedingungen auch auf sonnenfernen Planeten oder Monden entwickeln könnten: Es muss nur genügend Wasserstoff in der Gashülle vorhanden sein. Das erweitert die potenziell habitable Zone bis hinaus zu einer Umlaufbahn, die dem des Saturns entspräche. ↩

(Spektrum.de, 4. Januar 2013)

Science 339, S. 64-67, 2012



# PRÄBIOTISCHE EVOLUTION DER URSPRUNG IRDISCHEN LEBENS

**von Alonso Ricardo und Jack W. Szostak**

Allmählich lichtet sich der Nebel um eines der größten Geheimnisse der Natur. Im Labor wiederholen Forscher die tastenden Schritte, mit denen einst aus unbelebter Materie die ersten Organismen entstanden.

Jede lebende Zelle, selbst das einfachste Bakterium, wimmelt nur so von molekularen Maschinen, die einen Nanotechniker vor Neid erblassen lassen. Sie zappeln, krabbeln und schrauben sich rastlos durch die Zelle, sie zerschneiden, kleben und kopieren Erbmoleküle, sie transportieren Nährstoffe hin und her oder verwandeln sie in Energie, sie bauen und reparieren Zellmembranen, sie übertragen mechanische, chemische oder elektrische Signale – die Aufzählung scheint gar kein Ende zu nehmen, und mit jeder neuen Entdeckung wird sie länger.

Wie um alles in der Welt soll sich diese Zellmaschinerie, die vorwiegend aus Katalysatoren auf Eiweißbasis – so genannten Enzymen – besteht, vor rund 3,7 Milliarden Jahren ganz von selbst zusammengebaut haben? Gewiss, unter geeigneten Bedingungen entstehen einige Proteinbausteine, die Aminosäuren, ohne Weiteres aus einfacheren Chemikalien; das haben Stanley L. Miller und Harold C. Urey in den 1950er Jahren an der University of Chicago mit ihren legendären Experimenten nachgewiesen. Doch von dort zu Proteinen und Enzymen ist es noch ein gewaltiger Schritt. Wenn eine Zelle Proteine synthetisiert,

trennen komplizierte Enzyme die beiden Stränge der DNA-Doppelhelix voneinander, andere Enzyme lesen die darauf in Genen kodierten Protein-Bauanleitungen ab und übersetzen sie in die fertigen Produkte. Somit tritt bei dem Versuch, den Anfang allen Lebens zu erklären, ein paradoxes Problem auf: Anscheinend sind – abgesehen von der in der DNA gespeicherten Information – Proteine nötig, um Proteine zu fabrizieren.

Das Paradoxon verschwände allerdings, wenn die ersten Organismen ganz ohne Proteine ausgekommen wären. Neue Experimente zeigen, dass Erbmoleküle, die der DNA oder der strukturell nahe verwandten RNA ähneln, spontan hätten entstehen können. Und da solche Moleküle sich unterschiedlich zusammenzufalten und einfache Reaktionen zu katalysieren vermögen, wurden sie vielleicht fähig, sich ohne die Hilfe von Proteinen selbst zu kopieren.

### Schwieriger Beginn

Wie konnte in der Frühzeit der Erde aus einfachen Molekülen genetisches Material entstehen? Betrachtet man die Funktion der RNA in heute lebenden Organismen, so liegt es nahe, dass die RNA vor der DNA auf-

#### AUF EINEN BLICK

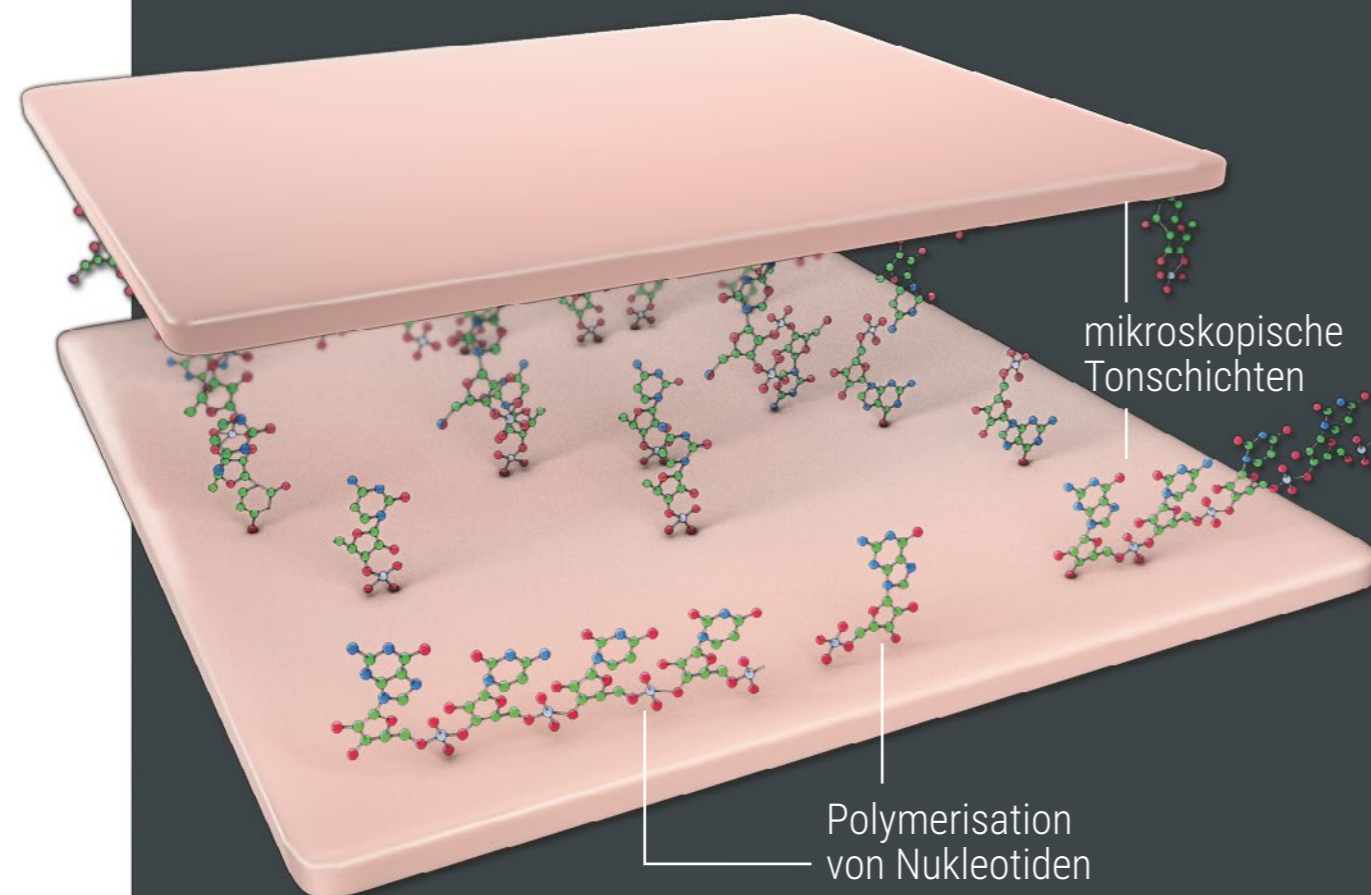
## Von der Ursuppe zu den ersten Zellen

- 1 Forscher haben vorgeführt, wie das Erbmolekül RNA aus Chemikalien entstehen konnte, die auf der unbelebten Früherde vorhanden waren.
- 2 Andere Experimente stützen die Hypothese, dass am Ursprung allen irdischen Lebens primitive Zellen standen, die RNA-ähnliche Moleküle enthielten. Diese Zellen konnten sich spontan bilden, reproduzieren und weiterentwickeln.
- 3 Wissenschaftler versuchen jetzt künstliche Organismen zu kreieren, die sich komplett selbst zu replizieren vermögen. Wenn im Labor praktisch ein zweites Mal Leben entsteht, lässt sich besser verstehen, wie es ursprünglich entstand.

trat. Wenn heutige Zellen ein Protein fabrizieren, kopieren sie zunächst das entsprechende Gen von der DNA in RNA und benutzen die RNA dann als Bauanleitung für das Protein. Dieser zweite Schritt könnte anfangs unabhängig existiert haben; erst

# Auf dem langen Weg zum Leben

Nachdem durch chemische Reaktionen die ersten genetischen Bausteine und andere organische Moleküle entstanden waren, brachten geophysikalische Prozesse sie in neue Umgebungen und reicherten sie dort an. Die Chemikalien fügten sich zu größeren Molekülen und schließlich zu primitiven Zellen zusammen. Vor rund 3,7 Milliarden Jahren brachten günstige Umweltbedingungen diese Protozellen dazu, sich zu reproduzieren.



In den wässrigen Lösungen, in denen die Nukleotide entstanden, konnten sie sich kaum zu langen Strängen zusammenlagern und Erbinformationen speichern. Dafür waren spezielle Bedingungen nötig – zum Beispiel molekulare Adhäsionskräfte, welche die Nukleotide zwischen mikroskopisch dünnen Tonschichten eng zusammenbrachten

später wäre die DNA dank ihrer besseren chemischen Stabilität als dauerhaftere Speicherform aufgetreten.

Es gibt noch einen weiteren Grund, weshalb Forscher annehmen, die RNA sei zuerst entstanden. Ribozyme – Enzyme aus RNA statt Protein – spielen auch in heutigen Organismen noch eine zentrale Rolle. Die Gebilde, welche die als RNA angelieferten Baupläne in Proteine umsetzen, sind selbst Komplexe aus RNA und Protein, wobei die RNA den eigentlichen Katalysator darstellt. Anscheinend enthält jede unserer Zellen in ihren Ribosomen »fossile« Relikte einer urtümlichen RNA-Welt.

Darum konzentrieren sich viele Forscher auf den Ursprung der RNA. Erbmoleküle wie DNA und RNA sind Polymere, das heißt Stränge aus kleineren Molekülen, in diesem Fall aus Nukleotiden. Die wiederum bestehen aus drei Komponenten: einem Zucker, einer Phosphatgruppe und einer Nukleinbase. Es gibt vier verschiedene Nukleinbasen; sie bilden das »Alphabet«, mit dem das Polymer seine Information kodiert. DNA-Nukleotide enthalten jeweils eine der Nukleinbasen A, G, C oder T (Adenin, Guanin, Cytosin oder Thymin). Im Alphabet der RNA steht U (Uracil) an Stelle

von T. Die Nukleinbasen sind stickstoffreiche Verbindungen, die sich nach einer einfachen Regel paaren: A bindet immer an U – beziehungsweise an T –, und G bindet stets an C. Diese Basenpaare bilden die Sprossen der spiralförmigen DNA-Leiter, der bekannten Doppelhelix. Die korrekte Paarung ist entscheidend dafür, dass bei der Reproduktion der Zelle exakte DNA-Kopien entstehen. Zucker und Phosphatgruppen bilden das Rückgrat jedes Strangs.

Nukleinbasen können in wenigen Schritten spontan aus Zyanid, Azetylen und Wasser entstehen – aus einfachen Molekülen, die auf der präbiotischen Erde sicherlich vorhanden waren. Auch Zuckermoleküle lassen sich leicht aus einfachen Ausgangssubstanzen synthetisieren. Schon seit gut 100 Jahren ist bekannt, dass beim Erhitzen einer alkalischen Lösung von Formaldehyd – auf der jungen Erde sicher verfügbar – Mischungen vieler verschiedener Zuckermoleküle entstehen. Das Problem ist nur: Wie gewinnt man den speziell zum Bau von Nukleotiden geeigneten Zucker? Im Fall der RNA ist das die Ribose. Sie ist chemisch labil und zerfällt schon in schwach alkalischen Lösungen rasch. Daraus schlossen viele Forscher bis vor Kur-

zem, das erste Erbmolekül habe keine Ribose enthalten können. Doch einer von uns (Ricardo) und andere Forscher haben herausgefunden, wie die Ribose stabilisiert werden kann.

Auch der Phosphatanteil der Nukleotide bereitet Kopfzerbrechen. Phosphor, das Zentralatom der Phosphatgruppe, ist in der Erdkruste zwar reichlich vorhanden, jedoch meist in Form von Mineralien, die sich in Wasser kaum lösen. Darum ist nicht offensichtlich, wie Phosphate in die präbiotische Mixtur gelangt sein sollen. Die hohen Temperaturen von Vulkanschloten können phosphathaltige Mineralien in lösliche Formen überführen, doch die so freigesetzten Mengen sind, zumindest in der Nähe heutiger Vulkane, gering. Eine völlig andere Quelle für lösliche Phosphatverbindungen ist Schreibersit oder Glanzeisen – ein seltenes Mineral, das vor allem in bestimmten Meteoriten auftritt.

Im Jahr 2005 entdeckten Matthew Pasek und Dante Lauretta von der University of Arizona in Tucson, dass die Korrosion von Schreibersit in Wasser den Phosphoranteil freisetzt. Dieser Mechanismus erscheint viel versprechend: Der freigesetzte Phosphor ist nicht nur viel besser wasser-

löslich als Phosphat, sondern reagiert auch viel bereitwilliger mit organischen – auf Kohlenstoff basierenden – Verbindungen.

### **Tricks beim Zusammenbau**

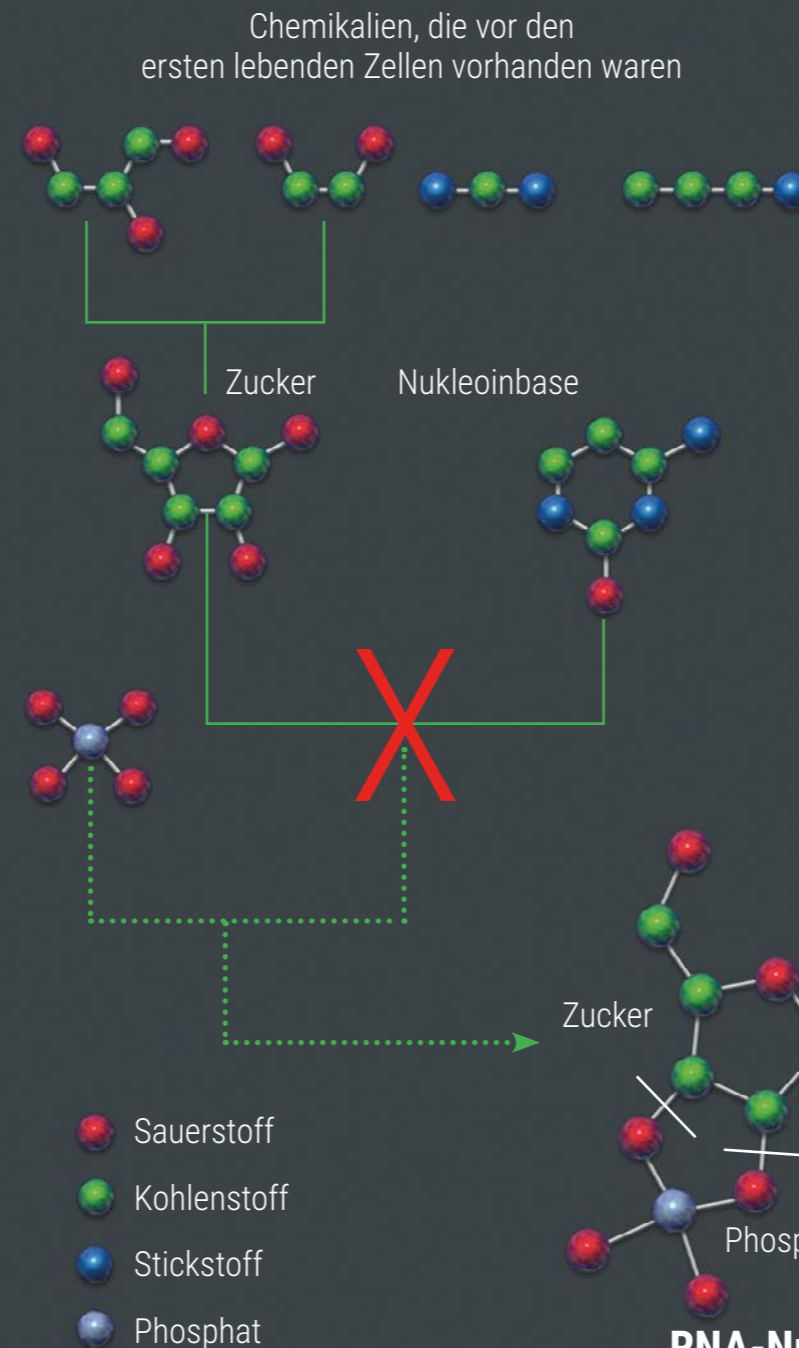
Damit hätten wir also eine grobe Vorstellung der möglichen Abläufe, die zur Entstehung von Nukleinbasen, Zuckern und löslichem Phosphat führen. Der nächste Schritt wäre logischerweise, diese Komponenten in korrekter Weise zu verbinden. Doch gerade das bildete in den vergangenen Jahrzehnten die hartnäckigste Hürde in der präbiotischen Chemie. Einfaches Mischen der drei Komponenten in Wasser löst noch lange nicht die spontane Bildung eines Nukleotids aus – hauptsächlich deshalb, weil jede der erforderlichen Bindungsreaktionen auch ein Wassermolekül freisetzt, und so etwas kommt in wässrigen Lösungen von selbst kaum vor. Damit sich die chemischen Bindungen bilden können, muss folglich Energie zugeführt werden, zum Beispiel in Form energiereicher Substanzen, an denen in der präbiotischen Welt vermutlich kein Mangel herrschte. Im Labor erwiesen sich Reaktionen, die von solchen Molekülen angetrieben werden, allerdings als völlig ineffizient.

# Die ersten genetischen Moleküle

Die ersten irdischen Lebewesen, die fähig waren, sich zu reproduzieren und weiterzuentwickeln, speicherten ihre Erbinformationen wahrscheinlich in Form von Molekülen, die der RNA ähnelten, einer der DNA strukturell verwandten Nukleinsäure. DNA und RNA sind Ketten aus so genannten Nukleotiden. Aber wie konnten Nukleotide einst aus einfacheren Chemikalien entstehen? Die drei Bestandteile eines Nukleotids – Nukleinbase, Phosphatgruppe und Zucker – bilden sich zwar mitunter spontan, fügen sich jedoch nicht von selbst richtig zusammen. Wie neue Experimente zeigen, können zumindest zwei Typen von RNA-Nukleotiden, welche die Nukleinbasen C und U enthalten, auf anderem Weg entstehen. In heutigen Organismen gibt es vier Typen von RNA-Nukleinbasen: A, C, G und U.

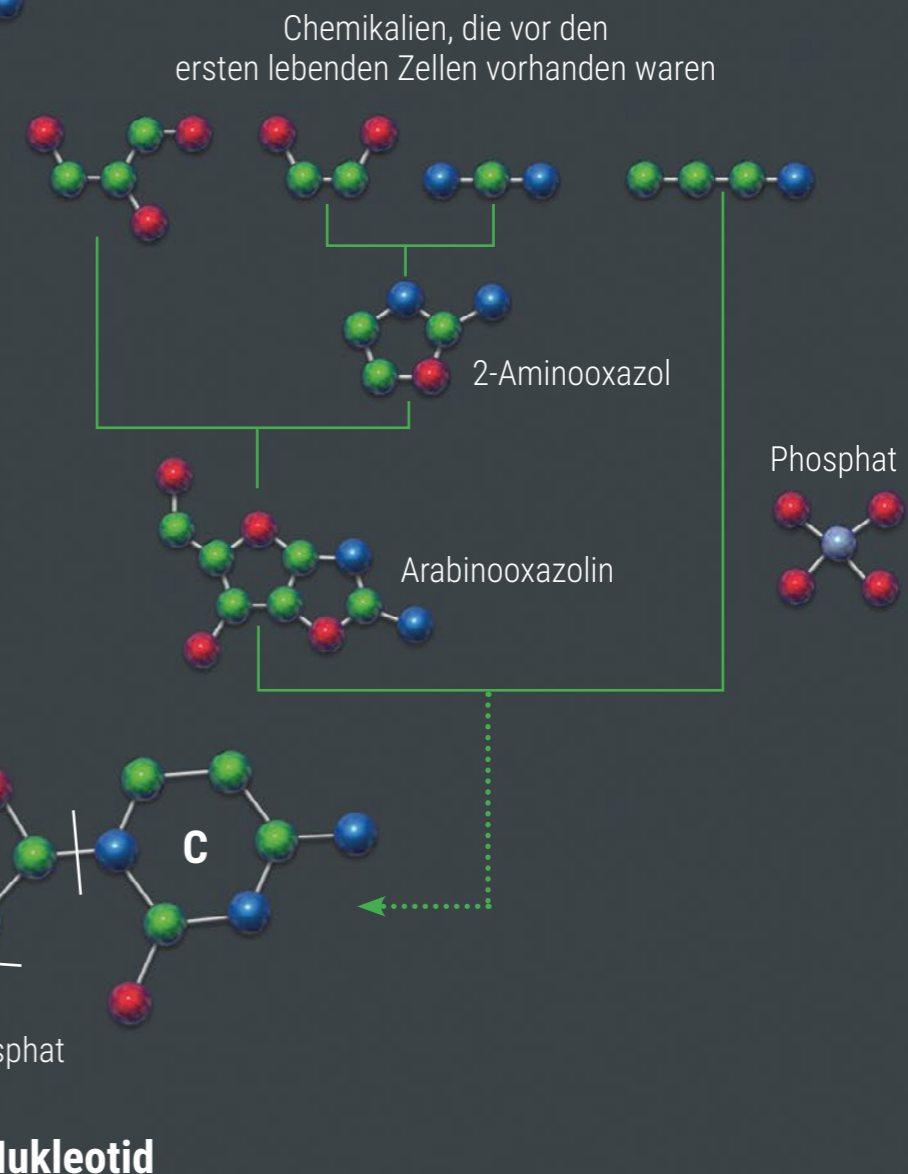
## Gescheiterte Nukleotidsynthese

Lange Zeit gelang es den Chemikern nicht, einen Weg zu entdecken, auf dem Nukleinbasen, Phosphat und Ribose – die Zuckerkomponente der RNA – sich spontan zu RNA-Nukleotiden verbinden konnten.

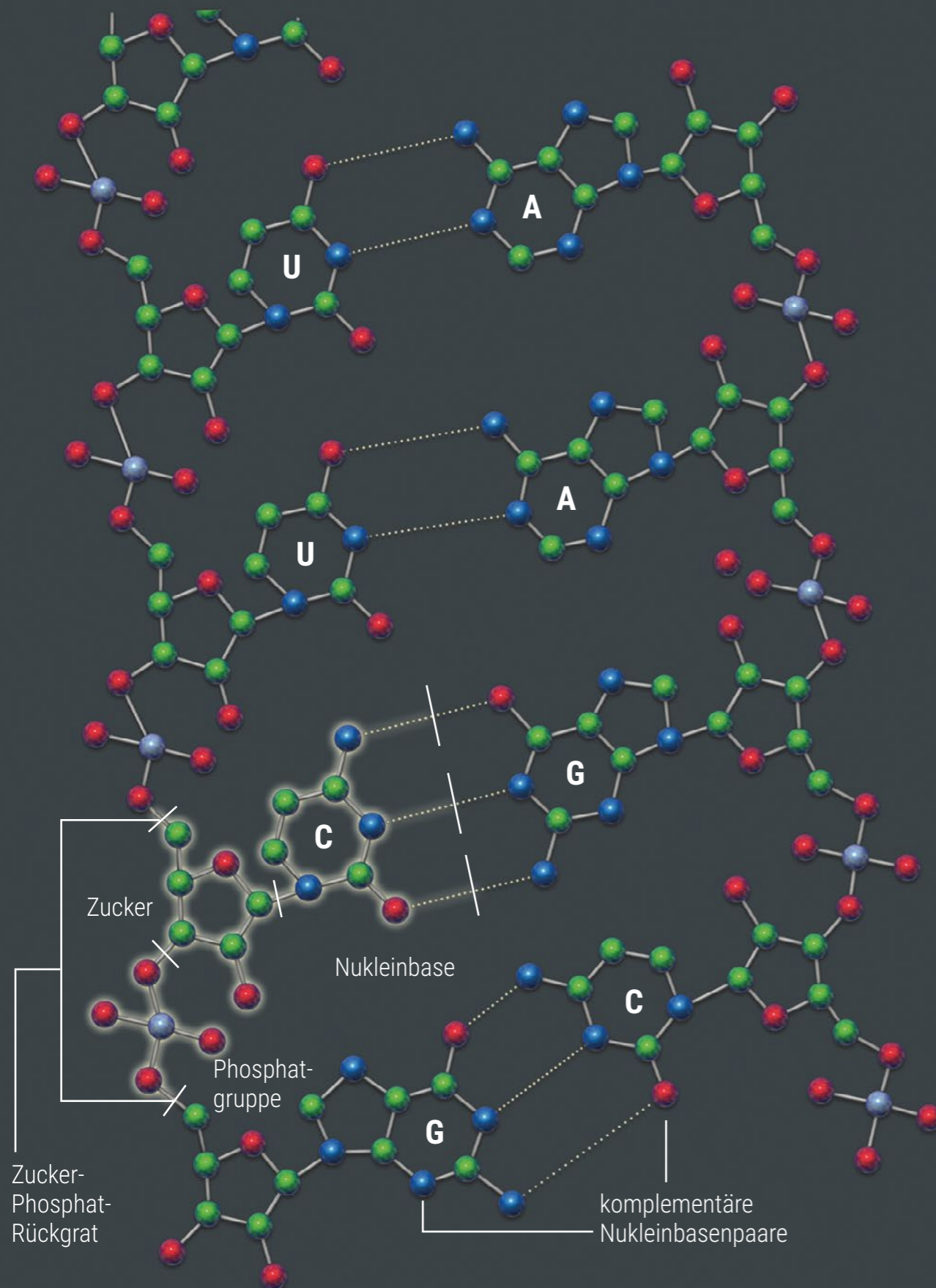


## Ein neuer Weg

In Gegenwart von Phosphat bilden die Ausgangsstoffe für Nukleinbasen und Ribose zunächst 2-Aminooxazol. Dieses Molekül enthält Teile eines Zuckers sowie Teile der Nukleinbasen C oder U. Weitere Reaktionen ergeben zunächst einen kompletten Baustein aus Ribose und Base und anschließend ein komplettes Nukleotid. Daneben entstehen zwar auch »falsche« Verbindungen, doch diese werden durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ausgemerzt..



## doppelsträngige RNA



ANDREW SWIFT, NACH: POWNER, M.W. ET AL.: SYNTHESIS OF ACTIVATED PYRIMIDINE RIBONUCLEOTIDES IN PREBIOTICALLY PLAUSIBLE CONDITIONS. IN: NATURE 459, S. 239-242, 2009

Doch das Frühjahr 2009 brachte eine große Überraschung: John Sutherland und seine Mitarbeiter von der University of Manchester (England) verkündeten, sie hätten einen viel plausibleren Mechanismus der Nukleotidsynthese gefunden, der auch das Problem der Instabilität von Ribose umgeht. Diese raffinierten Chemiker brachen mit der Tradition, Nukleotide aus Nukleinbase, Zucker und Phosphat herstellen zu wollen. Ihr Ansatz beruht zwar auf denselben einfachen Substanzen wie früher, die aus Zyanid, Azetylen und Formaldehyd entstehen. Doch statt Nukleinbase und Ribose getrennt herzustellen und erst danach zu versuchen, sie zu verbinden, mischten sie gleich alle Ausgangsstoffe zusammen, und obendrein Phosphat. Im Verlauf einer komplizierten Reaktionsfolge, bei der das Phosphat mehrmals als unersetzlicher Katalysator wirkte, entstand ein kleines Molekül namens 2-Aminooxazol; es lässt sich als Fragment eines Zuckers auffassen, das an ein Stück einer Nukleinbase gebunden ist. Vermutlich entstanden einst in einem frühirdischen Tümpel nebst einem Mischmasch anderer Substanzen auch geringe Mengen von 2-Aminooxazol. Dieses kleine, stabile Molekül ist sehr flüchtig. Sobald das Wasser verdunstete, verdampfte darum auch das 2-Aminooxazol, um andernorts in reiner Form wieder zu kondensieren. Dort bildete es das Ausgangsmaterial für weitere chemische Reaktionen, die zu einer Verbindung aus einem vollständigen Zucker und einer Nukleinbase führten.

So elegant dieser Weg auch erscheint, er liefert leider nicht ausschließlich die »richtigen« Nukleotide; manchmal sind Zucker und Nukleinbase nicht korrekt angeordnet. Doch erstaunlicherweise zerstört Bestrahlung mit ultraviolettem Licht – wie in seichten Gewässern auf der frühen Erde, die starker UV-Strah-

lung ausgesetzt waren – die »falschen« Nukleotide und lässt nur die »richtigen« übrig. Alles in allem ergibt sich ein blitzsauberer Reaktionsverlauf zu den C- und U-Nukleotiden. Freilich fehlt noch ein ebenso schöner Reaktionspfad zu G und A, aber Sutherlands Team hat jedenfalls einen wesentlichen Beitrag zur Antwort auf die Frage geleistet, wie ein so komplexes Molekül wie die RNA einst überhaupt entstehen konnte.

Wenn wir einmal Nukleotide haben, fehlt als letzter Schritt zur Synthese eines RNA-Moleküls noch die Polymerisation: Der Zucker des einen Nukleotids bildet eine chemische Brücke zur Phosphatgruppe des nächsten, so dass sich die Nukleotide kettenförmig aneinanderreihen. Da sich die Ketten in wässriger Lösung nicht spontan bilden, benötigt auch dieser Schritt Energiezufuhr. Forschern gelang es, kurze Ketten von 2 bis 40 Nukleotiden Länge zu produzieren, indem sie einer Lösung chemisch reaktiver Nukleotidderivate verschiedene Chemikalien beifügten. Gene heute lebender Organismen sind allerdings Tausende bis Millionen Nukleotide lang. Ende der 1990er Jahre konnten Jim Ferris und seine Mitarbeiter vom Rensselaer Polytechnic

Institute zeigen, dass Tonmineralien den Prozess begünstigen, wodurch Ketten mit bis zu 50 Nukleotiden entstehen. Da mineralische Oberflächen die Eigenschaft haben, Nukleotide zu binden, bringen sie die reaktiven Moleküle nahe zusammen und erleichtern so die Brückenbildung.

Diese Entdeckung bestärkte einige Forscher in ihrer Annahme, das Leben sei auf mineralischen Oberflächen entstanden – möglicherweise im lehmreichen Schlamm auf dem Grund von Tümpeln, die aus heißen Quellen gespeist wurden.

### **Künstliches Leben im Labor**

Selbst wenn man genau wüsste, wie genetisch nutzbare Polymere erstmals entstanden sind, wäre das Problem der Lebensentstehung damit noch nicht gelöst. Um als »lebendig« zu gelten, muss sich ein Organismus vermehren, das heißt seine genetische Information kopieren. In modernen Zellen erfüllen Enzyme auf Proteinbasis diese Aufgabe.

Doch wenn genetische Polymere aus geeigneten Nukleotidsequenzen bestehen, können sie durch Faltung komplexe Formen annehmen und chemische Reaktionen katalysieren – genau wie die heutigen

Enzymproteine. Daher ist denkbar, dass die RNA in den allerersten Organismen ihre eigene Replikation steuerte. Das hat uns sowie David Bartel am Massachusetts Institute of Technology auf die Idee gebracht, durch Evolution im Labor neue Ribozyme zu züchten.

Wir begannen mit Billionen zufälliger RNA-Sequenzen. Dann wählten wir solche mit katalytischen Eigenschaften aus und kopierten sie. Bei jedem Kopiervorgang traten in einigen RNA-Strängen Mutationen auf, die deren katalytische Eigenschaften verbesserten. Wieder selektierten wir diese Moleküle für den nächsten Kopierschritt. Mit derart gerichteter Evolution vermochten wir Ribozyme zu schaffen, die das Kopieren anderer, relativ kurzer RNA-Stränge katalysieren. Allerdings können sie keine RNAs mit ihren eigenen Sequenzen kopieren; das heißt, sie produzieren keine direkten Nachkommen.

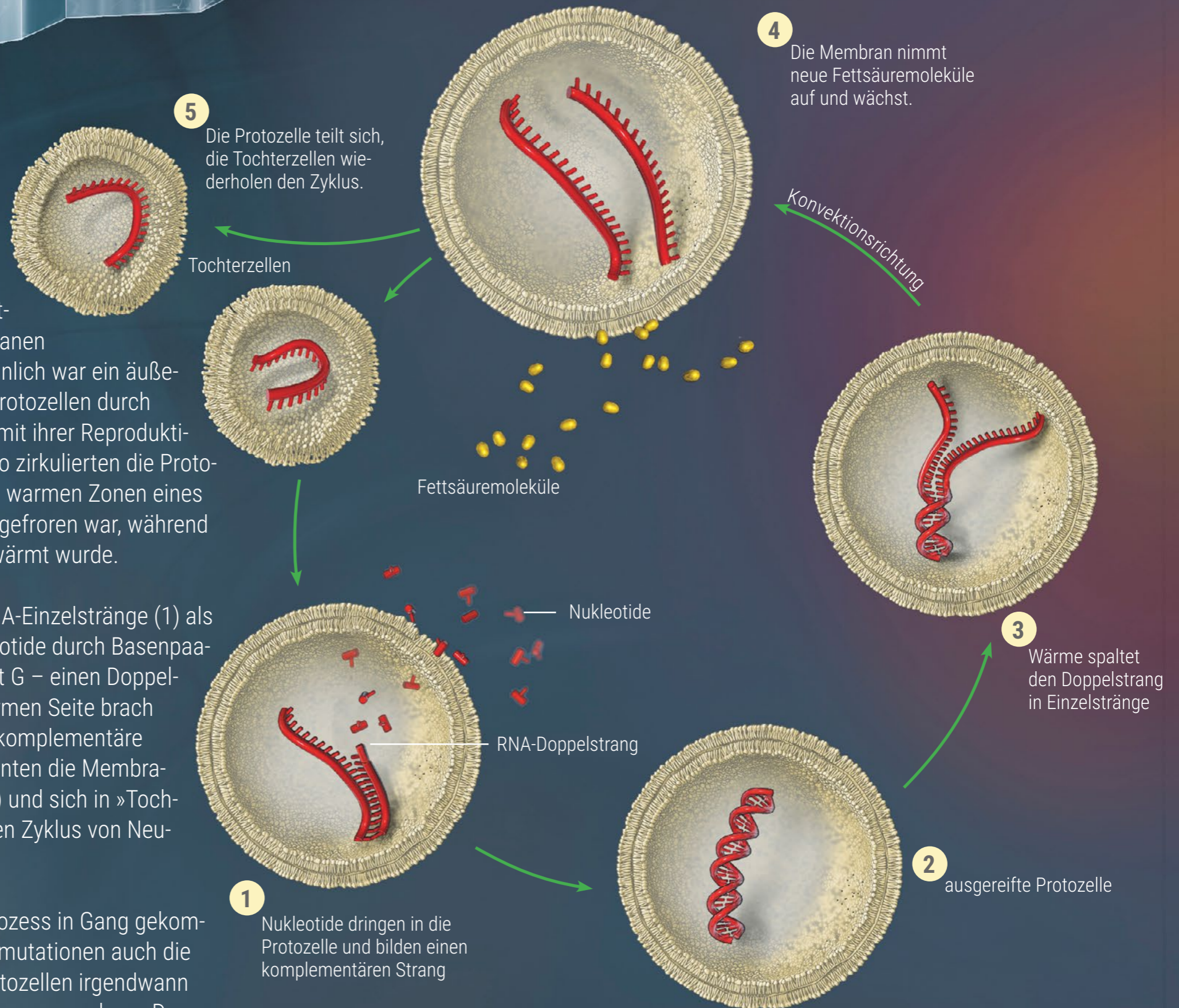
Die Idee der RNA-Selbstreplikation neuen Auftrieb durch Tracey Lincoln und Gerald Joyce vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien). Sie entwickelten zwei Ribozyme, die Kopien des jeweils anderen Moleküls erzeugen können, indem sie zwei kürzere RNA-Stränge verbinden.

# Unterstützte Reproduktion

Manche der neu gebildeten Polymere wurden in wasser-gefüllte Bläschen eingeschlossen, die entstanden, indem Fettsäuren sich spontan zu Membranen zusammenlagerten. Wahrscheinlich war ein äußerer Anstoß nötig, damit diese Protozellen durch Duplizierung des Erbmateri-als mit ihrer Reproduktion begannen. In einem Szenario zirkulierten die Protozellen zwischen den kalten und warmen Zonen eines Tümpels, der auf einer Seite zugefroren war, während die andere Seite vulkanisch erwärmt wurde.

Auf der kalten Seite dienten RNA-Einzelstränge (1) als Vorlagen, an denen neue Nukleotide durch Basenpaarung – A paart sich mit U, C mit G – einen Doppelstrang (2) bildeten. Auf der warmen Seite brach die Hitze die Doppelstränge in komplementäre Einzelstränge auf (3). Dort konnten die Membranen auch langsam wachsen (4) und sich in »Tochterprotozellen« teilen (5), die den Zyklus von Neuem begannen.

Nachdem der Reproduktionsprozess in Gang gekommen war, begann durch Zufallsmutationen auch die Evolution zu wirken, bis die Protozellen irgendwann fähig wurden, sich eigenständig zu vermehren. Das Leben war geboren.



Leider gelang das Experiment nur, wenn bereits lange und komplexe RNA-Stücke vorhanden waren, die nicht spontan hätten entstehen können. Dennoch legen die Resultate nahe, dass die katalytischen Fähigkeiten der RNA im Prinzip für die Selbstreplikation ausreichen.

Gibt es vielleicht eine einfachere Alternative? Wir und andere Forscher versuchen derzeit, genetische Moleküle ohne Hilfe von Katalysatoren zu kopieren. Wir benutzen DNA-Einzelstränge als Kopiervorlage, da DNA einfacher und billiger zu handhaben ist als RNA; wir hätten die gleichen Experimente aber auch mit RNA durchführen können. Wir fügten zuerst den Mustersträngen eine Nukleotidlösung zu und hofften, dass sich die Nukleotide gemäß den Regeln komplementärer Basenpaarung – A zu T und C zu G – an die Musterstränge binden und dann polymerisieren würden, so dass schließlich eine komplette Doppelhelix entstünde. Dies wäre der erste Schritt zur vollständigen Replikation: Nach Bildung der Doppelhelix müsste man die beiden Stränge trennen, damit der komplementäre Strang als Vorlage zur Synthese einer Kopie des Originalstrangs dient.

Mit normaler DNA oder RNA verläuft

dieser Vorgang extrem langsam. Doch durch kleine Änderungen an der chemischen Struktur der Zuckerkomponente – Austausch einer Hydroxylgruppe aus Sauerstoff und Wasserstoff gegen eine Aminogruppe aus Stickstoff und Wasserstoff – geht die Polymerisation hunderte Male schneller vor sich, so dass die Gegenstränge in Stunden statt Wochen entstehen. Das neue Polymer verhält sich wie normale RNA, obwohl es Stickstoff-Phosphor-Bindungen statt der normalen Sauerstoff-Phosphor-Bindungen trägt.

Nehmen wir einmal an, dass wir unsere Wissenslücken hinsichtlich der Chemie der Lebensentstehung bald ganz schließen werden. Dann können wir schon überlegen, wie einst aus der Interaktion von Molekülen die ersten zellenähnlichen Gebilde hervorgingen.

### **Wie entstand die erste Zelle?**

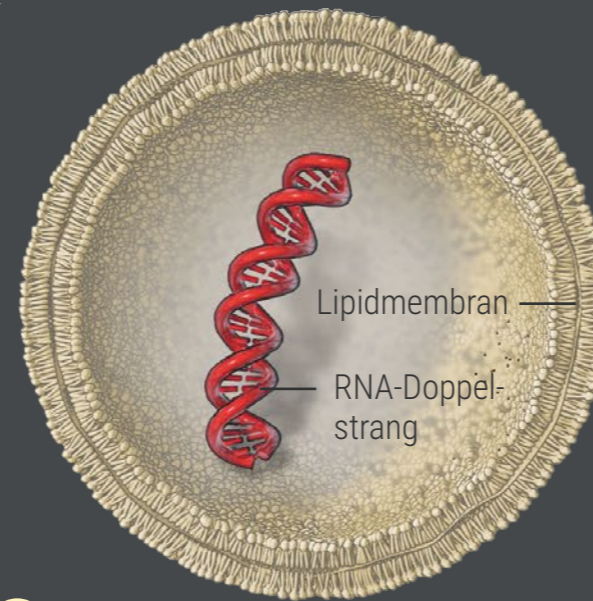
Die Außenmembranen moderner Zellen bestehen in erster Linie aus Lipid-Doppelschichten, die sich ihrerseits aus fettigen Molekülen wie Phospholipiden und Cholesterin aufbauen. Membranen halten die einzelnen Zellkomponenten physikalisch zusammen und bilden eine Barriere gegen

das unkontrollierte Ein- und Austreten großer Moleküle. In die Hülle eingebettete Proteine agieren quasi als Türhüter: Sie befördern Moleküle in die Zelle hinein oder aus ihr heraus. Andere Proteine wirken bei der Konstruktion und Reparatur der Membran mit. Wie konnte eine kümmerliche Protozelle, ganz ohne raffinierte Proteinmaschinerie, all diese Aufgaben bewältigen?

An einem einfachen Modell demonstrierten wir die Fähigkeit einer Protozelle, ihre genetische Information mit Hilfe von Nährstoffen aus der Umgebung zu kopieren. Wir präparierten Vesikel – kleine Bläschen – aus Fettsäuremembranen mit einem kurzen Stück einzelsträngiger DNA im Inneren, die als Schablone zur Herstellung eines Gegenstrangs gedacht war. Dann setzten wir den Vesikeln chemisch reaktive Versionen von Nukleotiden zu. Diese durchdrangen spontan die Membranbarriere, lagerten sich an den DNA-Strang in der Modellprotozelle an und erzeugten einen Komplementärstrang. Das Experiment stützt die Idee, dass die ersten Protozellen nicht viel mehr als RNA – oder etwas Ähnliches – enthielten und ihr Erbmateriale ohne Hilfe von Enzymen zu replizieren vermochten.

# Unterwegs zur heutigen Zelle

Nachdem das Leben auf die Welt gekommen war, trieb der Konkurrenzkampf unter den Lebensformen die Entwicklung zu immer komplexeren Organismen voran. In allen Einzelheiten werden wir die frühe Evolution wohl nie rekonstruieren können, doch hier ist ein plausibles Modell der wichtigsten Prozesse, die von der ersten Protozelle bis zu Bakterien und anderen DNA-haltigen Zellen führten.



1

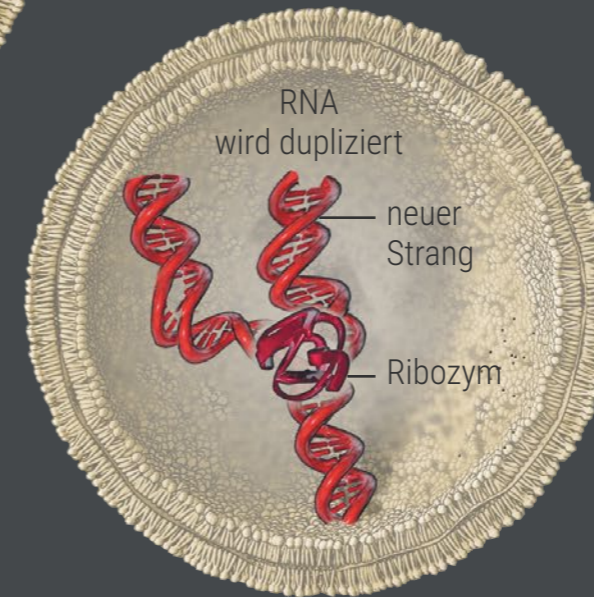
## Die Evolution beginnt

Die erste Protozelle ist bloß ein wassergefülltes Bläschen, das RNA enthält. Sie benötigt zur Reproduktion einen externen Anstoß, etwa zyklische Temperaturschwankungen. Doch bald erwirbt sie neue Eigenschaften.

2

## RNA-Katalysatoren

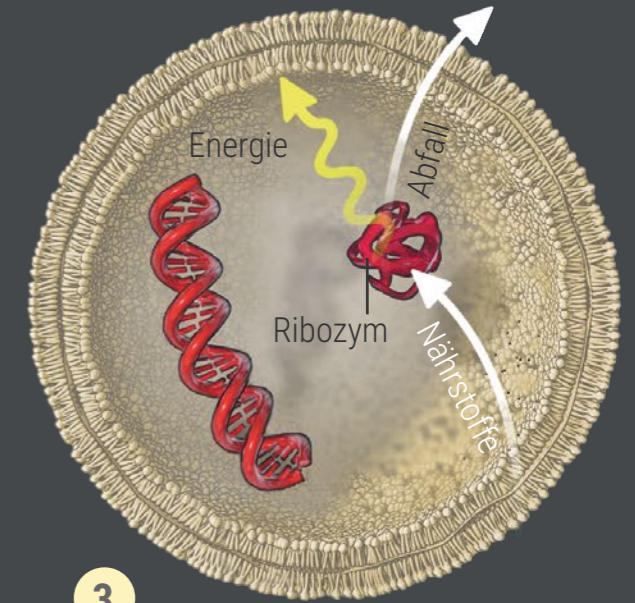
Ribozyme entstehen; diese gefalteten RNA-Moleküle haben ähnliche Fähigkeiten wie Enzyme auf Proteinbasis. Sie beschleunigen die Reproduktion und verstärken die Membran der Protozellen. Nun beginnen die Protozellen sich selbstständig zu reproduzieren.



3

## Der Stoffwechsel setzt ein

Andere Ribozyme katalysieren den Stoffwechsel: Sie setzen Ketten chemischer Reaktionen in Gang, mit denen Protozellen Nährstoffe aus der Umwelt zu nutzen vermögen.



ANDREW SWIFT

## Teile dich und herrsche

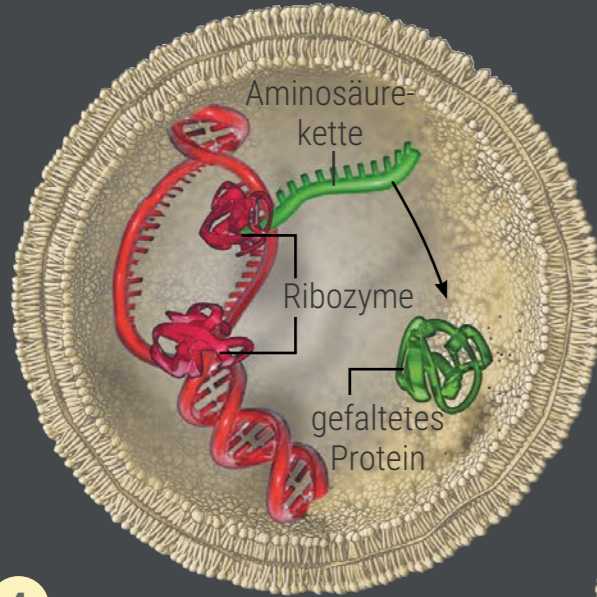
Um sich zu reproduzieren, mussten die Protozellen fähig sein, zu wachsen, ihr Erbgut zu duplizieren und sich in gleichwertige Tochterzellen zu teilen. Wie Versuche gezeigt haben, können primitive Vesikel auf mindestens zwei Arten wachsen. In einer Pionierarbeit aus den 1990er Jahren fügte Pier Luigi Luisi von der Eidgenössischen Technischen Hochschule

Zürich der Lösung, in der die Vesikel schwammen, frische Fettsäuren hinzu. Die Membranen bauten die Fettsäuren ein und vergrößerten ihre Oberfläche. Indem Wasser und darin gelöste Substanzen nachströmten, vergrößerte sich auch das Zellvolumen. Einen zweiten Ansatz, der auf der Konkurrenz zwischen Protozellen beruht, untersuchte Irene Chen, damals Doktorandin in unserem Labor. Modell-

protozellen, die RNA oder ähnliche Moleküle enthielten, schwollen an, weil durch Osmose Wasser in die Zelle strömte. Die dadurch gedehnten Membranen wuchsen, indem sie den entspannten Membranen der Nachbarvesikel Fettsäuren stahlen – wodurch diese schrumpften.

Im Jahr 2008 beobachtete Ting Zhu, ebenfalls Doktorand in unserem Labor, das Wachstum der Modellprotozellen,

# Vom Protein zum Bakterium



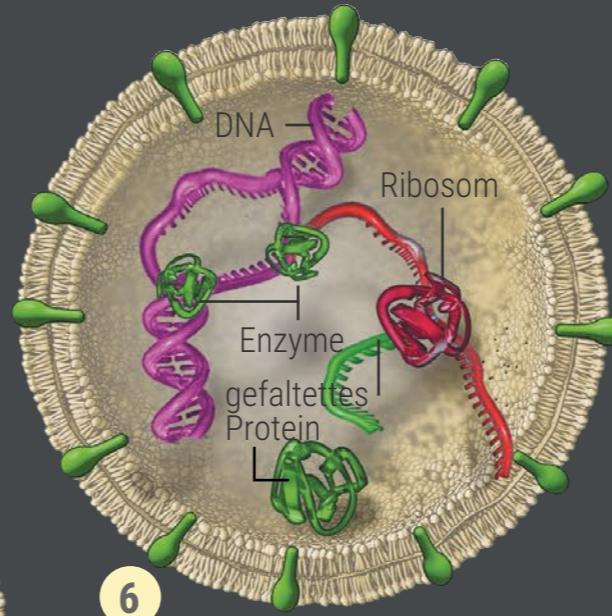
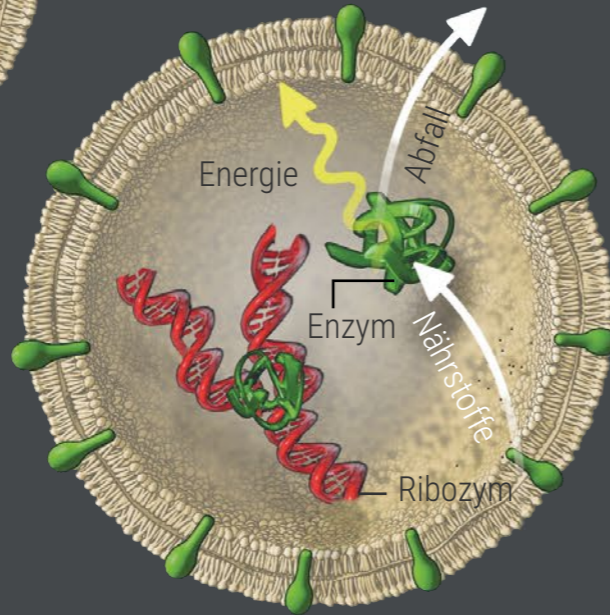
## 4 Proteine treten auf

Komplexe Systeme von RNA-Katalysatoren beginnen RNA-Nukleotidsequenzen (Gene) in Ketten von Aminosäuren (Proteine) zu übersetzen. Später erweisen sich Proteine als die besseren Katalysatoren, die vielfältige Aufgaben übernehmen können.

5

## Proteine dominieren

Katalysatoren auf Proteinbasis – das heißt Enzyme – ersetzen Zug um Zug die meisten Ribozyme der Protozellen.



6

## Geburt der DNA

Andere Enzyme beginnen DNA herzustellen. Dank ihrer überlegenen Stabilität übernimmt die DNA die Rolle des primären Erbmoleküls. Die RNA hat nun vor allem die Aufgabe, als Brücke zwischen der DNA und den Proteinen zu wirken.

7

## Die Welt der Bakterien

Organismen, die modernen Bakterien ähneln, passen sich an unterschiedlichste Umweltbedingungen überall auf der Erde an. Sie herrschen unangefochten Milliarden Jahre lang. Einige entwickeln sich allmählich zu komplexeren Organismen weiter.



nachdem er sie mit frischen Fettsäuren gefüttert hatte. Zu unserem Erstaunen streckten die anfangs kugelförmigen Bläschen zunächst ein dünnes Filament aus, das im Lauf einer halben Stunde länger und dicker wurde, wodurch sich das ganze Vesikel allmählich in eine lange, dünne Röhre verwandelte. Diese Struktur war sehr zerbrechlich. Schon durch leichtes

Schütteln – wie durch die Wellen, die der Wind auf einem Tümpel erzeugt – zerfiel sie in kleinere, kugelförmige Tochterprotozellen, die dann selbst wuchsen und den Zyklus wiederholten. Wenn die richtigen Bausteine vorhanden sind, erscheint demnach die Bildung von Protozellen nicht allzu schwierig: Membranen fügen sich selbst zusammen, genetische Polymere

ebenfalls, und die beiden Komponenten können auf vielfältige Weise zusammenfinden – beispielsweise, indem die Membranen um bereits existierende Polymere herum entstehen. Diese mit Wasser und RNA gefüllten Säckchen wachsen, absorbieren neue Moleküle, konkurrieren um Nährstoffe und teilen sich. Um wirklich zu leben, müssen sie sich jedoch reprodu-

zieren und weiterentwickeln. Insbesondere müssen sie ihre RNA-Doppelstränge trennen, damit jeder Einzelstrang als Vorlage für einen neuen Doppelstrang dienen kann, der an eine Tochterzelle weitergegeben wird.

Dieser Vorgang kam nicht ganz von selbst in Gang, sondern brauchte ein wenig Nachhilfe. Stellen wir uns zum Beispiel eine Vulkangegend auf der ansonsten kalten Früherde vor; damals schien die Sonne mit nur 70 Prozent ihrer heutigen Kraft. Vermutlich gab es Kaltwassertümpel, die teilweise von Eis bedeckt waren, aber von heißem Gestein flüssig gehalten wurden. Die Temperaturunterschiede riefen Konvektionsströme hervor, und dadurch wurden die Protozellen im Wasser höheren Temperaturen ausgesetzt, wenn sie die heißen Steine passierten, aber fast augenblicklich vom kalten Wasser wieder abgekühlt. Die plötzliche Erwärmung spaltete die Doppelhelix in Einzelstränge, und bei der Rückkehr in die Kälte konnten sich nach diesen Vorlagen neue Doppelstränge bilden – getreue Kopien des Originals. Sobald die Umwelt die Protozellen zur Reproduktion anregte, setzte auch die Evolution ein. Insbesondere

re mutierten einige RNA-Sequenzen irgendwann zu Ribozymen, die das Kopieren der RNA beschleunigten – ein klarer Wettbewerbsvorteil. Schließlich begannen Ribozyme die RNA ohne Hilfe von außen zu kopieren.

Es ist leicht vorstellbar, wie RNA-Protozellen sich dann weiterentwickelt haben. Der Stoffwechsel entstand allmählich, indem neuartige Ribozyme den Zellenergie ermöglichten, in ihrem Inneren Nährstoffe aus einfacheren und häufiger vorkommenden Ausgangsmaterialien selbst herzustellen. Als Nächstes erweiterten die Organismen ihre chemische Trickkiste um die Proteinsynthese. Mit ihrer erstaunlichen Vielseitigkeit haben die Proteine dann die Rolle der RNA beim Kopieren der Erbinformation und im Stoffwechsel übernommen. Später lernten die Organismen, DNA herzustellen, und kamen dadurch in den Besitz eines robusteren Trägers der Erbinformation. Erst an diesem Punkt wurde die RNA-Welt zur DNA-Welt – und das Leben, wie wir es kennen, begann. ↩

(Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung, 1/2014)

Gesteland, R. F. et al. (Hg.): The RNA World. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, 3. Auflage 2006

Hazen, R. M.: Genesis: The Scientific Quest for Life's Origins. Joseph Henry Press, Washington 2005

Nielsen, P. E.: Ein neues Molekül des Lebens? In: Spektrum der Wissenschaft 10/2009, S. 42-49

Shapiro, R.: Ein einfacher Ursprung des Lebens. In: Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 64-72

Szostak, J. et al.: Synthesizing Life. In: Nature 409, S. 387-390, 2001



HERKUNFT DES WASSERS

# ALS DIE MEERE VOM HIMMEL FIELEN

von David Jewitt und Edward D. Young

Neue Entdeckungen befeuern die Debatte  
über die Herkunft des Wassers auf der  
Erde: Stammt es überwiegend von Kometen,  
von Asteroiden – oder von ganz anderen  
Himmelskörpern?

**B**lickt man von der Küste auf das offene Meer hinaus, scheint es, als sei es schon immer da gewesen. Aber das ist keineswegs der Fall. Sein Wasser, die Regentropfen, die Feuchtigkeit der Luft, jeder Schluck aus einem Becher – das alles stammt aus einer Zeit, als die Ozeane buchstäblich vom Himmel fielen.

Das gesamte Wasser unseres Sonnensystems lässt sich bis zu der ursprünglichen Materiewolke aus Gas und Staub zurückverfolgen, aus der vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren die Sonne und ihre Planeten entstanden. Sie war reich an Wasserstoff und Sauerstoff, den beiden chemischen Bestandteilen von Wasser (H<sub>2</sub>O). Das überrascht nicht, ist doch Wasserstoff das häufigste und Sauerstoff das dritthäufigste Element im Kosmos – auf Platz 2 steht das Edelgas Helium. Die Sonne und die großen Gasplaneten, die vor den Gesteinsplaneten entstanden, nahmen das meiste Gas der Wolke auf. Ein großer Teil des übrigen Sauerstoffs verband sich mit anderen Elementen wie Kohlenstoff und Magnesium. Trotzdem reichte die restliche Menge an Wasserstoff und Sauerstoff aus, um im Sonnensystem erheblich mehr Wasser als

Gestein zu produzieren. Allerdings widerspricht das unseren Beobachtungen: Die Erde und ihre Nachbarn Mars und Venus sowie Merkur bestehen überwiegend aus Gestein. Ihr verhältnismäßig geringer Wasseranteil folgt daraus, wo und auf welche Art und Weise sie entstanden sind. Als die Materiewolke, aus der das Sonnensystem hervorging, kollabierte, verformte sie sich durch die Drehimpulserhaltung zunächst zu einer flachen, rotierenden so genannten protoplanetaren Scheibe. Nach heutigen Erkenntnissen bildeten sich in ihr die Gesteinsplaneten Schritt für Schritt, indem kleinere Objekte zusammenstießen und zu größeren verschmolzen: Aus mikroskopisch kleinen Staubkörnern entwickelten sich Steine, diese wuchsen weiter zu Felsbrocken und schließlich zu kilometergroßen Planetenbausteinen, den Planetesimalen. Die heutigen Asteroiden und Kometen entstanden aus übrig gebliebenen Planetesimalen.

In der inneren, sonnennahen Region der Materiescheibe ließen Reibungswärme und Sonneneinstrahlung Wasserstoff und andere leichte Elemente entweichen. Für die Planetenbildung blieb dort lediglich relativ trockenes Material zurück. Während

Auf einen Blick

## Herkunft des irdischen Wassers

- 1 In der Umgebung der jungen Sonne war die Strahlung so intensiv, dass sich das dort vorhandene Wasser in äußere Regionen des Sonnensystems verflüchtigte.
- 2 In Sonnennähe entstanden so relativ trockene Planeten. Vermutlich gelangte das meiste Wasser erst in einer späten Entwicklungsphase durch Asteroiden- oder Kometenschauer auf die Erde.
- 3 Die Sachlage ist jedoch nicht eindeutig. Möglicherweise wirkten bei der Entstehung der irdischen Ozeane verschiedene Prozesse zusammen.



## **BOMBARDEMENT AUS DEM ALL**

**Übrig gebliebene Planetesimale aus den äußeren wasserreichen Regionen des Sonnensystems bombardierten die Erde und lieferten Wasser für die Ozeane.**

nensystem geschleudert wurden. Beobachtungen von protoplanetaren Scheiben um fremde Sterne lieferten jüngst weitere Hinweise auf die Existenz von Schneegrenzen und Kollisionen von Planetesimalen. In den Tiefen des interstellaren Raums sehen wir heute also dieselben Prozesse, die vor langer Zeit in unserem Sonnensystem abliefen. Trotzdem sind viele Aspekte der Herkunft der irdischen Ozeane immer noch rätselhaft.

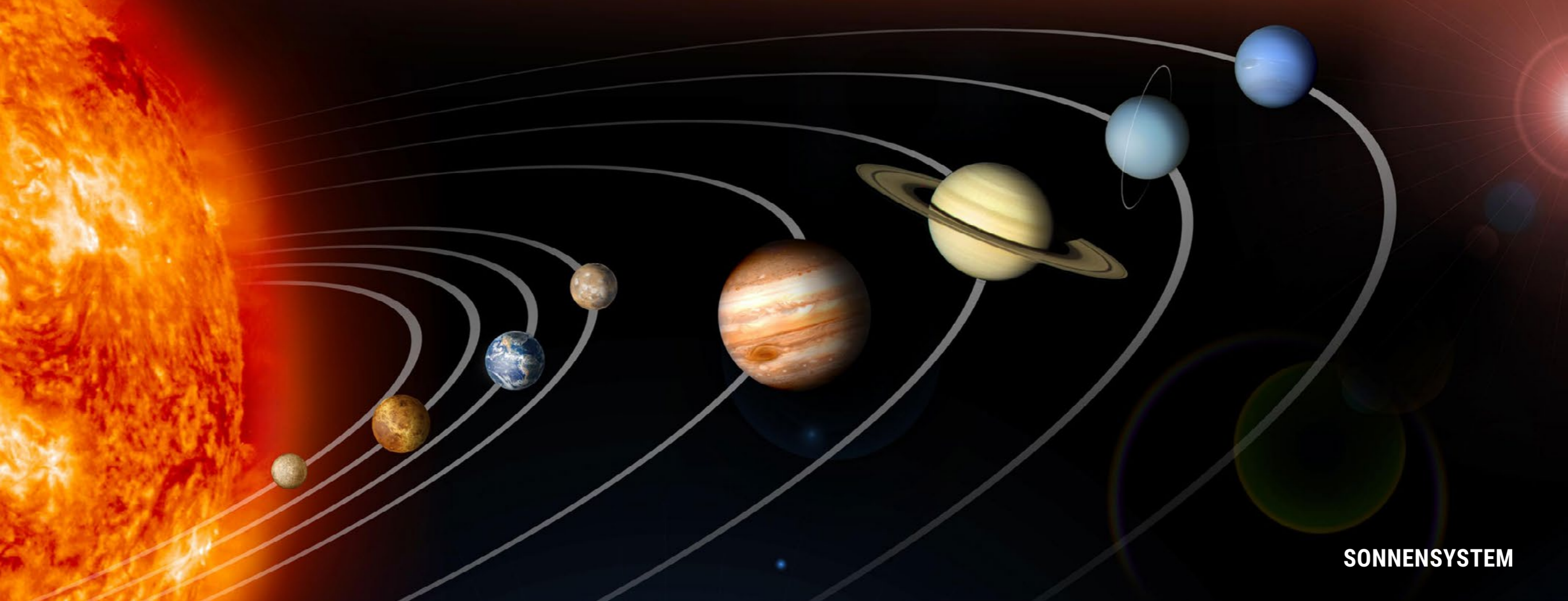
## **Planet Ozean – einst knochentrocken**

Vom All aus betrachtet erscheint uns die Erde als blauer Planet. Zwei Drittel seiner Oberfläche sind von Wasser bedeckt. Und sogar wir Menschen bestehen zu mehr als zwei Dritteln aus Wasser. Die Ozeane haben eine mittlere Tiefe von vier Kilometern und enthalten genug Wasser, um eine Kugel mit einem Durchmesser von 1300

also nahe der Sonne Gesteinskörper entstanden, waren weiter außen, etwa in der Gegend des heutigen Asteroidengürtels und der Jupiterbahn, die Temperaturen so niedrig, dass Wasser und andere flüchtige Stoffe ausfrieren konnten. Astronomen bezeichnen diese Übergangsregion als

Schneegrenze. Das meiste Wasser auf der Erde muss, so die allgemeine Überzeugung, von jenseits der Schneegrenze stammen. Vielleicht kam es als Schauer von eisigen Asteroiden und Kometen, die von den äußeren Riesenplaneten in der letzten Phase der Planetenentstehung in das innere Son-

RON MILLER



**SONNENSYSTEM**

NASA / JPL

Kilometern zu füllen. Und doch macht dieses lediglich 0,02 Prozent der gesamten Masse der Erde aus. Wäre unser Planet eine 300 Tonnen schwere Boeing 777, so entspräche der Wassergehalt gerade einmal der Masse eines einzigen Passagiers. Das in den Polkappen, in Wolken, Flüssen, Seen, feuchtem Erdboden und allen Lebewesen enthaltene Wasser trägt nur einen winzigen Teil zu dieser Menge bei.

Im felsigen Erdmantel, der sich über mehr als 3000 Kilometer von der Kruste bis zum Kern erstreckt, verbirgt sich weite-

res Wasser. Es liegt dort nicht in flüssiger Form vor, sondern ist in die molekulare Struktur hydratisierter Gesteine und Mineralien eingebunden, die tektonische Prozesse unter die Kruste transportiert haben. Ein Teil dieser im Gestein gefangenen Feuchtigkeit kann über Vulkane aus dem Mantel wieder an die Oberfläche gelangen, doch der überwiegende Rest bleibt in der Tiefe verborgen.

Unterhalb des Erdmantels liegt der mächtige Nickel-Eisen-Kern. Er enthält nicht nur etwa 30 Prozent der Masse der

Erde, sondern möglicherweise auch mehr Wasser als der Mantel – allerdings in Form von Wasserstoff. Unter anderen Bedingungen als den extremen Drücken und Temperaturen im Kern würde sich dieser aber sofort mit Sauerstoff aus der Umgebung zu Wasser verbinden.

Wie viel Wasser sich im Inneren unseres Planeten befindet, weiß niemand genau. Einerseits fehlen direkte Materialproben von dort, andererseits wissen wir auch nicht, wie effektiv Wasser von der Oberfläche nach innen und wieder zurück trans-



portiert wird. Realistische Annahmen liefern für den Mantel noch einmal so viel Wasser, wie in allen Ozeanen enthalten ist. Aber selbst dann macht das Wasser nur 0,04 Prozent der Erdmasse aus. So seltsam es auch klingen mag: Die Erde ist 100-mal trockener als alte Knochen. Trotzdem stellt sich die Frage, woher das Wasser auf unserem Planeten stammt.

### **Kometen oder Asteroiden?**

Inzwischen gehen die Forscher davon aus, dass die junge Erde noch trockener war als die heutige. Vermutlich gelangte das Wasser in einer recht späten Entwicklungsphase auf unseren Heimatplaneten, noch nachdem sich der Mond bildete.

Zumindest für einige zehn Millionen Jahre nach ihrer Geburt muss die Erde – wie die anderen Gesteinsplaneten der Son-

### **67/P TSCHURJUMOW-GERASIMENKO**

**Die Zusammensetzung des Wassers von dem Kometen 67/P Tschurjumow-Gerasimenko unterscheidet sich in seinem D/H-Gehalt von jenem der irdischen Ozeane.**

ne auch – eine teilweise geschmolzene Oberfläche besessen haben. Ursache dafür war ein ständiger Zustrom von kilometergroßen Planetesimalen, die dem jungen Planeten mit ihren Einschlägen große Mengen an Energie zuführten. Zwar gibt es geochemische Hinweise auf Spuren von Wasser in den Magmaozeanen der frühen Erde. Aber geschmolzenes Gestein eignet sich nicht sonderlich gut als Aufenthaltsort für Wasser. Der größte Teil der Feuchtigkeit der Proto-Erde und der Planetesimale dürfte daher als ionisiertes Gas und Dampf wieder ins All entwichen sein. Ein Teil davon könnte allerdings auf die Erde zurückgefallen und gebunden in Gestein in den Mantel abgesunken sein.

Weitere große Einschläge haben vermutlich später den Gehalt an Wasser auf und nahe der Erdoberfläche verändert. So kollidierte die Erde vor 4,47 Milliarden Jahren mit einem marsgroßen Körper. Aus den bei dieser Katastrophe ausgeworfenen Trümmern bildete sich der Mond. Die enorme Einschlagsenergie dürfte einen Großteil der Atmosphäre hinweggefegt, jeden bereits vorhandenen Ozean schlagartig zum Verdampfen gebracht und einen mehrere hundert Kilometer tiefen Magmaoze-

an produziert haben. Unabhängig davon, ob die Erde feucht oder trocken entstanden ist – dieses Ereignis hat nahezu das gesamte damals bereits vorhandene Wasser von unserem Planeten entfernt.

Daher haben die Astronomen lange nach einer Quelle gesucht, die nach der Abkühlung des Erde-Mond-Systems Wasser auf unseren Planeten bringen konnte. Seit den 1950er Jahren wissen wir, dass Kometen reich an Wassereis sind. Die Schweifsterne kommen aus zwei großen Reservoiren in das innere Sonnensystem: dem Kuipergürtel, der etwa auf Höhe der heutigen Plutobahn beginnt, und der Oortschen Wolke, die sich jenseits des Kuipergürtels möglicherweise bis zur halben Entfernung des nächsten Sterns ins All hinaus erstreckt. Vielleicht, so dachten viele Forscher, waren Kometen die vorherrschende Quelle der irdischen Ozeane.

Doch in den 1980er und 1990er Jahren geriet dieser Erklärungsansatz ins Wanken. Damals bestimmte man erstmals das Verhältnis von Deuterium (D) zu Wasserstoff (H) in Kometen aus der Oortschen Wolke. Deuterium ist ein schweres Isotop des Wasserstoffs, das zusätzlich zum Proton ein Neutron in seinem Atomkern enthält. Die

Häufigkeit von Deuterium im Verhältnis zu normalem Wasserstoff liefert eine Art Fingerabdruck für die Geschichte eines Himmelskörpers. Wenn die irdischen Ozeane also aus geschmolzenen Kometen entstanden sind, müsste ihr D/H-Verhältnis dem der heutigen Kometen gleichen. Die Objekte aus der Oortschen Wolke besitzen allerdings einen doppelt so hohen D/H-Wert wie das Meereswasser. Folglich muss der größte Teil des Wassers auf der Erde einen anderen Ursprung haben.

Zwar zeigten in den vergangenen Jahren Messungen des D/H-Verhältnisses an Kometen aus dem Kuipergürtel ähnliche Werte wie die irdischen Ozeane. Aber Ende 2014 lieferte die ESA-Sonde Rosetta für den ebenfalls aus dem Kuipergürtel stammenden Kometen 67/P Tschurjumow-Gerasimenko einen dreimal höheren D/H-Wert. Dieses Ergebnis in Verbindung mit Analysen der orbitalen Dynamik einfallender Körper aus den kometenreichen Regionen spricht gegen Kometen als vorherrschende Quelle des irdischen Wassers – auch wenn sicherlich gelegentlich ein Schweifstern seinen Teil dazu beigetragen hat.

Die offensichtliche Alternative sind Asteroiden – und die meisten Forscher gehen

heute davon aus, dass der Löwenanteil des irdischen Wassers von solchen Himmelskörpern stammt. Wie Kometen sind auch Asteroiden Bruchstücke von Planetesimalen aus der Entstehungszeit des Sonnensystems. Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter liegt viel näher an der Erde als der Kuipergürtel. Damit ist auch die Wahrscheinlichkeit viel größer, dass ein aus der Bahn geworfenes Objekt aus dieser Zone die Erde trifft. Ein Beleg dafür ist der Mond: Seine kraterübersäte Oberfläche zeugt von zahlreichen Asteroideneinschlägen in seiner Frühzeit.

### **Meteoriten als Zeugen**

Und Meteoriten – kleine Bruchstücke von Asteroiden, die den Erdboden erreichen – erinnern uns daran, dass die Erde immer noch stetig von interplanetaren Trümmern getroffen wird. Die Untersuchung

### **WASSERSPENDER ASTEROID?**

**Das Wasser von einigen Asteroiden ist unserem Wasser sehr viel ähnlicher als das von Kometen.**

ESA / ROSETTA / NAVCAM



dieser vom Himmel gefallenen Steine bietet uns einen Einblick in ihre Geschichte und hilft uns dabei, die Frage zu beantworten, ob Asteroiden die Ozeane der Erde gefüllt haben könnten. Messungen an bestimmten Arten von Meteoriten haben inzwischen gezeigt, dass ihr D/H-Wert mit jenem des Meereswassers übereinstimmt.

Wie ihre Ursprungsasteroiden, so überdecken auch Meteoriten einen weiten Bereich an chemischen Zusammensetzungen und besitzen ganz unterschiedliche Anteile an Wasser. Viele der wasserarmen, steinigen Meteoriten stammen von Asteroiden, die ihre Bahn am inneren Rand des Gürtels ziehen, etwa doppelt so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Kohlige Chondrite dagegen, Meteoriten aus hydratisierten Mineralien und Karbonaten, stammen von relativ feuchten Asteroiden am äußeren Rand des Gürtels, etwa auf halbem Weg zu Jupiter. Sie enthalten bis zu mehrere Gewichtsprozent an Wasser.

Einer von uns (Young) hat sich intensiv mit der Geschichte des Wassers in solchen Gesteinsbrocken aus dem All befasst. Die wasserreichen Mineralien in kohligen Chondriten bilden sich über Reaktionen

zwischen dem Gestein und flüssigem oder dampfförmigem Wasser, die bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von wenigen hundert Grad Celsius ablaufen. Auf der Erde entstehen solche Mineralien, wenn Wasser durch poröses Gestein hindurchsickert. In Meteoriten künden sie von einer Ära im Sonnensystem, in der Wassereis geschmolzen und durch die Gesteinsmatrix des Asteroiden geflossen ist.

Die Wärmequelle, die das Eis zum Schmelzen gebracht hat, war höchst wahrscheinlich das radioaktive Isotop Aluminium-26, das im jungen Sonnensystem in großen Mengen vorhanden war. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 717 000 Jahren in Magnesium-26 und liefert so über mehrere Millionen Jahre hinweg reichlich Energie. In den kalten Außenzonen des Sonnensystems jenseits der Schneegrenze war die Zerfallswärme von Aluminium-26 ein effizienter, wenn auch nur kurz wirkender Einfluss auf die Geologie und die Hydrologie der an flüchtigen Substanzen reichen Asteroiden. Nach der Entstehung der Sonne war das Wasser in vielen Asteroiden über einige Millionen Jahre hinweg flüssig und trieb hydrothermale Zirkulationssysteme in ihnen an.

Ganz ähnliche Wasserkreisläufe findet man beispielsweise bei Vulkanschloten auf den Mittelozeanischen Rücken der Erde.

Das warme Wasser sickerte durch Risse und Spalten des radioaktiv erwärmten Gesteins und führte zur Bildung von hydratisierten Mineralien und Karbonaten. In der Endphase der Planetenentstehung streuten die äußeren Riesenplaneten durch ihre Gravitation kleinere Körper kreuz und quer durch das Sonnensystem – und so konnten wasserhaltige Asteroiden aus dem Bereich jenseits der Schneegrenze auf die Erde und die anderen Gesteinsplaneten stürzen.

Hinweise auf diese Umwälzung im jungen Sonnensystem finden wir sowohl im chemischen Aufbau der Erde als auch des Planeten Mars. Elemente der Platin-Gruppe beispielsweise sind siderophil, das heißt Eisen liebend. Sie besitzen also eine stärkere chemische Affinität zu Eisen und anderen Metallen als zu Gestein. Auf der neugeborenen, geschmolzenen Erde sollten diese Elemente deshalb zusammen mit Eisen und Nickel in den Kern abgesunken sein. Doch überraschenderweise findet man im heutigen Mantel und sogar in der Kruste einen beachtlichen Anteil an siderophilen

Elementen. Das passt zu der Annahme, dass etwa ein Prozent der Erdmasse von Chondriten stammt, die erst eingeschlagen sind, nachdem der Planet abgekühlt war und sich der Kern bereits vollständig herausgebildet hatte. Nur durch dieses späte Bombardement aus dem All haben wir auf der Erde Zugang zu Platin, einem Element, das nicht nur für Schmuck, sondern auch für Auto-Katalysatoren von Bedeutung ist. Und es ist möglicherweise ebenfalls die Erklärung für all das Wasser der irdischen Ozeane. Sehr wahrscheinlich traf ein gewaltiger Schwung von Materie aus dem Asteroidengürtel gegen Ende der Planetenentstehung nicht nur Erde und Mars, sondern alle inneren Planeten.

Allerdings hat das schöne Bild von den Asteroiden, die das Wasser zur Erde liefern, wohl einen entscheidenden Fehler. Darauf stießen die Forscher, als sie ihren Blick auf Edelgase wie Xenon und Argon richteten. Diese sind chemisch nahezu inert, sie reagieren kaum mit anderen Stoffen. Daher lassen sich mit ihnen physikalische Prozesse gut verfolgen. Wenn die Gesteinsplaneten und die Asteroiden eng miteinander verwandt sind, sollten sie auch ähnliche Anteile der meisten Edelgase aufweisen.

Tatsächlich zeigte sich aber, dass Erde und Mars sehr viel weniger Xenon und Argon enthalten als Meteoriten.

Es gibt viele Vorschläge zur Lösung dieses Xenon-Problems – darunter einige, die das Pendel zurück zu den Kometen als Hauptlieferanten des irdischen Wassers und anderer flüchtiger Substanzen schwingen lassen. Während wir diesen Text verfassten, warteten die Wissenschaftler ungeduldig auf erste Messungen der Edelgase auf einem Kometen, nämlich auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko durch Rosetta. Sie könnten dabei helfen, eine endgültige Antwort auf die Frage nach dem Ursprung des irdischen Wassers zu finden. Wie die Vergangenheit zeigt, könnten sie aber ebenso gut noch schwierigere Fragen aufwerfen – und damit die Debatte für weitere Jahrzehnte in Gang halten.

### **Nur scheinbar ein Gegensatz?**

Asteroiden oder Kometen – es scheint keine einfache Antwort auf diese Frage zu geben. Vielleicht ist aber nicht der Vorgang selbst, sondern die von uns gestellte Frage das Problem. Der Unterschied zwischen Asteroiden und Kometen ist möglicherweise gar nicht so gewaltig wie ursprüng-

lich angenommen. Einer von uns (Jewitt) hat unlängst zusammen mit Henry Hsieh vom Institut für Astronomie und Astrophysik der Academia Sinica in Taiwan Objekte im Asteroidengürtel entdeckt, die wie Kometen auf ihrer Bahn periodisch Staub ausstoßen. Entgegen unseren Erwartungen enthalten sie noch Eis, obwohl sie sich in der sonnendurchfluteten Region innerhalb der Schneegrenze befinden.

Darüber hinaus ist die eigentliche Frage ja nicht, warum die Erde so viel, sondern eher, warum sie so wenig Wasser besitzt. Es gibt zahlreiche Wege, auf denen die Erde ihren relativ geringen Anteil an Wasser erhalten haben könnte. Sie hängen eng mit der genauen Geschichte des Planeten, der einschlagenden Himmelskörper und den Anfangsbedingungen ihrer Entstehung zusammen. All die Unsicherheiten lassen eine Menge Spielraum für andere, exotischere Erklärungen für die Herkunft des irdischen Wassers: Auch wenn diese unwahrscheinlich sind, lassen sie sich nicht völlig ausschließen.

Rein theoretisch könnte beispielsweise der größte Teil des Wassers nahezu von Beginn an auf der Erde gewesen sein. Neuere Forschungen deuten darauf hin, dass sich

Wasserstoffionen des Sonnenwinds in Form hydratisierter Mineralien auf den amorphen Oberflächen interplanetarer Staubpartikel ansammeln können – die so bereits am Anfang der Planetenentstehung wasserhaltiges Material in die Planetesimale einbrachten. Selbst dann wäre aber schwer zu verstehen, wie ein solches, ursprünglich tief im Mantel vorhandenes Wasserreservoir die Entstehungsphase der Erde überstehen und schließlich nach dem großen Bombardement herausickern konnte.

In jüngster Zeit haben größere Himmelskörper die Aufmerksamkeit der Forscher auf sich gezogen, so etwa der Zwergplanet Ceres, der mit einem Durchmesser von 900 Kilometern der größte bekannte Asteroid ist. Anfang 2014 beobachteten Astronomen, dass von Ceres etwa 20 000 Kilogramm Dampf pro Stunde wegströmen. Einige Forscher vermuten daher, Ceres bestehe zur Hälfte aus Wasser. Die Erde hat etwa die 6000-fache Masse von Ceres. Das bedeutet, dass bereits fünf derartige Objekte genauso viel Wasser enthalten könnten wie die gesamte Erde.

Solche Objekte gab es im chaotischen, frühen Sonnensystem viele; sie waren

deutlich häufiger als heute. So könnten durchaus mehrere ceresähnliche Himmelskörper ihren Weg in das innere Sonnensystem und zur Erde gefunden haben. Eine Hand voll von ihnen hätte bereits ausgereicht, um unseren Planeten mit Ozeanen auszustatten – weitere Asteroiden- oder Kometenschauer wären völlig unnötig gewesen. Inzwischen hat die NASA-Sonde Dawn Ceres erreicht und wird uns bald ein neues Bild des Zwergplaneten liefern. Und vielleicht neue, überraschende Erkenntnisse über die Geschichte des Wassers auf der Erde und im Sonnensystem. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 9/2015)

Altwegg, K. et al.: 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter Family Comet with a High D/H Ratio. In: Science 347, 1261952, 2015

Bardley, J. P. et al.: Detection of Solar Wind-Produced Water in Irradiated Rims on Silicate Minerals. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 111, S. 1732-1735, 2014

Hsieh, H. H. et al.: A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. In: Science, 312, S. 561-563, 2006

Mottl, M. J. et al.: Water and Astrobiology. In: Chemie der Erde 67, S. 253-282, 2007

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

# KOMPAKT

Quelle des Lebens

## MEERE & OZEANE



FÜR NUR  
€ 4,99

- > Der lange Weg des Plastikmülls im Meer
- > Stammt das Meersalz aus Kometen?
- > Haiwanderungen auf der Spur

HIER DOWNLOADEN



CHEMISCHE EVOLUTION

# SCHÖNE, ALTE RNA-WELT?

von Martina Preiner

Wie wurde aus Chemie Leben?  
Neue Hinweise stützen die These  
von der RNA als Lebensspender.  
Doch Kritiker sind unbeeindruckt.

In der Geschichte der Evolution gibt es gleich mehrere Henne-Ei-Probleme. Eines der undurchdringlichsten ist die Frage nach dem »Was kam zuerst?« in der Zeit, bevor es Leben auf der Erde gab. Zwei Bestandteile sind nach allem, was wir wissen, grundlegend für das Leben: Proteine auf der einen Seite und Nukleinsäuren wie DNA auf der anderen. Proteine braucht man als Enzyme, um Nukleinsäuren aufzubauen. Aber um die Enzyme herzustellen, benötigt man wiederum die entsprechende Bauanleitung, die nur die Nukleinsäuren liefern können.

Anfang der 1980er Jahre häuften sich Veröffentlichungen, die Lösungen für dieses Dilemma der »präbiotischen Evolution« anboten: Es hatte sich gezeigt, dass bei manchen Einzellern neben normalen Enzymen auch RNA-Strukturen die Synthese anderer RNA-Moleküle katalysieren können. In Anlehnung an die bis dahin einzigen bekannten Zellkatalysatoren, die Enzyme, nannte man diese Strukturen aus RNA – also aus Ribonukleinsäure – Ribozyme. 1986 griff der Biochemiker und Nobelpreisträger Walter Gilbert die gesammelten Ergebnisse auf, um einer jungen Evolutionshypothese einen Namen zu geben:

»RNA-Welt«. Die Kernaussage: Das wichtigste Ereignis für den Ursprung des Lebens ist die Bildung eines selbstreplizierenden Moleküls. Eines Moleküls, das sich sowohl eigenständig kopieren als auch abändern kann und dadurch immer bessere und effizientere Kopiermechanismen entwickelt. Und der beste Kandidat für dieses Molekül sei die RNA.

Für viele Wissenschaftler, die sich mit präbiotischer Evolution auseinandersetzen, klingt dies alles sehr schlüssig. Doch die These wurde aus diversen Gründen auch attackiert. Unter anderem deshalb, weil eine große Frage bei alledem offen blieb: Wie konnte sich die RNA überhaupt bilden? Ein zentraler Bereich der Forschung ist folglich die Suche nach einem chemischen Nachweis dafür, dass RNA tatsächlich »von selbst« entstehen kann.

### Was war vor der RNA?

Auch wenn die einzelsträngige RNA einfacher aufgebaut ist als die doppelsträngige DNA – nachzuweisen, wie ausgerechnet dieses Polymer sich Stück für Stück aus kleinen Verbindungen vor vier Milliarden Jahren hätte formen können, ist ein schwieriges Unterfangen. Dennoch konnten Che-

miker um John Sutherland im Jahr 2009 mit erstaunlich einfachen Ausgangsmolekülen zwei der vier RNA-Grundbausteine (oder Ribonukleotide) im Labor herstellen. Dabei handelt es sich um Verbindungen aus Zuckern und Basen, in Sutherlands Fall die so genannten Pyrimidinbasen Uracil und Cytosin. »Das war eine schöne Arbeit, aber Sutherland wurde dafür kritisiert, dass er die Reaktionen stufenweise ablaufen ließ, wie bei einer normalen chemischen Laborsynthese«, sagt Thomas Carell, Chemiker an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. »In einer urzeitlichen Lösung wären alle Reaktionsbestandteile wahrscheinlich zur gleichen Zeit vorhanden gewesen.«

Erst kürzlich haben er und Kollegen einen Weg gefunden, die beiden anderen Bausteine der RNA, die Purinbasen Adenosin und Guanin, herzustellen – und zwar erstmals unter »plausiblen Urzeitbedingungen«: bei einer Temperatur von 100 Grad Celsius, unter Sauerstoffausschluss und in wässrigen Lösungen von Ammoniak oder Borax, zu denen dann die anderen Verbindungen hinzugegeben werden.

Bei einem anderen Forschungsprojekt hatten die Münchner Forscher per Zufall



ISTOCK / MLENNY

## DER GEYSIR STROKKUR IN ISLAND

**Unter welchen Bedingungen sich das Leben entwickelte, ist umstritten. Vielleicht spielten heiße Quellen eine Rolle.**

entdeckt, dass ein Molekül namens Formamidopyrimidin (FaPy) zu Purinen reagieren kann. Nun fragten sie sich, ob sich unter urzeitlichen Bedingungen Formamidopyrimidine bilden konnten. Dazu braucht es nur drei verschiedene Elemente: Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Eine Verbindung, die alle Bestandteile liefert und von der viele Wissenschaftler glauben, dass sie vor vier Milliarden Jahren auf der Erde vorhanden war, ist Zyanwasserstoff oder Blausäure. Mit Wasser reagiert sie zu Aminopyrimidinen und diese wiederum mit Hilfe von etwas Säure zu einer FaPy-Verbindung – der Kreis war geschlossen: Purine können sich bei den vorgegebenen, einfachen Bedingungen entwickeln.

In Anwesenheit von Ameisensäure oder auch Formamid (die im Rahmen der Rosetta-Mission auf dem Kometen Tschurjumow-Gerasimenko entdeckt wurden und sich demnach wohl auch in der Ur-Erdatmosphäre bilden konnten) reagieren die Basen sehr gut und mit großer Ausbeute mit Zuckern – und somit zu fertigen Ribonukleotiden.

Carell glaubt, dass sich auf diesem Weg auch die beiden Pyrimidine herstellen lassen, die Sutherland 2009 auf seine Art syn-

thetisierte. Die Publikation seines Teams kam in der Fachwelt gut an, aber wo Lob ist, ist auch Kritik. Auch an sich selbst: »Eine grundlegende Sache, bei der wir noch gar keine Ahnung haben, warum sie so ist, wie sie ist, ist die Chiralität«, sagt Thomas Carell. Von manchen organischen Molekülen gibt es zwei Varianten, die zueinander spiegelverkehrt sind – bei den Nukleinsäuren und auch bei den Proteinen hat sich letztlich eine davon durchgesetzt, obwohl sich bei Reaktionen beide bilden. Für die durchgängige Bevorzugung einer der Varianten, die Homochiralität, gibt es schlichtweg noch keine befriedigende Erklärung. Vor allem aber fehlen Hinweise, wie sich aus den einzelnen Bausteinen komplette RNA-Stränge zusammengefunden haben sollen. Doch für Carell sind das keine unüberwindbaren Hürden. Letztlich werde sich ein nachvollziehbarer Weg dorthin finden lassen.

## Information vs. Stoffwechsel

Nicht alle teilen seine Ansicht. Skeptisch ist etwa der Biologe Bill Martin, der sich an der Düsseldorfer Heinrich-Heine-Universität mit molekularer Evolution beschäftigt. Seiner Meinung nach erfänden Chemiker eine

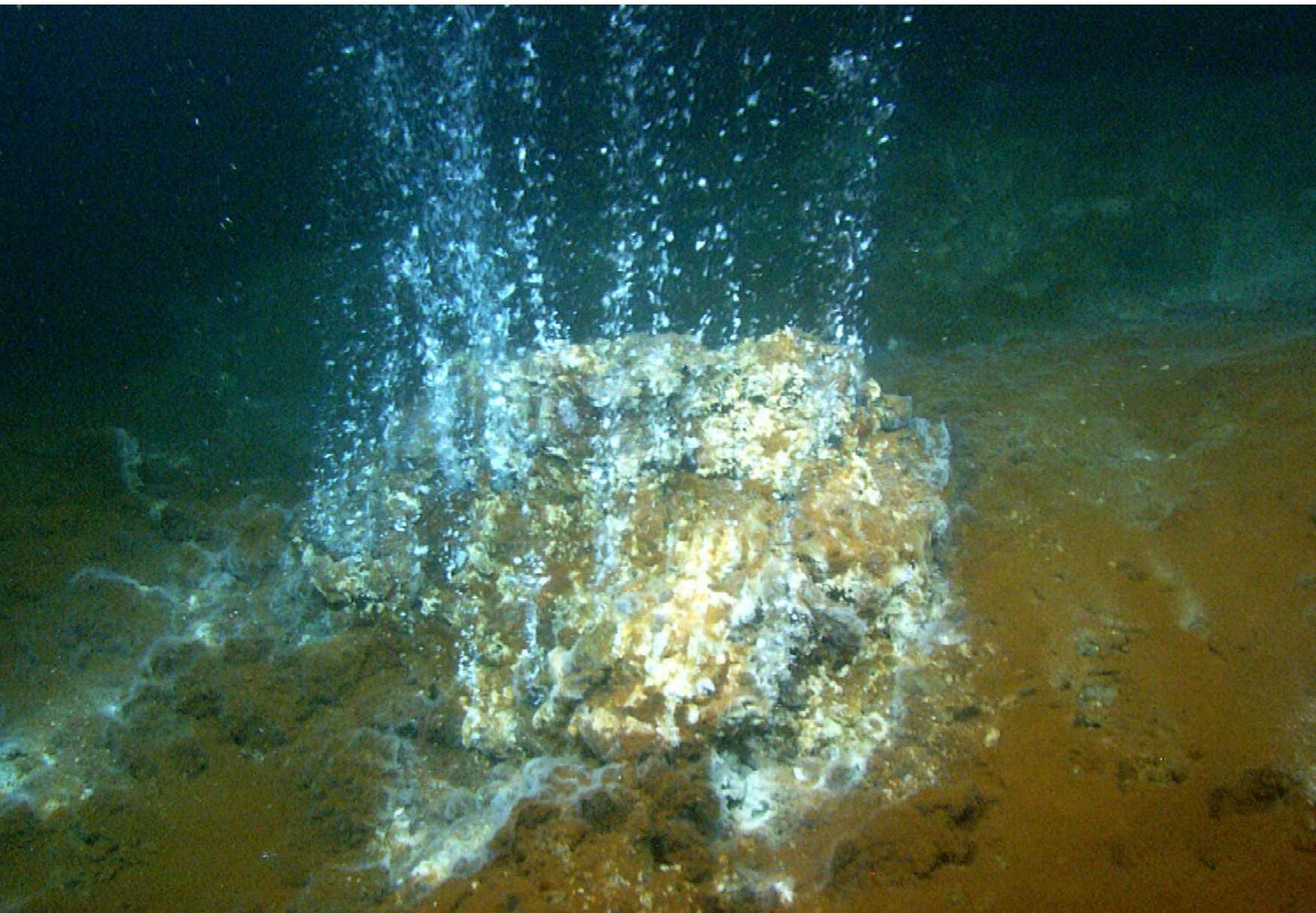
ihnen passende präbiotische Umwelt, um darin die gewünschten Moleküle herzustellen: »Das sind spannende Synthesen, aber nur weil man etwas im Labor machen kann, heißt das nicht, dass es so gewesen sein muss.«

Martin ist Vertreter der so genannten »Metabolism-first«-Hypothese. Wird in der RNA-Welt die (vererbare) Information über alles andere gestellt, steht hier der

Stoffwechsel am Anfang des Lebendigen. Reaktionen von kleinen Molekülen hätten zu einfachen organischen Verbindungen geführt, unter Umständen mit Hilfe der katalytischen Eigenschaften von Mineralien oder porösen Oberflächen in Gesteinen. Diese Verbindungen ließen sich auf unterschiedliche Weisen zu – wiederum einfachen – Aminosäuren, Lipiden und Nukleobasen kombinieren, welche dann als Kata-

lysatoren für die Bildung anspruchsvollerer Moleküle dienen konnten. Der Anfang eines Stoffwechsels wäre gemacht.

Für dieses Szenario spricht, dass sich lange, komplexe Moleküle wie RNA **nicht spontan bilden müssen wie bei der RNA-Welt-Hypothese**. Zudem existieren hier relativ einfache Theorien, wie sich die Homochiralität entwickeln konnte, die vielen Chemikern solche Kopfschmerzen bereitet. Ausgangspunkt einer solchen Theorie ist Glycin, eine Aminosäure, die sich spontan aus kleinen Molekülen bilden kann, einfach aufgebaut ist und keine Chiralität besitzt. Basierend darauf könnten sich weitere einfache Aminosäuren mit katalytischer Hilfe kurzer Peptidketten gebildet haben – es wäre denkbar, dass dieser primitive katalytische Prozess zufälligerweise



INSTITUTE FOR EXPLORATION, THE UNIVERSITY OF RHODE ISLAND (URI) GRADUATE SCHOOL OF OCEANOGRAPHY (GSO) / URI INSTITUTE FOR ARCHAEOLOGICAL OCEANOGRAPHY

#### HYDROTHERMALQUELLE IN DER TIEFSEE

**So unwirtlich diese heißen Quellen in der Tiefsee wirken mögen, nach Meinung mancher Wissenschaftler boten sie einst genau die richtigen Voraussetzungen für die Entstehung der Chemie des Lebens.**

**Diese Aufnahme wurden im Kolumbo-Krater in der Ägäis gemacht.**

linksdrehende Aminosäuren bevorzugt hat und damit auch Einfluss auf die chirale Auswahl der Nukleinsäuren hatte, mit denen sie dann interagierten. Ein Nachweis dafür steht allerdings noch aus.

### **Die Bedingungen in der Urzeit legt jeder anders aus**

Bill Martin geht in seiner Forschung noch einen Schritt weiter zurück, vor die hypothetische RNA-Welt oder die der ersten Stoffwechselwege: Wie wurde das Kohlendioxid fixiert, um daraus Moleküle zu machen; welche Umgebung haben diese dann gebraucht, um weiter zu reagieren, ohne dass ihnen der Nachschub für grundlegende chemische Reaktionen ausging? Martin sieht als Wiege solcher Entwicklungen Hydrothermalquellen.

Welche Annahmen als »plausibel« gelten können für die Verhältnisse auf der Urerde, ist umstritten. Mitunter kritisieren Geologen die Modelle, die Chemiker und Biochemiker ihren Laborexperimenten zu Grunde legen. Diese seien zwar chemisch gesehen nachvollziehbar, deckten sich aber nicht mit den Erkenntnissen der Geowissenschaftler. Nach Einschätzung von Geologen wie Frances Westall vom Centre

national de la recherche scientifique (CNRS) in Orleans war die Erde zu der Zeit, als das Leben begann, komplett von Wasser bedeckt, vulkanisch extrem aktiv und überall ungefähr 80 Grad Celsius warm. Manche Chemiker und Biochemiker arbeiten jedoch mit viel geringeren Temperaturen, teils sogar mit Eis.

Ein weiterer Aspekt: Zu jener Zeit wurde die Erde so oft von Meteoriten getroffen, dass Westall und viele Kollegen stark davon ausgehen, dass auf diese Weise komplexe chemische Verbindungen auf die Erde kamen. Auch sie könnten erheblichen Anteil an der präbiotischen Evolution gehabt haben: »Ein Großteil der ursprünglichen Verbindungen könnte so auf die Erde gekommen sein«, sagt die Forscherin.

Ihr Kollege Bill Martin hält dagegen: Die Menge solcher extraterrestrischen Moleküle sei auf die immense Wassermasse gerechnet viel zu gering, um eine relevante Rolle zu spielen. Die benötigten Verbindungen müssten für eine Weiterentwicklung hoch konzentriert sein, und auch hier böten Hydrothermalquellen seiner Ansicht nach eine Lösung: In zellartigen Mikrokompartmenten habe sich ein Mix aus Molekülen anreichern können. Doch was

darin an einfachen chemischen Reaktionen abgelaufen ist – dafür hat auch Martin erst einmal nur Theorien.

### **Der goldene Mittelweg**

Die Lösung in der Debatte um RNA-Welt und »Metabolism first« könnte am Ende womöglich gar in der Mitte liegen. Niles Lehman, Biochemiker an der Portland State University, forscht selbst an Ribozymen und betrachtet die RNA-Welt pragmatisch: »Die Hypothese ist ein gutes Werkzeug, um davon ausgehend Forschung zu betreiben, aber ich denke, dass sich die Protein- und Nukleinsäurensysteme parallel zueinander entwickelt haben. Beweisen können wir das allerdings noch nicht.«

Es ist schwierig, einen Nachweis zu finden für Vorgänge, die vor über vier Milliarden Jahren stattfanden. Meist können Forscher nur darauf hoffen, die Beschreibung eines in sich schlüssigen Zusammenspiels der natürlichen Kräfte zu finden – an dessen Ende dann die Entstehung der entscheidenden Moleküle steht. Lehman und sein Team [griffen zuletzt auf spieltheoretische Ansätze zurück](#). Sie ließen dazu Ribozyme gegeneinander antreten und beobachteten, dass diese sich nach dem Stein-

Schere-Papier-Prinzip in Gegenwart der anderen unterschiedlich gut replizierten. Derartige Experimente zeigen, wie schon ein sehr kleines Netzwerk aus RNA-Molekülen eine Art Selektionsmechanismus entwickeln könnte. Solche Forschungsansätze stehen noch ganz am Anfang, könnten aber den Vertretern der einzelnen Lager helfen, ihre Scheuklappen abzulegen. »In dieser Art der Forschung neigen wir dazu, das in Stein zu meißeln, was wir zuerst über den Ursprung des Lebens gelernt haben. Sei es RNA-Welt oder ›Metabolism first‹, Ursuppe oder Hydrothermalquellen – davon wieder abzukommen, ist schwer«, sagt Bill Martin. Vielleicht ist es ja auch an der Zeit für eine komplett neue Hypothese. ↩

(Spektrum.de, 16. Juni 2016)

## SCHLAMMTÖPFE IN ISLAND

**Die frühe Erde war geprägt von starker vulkanischer Aktivität, Meteoriteneinschläge waren häufiger als heute. Womöglich kamen durch die Gesteinsbrocken aus dem All sogar wichtige Bio-Moleküle auf den jungen Planeten.**



FOTOLIA / AIVOLIE



Die Hydrothermalquelle in uns

von Lars Fischer

# LAND ODER MEER?

Die meisten Forscher sind sich einig:  
Die Wiege des Lebens ist das Meer.  
Ein Team um einen Biophysiker aus  
Osnabrück präsentiert eine alternative  
Hypothese – entstanden seien die  
ersten Zellen auf den frühen Kontinenten.  
Für diese These ernten die Wissen-  
schaftler Widerspruch.

# W

ir wissen nicht, wo es geschah oder wie, aber dass es passierte, davon legt unsere Anwesenheit Zeugnis ab.

Vor etwas mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren entstand irgendwo auf der Erde ein System aus chemischen Reaktionen, das sich selbst unter Energieverbrauch aufrechterhalten und vervielfältigen konnte. Es hat das bis heute ununterbrochen getan – in den unzähligen Varianten dessen, was wir als Leben bezeichnen.

Wissenschaftler sind sich heute weitgehend einig, dass die Entstehung des Lebens kein nicht wiederholbarer Glücksfall war, sondern das Ergebnis einer Umwelt, die nach nachvollziehbaren Prinzipien aus zu Beginn recht einfachen chemischen und physikalischen Prozessen im Laufe der Zeit immer komplexere System hervorbrachte. Die genauen Bedingungen, unter denen das geschah, sind jedoch noch strittig.

## Kam das Leben doch vom Land?

Ein Team um die Biologen Armen Mulkidjanian und Eugene Koonin postuliert, das erste Leben sei keineswegs im Meer, sondern in landgebundenen Hydrothermal-

quellen entstanden – und löste mit dieser Veröffentlichung eine heftige Debatte aus [1]. Denn Darwin hatte zwar einst über den sprichwörtlichen warmen Tümpel als Heimat der ersten Organismen spekuliert, doch in den letzten Jahrzehnten galt unter den meisten Forschern als sicher: Die Wiege des Lebens stand im Ozean.

Dementsprechend stößt die These auch auf Ablehnung. Zu jener Zeit habe es auf der Erde nur sehr wenig festes Land gegeben, zitiert zum Beispiel »Nature« [2] den Biochemiker und Wissenschaftsjournalisten Nick Lane vom University College London, und die hydrothermalen Systeme seien viel zu verstreut und kurzlebig gewesen, als dass sie einen Startpunkt für das Leben hätten abgeben können. Mulkidjanian weist das zurück: »Geologen können nur mit Sicherheit sagen, dass es aus jener Zeit Zirkonkristalle gibt. Daraus lässt sich schließen, dass es bereits vor 4,4 Milliarden Jahren Kontinente gab –, und dass an ihren Rändern [schon vor 4,0 – 4,2 Milliarden Jahren Subduktion stattfand](#).« Genaueres wisse man nicht.

Mulkidjanian, der an der Universität Osnabrück über den Energiestoffwechsel von Zellen forscht, stützt seine These auf

Parallelen in den Elementhäufigkeiten von diesen Hydrothermalsystemen und dem Innenleben moderner Zellen. Einige Elementen wie Zink, Phosphor und Kalium, die im Stoffwechsel eine herausragende Rolle spielen, sind in normalen wässrigen Umgebungen sehr rar – nicht jedoch in den heißen Quellen, die in der Frühzeit der Erdgeschichte auf den Kontinenten brodelten.

## Uralte Erbstücke im Zellplasma

Diese Besonderheit, argumentieren die Autoren, sei kein Zufall, sondern uraltes Erbe aller Lebewesen. Diese Idee ist keineswegs neu. Bereits in den 1920er Jahren stellten Wissenschaftler fest, dass die Zusammensetzung von Blut und Lymphe erstaunliche Parallelen zum Meerwasser aufweist. Aus dieser Beobachtung entstand die Idee vom »inneren Ozean«: Die ersten Vielzeller tragen seit ihrer Entstehung jenes Milieu mit sich herum, an das ihre einzelligen Vorfahren optimal angepasst waren – das Meer.

Mulkidjanian geht nun davon aus, dass Ähnliches auch für das Zellplasma gilt – die Bedingungen im Inneren der Zelle selbst spiegeln die Umgebung wider, in

## AM URSPRUNG DES LEBENS?

**Heutzutage sind heiße Quellen an Land meist sehr sauer. Im Erdaltertum könnten diese hydrothermalen Systeme die ersten Lebensformen hervorgebracht haben, vermuten Forscher.**

der ihr Urahn entstand. Der Grund dafür seien, erklärt der Osnabrücker Forscher, die ersten Zellmembranen. Sie bestanden aus viel einfacheren Molekülen als die modernen Membranen: Anders als moderne Phospholipide trugen sie wohl nur einen Fettsäurerest und seien deswegen für kleine Moleküle sehr durchlässig gewesen. »Die ionendichte Membran, die wir bei modernen Zellen sehen, können wir als eine Anpassung an andere Umweltbedingungen betrachten. Erst als die ersten Zellen andere Bereiche des Systems besiedelten, brauchten sie dafür dichte Membranen, um angesichts der veränderten Stoffkonzentrationen die optimalen Bedingungen in ihrem Inneren zu bewahren«, so Mulkidjanian.

Auch diese einfachen Membranen hätten – das zeigen Experimente – Peptide, Nukleinsäuren und ähnliche organische

Verbindungen im Inneren der Protozellen zurückgehalten. Doch sie hätten nicht verhindert, dass Metallionen und kleine Moleküle frei in die Zellen diffundierten. Und so, argumentieren die Forscher, sind die wichtigsten und ältesten Stoffwechselwege auf jene Bedingungen optimiert, die sie einst vorfanden.

### Durchlässige Membranen?

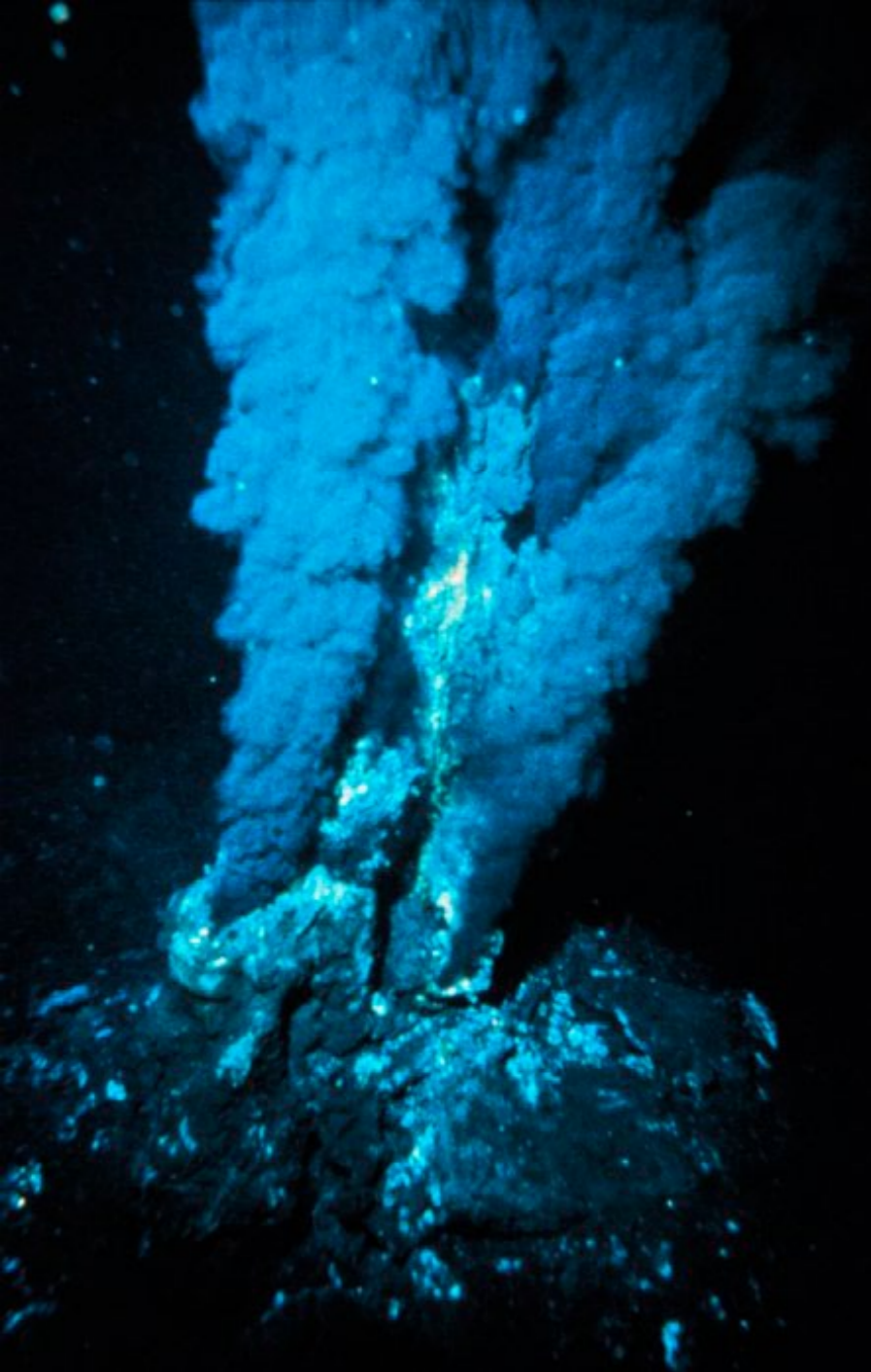
Das Argument, Leben sei überhaupt nur dann Leben, wenn es gegenüber der Umwelt abgeschottet sei, lässt er nicht gelten.

Es sei vielmehr bekannt, dass Bakterien am schnellsten wüchsen, wenn die Bedingungen in ihrem Inneren und außen gleich seien, so dass sie keine Energie aufwenden müssten, um die Ionenkonzentration in ihrem Zytoplasma optimal zu halten. Unter diesen Bedingungen wüchsen Bakterien sogar in Gegenwart von Entkopplern, die [das Membranpotenzial zunichtemachen](#).

Der erhebliche Aufwand, den Zellen heute treiben, um die Konzentrationen der verschiedenen Elemente im richtigen Bereich zu halten, führen die Forscher dem-

ANNA S. KARYAGINA, LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY





P. RONA / OAR / NATIONAL UNDERSEA RESEARCH PROGRAM / NOAA

## SCHWARZER RAUCHER

**Hydrothermale Systeme in der Tiefsee gelten als mögliche Orte, an denen das Leben entstanden sein könnte. Die Forscher um Mulkidjanian widersprechen: in ihrem Wasser seien zu wenig Kalium und Phosphat enthalten.**

onal vorhandenen Elemente Phosphor, Zink und Kalium darauf hin, dass diese Umgebung eine besondere war: Nur vulkanische heiße Quellen an Land, vergleichbar denen im Yellowstone-Nationalpark, hätten eine ähnliche chemische Signatur.

Und die ist recht spezifisch. Über alle Bereiche des Lebens findet man bei den ältesten konservierten Enzymen Mangan und Zink als häufige Kofaktoren, während häufige und vergleichbar leicht verfügbare Elemente wie Eisen nach diesen Analysen erst später hinzukamen. Ein weiteres Rätsel umgibt den Phosphor, eines der wichtigsten Elemente im Energiehaushalt und in Biomolekülen wie der DNA, das jedoch überall sonst extrem selten ist – so selten, dass es absurd erscheint, wie wichtig es für alle Organismen ist.

## Hydrothermale Fluide – ein ganz besonderer Saft

Auch das ungewöhnliche Mengenverhältnis von Kalium und Natrium in der Zelle bedarf nach Ansicht von Mulkidjanian und Koonin einer Erklärung: Die beiden Elemente kommen in einer Umkehrung ihrer natürlichen Verteilung vor – die Kaliumkonzentration ist mehrere Größenordnungen höher, als sie es in Meerwasser während der Erdgeschichte jemals gewesen ist, und die von Natrium mehrere Größenordnungen geringer. Hinzu komme, dass mehrere der evolutionär ältesten Proteine mit Kalium zusammenwirken, keines dagegen mit Natrium.

Diese Anreicherung von Kalium gegen Natrium findet man im Ozean nicht, denn im Meerwasser ist Natrium um den Faktor 40 häufiger als sein Schwesterelement – und war es auch im Erdaltertum. Kaliumreiche Gesteine der Kontinente jedoch können dieses Verhältnis auf dem Land deutlich verschieben oder sogar umkehren. Die heißen Fluide der hydrothermalen Systeme könnten so all diejenigen Elemente mit sich geführt haben, deren Anwesenheit so schwer zu erklären ist. Moderne terrestrische Hydrothermalquellen sind allerdings

entsprechend als zentrales Indiz für ihre These an: Die ersten Zellen hatten demnach nicht die Mittel, seltene Elemente aktiv anzureichern und waren auf das angewiesen, was sie in ihrer Umgebung fanden. Nach Ansicht von Mulkidjanian und Koonin deuten insbesondere die überproporti-

ein sehr lebensfeindlicher Ort, die Bedingungen an terrestrischen Hydrothermalquellen waren im Hadaikum allerdings völlig anders als heute – aus einem einfachen Grund: Es fehlte der Sauerstoff. Heute sind gerade die von den Forschern favorisierten oberen Bereiche hydrothermaler Systeme stark sauer, weil dort Schwefelwasserstoff mit Luftsauerstoff zu Schwefelsäure reagiert. In der Frühzeit der Erde jedoch wären derartige Vorgänge nicht abgelaufen, das Wasser in diesen Systemen hatte wohl einen neutralen pH-Wert. Auch gelöstes Kieselgel hätte sich anders niedergeschlagen, in Form poröser Mineralien wie Zeolithe oder Tonen, die mit Sulfiden versetzt waren. Alle drei gelten als sehr förderlich für die Entstehung von Leben.

So lässt sich auch der Nobelpreisträger **Jack Szostak**, Fachmann für Membranen und einer der profiliertesten Forscher auf dem Gebiet der Lebensentstehung, von »Nature« wohlwollend zitieren, geothermal aktive Regionen seien generell ein plausibler Kandidat als Schauplatz des ersten Lebens. Skeptisch äußert er sich allerdings über das Vorgehen von Mulkidjanian und Koonin, aus der Zusammensetzung der Zelle direkt auf die Umwelt zur

Zeit der Lebensentstehung zu schließen – insbesondere bestehe im Fall des Kaliums die Möglichkeit, dass dessen hohe Konzentration eine spätere Anpassung der Zellen sei, erklärt er.

Mulkidjanian lässt sich davon nicht beirren und sucht den Disput mit seinem prominenten Fachkollegen: »Wir haben mit Professor Szostak schon auf einer Konferenz in Texas über dieses Thema diskutiert und werden weitere Forschungsarbeiten veröffentlichen, in denen wir uns mit seinen Argumenten auseinandersetzen.« Dann geht die Diskussion über den Ursprung des Lebens in eine neue Runde. ↩

(Spektrum.de, 16. Februar 2012)

[1] Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A., 10.1073/pnas.1117774109, 2012

[2] Nature 10.1038/nature.2012.10024, 2012

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

# KLIMA-SCHUTZ

Strategien gegen die globale Erwärmung

FÜR NUR  
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



ENDOSYMBIOSE

# Der Schritt zum komplexen Leben

von William Martin, Nick Lane  
und Valérie Schmitt

Alle Tiere, Pflanzen und Pilze bestehen aus Zellen, die einen Kern besitzen; so auch wir Menschen. Der grundlegende Bauplan einer solchen eukaryotischen Zelle entstand nur ein einziges Mal in vier Milliarden Jahren. Ohne diesen Schritt in der Evolution wäre komplexes Leben nicht möglich gewesen – aus Energiemangel.

**V**or rund vier Milliarden Jahren entstand das Leben auf der Erde. Lange kam es nicht über das Stadium einfach aufgebauter Bakterien hinaus – bis zu einem entscheidenden Evolutionssprung: Zwei dieser primitiven Organismen verschmolzen zu einer Einheit. Der eine wurde dabei ein Teil des anderen, ein so genannter Endosymbiont. Er verlor seine Eigenständigkeit, indem er einen Teil seiner Gene und Funktionen an die ihn umschließende Zelle abgab, und entwickelte sich zu einem Organ zurück, das der Energiegewinnung dient: zum Vorfahren der heutigen Mitochondrien. Diese Entstehung der »zellulären Kraftwerke« dürfte der wesentliche Schritt in der Evolution gewesen sein, der die Entwicklung von komplexem Leben überhaupt erst ermöglichte.

Die ursprünglichen Organismen heißen Prokaryoten und umfassen Bakterien (Eubakterien) und Archaeen (Archaeobakterien). Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Flüssigkeitsansammlungen, die von einer dünnen Membran sowie einer festeren Zellwand umschlossen sind. In ihnen schwimmen Moleküle unterschiedlichster Größe herum und vollziehen sich die le-

bensnotwendigen biochemischen Reaktionen. Prokaryoten besitzen weder einen Zellkern noch sonstige kompliziertere innere Strukturen. Im Gegensatz dazu sind die Eukaryoten wesentlich komplexer aufgebaut und verfügen über einen echten Zellkern. Zu ihnen gehören neben verschiedenen Einzellern wie der Amöbe alle heutigen vielzelligen Organismen – Pflanzen, Pilze und Tiere.

Komplexe Lebewesen bestehen also ausnahmslos aus eukaryotischen Zellen. Diese sind im Durchschnitt 10 000- bis 100 000-mal so groß wie Prokaryoten und besitzen viel mehr unterschiedliche Gene und Proteine. Doch was genau ihre höhere Komplexität ermöglicht, ist bislang unklar geblieben. Denn wenn man lange genug danach sucht, findet man praktisch jedes ihrer Merkmale auch bei einzelnen Prokaryoten, allerdings immer nur eines davon: kernähnliche Strukturen, innere Membranen, lineare statt kreisförmige Chromosomen, mehr als zwei Chromosomensätze, Riesengröße, dynamische Zellskelette, ja sogar Räuber-Beute-Beziehungen und Parasitismus.

Bakterien machten also durchaus Anläufe in Richtung eukaryotischer Komple-

AUF EINEN BLICK

## Energieversorgung als entscheidender Faktor

- 1 Komplexes Leben entstand in der Evolution wohl nur ein einziges Mal: Dabei nahm vermutlich ein Archaeobakterium eine Bakterienzelle in sich auf. Dieser Schritt ermöglichte eine enge Zusammenarbeit der beiden Zellen: eine Endosymbiose.
- 2 Die aufgenommene Zelle verlor einen Großteil ihrer – nicht mehr benötigten – Gene und entwickelte sich zu einem Vorläufer der Mitochondrien, der in vielfacher Anzahl vorkommenden Kraftwerke eukaryotischer Zellen. An ihrer durch Einstülpungen stark vergrößerten Innenmembran entsteht der Energieträger ATP.
- 3 Erst die damit massiv erhöhte Energieproduktion ermöglichte es, neue Genfamilien samt zugehörigen Proteinen zu entwickeln. Diese sind für komplexe Merkmale wie Vielzelligkeit und Spezialisierung nötig.

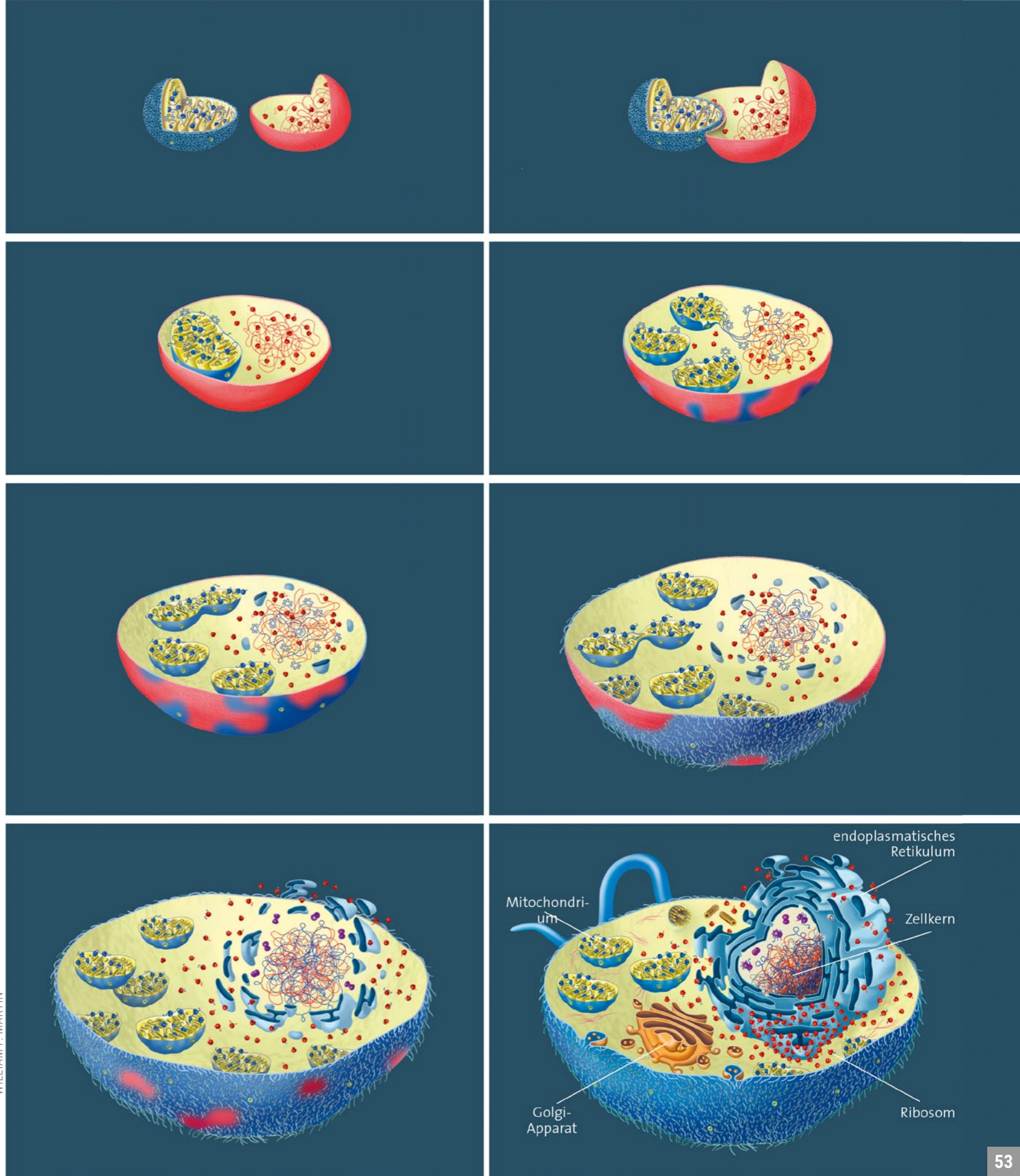
xität, brachen diese dann aber ab. Warum entwickelten sich die Eukaryoten dagegen immer weiter? Die Antwort hängt mit der Einzigartigkeit ihrer Entstehung zusammen. Alle heute existierenden Menschen, Tiere, Pilze und Pflanzen haben einen gemeinsamen Vorfahren, der vermutlich auf die Endosymbiose von zwei verschiedenen bakteriellen Urzellen zurückgeht.

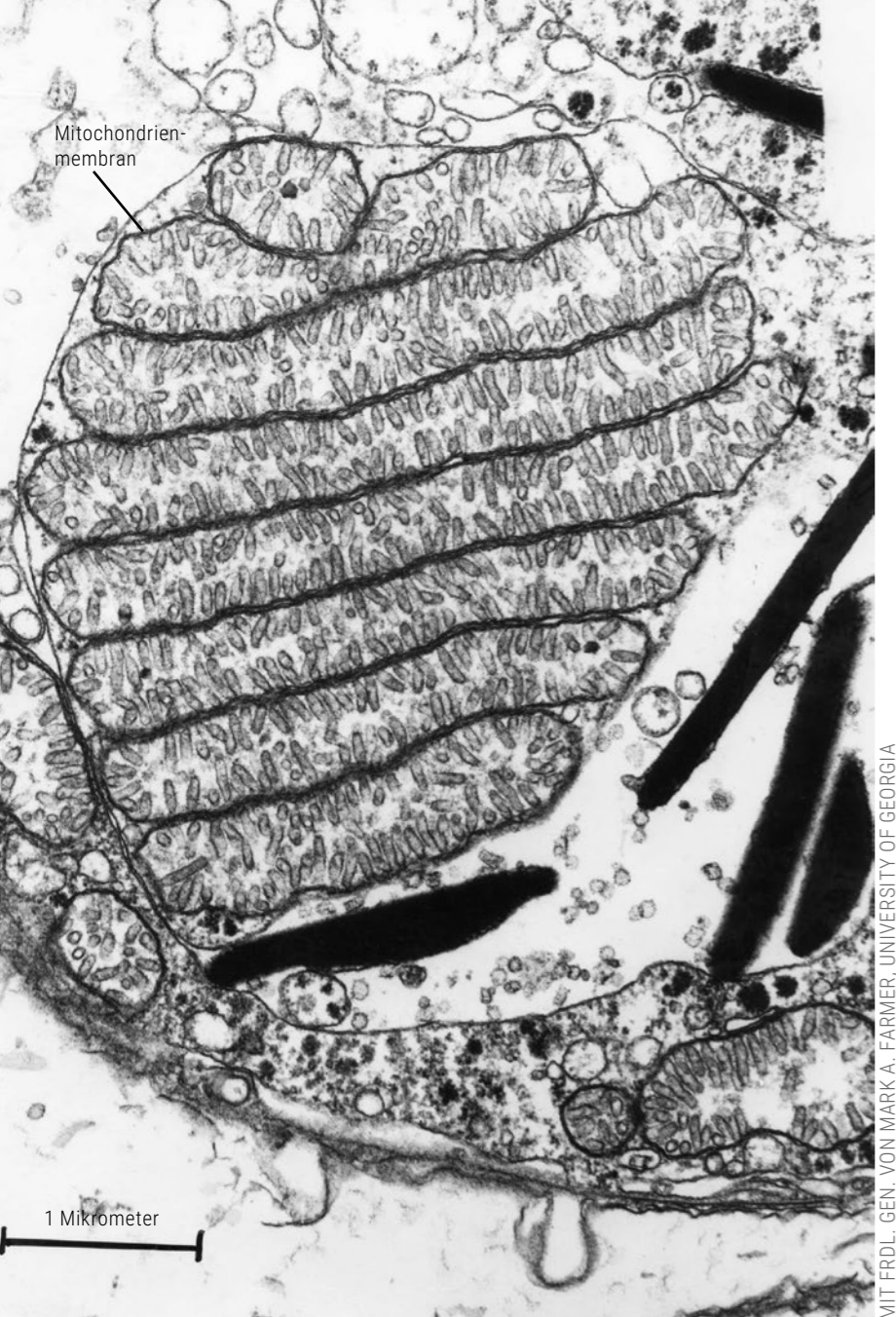
Den Beweis, dass Endosymbiosen bei Prokaryoten tatsächlich vorkommen, lie-

## DIE ENTSTEHUNG EUKARYOTISCHER ZELLEN

So stellen sich heute viele Zellbiologen und Evolutionsforscher die Entstehung der eukaryotischen Zelle vor: Ein Archaeobakterium (rot) nahm eine andere prokaryotische Zelle (blau) auf. Letztere begann dann, einen Großteil ihres Erbguts an Ersteres abzugeben oder ganz loszuwerden. Auf diese Weise von genetischem Ballast befreit, konnte sie sich vielfach vermehren und auf die Produktion von Energie spezialisieren. Dies erlaubte es im Gegenzug der Wirtszelle, komplexe innere Strukturen auszubilden.

WILLIAM F. MARTIN





## MITOCHONDRION

**Diese elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt das große Mitochondrium des eukaryotischen Einzellers *Oxyrrhis marina*, eines Dinoflagellaten. An den vielfältigen Einstülpungen der inneren Mitochondrienmembran läuft der Großteil der Energieproduktion ab.**

ferte 2001 ein Forscherteam um die Biologen Carol D. von Dohlen und William R. McManus von der Utah State University in Logan. Es entdeckte Bakterien, die innerhalb von anderen Bakterienzellen leben.

Analysen ihres Erbguts zufolge sind Eukaryoten ursprünglich Mischwesen aus Eubakterien und Archaeobakterien. Ein Team um Cymon J. Cox und Peter G. Foster vom Natural History Museum in London sowie T. Martin Embley vom Institute for Cell and Molecular Biosciences in Newcastle upon Tyne verglich 2008 mit Hilfe aktueller stammesgeschichtlicher Modelle ausgewählte Gene von 40 verschiedenen Organismen, darunter so unterschiedliche wie die Bierhefe, die Taupflanze und der Mensch. Laut den Ergebnissen der Forscher stammen wesentliche Komponenten der eukaryotischen Zelle, die allen untersuchten Lebewesen gemeinsam sind, von einem Archaeobakterium ab.

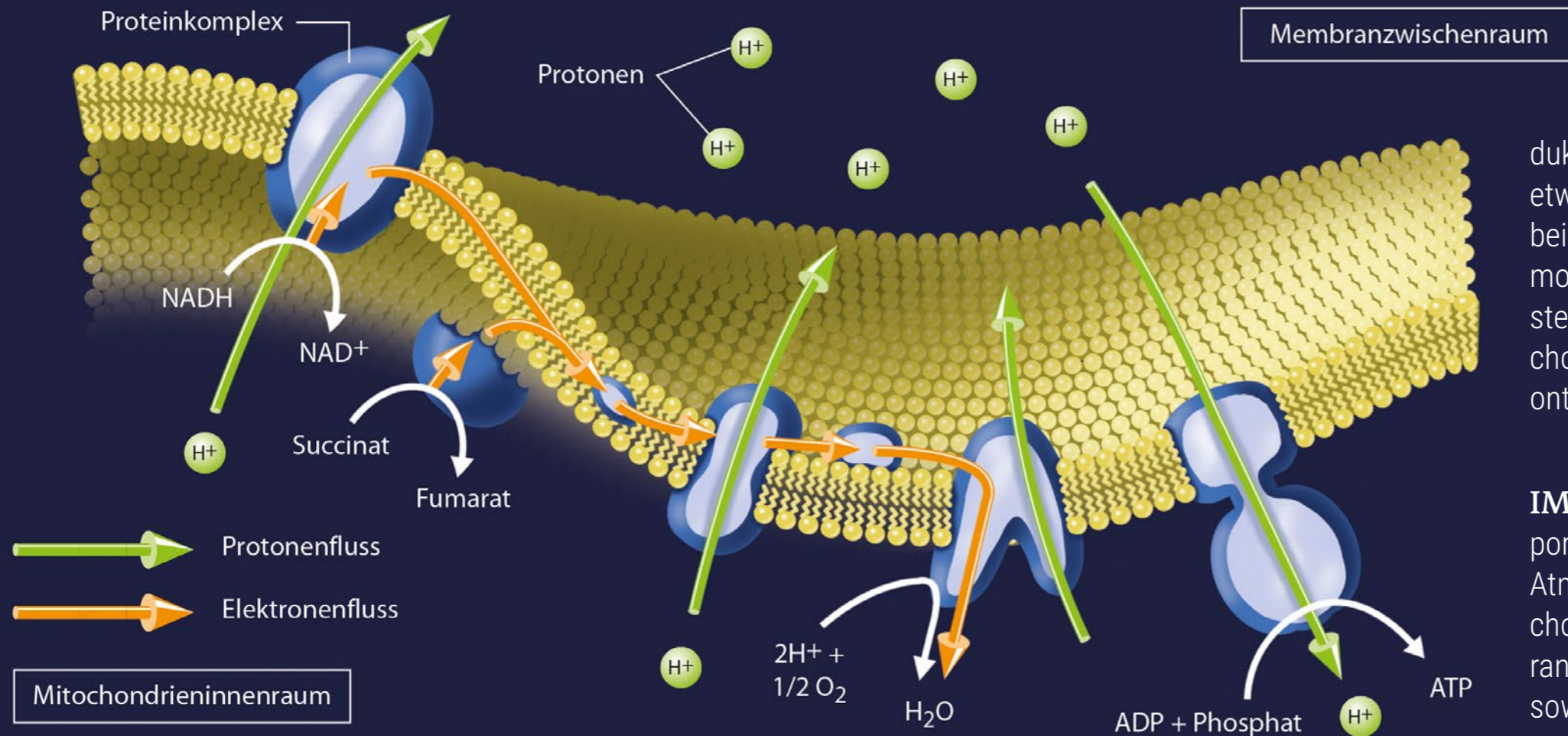
Möglicherweise war also der gemeinsame eukaryotische Vorfahre eine archaeobakterielle Wirtszelle mit einem endosymbiotischen Bakterium, das sich zum Mitochondrium weiterentwickelte. Alle Eukaryoten besitzen entweder Mitochondrien beziehungsweise davon abgeleitete

Organellen oder haben zumindest einmal welche besessen und sie später verloren. Es ist also plausibel, dass die Ursprünge von Mitochondrien und eukaryotischen Zellen zusammenfallen. War damit die Aneignung von Mitochondrien der entscheidende Schritt zur eukaryotischen Komplexität? Wenn ja, welchen herausragenden Vorteil brachte sie? Auf den Punkt gebracht lautet die Antwort: mehr Energie – und zwar sehr viel mehr.

## Buchführung für Einzeller

Pro Basenpaar DNA gerechnet verfügen Bakterien und einzellige Eukaryoten über ähnlich viel Stoffwechselenergie. Letztere besitzen jedoch im Vergleich zu Prokaryoten ein wenigstens 10 000-fach größeres Genom. Bakterien steht also erheblich weniger Energie pro Zelle zu Gebot als Eukaryoten, wie verschiedene Berechnungen bis ins Detail darlegen. So haben Proteobakterien – eine wichtige Klasse von Prokaryoten – zwar eine etwa dreimal höhere Stoffwechselrate pro Gramm Lebendgewicht als ein durchschnittlicher eukaryotischer Einzeller. Da Letzterer jedoch um etwa den Faktor 15 000 größer ist, steht insgesamt fast 5000-mal mehr Stoffwechsel-

# Mitochondrien – die Kraftwerke der Zellen



duktion. Sie benutzen stattdessen etwa Fumarat oder Protonen, wobei Succinat beziehungsweise molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) entsteht. Dennoch stammen alle Mitochondrien vom selben Endosymbionten ab!

**IM ZUGE DES** Elektronentransports pumpen Komponenten der Atmungskette Protonen vom Mitochondrieninneren in den Membranzwischenraum. Das erzeugt sowohl einen Konzentrations- als auch einen Ladungsunterschied über die Innenmembran, den die Protonen durch Rückfluss nach innen ausgleichen möchten. Sie können die Membran jedoch nur durch einen speziellen Kanal passieren: die ATP-Synthase. Diese molekulare Maschine nutzt den Protonenstrom als Antrieb, um ATP aus ADP und Phosphat zusammenzusetzen – jene Phosphorylierungsreaktion, nach welcher der gesamte Vorgang benannt ist.

**DIE INNERE MITOCHONDRIENMEMBRAN** besitzt durch viele Einstülpungen eine beträchtliche Oberfläche im Vergleich zur Größe der Organelle von einigen Mikrometern. An ihr laufen biochemische Reaktionen ab, die zur Bildung des energiereichen Moleküls ATP (Adenosintriphosphat) führen. Dieses dient dem gesamten Organismus

als universelle Energiewährung. Ein Großteil der ATP-Produktion erfolgt durch »oxidative Phosphorylierung«. Dabei bilden Molekülkomplexe in der inneren Mitochondrienmembran eine Elektronentransportkette. Elektronen, die von Trägermolekülen wie NADH aus anderen Stoffwechselprozessen eingebracht werden, wandern dabei von

einem Komplex zum nächsten. Das letzte Glied dieser »Atmungskette« ist bei den meisten Mitochondrien Sauerstoff. Er nimmt zusätzlich zu den Elektronen auch Protonen, also Wasserstoffionen ( $H^+$ ), auf und bildet daraus Wasser. Manche Mitochondrien liefern aber ATP ohne Hilfe von Sauerstoff, bei kaum beeinträchtigter Energiepro-

energie bereit. Ähnlich ungleich liegen die Verhältnisse, wenn man die Energie pro Gen berechnet: Obwohl ein durchschnittliches Bakteriengenom mit etwa 5000 Erbfaktoren nur rund ein Viertel der Genzahl eines typischen eukaryotischen Einzellers enthält, kommt in Letzterem auf jedes Gen schätzungsweise 1200-mal mehr Energie.

Das erleichtert es ungemein, Gene in Proteine umzusetzen, denn dieser Vorgang verschlingt fast drei Viertel des Energiebudgets einer Zelle. Und genau deshalb kann sich ein bakterielles Genom auch nicht so ohne Weiteres vergrößern: Würde es nur zehnmal so viele Erbfaktoren beinhalten, benötigte die Proteinsynthese ebenfalls etwa zehnmal so viel Energie – was die Möglichkeiten der Prokaryoten bereits bei Weitem überstiege.

Größere prokaryotische Zellen arbeiten zudem energetisch weniger effizient. Das liegt daran, dass Bakterien mit Hilfe von Proteinkomplexen in ihrer Zellmembran Energie durch Synthese des Moleküls Adenosintriphosphat (ATP) gewinnen. Die Energieproduktion nimmt demnach mit der Oberfläche der Zellmembran zu, die Proteinsynthese jedoch mit dem Zellvolumen, also viel stärker, da mit der dritten

statt der zweiten Potenz. Ein Gedankenexperiment verdeutlicht das Problem: Hätte ein durchschnittliches Bakterium die gleiche Genomgröße und das gleiche Volumen eines durchschnittlichen eukaryotischen Einzellers, stünde jedem seiner Gene statt 1200-mal weniger Energie etwa 200 000-mal weniger zur Verfügung als einem eukaryotischen Gen.

Damit kristallisiert sich heraus, warum Prokaryoten selten mehr als ein einziges aufwändigeres Merkmal gleichzeitig zeigen. Jedes davon kostet sehr viel Energie, da hierfür in der Regel zusätzliche Proteine entwickelt und hergestellt werden müssen. Fehlt die Energie, geht das Merkmal schnell wieder verloren. Es sind also energetische Barrieren, die den Prokaryoten den evolutiven Weg zur Komplexität versperren. Der Übergang zu Eukaryoten brachte hingegen eine Vielfalt von neuen Merkmalen mit sich, unterstützt von etwa 3000 zusätzlichen, eukaryotenspezifischen Proteinfamilien. Dieser evolutionäre Sprung benötigte allerdings um Größenordnungen mehr Energie, als ein Prokaryot aufbringen kann.

Die Erfindung der Mitochondrien bewirkte dabei die entscheidende Verände-

## Prokaryoten und Eukaryoten

**DER BEGRIFF »PROKARYOT«** leitet sich aus dem Griechischen ab: »pró« für vor, vorher und »káryon« für Kern. Bei Prokaryoten liegt die DNA frei im Zellplasma, im Gegensatz zu den Eukaryoten (griechisch: eû = gut, echt), bei denen sie von der Kernhülle umschlossen wird. Am Vorhandensein eines Zellkerns lassen sich Prokaryoten im Lichtmikroskop von Eukaryoten zuverlässig unterscheiden. Während bei Prokaryoten die DNA typischerweise ringförmig vorliegt, ist sie bei Eukaryoten auf mehrere lineare Chromosomen verteilt. Eukaryotische Zellen sind in der Regel um einiges größer als prokaryotische, bis zu 100 000-fach. Sie sind auch viel komplexer strukturiert: mit einem inneren Membransystem, einem Zellskelett und weiteren spezialisierten Strukturen.

rung: Diese Zellorgane gewannen über ihre ausgedehnten inneren Membranen einen Überfluss an Energie, mit der sie ihren Wirt versorgen konnten. Damit ermöglichten sie einen gewaltigen Anstieg in dessen Genomgröße. Die bakterielle Methode der

Energiegewinnung blieb bei Mitochondrien zwar grundsätzlich erhalten, aber weil die ATP-Synthese nicht mehr an die äußere Zelloberfläche gekoppelt war, brachte zunehmendes Zellvolumen dem Ureukaryoten keine energetischen Nachteile.

### **Gefordert: Eine äußerst feinfühlig Regulation**

Die Energiegewinnung in Mitochondrien vergrößerte die Anzahl an Proteinen, die eine Zelle bilden kann, 10 000- bis 1 000 000-fach. Damit beseitigte sie den starken Selektionsdruck, alle nicht unbedingt benötigten Gene zu entfernen, der die Evolution der Prokaryoten bis heute begrenzt. Aber wenn die räumliche Abtrennung der Energieproduktion innerhalb der Zellen solch einen massiven Vorteil bringt, warum kompartmentieren sich Prokaryoten nicht einfach selbst? Viele von ihnen haben tatsächlich umfangreiche eingestülpte Membranen. Was hat sie dann daran gehindert, komplexer zu werden?

Die Antwort darauf liefern die Gene der Mitochondrien. Die Organellen besitzen nämlich immer noch ein eigenes kleines Genom, das Proteine für das Herzstück der Energiegewinnung kodiert: für den Elektro-

nentransport der so genannten Atmungskette. Bei dieser werden Elektronen und Protonen durch die innere Membran der Mitochondrien hindurchtransportiert, was eine elektrische Potenzialdifferenz entstehen lässt, deren Feldstärke der eines Blitzes entspricht. Das hohe Membranpotenzial ist ein besonderes Merkmal bioenergetischer Organellen – also neben Mitochondrien auch der pflanzlichen Chloroplasten, in denen die Fotosynthese abläuft. Wird es gestört, stockt nicht nur die Energieproduktion, sondern es entstehen auch zunehmend gefährliche Nebenprodukte, so genannte freie Radikale, an der Membran, was in der Zelle eine Art Selbstmordautomatismus auslösen kann. Das erfordert einen besonders feinfühlig Regulationsmechanismus.

Dadurch, dass die mitochondriale DNA (mtDNA) zentrale Proteine der Atmungskette kodiert, können einzelne Mitochondrien optimal auf Veränderungen in ihrem Membranpotenzial reagieren. Die auf mitochondriale Krankheiten spezialisierten Forscher Christophe Rocher und Thierry Letellier von der Université Bordeaux Ségalen wiesen 2008 nach, dass die vollständige Menge an mtDNA nötig ist, um die

Energieproduktion normal am Laufen zu halten. Das Mitochondriengenom hat sich also während der Evolution bis auf das unbedingt notwendige Mindestmaß reduziert.

Um die Energieversorgung optimal zu regulieren, müssen die daran beteiligten Gene räumlich eng mit den bioenergetischen Membranen verbunden sein. Das begrenzt sowohl die Genomgröße als auch die Komplexität von Prokaryoten. Riesebakterien illustrieren das hervorragend. Beispielsweise zeigt *Epulopiscium fishelsoni* extreme Polyploidie: Jede Zelle besitzt, in regelmäßigen Abständen entlang der Zellmembran verteilt, rund 600 000 Kopien des kompletten Genoms. Diese Bakterien sind bei etwa 0,05 Millimeter Durchmesser fast einen halben Millimeter lang – und damit sogar mit dem bloßen Auge sichtbar. Aber nur ein hauchdünner Saum an der Zellmembran gewährleistet ihre Energieversorgung, und genau hier befindet sich auch die dafür notwendige DNA.

Das größte bislang bekannte Bakterium, *Thiomargarita namibiensis*, entdeckte ein Expeditionsteam um die Mikrobiologin Heide Schulz-Vogt vom Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen

Ende der 1990er Jahre vor der namibischen Küste. Es kann sogar bis zu einem dreiviertel Millimeter groß werden. Wie Schulz-Vogt 2006 in einem Buchkapitel über dieses Riesenbakterium schreibt, hat auch *Thiomargarita namibiensis* Tausende von Genomkopien an der Zellmembran verteilt. Bakterien können demnach solche Ausmaße erreichen, indem sie DNA an ihren bioenergetischen Membranen platzieren. Was aber hält sie trotzdem davon ab, echte eukaryotische Komplexität zu erlangen?

Die Antwort findet sich im Umbau der Genome, der im Rahmen der Endosymbiose erfolgte: Dabei gingen überschüssige Gene des Endosymbionten verloren oder wurden auf die Chromosomen des Wirts übertragen. Das vereinfachte die Vermehrung der Endosymbionten enorm (die durch Teilung innerhalb der Wirtszelle erfolgt). Als Ergebnis dieser Entwicklung schrumpften die Genome der Endosymbionten massiv. Im Gegensatz dazu sind bei polyploiden Riesenbakterien alle Genomkopien praktisch identisch und vollständig. Entscheidend ist dabei, dass das Erbgut der Endosymbionten nicht wie dasjenige des Wirts über dessen Zellkern vererbt wird,

sondern über dessen Zellplasma. Das erst ermöglicht die hohe Spezialisierung der Genome, die für eine verbesserte Effizienz unabdingbar ist. Im Prinzip könnten Prokaryoten hierfür zwar so genannte Plasmide nutzen – ringförmige DNA-Moleküle mit unabhängiger Vermehrung, die für Bakterien charakteristisch sind. Irgendwelche auf Energiegewinnung spezialisierten Plasmide hat man bisher jedoch nicht gefunden.

Ein möglicher Grund dafür ist: Anders als bei Organellen, die sofort Energie liefern können, bringt die Entwicklung derartiger Plasmide beträchtliche energetische Investitionskosten mit sich – unter anderem, weil sie in hoher Anzahl produziert werden müssten und zudem eine aufwändige Maschinerie benötigt würde, um sie in regelmäßigen Abständen an der Membran zu deponieren. Diese Vorleistung hätte die Zelle erst einmal zu erbringen, bevor sie einen Vorteil daraus ziehen könnte.

### **Immenser Kopieraufwand als Evolutionsbremse**

Da sie nicht über Mitochondrien und ihre spezialisierten Minigenome verfügen, müssen Riesenbakterien wie *Epulopiscium*

ihr komplettes Erbgut hunderttausende Male pro Generation kopieren. Zum Vergleich: Ein solcher Prokaryot mit 200 000 Genomen unterhält 760 000 Mb (Megabasen = Millionen Basenpaare) DNA; ein ähnlich großer Eukaryot muss bei 200 000 Kopien eines durchschnittlichen mitochondrialen Genoms nur etwa 6000 Mb aufrechterhalten.

Folglich reicht es nicht aus, einfach zu wachsen und Massen an DNA anzuhäufen, um Komplexität zu erreichen. *Epulopiscium* ist so groß wie ein Eukaryot und hat ähnlich viel DNA; aber wegen seiner genomischen Symmetrie ist es dazu verdammt, ein Prokaryot zu bleiben. Das Gleiche gilt für *Thiomargarita*. Keines der Riesenbakterien hat wirkliche eukaryotische Merkmale und Komplexität entwickelt, da ihnen die Stoffwechselenergie für die notwendigen zusätzlichen Gene fehlt. Zellen müssen dazu Energie über große Membranflächen produzieren, wofür sie kleine spezialisierte Genome in vielfacher Ausfertigung benötigen. Erst die Entwicklung eines Endosymbionten zu einem auf ATP-Produktion spezialisierten Organell und dessen Vermehrung in der Wirtszelle liefert ausreichend Energie für jene hunderttausende zusätzli-

che Wirtsgene und ihre Umsetzung in Proteine, dank denen die Zelle komplexer werden kann.

Das Auslagern von endosymbiontischen Genen in die Wirtschromosomen scheint dabei den entscheidenden Schritt auf dem Weg zur Komplexität darzustellen. Statt zahllose Kopien des vollständigen Genoms als Ballast mit sich herumzuschleppen, konnten eukaryotische Zellen neue Genfamilien und regulatorische Elemente entwickeln. Das öffnete die Tür zu einer Proteinevolution, die für Zellen ohne Mitochondrien unerreichbar bleibt. Ein erheblich erweitertes Repertoire an neuartigen Proteinfaltungen, -wechselwirkungen und Regulationswegen ermöglichte dann erst eukaryotische Komplexität.

Der »erste« Eukaryot vergrößerte sein Erbgut um etwa 3000 Genfamilien. Bei Eukaryoten finden sich fünfmal so viele verschiedene Proteinfaltungen wie bei Eubakterien und zehnmal so viele wie bei Archaeobakterien. Sogar die mittlere Proteinfaltungslänge ist um 30 Prozent größer als bei Prokaryoten.

Im Gegensatz zu der Hypothese, dass Zellen sich Mitochondrien im Zuge der Entwicklung von Komplexität aneigneten,

deuten die Resultate der Bioenergetik also auf die genau entgegengesetzte Richtung der Evolution: Mitochondrien sind demnach die Voraussetzung für Komplexität; komplexe, eukaryotenspezifische Merkmale wie Zellzyklus, sexuelle Vermehrung, Phagozytose, Kern und Vielzelligkeit entstanden erst danach. ↩

(Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung, 1/2014)

Cox, C. J. et al.: The Archaeobacterial Origin of Eukaryotes. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 105, S. 20356-20361, 2008

Koonin, E. V.: The Origin and Early Evolution of Eukaryotes in the Light of Phylogenomics. In: Genome Biology 11, 209, 2010

Lane, N., Martin, W.: The Energetics of Genome Complexity. In: Nature 467, S. 929-934, 2010

Müller, M. et al.: Biochemistry and Evolution of Anaerobic Energy Metabolism in Eukaryotes. In: Microbiology and Molecular Biology Reviews 76, S. 444-495, 2012

Rocher, C., Letellier, T.: Influence of Mitochondrial DNA Level on Cellular Energy Metabolism: Implications for Mitochondrial Diseases. In: Journal of Bioenergetics and Biomembranes 40, S. 59-67, 2008

# Spektrum DER WISSENSCHAFT KOMPAKT



FÜR NUR  
€ 4,99

## CRISPR/CAS9

Erbgut auf dem Schneidetisch

- > Gezielter Eingriff ins Erbgut
  - > Was wir von CRISPR erwarten können
- > Gentechnik ohne Gene?

HIER DOWNLOADEN

MIKROBIOLOGIE

# Entscheidendes Bindeglied in der Evolution des Lebens

von Nicole Paschek

In der Tiefsee entdeckte Lokiarchaeen zeigen erstaunliche Ähnlichkeiten zu komplexen Zellen. Sie geben neue Einblicke in die Evolution von Eukaryoten, zu denen auch wir Menschen zählen.

**B**akterien, Archaeen und Eukaryoten – in diese drei Domänen teilt man traditionell das Leben auf der Erde ein. Eukaryoten sind Ein- und Vielzeller mit komplex aufgebauten Zellen. Fast alle mehrzelligen Organismen wie Pflanzen, Pilze und Tiere zählen dazu. Von den Prokaryoten – also Bakterien und Archaeen – unterscheiden sie sich durch ihren »echten« Zellkern und andere Zellorganellen wie die Mitochondrien, die »Kraftwerke der Zelle«. Im Gegensatz dazu sind die Prokaryoten relativ simpel gebaut und meist einzellig. Sie besitzen keine komplexen Organellen und keinen Zellkern, so dass ihr Genom frei in ihrem Inneren schwimmt.

Laut der so genannten Endosymbiontentheorie gingen eukaryotische Zellen aus einer Symbiose zwischen zwei Prokaryoten hervor. Im Lauf der Evolution nahm demnach eine Wirtszelle ein so genanntes Alphaproteobakterium auf, welches fortan in der Zelle als Mitochondrium weiterlebte. Das erklärt auch, wieso diese Zellorganellen ihr eigenes Genom, die mitochondriale DNA, besitzen.

Jedoch ist bisher noch nicht bekannt, wie jene Zelle aussah, die sich den Vorläu-

fer des Mitochondriums einverleibte. Man vermutet, dass sie entweder ein gemeinsamer Vorfahre mit den Archaeen war oder dass jene Vorläuferzelle der Eukaryoten selbst zu den Archaeen gehörte. Um das zu klären, müssten Forscher Zwischenstufen finden, die den Übergang widerspiegeln.

### Überraschender Fund:

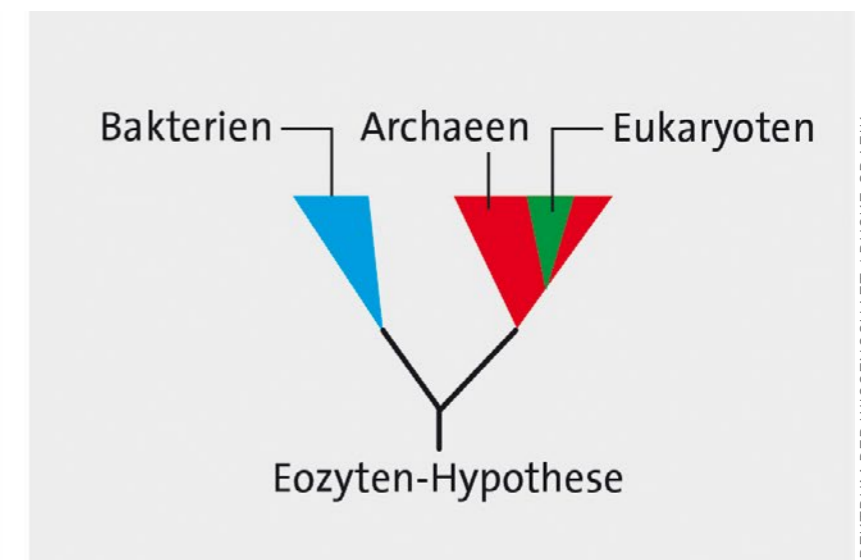
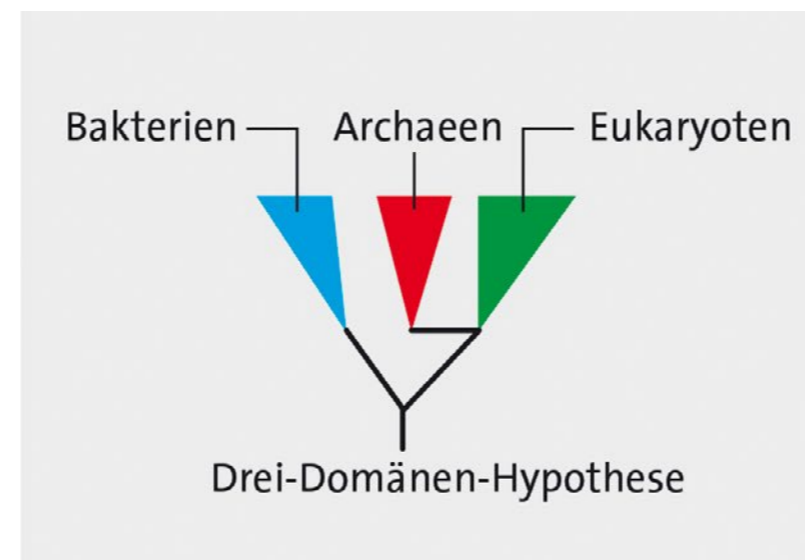
#### Völlig neue Organismen in der Tiefsee

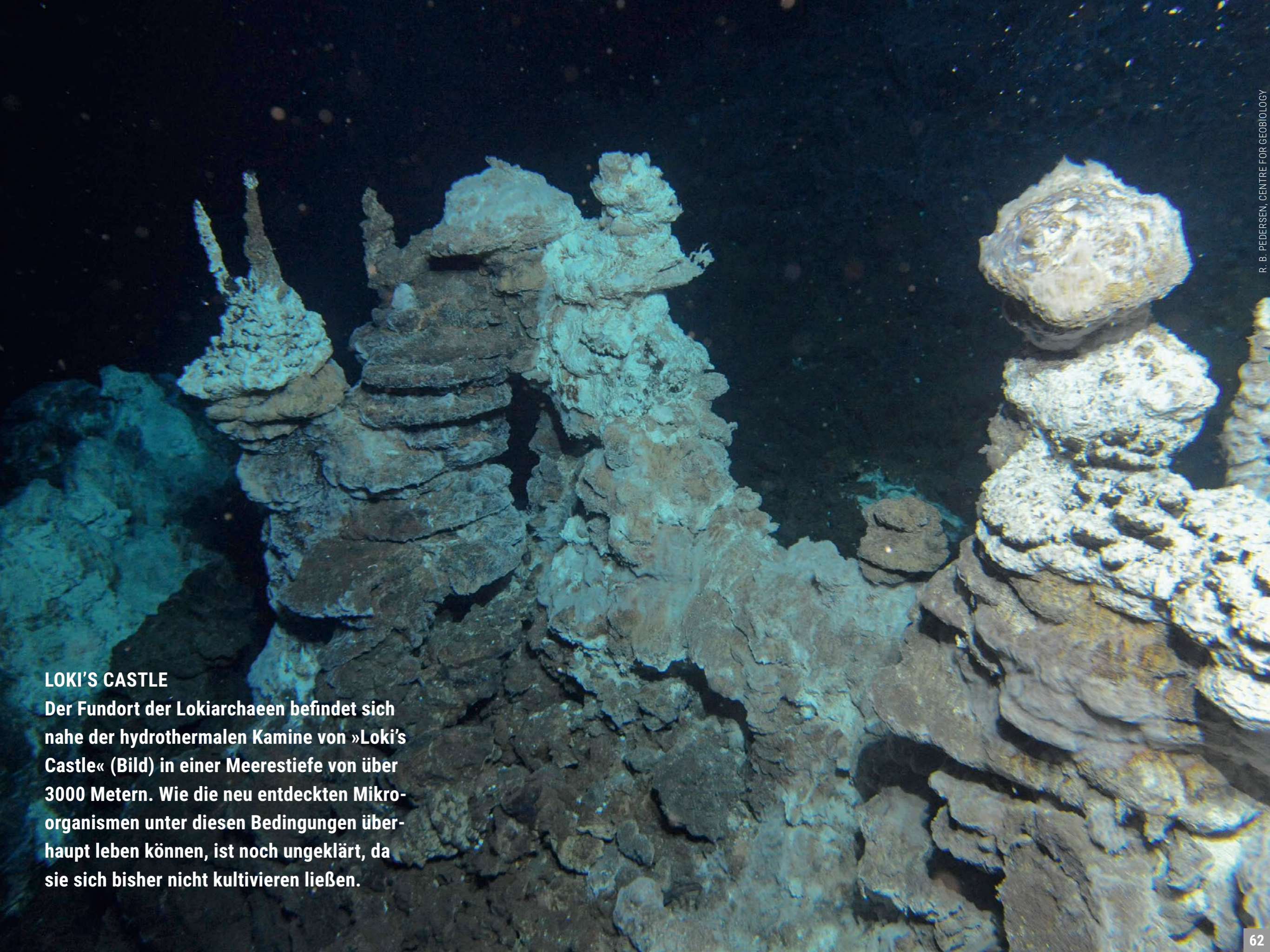
Solch eine Zwischenstufe entdeckte Thijs Ettema von der Universität Uppsala in Schweden zusammen mit seinen Kollegen der Universitäten Bergen (Norwegen), Uppsala und Wien. In einer Bodenprobe aus 3283 Meter Tiefe des mittelatlantischen Ozeans, zwischen Grönland und Norwegen, spürten sie völlig neue Archaeen-Arten auf. Ihr Name war schnell gefunden:

Lokiarchaeen – nach der Fundstelle, 15 km nördlich von »Loki's Castle«, einer Gruppe hydrothermalen Schlote. Dort strömt aus vier »schwarzen Rauchern« zirka 300 Grad heiße Flüssigkeit ins Meer, die aus Schwefelwasserstoff, Ammonium, Kohlenstoffdioxid und vergleichsweise großen Mengen Methan besteht. Obwohl die vulkanische Aktivität von Loki's Castle den

### DREI-DOMÄNEN-HYPOTHESE

**Nach der Drei-Domänen-Hypothese (links) gliedert sich das Leben in drei Bereiche: Bakterien, Archaeen und Eukaryoten. Einer anderen Auffassung zufolge – jetzt von neuen Daten gestützt – entstanden die Eukaryoten innerhalb der Archaeen (rechts).**





## LOKI'S CASTLE

Der Fundort der Lokiarchaeen befindet sich nahe der hydrothermalen Kamine von »Loki's Castle« (Bild) in einer Meerestiefe von über 3000 Metern. Wie die neu entdeckten Mikroorganismen unter diesen Bedingungen überhaupt leben können, ist noch ungeklärt, da sie sich bisher nicht kultivieren ließen.

Entdeckungsort der Lokiarchaeen stark beeinflusst, herrscht an Letzterem eine Temperatur nahe dem Gefrierpunkt.

Die Wissenschaftler stießen auf die neuen Organismen, indem sie das in der Bodenprobe vorhandene »Metagenom« erfassten, also die gesamte darin enthaltene DNA sequenzierten. Dabei ergaben sich kurze DNA-Stücke, die sich in ihrer Sequenz überlappten und somit aus dem gleichen Organismus stammten, so genannte Contigs. In-dem sie diese Contigs zusammenfügten, konnten sie das Lokiarchaeen-Genom rekonstruieren. Die Analyse ergab, dass Lokiarchaeen zu den so genannten TACK-Archaeen gehören (ein Überstamm der Archaea bestehend aus Thaumarchaeota, Aigarchaeota, Crenarchaeota und Korarchaeota). Man wusste bereits, dass Vertreter dieser Gruppe einige Gene für spezielle Proteine besitzen, die sonst nur in Eukaryoten vorkommen. Das Besondere an den Lokiarchaeen aber ist: Sie zeigen eine erstaunliche Vielfalt solcher Gene, zum Beispiel für aktinähnliche Proteine.

Aktine sind eukaryotische Strukturproteine, die Filamente des Zellskeletts bilden und essenziell für verschiedene zelluläre Prozesse sind: Muskelbewegung, Zelltei-

lung, Stofftransport innerhalb der Zelle und Endozytose funktionieren nicht ohne sie. Bei letzterem Vorgang nimmt die Zelle etwas von außen auf, indem sie ihre Zellmembran nach innen stülpt. Schluckt sie feste Bestandteile oder sogar andere Zellen, nennt man diesen Vorgang auch Phagozytose. Die eukaryotische Vorläuferzelle müsste hierzu fähig gewesen sein – andernfalls hätte sie das Alphaproteobakterium wohl nicht aufnehmen können, das zum Mitochondrium wurde.

Das Einverleiben fremden Materials birgt aber auch Risiken: Die eigene DNA könnte sich mit der fremden vermischen. Möglicherweise entstand der mit Membranen abgegrenzte Zellkern der Eukaryoten deswegen, weil so die Integrität des Wirtszell-Genoms bewahrt blieb. Dies könnte durch Membraneinstülpungen um die DNA herum geschehen sein.

Doch wie nah sind Lokiarchaeen tatsächlich mit den Eukaryoten verwandt? Um sie besser im Stammbaum des Lebens einordnen zu können, haben die Wissenschaftler ihre DNA mit der anderer Vertreter der postulierten Domänen verglichen. Demnach bilden die Lokiarchaeen eine monophyletische Gruppe mit den Eukary-

oten. Das heißt, beide stammen von einer gemeinsamen Urform ab. Lokiarchaeen sind also nicht die Vorläufer von Eukaryoten, sondern eigene Organismen zwischen den relativ simplen Mikroben und den komplexen eukaryotischen Zellen.

Weiter unklar ist jedoch, ob Archaeen und Eukaryoten von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen oder ob die komplexen Zellen aus Archaeen hervorgingen. Im ersten Szenario, das die Forscher bis vor ein paar Jahren überwiegend postulierten, gäbe es drei Domänen im Stammbaum des Lebens, im zweiten nur zwei, denn Eukaryoten würden zum selben Ast wie Archaeen gehören. Die aktuelle Studie stützt die letztere, seit zwei Jahren zunehmend populäre Ansicht, beweist sie jedoch noch nicht endgültig.

### **Nichts als etwas Dreck**

Alles, was die Forscher bisher über Lokiarchaeen wissen, stammt aus weniger als zehn Gramm Dreck vom Meeresboden. Und sie kennen lediglich Sequenzen ihrer DNA. Ettema versucht nun, auch die Organismen selbst zu kultivieren und zu untersuchen. Nur so ließe sich erkennen, wie komplex sie wirklich sind und ob ihre spek-

takulären Gene tatsächlich die gleichen Aufgaben erfüllen wie bei Eukaryoten.

Dass jene eukaryotenartigen Erbanlagen funktionslos sind, hält der Evolutionsbiologe Andrew Roger von der kanadischen Dalhousie University für unwahrscheinlich: »Gene, die nicht exprimiert werden oder nicht funktional sind, bleiben nicht sehr lange im prokaryotischen Genom. Mutationen hätten sie sicherlich bereits aus dem Genom gelöscht.«

Die Forscher wissen auch nicht, wie Lokiarchaeen unter den schwierigen Bedingungen am Fundort überhaupt überleben. Neben Eiseskälte herrscht im Tiefseeboden auch chronischer Nährstoffmangel. »Auf Grund der extremen Limitierung von Nährstoffen ist das Leben in dieser Biosphäre sehr langsam«, erklärt Ettema. Er schätzt, dass sich Mikroorganismen im Tiefseeboden möglicherweise nur einmal alle zehn Jahre teilen. Die langsame Art von Lokiarchaeen zu leben ist auch ein Grund, wieso es bisher nicht gelang, Kulturen von ihnen zu züchten.

In den Tiefen des Atlantiks sind die Forscher mit den Lokiarchaeen auf Zeugen der Entstehung von Eukaryoten gestoßen. Vermutlich gibt es noch weitere Archaeenar-

ten zu entdecken, die Aufschluss über unser Verwandtschaftsverhältnis zu den einzelligen Prokaryoten geben könnten. »Ich denke, wir brauchen noch mehr Bindeglieder, um die phylogenetischen Analysen zu bestätigen«, so Roger. »Diese könnten uns auch dabei helfen, die Reihenfolge zu rekonstruieren, in der die größten genetischen und zellulären Innovationen auf dem Weg zu den Eukaryoten stattfanden.«

Die neue Studie lässt vermuten, dass die eukaryotische Vorläuferzelle viel komplexer war als bisher angenommen. Sie besaß höchstwahrscheinlich bereits dynamische aktinähnliche Filamente und weitere Proteine, die bis dato für eukaryotenspezifisch gehalten wurden. So haben die neuen Lokiarchaeen nicht nur ein neues Glied in den Stammbaum des Lebens eingefügt, sondern auch ein wenig Licht ins Dunkel des Ursprungs unserer eigenen Zellen gebracht.

(Spektrum der Wissenschaft, 8/2015)

Spang, A. et al.: Complex Archaea That Bridge the Gap Between Prokaryotes and Eukaryotes. In: Nature 521, S. 173-179, 2015

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

FÜR NUR  
€ 4,99

## ACHTSAMKEIT UND EMPATHIE

Die Wissenschaft der Wertschätzung

Mindfulness | Der Wert des Augenblicks  
Mitgefühl | Stress hemmt Sinne für andere  
Meditation | Drei Wege ins Nirwana

HIER DOWNLOADEN

UR-ÖKOSYSTEME

# KEIN MANGEL AUF DER FRÜHEN ERDE

von Lars Fischer

Schon vor drei Milliarden Jahren beherrschten Mikroben einen der wichtigsten biochemischen Tricks: die Ernte von Stickstoff.

**P**roben uralter Gesteine in Westaustralien und Südafrika zeigen, dass das Leben seinen womöglich wichtigsten Trick schon eine Milliarde Jahre länger beherrscht als bisher gedacht. Schon vor über drei Milliarden Jahren haben Organismen [den Stickstoff der Luft aufgebro-](#)

## ALGENBLÜTE IN DER OSTSEE

**Alle Jahre wieder im Sommer blüht die Ostsee auf: Zyanobakterien vermehren sich massenhaft und durchziehen das Meer mit grünem Schleim. Sterben sie massenweise ab, entstehen oft sauerstoffarme Todeszonen.**

NASA, GSFC / MODIS RAPID RESPONSE TEAM, JEFF SCHMALZ

chen und in eine verwertbare Form gebracht – eine Fähigkeit, die Forscher bisher nur ihren entfernten Nachkommen zuge-  
traut hatten. In den bis zu 3,2 Milliarden  
Jahre alten Ablagerungen fanden die US-  
Forscherin Eva Stüeken und ihre Kollegen  
Stickstoff mit einem ungewöhnlichen Iso-  
topenverhältnis.

Die Mengen der unterschiedlich schwe-  
ren Atome weisen darauf hin, dass das Ele-  
ment nur aus biologischer Produktion  
stammen kann. Damit stand bereits den  
frühesten Ökosystemen reichlich Stick-  
stoff zur Verfügung, so dass sich das Le-  
ben auf der Erde schon viel früher unge-  
hemmt ausbreiten konnte als bislang ver-  
mutet. Ohne Stickstoff gäbe es kein Leben,  
wie wir es kennen: Proteine enthalten ihn  
in ihrem Peptidgerüst, und das Erbmole-  
kül DNA besteht sogar zu 17 Prozent aus  
dem Element. Das Problem: Stickstoff ist  
zwar das häufigste Element der Atmo-  
sphäre, in dieser Form ist es für Lebewe-  
sen aber nicht nutzbar. Damit die Bio-  
sphäre wirklich florieren konnte, mussten  
ihre Mitglieder erst lernen, die gut ver-  
wertbaren stickstoffhaltigen Ammoni-  
umionen selbst herzustellen. In den ins-  
gesamt 52 Bodenproben aus Australien

und Südafrika fanden Stüeker und ihr  
Team eine sehr gewöhnliche und zugleich  
untypische Verteilung der Stickstoffisoto-  
pe: Sie entspricht ziemlich präzise jener  
der Atmosphäre. Das klingt zwar unspek-  
takulär, aber es bedeutet, dass dieser Stick-  
stoff nur durch Lebewesen aus der Atmo-  
sphäre geholt worden sein kann – er ent-  
hält merklich mehr des leichten  $^{14}\text{N}$  als  
Stickstoff, der rein chemisch in der Atmo-  
sphäre entstand und dadurch etwas an  $^{15}\text{N}$   
angereichert ist.

Das Leben vor mehr als drei Milliarden  
Jahren, vermuten die Forscher deswegen,  
war deutlich weiter verbreitet als in den  
kleinen Nischen, die wir jenen frühen  
Ökosystemen bisher zugestanden haben.  
Doch wenn Stickstoff in hinreichender  
Menge zur Verfügung stand, gibt es kei-  
nen Grund, weshalb Einzeller nicht schon  
damals den ganzen Planeten besiedelt ha-  
ben sollten. Die fossilen Belege sprechen  
dafür: Die Proben stammen aus Sedimen-  
ten, die über 450 Millionen Jahre von Flüs-  
sen und Seen der Küste bis hinunter zum  
äußeren Schelf reichten. Sie alle zeugen  
von der Gegenwart des Lebens. ↩

(Spektrum.de, 18. Februar 2015)

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

$\text{H}_2\text{O}$

FÜR NUR  
€ 4,99

Struktur | Wasser ist klumpig  
Schneeflocken | Kristallene Schönheiten  
Paradoxon | Das Rätsel von Mpemba

HIER DOWNLOADEN

ATMOSPÄRE

# Dünne Luft

von Tilmann Althaus

Mittels geologischer Untersuchungen an irdischen Gesteinen und fossilen Mikrometeoriten konnten Forscher interessante Schlüsse auf die Erdatmosphäre vor rund 2,7 Milliarden Jahren ziehen. Sie war offenbar wesentlich dünner als heute und hatte einen streng geschichteten Aufbau.

**V**or rund 2,7 Milliarden Jahren, als die Erde nicht einmal halb so alt war wie heute, zeigte sich unser Planet von seiner unfreundlichen Seite.

Zu dieser Epoche enthielt die bodennahe Atmosphäre praktisch keinen Sauerstoff, so dass in der als Archaikum bezeichneten Zeit nur primitive einzellige Lebensformen auftraten. Für diese war Sauerstoff sogar ein starkes Gift. Wir wissen bislang nur wenig über die frühe Erdatmosphäre, so dass zwei kürzlich veröffentlichte Arbeiten von zwei unterschiedlichen Wissenschaftlergruppen aufhorchen lassen.

Die Forscher um Sanjoy M. Som von der University of Washington im gleichnamigen US-Bundesstaat untersuchte vulkanische Gesteine, Basalte, die vor 2,7 Milliarden Jahren erstarrten und heute in Westaustralien zu finden sind. Sie folgern aus ihren Messdaten, dass die Erdatmosphäre damals nur etwa den halben Oberflächen- und Luftdruck im Vergleich zu heute aufwies. Das andere Wissenschaftlerteam um Andrew G. Tomkins von der Monash University in Melbourne untersuchte Kalksteine aus Westaustralien, die ebenfalls vor 2,7 Milliarden Jahren entstanden, und konnte aus



diesen 60 Mikrometeorite extrahieren, die zu jener Zeit auf die Erde gefallen waren. Die chemische Analyse weist darauf hin, dass in Höhen um 75 Kilometer über der Oberfläche die dünne Atmosphäre größere Mengen an freiem Sauerstoff enthielt, der in den tieferen Lagen eindeutig fehlte.

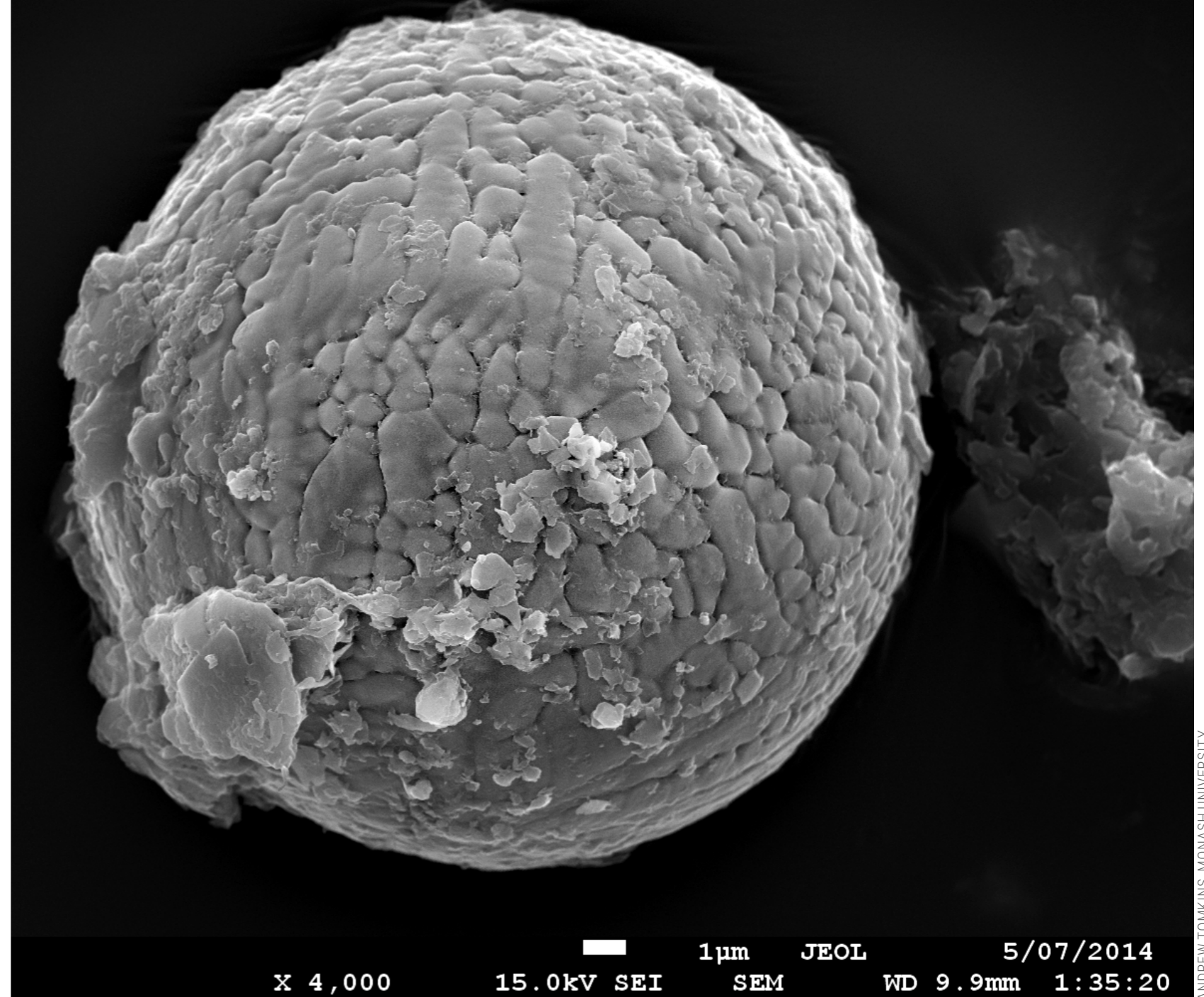
Wie aber konnten die Forscher um Som den Luftdruck vor 2,7 Milliarden Jahren bestimmen? Dafür untersuchten sie Basaltgesteine im Pilbara-Kraton, einer Region

**BLASEN IN ALTEM BASALT AUS AUSTRALIEN**  
**Dieses Lavagestein, ein Basalt, erstarrte vor rund 2,7 Milliarden Jahren, als die Erdatmosphäre noch deutlich anderen Charakter hatte als heute. Der Aufschluss befindet sich in Westaustralien am Beasley River. Die damals entstandenen Blasen wurden nach der Erstarrung der Lava über Millionen von Jahren hinweg mit Mineralen wie Kalzit und Achat aufgefüllt, und erscheinen nun als weiße Flecken.**

## MIKROMETEORIT

**In der australischen Region Pilbara befindet sich ein Kalkstein, der vor 2,7 Milliarden Jahren abgelagert wurde, damals unterschieden sich die Bedingungen auf der Erdoberfläche drastisch von den heutigen. Aus dem Kalkstein konnten Forscher 60 Mikrometeoriten wie dieses kugelförmige Gebilde extrahieren. Deren Analyse ergaben Aufschlüsse über die chemische Zusammensetzung von höheren Schichten der damaligen Erdatmosphäre.**

des australischen Kontinents, die sich seit dieser Zeit geologisch nur wenig verändert hat. Basalte sind Gesteine, die bei Temperaturen um 1100 Grad Celsius flüssig aus einem Vulkan austreten und Lavaströme bilden. Lava enthält immer größere Mengen an Gasen, die in der Gesteinsschmelze gelöst sind. Durch die Druckentlastung beim Austritt an der Erdoberfläche dehnen sich die Gase aus und bilden im dann erstarrten Basalt charakteristische Blasen. Sie zeigen sich als Hohlräume, aus denen die Gase längst entwichen sind. Damit erinnert Basalt ein wenig an einen gehenden Hefeteig, bei dem Mikroorganismen mit ihrem Stoff-



wechsel Kohlendioxid freisetzen und damit den Teig aufblähen.

In den Basalten vom Beasley River in Pilbara haben sich diese Blasen bis heute erhalten. Sie wurden allerdings über die lange Zeitspanne hinweg mit Mineralen wie Kalzit oder Achat aufgefüllt und erschei-

nen heute als helle rundliche Flecken in den rostbraunen Basalten. Den Forschern kam es aber vor allem auf die Volumina an und nicht auf die Füllungen. Die Größenverteilung der Blasen in den alten Gesteinen belegt, dass im Vergleich zu heute der Luftdruck deutlich niedriger war. Der wahr-

scheinlichste Wert liegt bei etwa einem halben Bar – nur halb so viel wie heute. Um nicht einer Fehlinterpretation aufzusitzen, hatten die Forscher bei der Auswahl der Gesteine sichergestellt, dass diese eindeutig in Wasser auf Meereshöhe erstarrt sind und nicht etwa auf einem hohen Berg bei entsprechend niedrigerem Luftdruck.

Ebenfalls auf Gesteine aus der Pilbara-Region griffen die Forscher um Andrew G. Tomkins zurück. Sie waren aber nicht direkt an ihnen interessiert, sondern extrahierten aus ihnen kosmische Einsprenglinge, nämlich fossile Mikrometeorite. Sie fielen vor 2,7 Milliarden Jahren auf die Erde und wurden in kalkhaltigen Sedimenten im Meer eingeschlossen, aus denen später Kalkstein wurde. Sie konnten durch chemische Auflösung des Kalksteins mittels starker Säuren 60 Mikrometeoriten herauspräparieren und diese dann mit hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopen im Detail analysieren. Bei ihrem Eintritt in die Erdatmosphäre verglühten die zwischen 50 und 100 Mikrometer großen Partikel nicht – sie wurden aber durch die Reibungshitze in Höhen zwischen 75 und 90 Kilometern weitgehend aufgeschmolzen. Dabei reagierte die in ihnen enthaltene me-

tallische Eisen-Nickel-Legierung mit den Gasen der Erdatmosphäre, wobei Eisenoxidminerale entstanden, darunter Magnetit und Wüstit. Dies ist erstaunlich, da ja die frühe Erdatmosphäre praktisch sauerstofffrei war. Tatsächlich ähneln die fossilen Mikrometeoriten – übrigens die derzeit ältesten bekannten – denjenigen, die heute auf der Erde gefunden werden.

Diesen Widerspruch lösen die Forscher um Tomkins damit auf, in dem sie annehmen, dass die hohe Erdatmosphäre reich an Sauerstoff war, während die darunterliegenden Atmosphärenschichten eine Mischung aus Kohlendioxid, Stickstoff und Wasserdampf enthielten. Der Sauerstoff in der hohen Atmosphäre könnte beispielsweise durch die energiereiche ultraviolette Strahlung der Sonne aus Kohlendioxid freigesetzt worden sein. Sie vermuten, dass vor 2,7 Milliarden Jahren die Erdatmosphäre einen ausgeprägten Schichtaufbau besaß. Möglicherweise wurde die tiefere, sauerstofffreie Atmosphäre durch eine Dunstschicht aus Methan von der hohen sauerstoffreichen Atmosphäre abgeschirmt. Diese Dunstschicht könnte dafür gesorgt haben, dass die mittleren Lagen wärmer als heute waren und so die vertikale Durchmi-

schung der Atmosphäre unterbunden haben. Eine solche Methan-Dunstschicht lässt sich heute in der dichten Stickstoffatmosphäre des größten Saturnmonds Titan beobachten. ↩

(Spektrum.de, 11. Mai 2016)

Originalarbeiten: Som, S. M. et al., Nature Geoscience, doi:10.1038/NGEO2713, 2016

Tomkins, A. G. et al., Nature, doi:10.1038/nature17678, 2016

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

# DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

JETZT ABONNIEREN!

