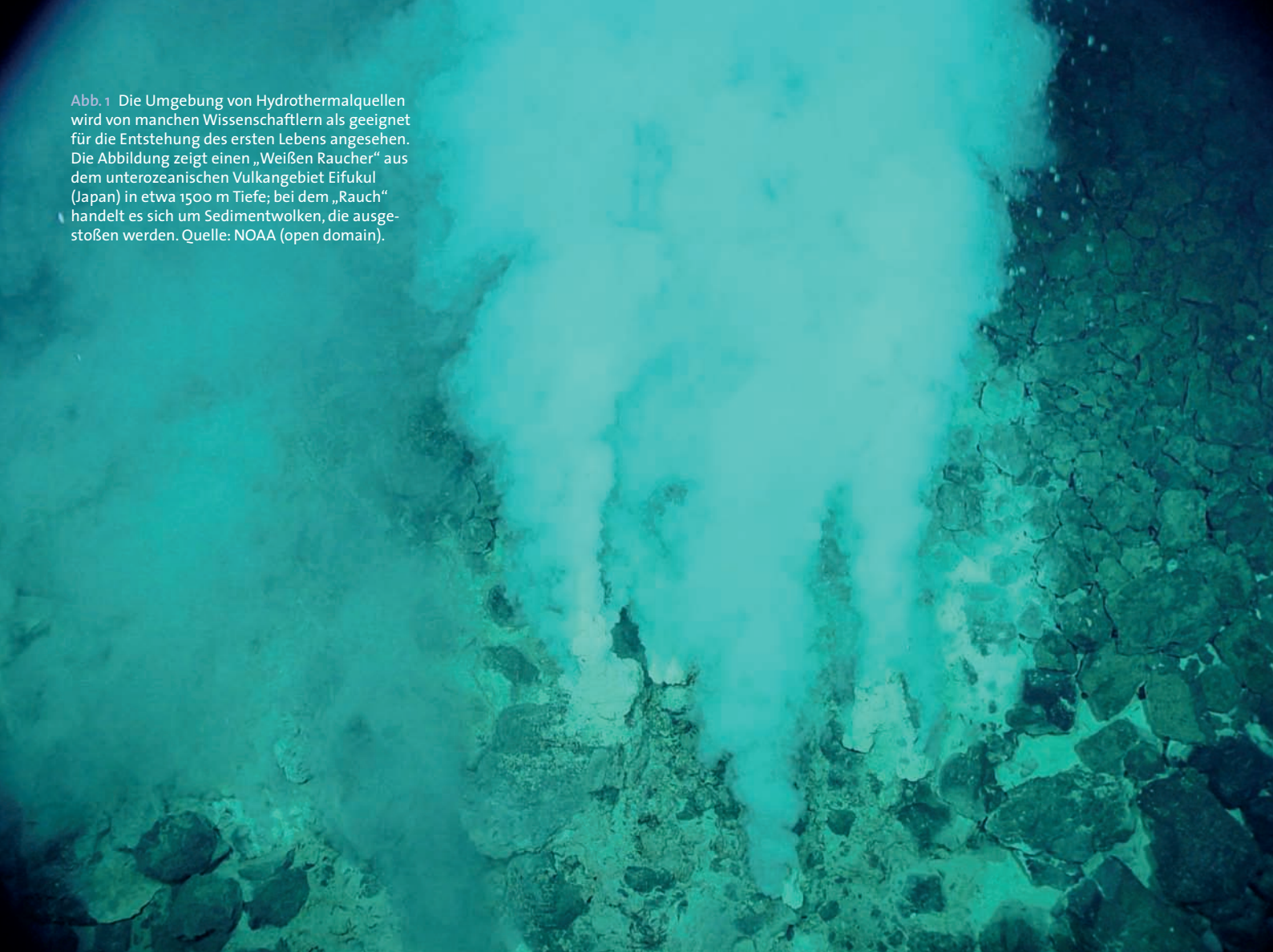


Abb. 1 Die Umgebung von Hydrothermalquellen wird von manchen Wissenschaftlern als geeignet für die Entstehung des ersten Lebens angesehen. Die Abbildung zeigt einen „Weißen Raucher“ aus dem unterozeanischen Vulkangebiet Eifukul (Japan) in etwa 1500 m Tiefe; bei dem „Rauch“ handelt es sich um Sedimentwolken, die ausgestoßen werden. Quelle: NOAA (open domain).



Brutstätten der ersten Zellen

Neue Vorschläge zur Entstehung erster Lebewesen

Auch die denkbar einfachsten Zellen, mit denen Lebewesen ihren Anfang genommen haben könnten, benötigen eine Vielfalt von molekularen Bestandteilen. In naturwissenschaftlichen Modellen zur Lebensentstehung werden unterschiedlichste Szenarien entwickelt und diskutiert, um die Entstehung erster zellähnlicher Systeme plausibel zu machen. Dabei spiegelt sich die Vielfalt der unterschiedlichen Synthesebedingungen in der Vielzahl der skizzierten Geburtsstätten für erste lebende Systeme wieder.

Harald Binder

Vor langer Zeit in einem kleinen Tümpel

Die Frage nach den physikalisch-chemischen Randbedingungen für die Entstehung der ersten lebenden Zellen ist von Wissenschaftlern in der Vergangenheit auf sehr unterschiedliche Weise beantwortet worden. In einem Brief vom 1. Februar 1871 an Joseph D. HOOKER spekulierte Charles DARWIN mit folgenden

Worten über den Ursprung des Lebens: „Man hat oft gesagt, dass alle Bedingungen für die erste Entstehung eines lebenden Organismus jetzt vorhanden sind, welche jemals haben vorhanden sein können. Aber wenn (und oh! was für ein großes 'Wenn'!) wir in irgend einem kleinen warmen Tümpel, bei Gegenwart aller Arten von Ammoniak, phosphorsauren Salzen, Licht, Wärme, Elektrizität usw., wahrnehmen könnten, dass sich eine Proteinverbin-

dung chemisch bildete, bereit noch kompliziertere Verwandlungen einzugehen, so würde heutigen Tages eine solche Substanz augenblicklich verschlungen oder absorbiert werden, was vor der Bildung lebender Geschöpfe nicht der Fall gewesen sein würde.“⁴¹ Bis heute wird das Bild vom kleinen Tümpel, in dem sich vor sehr langer Zeit Chemikalien angesammelt und durch chemische Reaktionen erste Vorstufen einfachster Zellen gebildet haben sollen, sowohl in Fachpublikationen (z. B. FOLLMANN & BROWNSON 2009) als auch in populären Darstellungen in verschiedenen Variationen gebraucht.

Lebensursprung in Hydrothermalquellen ...

Die Szenarien, die den verschiedenen Modellen zugrunde gelegt werden, sind immer abhängig von den Vorstellungen der Autoren über Aufbau und Ausstattung erster lebender Systeme bzw. von den Prozessen, die für deren Entstehung als entscheidend erachtet werden. So eröffnet z. B. W. MARTIN (2009) einen Artikel mit der unbewiesenen Feststellung: „Das Leben ist aus unbelebter Materie entstanden“ und fährt dann – ohne die Behauptung zu reflektieren oder zu begründen – unmittelbar mit seinen Folgerungen fort: „Wissenschaftliche Theorien für den Ursprung des Lebens müssen daher tragbare und überprüfbare Hypothesen unterbreiten, woher die reduzierten Kohlenstoffverbindungen stammen, aus denen sich das Leben entwickelte, aber auch woher die erforderliche Energie dafür stammte.“ Dabei erteilt er Ursuppentheorien eine klare Absage, diese hätten sich nach 80-jähriger experimenteller Erforschung als überholt erwiesen. Nach seinen eigenen Vorstellungen favorisiert er untermeerische Hydrothermalquellen als mögliche Lokalität für die Entstehung erster lebender Systeme. Diese heißen mineralreichen Tiefseequellen weisen im Gegensatz zu Vorstellungen über Ursuppen in irgendwelchen Tümpeln oder Lagunen Energiequellen (thermische und chemische) auf; ausgefällte Mineralien könnten hier die Rolle von Katalysatoren übernehmen, und die reduzierten Verbindungen, nicht zuletzt der Wasserstoff (H_2) dienen als reaktive Ausgangsstoffe.

Die 1977 erstmals beschriebenen geochemischen Systeme am Ozeanboden liefern neben thermischer Energie in Form der z. T. über 400 °C heißen mineralreichen Wässer aus der Kruste auch Wasserstoff (H_2). Letzterer ermöglicht die Reduktion von Kohlendioxid (CO_2) zu Methan (CH_4). In seinen Arbeiten zur Lebensentstehung skizziert MARTIN ein Modell, wonach zunächst gekoppelte Reaktionssys-

teme entstehen, die in eine Art Stoffwechsel münden. Die Etablierung von Stoffwechselvorgängen ist bei ihm der erste und entscheidende Schritt in der Lebensentstehung.

Dieter BRAUN forscht ebenfalls an im Labor nachempfundenen Konstellationen, wie sie bei Hydrothermalquellen vorkommen könnten. Für ihn stehen dabei aber die Bildung und Vermehrung von Nukleinsäuremolekülen im Zentrum des Geschehens (OBERMAYER et al. 2011; s. auch BINDER 2012). Er konnte in Laborexperimenten nachweisen, dass in kleinräumigen Systemen, die einen Temperaturgradienten aufweisen, Nukleinsäuremoleküle unter entsprechenden Bedingungen repliziert und konzentriert werden können. Die Effekte wurden in seiner Arbeitsgruppe auch theoretisch untersucht.

... oder Vulkaninseln

STRASDEIT & FOX (2009) sehen Vulkaninseln als geeignete Stätte zur Lebensentstehung. Dort könnten, wenn heiße Lava mit Meerwasser in Kontakt kommt, große Wassermengen schnell verdampfen und die zurückbleibenden Mineralsalze könnten unter Mitwirkung weiterer im Meerwasser gelöster Stoffe bzw. der vulkanischen Gase zur Synthese von Aminosäuren und Pyrrolen führen. Beide Stoffklassen werden zur Synthese von biologisch wichtigen Molekülen wie Proteinen und Porphyrinen (heute z. B. in Chlorophyll, Hämoglobin oder Cytochrom) benötigt. Die Autoren haben vulkanische Inseln in Laborexperimenten simuliert (STRASDEIT 2010) und auch geologische Felduntersuchungen auf Réunion im Indischen Ozean vorgenommen (NEUBAUER 2012). STRASDEIT sieht den Vorteil der von ihm bevorzugten Vulkaninsel vor allem darin, dass es in einer solchen Umgebung leicht vorstellbar sei, wie sich auf engem Raum die physikalisch-chemischen Randbedingungen rasch und extrem verändern, was für wichtige Reaktionsschritte seiner Theorie erforderlich ist. Kühle, wässrige Systeme könnten sehr nah bei Bereichen sein, die durch Hitze und Trockenheit charakterisiert sind, und auf diese Weise Synthesereaktionen beheimaten, die unterschiedlichste Bedingungen erfordern.

Das Szenario von Vulkaninseln als Umgebung für Schritte zum Lebensursprung würde auch für die Ideen von RODE passen, der die Idee einer durch Salz induzierten Peptidbildung aus Aminosäuren etabliert und im Labor experimentell untersucht hat (RODE et al. 1999; REMKO et al. 2010). In jüngerer Zeit erforscht er mit seinen Mitarbeitern Möglichkeiten, durch die Wechselwirkung von Mineralien und Aminosäuren den Ursprung der natürli-

chen Homochiralität² in Biopolymeren zu erklären (FRASER et al. 2011).

Eine Arbeitsgruppe um MULKIDJANIAN stellt alle oben angeführten Vorstellungen von Geburtsstätten für erste lebende Systeme in Frage (MULKIDJANIAN et al. 2012). Die Forscher gehen von der Hypothese aus, dass die Zusammensetzung der anorganischen Komponenten im Inneren moderner Zellen (Cytosol) deren Verteilung in der Umgebung widerspiegelt, in der die ersten zellähnlichen Systeme gebildet wurden. Die Zellmembranen der ersten und nach gängigen Vorstellungen einfachsten Zellen sollen undicht gewesen sein, d. h. kleine Moleküle konnten diese Abgrenzung durchdringen; in diesen Membranen werden auch keine spezifischen und leistungsfähigen Ionenpumpen erwartet, die in heute bekannten Zellen den Ionen-Haushalt der Zelle sehr ausgeklügelt regulieren. Daher erwarten MULKIDJANIAN et al., dass der Zellinhalt – zumindest hinsichtlich einiger für die Biochemie bedeutender Ionen – in der Zusammensetzung demjenigen der Geburtsstätte der Zellen gleicht. Aus den Daten von vergleichenden Genomanalysen relativ einfacher Organismen extrahieren die Autoren einen Minimalbestand an Enzymen, der in den ersten lebenden Zellen vorhanden gewesen sein sollte. Viele dieser Enzyme benötigen für ihre biochemische Funktion verschiedene Ionen, wie Kalium- (K^+), Zink- (Zn^{2+}), Mangan- (Mn^{2+}) und Phosphat- (PO_4^{3-}) Ionen. Aus diesem Befund folgern die Autoren, dass an der Geburtsstätte der ersten Zellen ein großes Verhältnis von K^+/Na^+ vorliegen sollte, begleitet von hohen Konzentrationen der anderen genannten Ionen. In Zellen wird ein hohes K^+/Na^+ -Verhältnis durch Ionenpumpen unter Energieverbrauch geschaffen bzw. aufrechterhalten.

In Meer-, See- und Flusswasser sind die Verhältnisse aber nicht so, wie man sie für erste einfache Zellen benötigt, dort liegt ein großer Überschuss an Na^+ -Ionen vor. Daher sind sie nach MULKIDJANIAN et al. als Geburtsstätte der ersten Zellen ungeeignet. Die Zusammensetzung der Ionen passt auch nicht zu Ozeanwasser, wie es die Autoren nach geochemischen Modellen für lange zurückliegende Zeiten



rekonstruiert haben. Sie schlagen stattdessen als Brutstätte für erste zellähnliche Systeme geothermale Systeme auf dem Festland vor. Heiße Quellen, die vor allem durch Wasserdampf gespeist werden, lassen nach bisherigen Untersuchungen Bedingungen erwarten, bei denen in einfachen Membranen die benötigten Ionen in den erforderlichen Verhältnissen eingeschlossen und dieselben aufgrund der entsprechenden Umgebung auch bei undichten Membranen erhalten bleiben. Solche heißen Quellen auf dem Festland sind z. B. aus dem Yellowstone Nationalpark, USA bekannt. Die Autoren nennen und dokumentieren auch entsprechende geothermische Systeme aus Kamtschatka (Russland). MULKIDJANIAN et al. sehen in dampfgespeisten heißen Quellen dieser Art in sauerstoffarmer oder -freier Atmosphäre geeignete Bedingungen für die Entstehung erster zellähnlicher Komplexe. Sie argumentieren, dass diese geologischen Systeme die im Zusammenhang mit Hydrothermalquellen am Ozeanboden diskutierten Vorteile aufweisen und darüber hinaus auch noch die geeignete Zusammensetzung der als wichtig erachteten Ionen liefern. Als weiteren Vorteil führen sie an, dass im Zusammenhang mit festländischen geothermischen Systemen im Gegensatz zu den marinen leicht und in geringer Entfernung auch trockene Bedingungen zu finden sind, die für manche Reaktionsschritte erforderlich sind.

Abb. 2 Heiße Quellen in vulkanischem Gebiet, hier am Námafjall im Norden Islands. Vergleichbare Systeme in gelegentlichem Kontakt mit Ozeanwasser könnten nach Ansicht mancher Wissenschaftler aussichtsreiche Orte für Lebensentstehung gewesen sein. (Foto: Hansueli KRAFF; Creative Commons-Lizenz)

Bewertung

All die unterschiedlichen Szenarien spiegeln die aufgrund chemischer Erfahrung erforderlichen unterschiedlichen Reaktionsbedingungen zur Synthese der Moleküle wider, die für erste zellähnliche Systeme als Minimalbestand diskutiert werden. Aber selbst wenn all diese unterschiedlichen Randbedingungen auf engem Raum anzutreffen sind, garantiert das den korrekten Ablauf der notwendigen, mehrstufigen, komplexen Reaktionsabläufe noch lange nicht. Dem Schlusssatz in MULKIDJANIAN et al. (2012), „es sei zu erwarten, dass weitere experimentelle Untersuchungen von Modellen, die die Bedingungen von geothermalen Feldern unter sauerstoffarmen Bedingungen simulieren, die Entwicklung erster Zellen erhellen werden“³, könnte man insofern als Denk- und Forschungsansatz zustimmen, als dass weitere Erfahrungen helfen, die Voraussetzungen für die Etablierung zellähnlicher Systeme klarer zu erkennen. Es könnte sich dabei allerdings auch herausstellen, dass die bisherigen Konzepte völlig unzureichend sind. Es sollte dabei nämlich auch kritisch reflektiert werden, dass Experimente im Labor mit reinen Ausgangs- und Zwischenstoffen unter Vernachlässigung von Verunreinigungen, Nebenreaktionen und weiteren Einflüssen die Aussagekraft einer Simulation abschwächen, was den Beleg für eine Selbstentstehung des Leben angeht. Vielmehr legen sie nahe, dass man nur dank sorgfältiger Vorbereitung und Kontrolle der Reak-

Experimente im Labor mit reinen Ausgangs- und Zwischenstoffen unter Vernachlässigung von weiteren Einflüssen schwächen die Aussagekraft einer Simulation ab.

tionspartner und -bedingungen komplexere Moleküle synthetisieren kann. In all den derzeit diskutierten Modellen werden notwendige Randbedingungen vorausgesetzt, die zur Synthese verschiedenster Bestandteile notwendig sind, die als Minimalbestand für die Etablierung erster zellähnlicher Systeme angesehen werden. Häufig sind Aspekte für Probleme vernachlässigt, die ebenfalls gelöst werden müssen, aber in der gewählten Perspektive nicht berücksichtigt sind. Insofern dokumentiert die Vielzahl der derzeit diskutierten Vorstellungen für potentielle Geburtsstätten erster Zellvorläufer eher die Vielfalt der zu lösenden Probleme und die Unzulänglichkeiten der bestehenden Vorstellungen, als dass sie eine wirklich plausible Erklärung zur Entstehung erster lebender Systeme liefern würden.

Anmerkungen

- ¹ „It is often said that all the conditions for the first production of a living organism are present, which could ever have been present. But if (and Oh! what a big if!) we could conceive in some warm little pond, with all sorts of ammonia and phosphoric salts, light, heat, electricity, etc., present, that a protein compound was chemically formed ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter would be instantly devoured or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed.“
- ² In der Biochemie ist die Funktionalität von Biopolymeren, wie z.B. Proteinen typischerweise davon abhängig, dass deren Bausteine bezüglich ihrer räumlichen Struktur einheitlich sind. Aminosäuren, die Bausteine der Proteine, weisen das Phänomen der Chiralität (Händigkeit) auf. D- und L-Aminosäuren verhalten sich zueinander wie linke zur rechten Hand (spiegelbildlich); Enzyme bestehen typischerweise ausschließlich aus L-Aminosäuren. Der Einbau einer D-Aminosäure würde die 3-dimensionale Struktur ändern und damit in der Regel die Funktion zerstören. Die Frage nach der Homochiralität zielt auf Erklärungen, wie eine Auslese der L-Aminosäuren für die Synthese erster funktionaler Proteine abgelaufen sein könnte. Bisher liegen dafür keine überzeugende Modelle vor.
- ³ „Further experimental exploration of models that mimic the conditions at anoxic geothermal fields are expected to shed more light on precellular evolution.“

Literatur

- BINDER H (2012) Wurde die RNA-Welt am Grunde des Ozeans etabliert? *Stud. Int. J.* 19, 61-62.
- FOLLMANN H & BROWNSON C (2009) Darwin's warm little pond revisited: from molecules to the origin of life. *Naturwissenschaften* 96, 1265-1292.
- FRASER DG, FRITZ D, JAKSCHITZ T & RODE BM (2011) Selective adsorption and chiral amplification of amino acids in vermiculite clay – implications for the origin of biochirality. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 13, 831-838.
- MARTIN W (2009) Alles hat einen Anfang, auch die Evolution: Hydrothermalquellen und der Ursprung des Lebens. *Biol. i. u. Z.* 39, 166-174.
- MULKIDJANIAN AY, BYCHKOV AY, DIBROVA DV, GALPERIN MY & KOONIN EV (2012) Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, doi: 10.1073/pnas.1117774109.
- NEUBAUER U (2012) Chemische Evolution auf der Vulkaninsel. *Nachr. Chem.* 60, 126-127.
- OBERMAYER B, KRAMMER H, BRAUN D & GERLAND U (2011) Emergence of Information transmission in a prebiotic RNA reactor. *Phys. Rev. Lett.* 107, 018101.
- REMKO M, FRITZ D & RODE BM (2010) Effect of metal ions (Li⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺) and water coordination on the structure and properties of L-histidine and zwitterionic L-histidine. *Amino Acids* 39, 1309-1319.
- RODE BM, SON HL & SUWANNACHOT Y (1999) The combination of salt induced peptide formation reaction and clay catalysis: a way to higher peptides under primitive earth conditions. *Origins Life Evol. Biosp.* 29, 273-286.
- STRASDEIT H (2010) Chemical evolution and early earth's and mars' environmental conditions. *Paleodiversity* 3, Suppl. 107-116.
- STRASDEIT H & FOX S (2009) Active volcanic islands as primordial molecule factories. *Orig. Life Evol. Biosphere* 39, 271-272.