

Evolution

Zufall und Zwangsläufigkeit der Schöpfung

*Im Auftrag
der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen
und der Georg-August-Universität Göttingen*

*herausgegeben von
Norbert Elsner, Hans Joachim Fritz,
Stephan Robbert Gradstein und Joachim Reitner*



WALLSTEIN VERLAG

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet
diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Wallstein Verlag, Göttingen 2009
www.wallstein-verlag.de

Vom Verlag gesetzt aus der Adobe Garamond
Umschlaggestaltung: Rothe Grafik, Georgsmarienhütte,
unter Verwendung der Zeichnung »Darwin« von Michael M. Prechtl
Druck: Druck- und Verlagshaus Fromm GmbH & Co. KG, Osnabrück

ISBN 978-3-8353-0301-0

Am Anfang ...

VON
HANS-JOACHIM FRITZ

»Was ist Leben?« ist eine häufig gestellte und noch nie überzeugend beantwortete Frage. Schiebt man sie mit der pragmatischen Einstellung »Zeig mir was, und ich werde dem schon anmerken, ob es lebt oder nicht« *vorläufig* beiseite (es wird darauf zurückzukommen sein), so bleibt dennoch eine zweite, ebenso tiefe Frage: »Woher kommt es denn, dieses Leben?« Die als schmerzhaft empfundene Lücke, die zwischen der für jeden denkenden Menschen ganz unabweisbaren Bedeutung dieser Frage und ihrer scheinbaren empirischen und rationalen Unzugänglichkeit klafft, diese Lücke hat bereits früh in der Menschheitsgeschichte kreative Kräfte mobilisiert: Soweit unsere Kenntnisse zurückreichen, haben verschiedenste Kulturen Schöpfungsmythen ehrfurchtheischender literarischer Größe hervorgebracht – unter ihnen in der Bibel das 1. Buch Mose, die Genesis.

Die biblische Schöpfungsgeschichte ist eine tiefe und verzweigte Wurzel unserer Kultur; vermutlich sind Elemente verschiedener noch älterer Mythen des vorderen und mittleren Orients in sie eingeflossen. Sie hat jedoch das Thema in unserem Kulturkreis nicht exklusiv besetzt: Noch eine zweite, in der Antike verankerte Traditionslinie hat lange anhaltenden Einfluss auf abendländisches Denken ausgeübt: die Idee der Urzeugung oder *generatio spontanea*. In ihrer starken Version unterstellt diese Lehre eine dauernde Bereitschaft toter Materie, Leben hervorzubringen. Ovid, als ein Beispiel von vielen, schildert in den *Metamorphosen* die Entstehung von Fröschen aus Schlamm¹ und steht damit in einer Tradition, die über Aristoteles bis mindestens zu den vorsokratischen griechischen Denkern zurückreicht.

Diese starke Version der Lehre von der Urzeugung, unter die auch das Postulat sprunghafter Übergänge von einer Lebensform zu einer anderen zu subsumieren ist, hat von der Antike über das Mittelalter bis ins 19. Jahrhundert viele Ausarbeitungen und Abwandlungen erfahren, von denen uns heute einige ausgesprochen kurios anmuten. So hat Jan Baptist van Helmont (1580-1644) folgendes Rezept zur *de novo* Erzeugung von Mäusen mitgeteilt: Man befülle einen irdenen Krug mit Weizenkörnern

1 Ovid: *Metamorphosen*, Buch XV, Vers 375: *Semina limus habet virides generantia ranae*: »Keime sind eigen dem Schlamm, die grüne Frösche erzeugen.«

und verstopfe seine Öffnung mit einem getragenen Hemd. Innerhalb von drei Wochen entstehen aus dem Weizen erwachsene Mäuse.²

Die letzte Bastion der starken Urzeugungstheorie war die Mikrobiologie, schien es doch lange, als könnten sich praktisch beliebige Stoffe in Mikroorganismen ›verwandeln‹: Brot in Schimmelpilz, Fleischbrühe in Bakterien u. s. w. Erst sorgfältig kontrollierte Versuche von Louis Pasteur (1822-1895) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts haben das Konzept endgültig diskreditiert³ und dem bereits William Harvey (1578-1657) zugeschriebenen Diktum *omne vivum e vivo* – in einer späteren Präzisierung Rudolf Virchows (1821-1902): *omnis cellula e cellula* – den Weg durchgehender Anerkennung in der Wissenschaft geebnet.⁴ Bis dahin war das Buch Genesis, und dies ist eine etwas skurrile Arabeske der Geistesgeschichte, in Bezug auf die Entstehung des Lebens ›moderner‹ als weiterhin anerkannte naturphilosophische Lehrmeinungen. Laut biblischer Schöpfungsgeschichte nämlich ist der Übergang von unbelebter Materie zu einem Lebewesen (›Lehm zu Adam‹) ein historisch *einmaliger* Akt.

Omnis cellula e cellula lässt offen, wo man denn wohl landet, wenn man in Gedanken eine Zellgeneration um die andere in der Zeit zurückschreitet. Ein auf kindlich-unbefangene oder streng dogmatische Weise gläubiger Mensch mag sich angesichts dieser Frage beim wörtlich genommenen Schöpfungsbericht oder dem entsprechenden Mythos, den seine jeweilige Religion vorhält, beruhigen – nicht so jemand, der dem Problem naturwissenschaftlich auf den Grund gehen will.

Zu Beginn eines solchen Unternehmens ist es alles andere als ausgemacht, dass es gelingen kann, nach anerkannten Regeln der Naturwissenschaften gültige Aussagen über die Entstehung des Lebens zu machen

2 J. B. van Helmont: *Ortus medicinae*. F. M. van Helmont (Ed.): Amsterdam 1648. Reproduktion der relevanten Seite 113 in: H. G. Schlegel: *Geschichte der Mikrobiologie*. Acta Historica Leopoldina. 28, S. 12 (1999).

3 Pasteur konnte zeigen, dass in zuvor abgekochtem Nährmedium kein mikrobielles Wachstum auftritt, wenn man den Zutritt auch kleinster Schwebeteilchen aus der Luft verhindert. Dafür hat ihm die französische Akademie der Wissenschaften 1862 einen zwei Jahre zuvor zur Klärung der Urzeugungsfrage ausgeschriebenen Preis zugesprochen.

4 Die chemische Synthese biologisch aktiver Gene (DNA) ist heute Routine – jüngst wurde sogar die Synthese eines kompletten mikrobiellen Genoms berichtet: D. G. Gibson *et al.* (17 Autoren): *Complete Chemical Synthesis, Assembly, and Cloning of a Mycoplasma genitalium Genome*. Science 319, 1215-1220 (2008). In allen diesen Fällen entfaltet sich die biologische Wirkung der synthetischen DNA aber erst im Kontext einer prä-existenten Zelle, so dass das Virchowsche Diktum dadurch nicht verletzt wird.

– dennoch ist der Versuch unternommen worden. Allem Widerspruch zum Trotz, der schon im Ansatz selbst zu stecken scheint, ist heute beobachtende, experimentelle und theoretische Forschung über den Ursprung des Lebens ein kleiner, aber feiner Zweig am Baum des internationalen Wissenschaftsbetriebs; dort tummeln sich einige besonders scharfsinnige Leute, die überraschende Einsichten gewonnen haben. Dieser Aufsatz handelt von dem gedanklichen Rahmen, in den eine naturwissenschaftliche Suche nach dem Ursprung des Lebens notwendig eingebettet ist und skizziert ein paar Linien, die zu dem heutigen Stand des Wissens geführt haben.

*Die Unausweichlichkeit der Annahme
einer Urzeugung »schwacher Version«*

Eine Erklärung, soll sie naturwissenschaftlich sein, muss sich unabhängig von ihrem Gegenstand strikt innerhalb der natürlichen Gegebenheiten bewegen, das heißt: man darf für sie keinen Eingriff einer übernatürlichen Instanz von außen, eines *Deus ex machina* heranziehen. Beim hier untersuchten, wie bei ähnlichen Problemen, ist demnach zweierlei zu beachten: (i) Für die Erklärung eines physikalischen oder chemischen Vorgangs wird nur Materie und Energie berücksichtigt, die zum relevanten Zeitpunkt am betrachteten Ort nachweislich zur Verfügung stand oder plausiblerweise als verfügbar angenommen werden kann. (ii) Für die Art der Wechselwirkung zwischen diesen Komponenten und die sich daraus ergebende chemische, mechanische oder sonstwie geartete Dynamik werden keine *ad hoc* Annahmen eingeführt, die in Konflikt mit anerkannten Naturgesetzen oder empirisch gut belegten Lehrsätzen qualitativer Art stehen.⁵

5 Dies heißt nicht, dass jede Interpretation der Natur immer und in allen Details zwingend mit dem jeweils aktuellen Schatz an Lehrbuchwissen übereinstimmen müsste: Naturgesetze sind von Menschen in die Form mathematischer Gleichungen gegossene Verallgemeinerungen vieler beobachtender oder experimenteller Messungen. Anders geartete oder genauere Messungen können zuweilen dazu führen, dass anerkannte Naturgesetze zu verfeinern oder gar grundsätzlich zu revidieren sind. Auf genau diese Weise hat zum Beispiel Max Planck die Tür zur Quantenphysik aufgestoßen: Experimentalphysiker hatten zuvor die von einem »Schwarzen Körper« bei bestimmten Temperaturen ausgehende Wärmestrahlung genauer als zuvor vermessen; dabei hatte sich eine auf den ersten Blick eher unscheinbare Abweichung der spektralen Verteilung der Strahlungsenergie vom sogenannten »Wienschen Verteilungsgesetz« (oder »Verschiebungsgesetz«) ergeben. Die theoretische Analyse dieser Abweichung führte Planck zur Entdeckung einer fundamentalen Naturkonstanten, des elementaren Wirkungsquantums und dar-

Damit lässt sich ein erster Rahmen abstecken: Das durch astronomische Beobachtungen am besten belegte kosmologische Modell schlägt vor, dass unser Universum in einem gigantischen Momentanereignis (›Big Bang‹) in seine Existenz als ein dynamisches System aus Raum, Zeit, Materie und Energie gesprungen ist. Dieser ›Urknall‹ ist auf ca. 13,7 Milliarden Jahre vor Gegenwart (-13,7 Gyr, ›Gyr‹ steht für ›Gigayears‹) zu datieren; sein unmittelbares Produkt war ein extrem heißes und sich rasch ausdehnendes Plasma, bestehend aus Elementarteilchen und sehr einfachen Atomkernen. Ein Plasma ist eine Materieform mit vielen interessanten Eigenschaften, mit Sicherheit aber nicht belebt.

Wenn es unmittelbar nach der Geburt unseres Universums also kein Leben gegeben hat, dann muss es offensichtlich irgendwann später aus unbelebter Materie *entstanden* sein. Der frühest mögliche Zeitpunkt dafür ›universumweit‹ ist ungefähr gleichzusetzen mit dem Erscheinen der ersten Sterne um ca. -13 Gyr.⁶ Urzeugung ist also möglich und hat mindestens *einmal* stattgefunden. Es ist aber niemandem gelungen, sie zu beobachten oder experimentell zu induzieren und man darf als sicher annehmen, dass sie unter gegenwärtigen (natürlichen) irdischen Bedingungen unmöglich ist. Diese Sichtweise kann man als ›schwache Version‹ des Urzeugungskonzepts bezeichnen; sie bildet die Basis aller naturwissenschaftlichen Ansätze, den Ursprung des Lebens zu verstehen.

Erdgeschichtliche Rahmenbedingungen

Unter dem Dach des Urzeugungskonzepts schwacher Version muss man den Ursprung des Lebens notwendig in der Vergangenheit suchen – als ein Ereignis oder einen Prozess – und es bleiben ›nur‹ die Fragen nach wann, wo und wie. Über mögliche andere Lebensformen als unsere irdi-

über zur Begründung einer neuen Physik. Über den Ursprung des Lebens aber liegen gerade *keine* direkten Beobachtungen vor und damit werden in diesem Bereich der Wissenschaft die »Naturgesetze jüngster Ausgabe« zu dankbar entgegengenommen und nicht in Frage zu stellenden Leitlinien für das Aufstellen von Hypothesen und das Schaffen konzeptioneller Ordnung.

6 Allerdings werden die für die Entstehung von Leben notwendigen Elemente höherer Ordnungszahl erst durch Kernfusionsprozesse im Innern massereicher Sterne ›erbrütet‹, von wo sie freigesetzt werden müssen, um in einer nachfolgenden Sternengeneration Bestandteil eines Planeten werden zu können. Damit ist die erwähnte Zeitmarke eigentlich auf das erste Erscheinen von Sternen zweiter Generation zu korrigieren. Darauf wird hier – im Sinne einer Maximalabschätzung des zur Verfügung stehenden Zeitraums – verzichtet. Das Material unseres eigenen Sonnensystems stammt wahrscheinlich aus dritter oder vierter Sternengeneration.

sche kann man derzeit allenfalls spekulieren und Beschränkung auf das Studium der Entstehung der letzteren scheint bis auf weiteres angeraten.

Eine sinnvolle erste Überlegung mag der Frage des frühest möglichen Zeitpunkts für die Existenz von Leben auf der Erde gelten: Die Bildung unseres Sonnensystems durch gravitative Gerinnung (›Akkretion‹) einer flachen, rotierenden Staub- und Gaswolke war vor ca. 4,6 Gyr soweit abgeschlossen, dass die Sonne gezündet und die Planeten sich herausgebildet hatten. Zu diesem Zeitpunkt war die Erde ein riesiger, weißglühender, rotierender Magmatropfen, der langsam abkühlte und sich dabei mit einer festen mineralischen Kruste überzog. Schließlich regnete der atmosphärische Wasserdampf ab und sammelte sich als Urozean – möglicherweise bereits um -4,4 Gyr.^{7, 8} Mit der Existenz flüssigen Wassers hat sich zum ersten Mal in der Geschichte der Erde ein Fenster für die mögliche Existenz von Leben geöffnet.

Die Akkretion der Erde hatte kein abruptes Ende: Das Aufsammeln von Materiebrocken aus dem Einzugsbereich der Erdgravitation hielt nach -4,6 Gyr noch eine ganze Weile an; streng genommen, bis heute, wenn auch in abnehmenden Maße. Dieser Trend jedoch wurde, so eine Theorie jüngeren Datums, um -3,9 Gyr herum noch einmal unterbrochen – durch eine Episode von ungefähr einhundert Millionen Jahren Dauer, während der erneut heftiger Meteoritenhagel herrschte (›Großes Bombardement‹ oder ›Late Heavy Bombardment‹).⁹ Einschläge von Impaktoren verschiedenster Größe setzten dabei große Mengen kinetischer Energie als Wärme frei – mit der Folge wiederholter Verdampfung des Urozeans und teilweisen Wiederaufschmelzens des festen Materials. Ob schon vor Einsetzen des ›Großen Bombardements‹ möglicherweise vorhandenes Leben eine Chance gehabt hätte, diese Bedingungen in irgendwelchen einigermaßen geschützten Refugien zu überstehen, ist eine offene Frage. Einigkeit herrscht darüber, dass sich auf unserem Planeten

7 S. A. Wilde, J. W. Valley, W. H. Peck and C. M. Graham: *Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago*. Nature 409, 175-178 (2001).

8 S. J. Mojziz, T. M. Harrison and R. T. Pidgeon: *Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago*. Nature 409, 178-181 (2001).

9 Als Auslöser des »Großen Bombardements« kommt vor allem eine zeitlich begrenzte Instabilität der Umlaufbahnen der großen Planeten in Frage, wie sie im Sonnensystem immer wieder einmal vorkommen kann. Diese gravitationelle Störung, so die Theorie, hätte Auslenkung kleinerer Himmelskörper aus dem Asteroiden-Gürtel zwischen Mars und Jupiter oder dem weiter außen gelegenen Kuiper-Gürtel auf Bahnen bewirkt, die auf Kollisionskurs mit der Erde lagen. Die Evidenz für dieses Konzept stammt vom Studium der Geologie des Mondes.

das Fenster lebenserhaltender Bedingungen um ca. -3,85 Gyr ein zweites Mal öffnete und sich danach wohl nie mehr schloss.

Panspermie versus irdische Urzeugung

Die frühe Erdgeschichte hat dem Leben die Kulissen aufgestellt; deren tatsächliche Besiedelung ist Gegenstand zweier konkurrierender Hypothesen unterschiedlichen wissenschaftlichen Gewichts. Gemäß der Vorstellung von ›irdischer Urzeugung‹ (›Abiogenese‹) ist das Leben entweder in dem Zeitintervall von -4,4 bis -3,95 Gyr oder nach -3,85 Gyr aus unbelebtem Material der Erde selbst hervorgegangen. Im ersteren Fall wäre zu unterstellen, dass sich mindestens *eine* Fortpflanzungslinie durch das ›Große Bombardement‹ gerettet hat. In Gegensatz dazu gehen Anhänger des Konzepts der ›Panspermie‹ von einer Entstehung des Lebens zu einem beliebigen Zeitpunkt nach -13 Gyr irgendwo im Universum aus. Daran anschließend, so die Hypothese, gelangten lebensfähige Keime irgendwie in den interstellaren Raum und wurden schließlich mit meteoritischem Material auf die noch sterile Erde gebracht, wo sie für ihre Ausbreitung günstige Bedingungen vorgefunden haben. Die zeitlichen Rahmenbedingungen für die Ankunft dieser Keime sind im wesentlichen dieselben wie die für irdische Urzeugung; die Konsequenzen jedoch weichen ein wenig voneinander ab: Panspermie könnte dem Leben auf der Erde ohne weiteren evolutiven Vorlauf zu einem Blitzstart verholfen haben, sobald die Bedingungen dies nur zuließen.¹⁰

Die Panspermie-Hypothese hat den Vorzug, dass sie die Anzahl von Optionen, wo in Raum und Zeit das Leben entstanden sein könnte, drastisch vergrößert; dieser attraktive Zug hat jedoch seinen Preis und der liegt unter anderem in der unsicheren Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, mit der irgendwo entstandenes Leben (bei endlicher Reisegeschwindigkeit!) ›rechtzeitig‹ und zudem – trotz unterwegs erlittener Strahlenbelastung – einigermaßen unbeschädigt hier eintreffen konnte, ganz zu schweigen von den wackligen Überlebenschancen der Landung auf der

10 Eine solche, rein hypothetische Ankunft kompletter Keime auf der Erde aus dem Weltall ist nicht zu verwechseln mit der (unten näher behandelten) Tatsache, dass seit je organisch-chemische Verbindungen mit speziellen Meteoriten auf die Erde gelangt sind – und immer noch gelangen. Der notwendig spekulative Charakter der Panspermie-Annahme hat diese anfällig dafür gemacht, vor diesen oder jenen esoterischen Karren gespannt zu werden, was ihrer Popularität innerhalb der Wissenschaft nicht eben förderlich ist, an ihrem offenen logischen Status jedoch nichts ändert.

Erde, speziell des sehr heißen Eintritts in die Atmosphäre. Für ›irdische Urzeugung‹ gelten die entsprechenden Argumente umgekehrt.

Die Frage ist also ungeklärt. Dieser Aufsatz folgt der gegenwärtigen Forschung, und die geht in großer Mehrheit von irdischer Urzeugung aus – hauptsächlich aus folgendem Grund: Die Hypothese, das irdische Leben sei von irgendwoher ›angereist‹, schließt zunächst keinerlei Aussagen zur Natur seiner Entstehung ein. Meint man es jedoch ernst mit der Erklärung des *Ursprungs*, dann bietet unser Wissen über die frühe Erde – fragmentarisch wie es sein mag – einen halbwegs konkreten Ansatzpunkt, während ein Entstehungsort ›irgendwo da draußen‹ eine unangenehm beliebige Qualität hat.

Dies sind klassische Argumente der Denkökonomie, wie sie in Philosophie und Naturwissenschaften sehr beliebt sind. Was man dabei aber nicht vergessen sollte: Bei der Frage nach der Entstehung des Lebens geht es um einen historischen Prozess und der hatte möglicherweise wenig Anlass, mit nach Maßgabe menschlicher Denkökonomie *ex post* angelegten Überlegungen konform zu verlaufen. Mit einer Festlegung, ohne Not, auf irdische Urzeugung könnten wir uns – dies ist zumindest nicht auszuschließen – in die Lage des Mannes begeben (haben), der drüben im finsternen Park seinen Autoschlüssel verloren hat, ihn aber unter der Straßenlaterne am Eck sucht, weil er »hier wenigstens ein wenig Licht« hat.

Forschung: Daten und Interpretationen

Noch einmal: Jeder naturwissenschaftliche Ansatz ist notwendig materialistischer Natur und die Klärung des Ursprungs des Lebens ist kriminalistischer Arbeit nicht unähnlich: Es gilt, materielle Spuren zu sichern, sie anschließend zu interpretieren und daraus eine lückenlose Kette von Indizien ohne logische Brüche zu knüpfen, die im Idealfall nur eine einzige Rekonstruktion des ›Tathergangs‹ zulässt.¹¹ In der Frage nach dem Ursprung des Lebens ist die Forschung davon weit entfernt; sie ist aber doch hinreichend fortgeschritten, um einen Korridor von Möglichkeiten in groben Umrissen skizzieren zu können.

11 Allerdings kommt bei der Entstehung des Lebens als »Tathergang« eine *prinzipielle* Schwierigkeit hinzu: Komplexe dynamische Systeme sind in ihrem Globalverhalten oft nicht komplett aus den Eigenschaften ihrer Komponenten zu verstehen. Nimmt zudem die Komplexität mit der Zeit zu, können solche Systeme kritische Phasen durchlaufen, in denen unvermittelt neue und aus dem vorherigen Verlauf nicht vorhersagbare Globaleigenschaften auftreten. Dieses Phänomen wird als »Emergenz« bezeichnet und man hat allen Grund anzunehmen, dass auch die Entwicklung des frühen Lebens durch Emergenz mitgeprägt wurde.

Spuren

Wollte man Objekte ernsthafter Wissenschaft entsprechend der Faszination, die sie auf ein breites Publikum ausüben, auf einer Rangliste anordnen, kämen Fossilien mit Sicherheit auf einen Spitzenplatz. Fossilien erlauben uns einen Blick auf untergegangene Lebensformen; viele sind von fremdartiger Schönheit – alle aber sind weit mehr als nur dies. Zusammen mit der Datierung der Sedimentschichten in denen sie aufgefunden werden,¹² haben Fossilien der Biologie eine zeitliche Dimension mit graduierter Skala erschlossen. Publikumsliebliche wie Dinosaurier sind, was paläontologische Forschung angeht, allenfalls die Spitze des Eisbergs.

Das in Sedimenten gespeicherte Protokoll der Erdentwicklung reicht zurück bis ca. -3,5 Gyr; dahinter dünnt es sich nach Vorkommenshäufigkeit stark aus und verwischt sich zudem; letzteres liegt an Veränderungen (Metamorphose), die das bereits verfestigte Sedimentgestein durch Einflüsse von Druck und Temperatur nachträglich erfahren hat. Alle Sedimente hinter dem Zeithorizont von -3,8 Gyr sind durch Erosion oder Subduktion (*i.e.* Abtauchen einer tektonischen Platte unter eine andere) sogar komplett verloren gegangen.

Die ersten Organismen waren Einzeller und damit notwendig bescheiden, was Größe, strukturelle Komplexität und Fähigkeit zur Fossilisation angeht. Zudem, das bringt die Natur des Problems mit sich, muss man ihre möglichen Fossilien in den ältesten verfügbaren Sedimenten suchen, und man mag sich angesichts dieser Schwierigkeiten wundern, dass das Instrumentarium der Paläontologie auf sehr frühe Lebensformen überhaupt anwendbar sein soll. Mit entsprechend verfeinerten Methoden ließen sich in jüngerer Zeit allerdings verblüffende Einsichten zu Tage fördern; ein paar wenige Beispiele sollen stellvertretend skizziert werden – eine eingehendere Darstellung findet sich bei M. Schidlowski¹³ (vergleiche auch Beitrag von J. Reitner in diesem Band).

Gesellschaften bestimmter Mikroorganismen wachsen in flachem Wasser als dünne Matten auf das Sediment auf und mineralisieren als Folge ihrer Stoffwechselaktivitäten im Wasser gelöste Kohlensäure als festen Kalk. Im Laufe vieler Generationen bilden sich dadurch sogenannte Stromatolithen: einem Baumkuchen vergleichbare, feinlamellige Schicht-

12 Methoden zur Gesteinsdatierung liegen zu weit außerhalb des engeren Gegenstands dieses Aufsatzes, um hier behandelt zu werden.

13 M. Schidlowski: *Die Anfänge des Lebens auf der Erde: Empirische Befunde der frühen geologischen Überlieferung*. In: J. Reitner, K. Weber und U. Karg (Eds.): *Das System Erde – was bewegt die Welt?* Göttingen: Universitätsverlag 2005, S. 9-36.

strukturen – wobei nur die jeweils äußerste, jüngste Schicht belebt ist (siehe Abb. 1, 2). Auf der heutigen Erde sind lebende Stromatolithen nur an wenigen Plätzen zu finden – in früheren Erdzeitaltern waren sie sehr viel stärker verbreitet und laut fossilen Funden reicht ihre Geschichte bis mindestens -3,5 Gyr zurück.

Bei Stromatolithen hat die Bildung großflächiger Gesellschaften sehr vieler Individuen, verbunden mit der Schichtenbildung, geholfen, makroskopisch sichtbare fossile Spuren zu legen. Dies ist naturgemäß viel schwieriger, wenn es um einzelne mikrobielle Zellen geht, von denen es gut gesicherte Funde aber immerhin zurück bis -3,2 Gyr gibt. Einige spektakuläre, hinsichtlich biogener Authentizität und Alterszuordnung jedoch nicht ganz unumstrittene zelluläre Fossilien (siehe Abb. 3) wurden auf -3,5 Gyr datiert,^{14,15} einige wenige – noch umstrittenere – sogar in die Altersstufe -3,6 bis -3,8 Gyr.¹⁶ Es sieht mithin so aus, als habe das Leben fossile Spuren hinterlassen, soweit die sedimentäre Aufzeichnung zurückreicht – und diese Sicht erfährt Unterstützung aus einer anderen Linie von Untersuchungen, die von fossil erhaltener Morphologie der Organismen ganz unabhängig ist.

Chemisch grob charakterisiert ist Biomasse eine Mischung biologisch synthetisierter Verbindungen des Elements Kohlenstoff. Diese sind fast ausnahmslos viel zu labil, um im Sediment Millionen oder gar Milliarden Jahre lang chemisch unverändert zu überdauern; sie gehen vielmehr langsam in stabilere, weniger differenzierte Verbindungen über – gewöhnliches Erdöl, zum Beispiel, ist auf diese Weise entstanden (es ist auf der hier relevanten Zeitskala aber ein recht junges Produkt). Aus Biomasse stammendes Material behält jedoch immer eine unverkennbare

14 J. W. Schopf: *Microfossils of the early Archaean Apex Chert: New evidence of the antiquity of life*. Science 260, 640-646 (1993). Zweifel werden in folgenden Arbeiten geäußert: M. D. Brasier, O. R. Green, A. P. Jephcoat, A. K. Kleppe, M. J. Van Kranendonk, J. F. Lindsay, A. Steele and N. V. Grassineau: *Questioning the evidence for Earth's oldest fossils*. Nature 416, 76-81 (2002). M. D. Brasier, O. R. Green, J. F. Lindsay and A. Steele: *Earth's oldest (approximately 3.5 Ga) fossils and the »early Edens« hypothesis: Questioning the evidence*. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 34, 257-269 (2004).

15 Siehe auch Abb. X (S. xxx) des Artikels von J. Reitner in diesem Band.

16 H. D. Pflug: *Yeast-like microfossils detected in the oldest sediments of the Earth*. Naturwissenschaften 65, 611-615 (1978). Zweifel werden geäußert in: D. Bridgewater, J. H. Allaart, J. W. Schopf, C. Klein, M. R. Walter, E. S. Barghoorn, P. Strother, A. H. Knoll and B. E. Gorman: *Microfossil-like objects from the Archaean of Greenland: A cautionary note*. Nature 289, 51-53 (1981). Die ursprüngliche Interpretation unterstützende, zusätzliche Evidenz wird beschrieben in: H. D. Pflug: *Chemical fossils in early minerals*. Topics in Current Chemistry 139, 1-55 (1987).



Abb. 1: Rezente Stromatolithe, Lake Clifton, Westaustralien. Foto: J. Reitner.

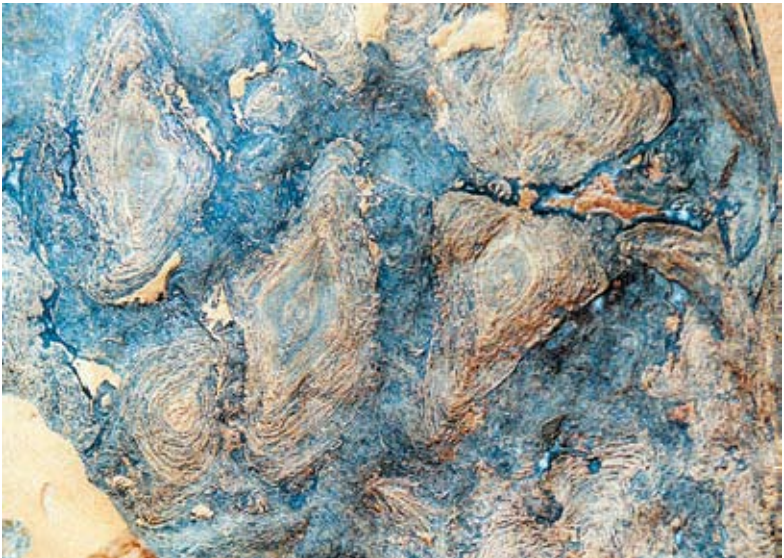


Abb. 2: *Conophyton* Stromatolithe, fossil, Proterozoikum, Mauretaniien, nahe Atar, Alter ca.1Gy. Foto: J. Reitner.

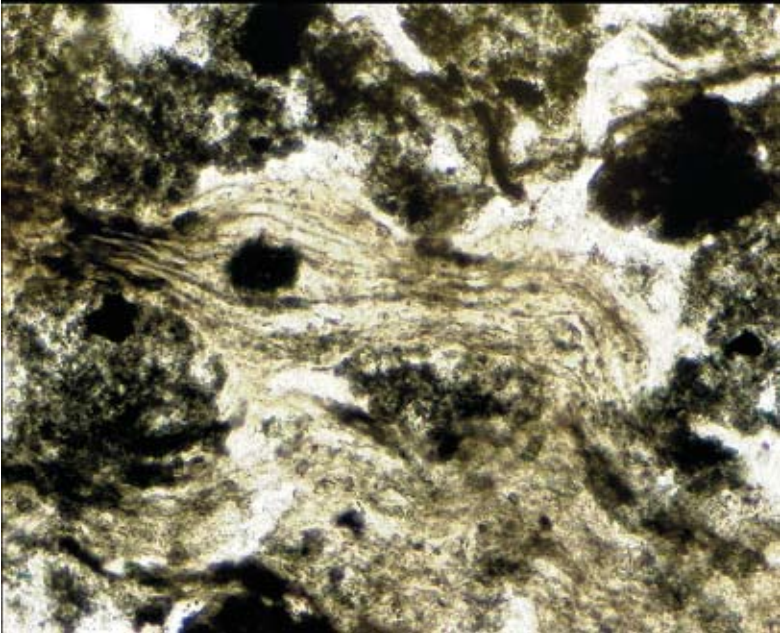


Abb. 3: Mikrofossilien: Schwarze, verkieselte Sedimente mit einem hohen Anteil an organischem Material, das zum Teil deutliche Biofilmstrukturen zeigt. Die filamentösen Strukturen erinnern an fädige Mikroben. Durchmesser eines Fadens ca. 2µm. Basis der Fig Tree Gruppe im Barberton Greenstone Belt, Südafrika, Archaiikum, Alter ca. 3,25 Gy. Foto: J. Reitner.

Signatur seiner biotischen Herkunft. Dies wird in den folgenden Absätzen illustriert.

Biologische Kohlenstoffverbindungen (Kohlenhydrate, Fette, Aminosäuren und andere mehr) werden Nahrungsketten entlang von einem Organismus zum anderen durchgereicht und dabei immer wieder chemisch umgewandelt; an der untersten Wurzel der Nahrungsketten jedoch tritt der Kohlenstoff aus der anorganischen in die Biosphäre ein, indem Primärproduzenten (Pflanzen, spezielle Mikroorganismen) Kohlendioxid aufnehmen und per Reduktion in organisches Material überführen. Dieser Prozess der Kohlenstoffixierung hinterlässt auf atomarem Niveau bleibende Spuren in biogenem Material – weitgehend uneindruckt von nachfolgender geochemischer Transformation. Dass dies möglich ist, hängt an der Tatsache, dass das Kohlenstoffatom eines Kohlendioxid-Moleküls eine von zwei alternativen Qualitäten hat.

Der Kern eines Kohlenstoffatoms besitzt sechs Protonen (einfach positiv geladene Elementarteilchen der Masse 1) – daher die Ordnungszahl 6 für dieses Element. Neben Protonen enthalten Atomkerne aber auch eine ungefähr gleich große Anzahl von Neutronen (Ladung 0, Masse 1); beim Kohlenstoff ist diese Neutronenzahl in der weit überwiegenden Anzahl der Fälle 6, in einer geringeren Anzahl 7. Das heißt, es gibt zwei Arten von Kohlenstoffatomen (Isotopen) mit stabilem Kern, solche mit Masse 12 und solche mit Masse 13 (das radioaktive Kohlenstoffisotop 14 spielt in der hier angestellten Betrachtung keine Rolle). Kohlendioxid, ob als atmosphärisches Gas oder im Meerwasser gelöstes Kohlensäuresalz, enthält die beiden Isotope in einem jeweils festen, genau bekannten Verhältnis.

Die Fixierung von anorganischem Kohlenstoff wird von Enzymen (proteinischen Katalysatoren) betrieben, die das leichte (¹²C-haltige) Kohlendioxid ein klein wenig schneller hereinlassen, als das schwere. Da biochemische Prozesse üblicherweise keine Gleichgewichtseinstellung zulassen, wird die über die Reaktionsgeschwindigkeit ausgeübte Bevorzugung des leichteren Kohlenstoffisotops in eine für die beteiligten Enzyme charakteristische Verschiebung des Isotopenverhältnisses abgebildet (kinetischer Isotopeneffekt) – durchweg zugunsten einer Erhöhung des Anteils an Isotop 12 in der Biomasse.

Man kann also in Mineralien eingeschlossenes, kohlenstoffhaltiges Material – auch kleinste Spuren davon – auf seine Zusammensetzung an Kohlenstoffisotopen untersuchen und anhand des gemessenen Verhältnisses feststellen, ob es sich um ehemalige Biomasse handelt – unabhängig vom Vorliegen einer morphologisch erkennbaren fossilen Struktur. Und hier ist die Überraschung: Isotopensignaturen von Graphiteinschlüssen in Apatit-Kristallen aus Gesteinsformationen des Inselchens Akilia vor Grönland legen nahe, dass schon vor -3,8 Gyr enzymatische Kohlenstofffixierung im Gange war, die sich hinsichtlich Ausmaß der ¹²C-Anreicherung nicht wesentlich von der heutigen unterscheidet, was man – mit einigem Vorbehalt – als das Wirken derselben Enzyme deuten kann.¹⁷

17 S. J. Mojzsis, G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman and R. L. Friend: *Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago*. Nature 384, 55-59 (1996). Auch diese Zuordnung wird seit ihrer Publikation intensiv und kontrovers diskutiert – wobei sich die Waagschale neuerdings wieder zu einer Bestätigung zu neigen scheint. Für eine jüngere Zusammenfassung des Stands der Diskussion siehe: J. M. Eiler: *The Oldest Fossil or Just Another Rock?* Science 317, 1046-1047 (2007).

Enzymatisch kontrollierte Chemie heißt auch durch Gene informationsgesteuerte Synthese der Enzyme ihrerseits und damit notwendig zelluläres Leben – nicht anders als wir es von heutigen (Mikro-)Organismen auch kennen. Obwohl eine definitive Antwort noch aussteht, scheint die Frage der Existenz modern anmutender Mikroorganismen fast unmittelbar anschließend an das Ende des ›Großen Bombardements‹ im affirmativen Sinne geklärt, unabhängig davon, ob sich die zellulären Fossilien aus der Zeit als authentisch herausstellen oder nicht. Mikrobielles Leben scheint vor -3,8 Gyr auf die irdische Bühne gesprungen zu sein wie Pallas Athene aus dem Haupt des Zeus: Komplett – in aller Schönheit und voller Rüstung.

Dieser verblüffende Befund kann verschiedenes bedeuten: Entweder ist die irdische Urzeugung, sobald nur die äußeren Bedingungen stimmen, in sehr viel kürzerer Zeit zu vollenden, als man sich das bislang vorgestellt hat, oder der Ursprung liegt doch wesentlich früher und alles heutige Leben stammt von den (wenigen?) Überlebenden des ›Großen Bombardements‹ ab (oder vielleicht doch von im Weltraum vagabundierenden Keimen?).

Damit nicht genug: Die Möglichkeit von Leben bereits im Hadaikum (Erdzeitalter vor -4 Gyr bzw. dem ›Großen Bombardement‹) hat in jüngster Zeit¹⁸ an Glaubwürdigkeit gewonnen: Auf geologisch verschlungenen Wegen sind kleinste Mengen von Kohlenstoff als winzige diamantene Einschlüsse in Zirkonpartikeln¹⁹ gelangt, die sich um ca. -4,25 Gyr durch Kristallisation aus erkaltendem Magma gebildet haben. Mikroanalyse hat für diese Einschlüsse ¹²C-Anreicherungen belegt, die mit biogenem Ursprung des Materials²⁰ zumindest kompatibel sind.

18 A. A. Nemchin, M. J. Whitehouse, M. Menneken, T. Geisler, R. T. Pidgeon and S. A. Wilde: *A light carbon reservoir in zircon-hosted diamond from the Jack Hills*. Nature 454, 92-95 (2008).

19 Das Mineral Zirkon ist kristallisiertes Silikat des Elements Zirconium ($ZrSiO_4$).

20 Unter der Prämisse, dass es sich tatsächlich um organischen Kohlenstoff handelt, stellt sich dessen Geschichte so dar: (i) Biologische Fixierung aus Kohlendioxid mit der dafür typischen Verschiebung der Isotopenzusammensetzung, (ii) Absinken abgestorbener Biomasse auf den Meeresboden, (iii) Einschluss von organischem Material in Sediment, (iv) Umwandlung des zunächst losen Sediments in Gestein, (v) Plattentektonische Subduktion des Sedimentgesteins, (vi) Umwandlung des eingeschlossenen Kohlenstoffs in Mikrodiamanten unter dem Einfluss von hohem Druck und hoher Temperatur im Erdmantel, (vii) Beförderung der Mikrodiamanten an die Oberfläche, zusammen mit aufsteigendem Magma, (viii) Einschluss der Mikrodiamanten in Zirkonkörner bei deren Auskristallisieren infolge Abkühlung (an dieser Stelle fängt die Datierungsuhr an zu ticken: ca. -4.25 Gyr), (ix) Erosiver Abtrag des vulkanischen Gesteins und sekundäre Sedimenta-

Wenn wir den Kohlenstoff-Isotopenanalysen und den zeitlichen Zuordnungen der Zirkonbildung trauen (wozu Anlass besteht) und wenn die Interpretation dieser Signaturen als Lebensspuren auch in diesem Fall richtig liegt (was weniger sicher ist), dann sind wir zu der Schlussfolgerung genötigt, es habe zelluläres Leben auf der Erde schon *extrem* früh gegeben. Allerdings besteht wenig Hoffnung, davon je Hinterlassenschaften zu finden, die über ein paar Einschlüsse elementaren Kohlenstoffs in Zirkonkristallen hinausgehen – und das ist sehr wenig, verglichen mit all dem, was wir über die Natur dieser (möglichen) frühen irdischen Zellen gerne wüssten. Außerdem: Die Zirkonpartikeln der australischen Jack Hills sind die ältesten Mineralien überhaupt, die je gefunden wurden – und wenn bereits diese tatsächlich Spuren zellulären Lebens enthalten, dann liegen uns für das Studium der besonders spannenden Frage, von welcher Natur die chemischen Prozesse waren, die *vor* dem zellulären Leben lagen, aber auf dieses hinführten, keinerlei geologische Zeugnisse vor.

Stoffwechsel, Information und Retrodiktion

Die Antwort auf das skizzierte Dilemma besteht in einer Umkehr der Blickrichtung: Man kann versuchen, aus Attributen, die sämtlichen *heutigen* Lebewesen gemeinsam sind, einschränkende Bedingungen für die Natur *allen* irdischen Lebens, abzuleiten und diese auf eine Extrapolation rückwärts in der Zeit anzuwenden. Die Berechtigung dafür leitet sich ab aus dem Konzept der Evolution, genauer: aus einer charakteristischen Eigenschaft der Evolution, die der französische Genetiker François Jacob (*1920) in einem Klassiker gewordenen Essay illustriert hat.²¹ Die Evolution erfindet selten etwas gänzlich Neues, vielmehr kombiniert sie bereits Vorhandenes auf neue Weise und wandelt es beständig schrittweise ab. In anderen Worten: Jedes Produkt der Evolution trägt Spuren dessen, woraus es hervorgegangen ist und so verweisen die gemeinsamen anatomischen Merkmale eines Vogelflügels und eines menschlichen Arms auf die Struktur der Vordergliedmaßen des längst untergegangenen, jüngsten gemeinsamen Vorfahrs von Vögeln und Säugern.

tion der Zirkonkörner, (x) Einschluss des Zirkons in Mischgestein (Konglomerat), (xi) Metamorphose des primären Konglomerats zu Metakonglomerat (ca. -3 Gyr), (xii) Gegenwart: Auffinden des Zirkons im Metakonglomerat der Jack Hills, West-Australien und Analyse seiner diamantenen Einschlüsse. Fazit: Die Datierung der Zirkonkristalle ist also eine Minimalabschätzung des Alters der organischen Substanz!

21 F. Jacob: *Evolution and Tinkering*. Science 196, 1161-1166 (1977).

Um mit diesem Ansatz in eine zeitliche Tiefe vorzustoßen, die einen der Wurzel des Lebens nahebringt, braucht es offensichtlich fundamentalere Merkmale als solche der Wirbeltieranatomie – und die findet man in der Biochemie und in der Genetik. Der darauf gegründete Versuch, auf Eigenschaften des frühesten Lebens zu schließen, hat etwas von einer umgekehrten Vorhersage und wird deshalb als ›Retrodiktion‹ bezeichnet. Die universellen chemischen Attribute allen irdischen Lebens sind in groben Umrissen wie folgt zu skizzieren:

Alle Chemie der Zelle läuft auf die identische Verdopplung ihrer Desoxyribonucleinsäure (DNA: für deoxyribonucleic acid) zu, die Voraussetzung für die Teilung in zwei genetisch gleiche Tochterzellen ist.²² DNA ist ein Makromolekül sehr einfacher Struktur: Sie besteht aus einer linearen Aneinanderreihung von Millionen bis Milliarden von vier verschiedenen Modulen (Monomereinheiten), den Nukleotiden (Abb. 4 links). In deren nicht-monotoner, aber präzise festgelegten Abfolge (›Sequenz‹) liegt das entscheidende Merkmal einer DNA, denn durch sie bekommt das Molekül die Qualität von Text.

Die DNA-Verdopplung besteht darin, dass Monomere erforderlicher Anzahl in genau derselben Reihenfolge verknüpft werden, wie im Ausgangsmolekül; die dazu notwendige, höchst ungewöhnliche Eigenschaft molekularer Kopierfähigkeit liegt in der DNA-Struktur selbst begründet: DNA-Synthese ist ›selbstinstruiert‹ (Abb. 4 Mitte). Zur Erhöhung der Polymerisationsgeschwindigkeit und zur Unterstützung der Kopiergenauigkeit braucht es allerdings Katalysatoren (›Enzyme‹). Enzyme sind Proteine und die sind ebenfalls lineare Makromoleküle – viel kleiner zwar als DNA, aber immer noch von sehr stattlicher Größe. Enzyme, wie alle Proteine, sind aus zwanzig verschiedenen Monomereinheiten, den Aminosäuren, aufgebaut, die von ganz anderer chemischer Natur sind als die Monomeren der DNA (Abb. 4 unten).

Auch jedes Enzym zeichnet sich durch eine charakteristische Reihenfolge seiner Monomereinheiten aus; von dieser hängt seine Funktion als Katalysator einer bestimmten Stoffwechselreaktion kritisch ab. Anders als der DNA jedoch geht den Proteinen jegliche Fähigkeit der Selbstinstruktion bei ihrer Synthese ab – das heißt, die Sequenzinformation muss hier aus einer externen Quelle zugeführt werden – und diese Quelle

22 In diesem Sinne ist mit »Teilen, teilen, teilen ... zur Produktion von 2, 4, 8, 16 ... Zellen« die Lebensweise einzelliger Mikroorganismen beinahe umfassend beschrieben – und wer sich schneller teilt, setzt sich gegen den Konkurrenten durch. Bei komplexen Vielzellern werden die Chancen auf Weitergabe der genetischen Information auf anderen Wegen optimiert – unter Beibehaltung aller grundlegenden Charakteristika der zellulären Chemie.

Abb. 4: Biologische Makromoleküle. *Links:* Struktur eines DNA-Strangs, bestehend aus einem polymeren Phosphorsäurediester mit dem Zucker Desoxyribose und den am Zucker aufgehängten heterozyklischen Basen Cytosin, Thymin, Guanin und Adenin. *Rechts:* Struktur eines RNA-Strangs. Aufbau ähnlich der DNA, aber mit Ribose als Zucker und mit Ersatz der Base Thymin durch Uracil (U). *Mitte:* Replikation (identische Verdopplung) eines DNA-Doppelmoleküls (›Doppelhelix‹), ermöglicht durch die paarweise chemische Passung von Adenin (A) und Thymin (T) sowie von Guanin (G) und Cytosin (C). *Unten:* Aufbau eines für Enzyme (Proteine) charakteristischen Polypeptidfadens durch Polykondensation (intermolekulare Wasseraustrittsreaktion). $R_{1..20}$ bezeichnet jeweils eine der 20 Aminosäuren.

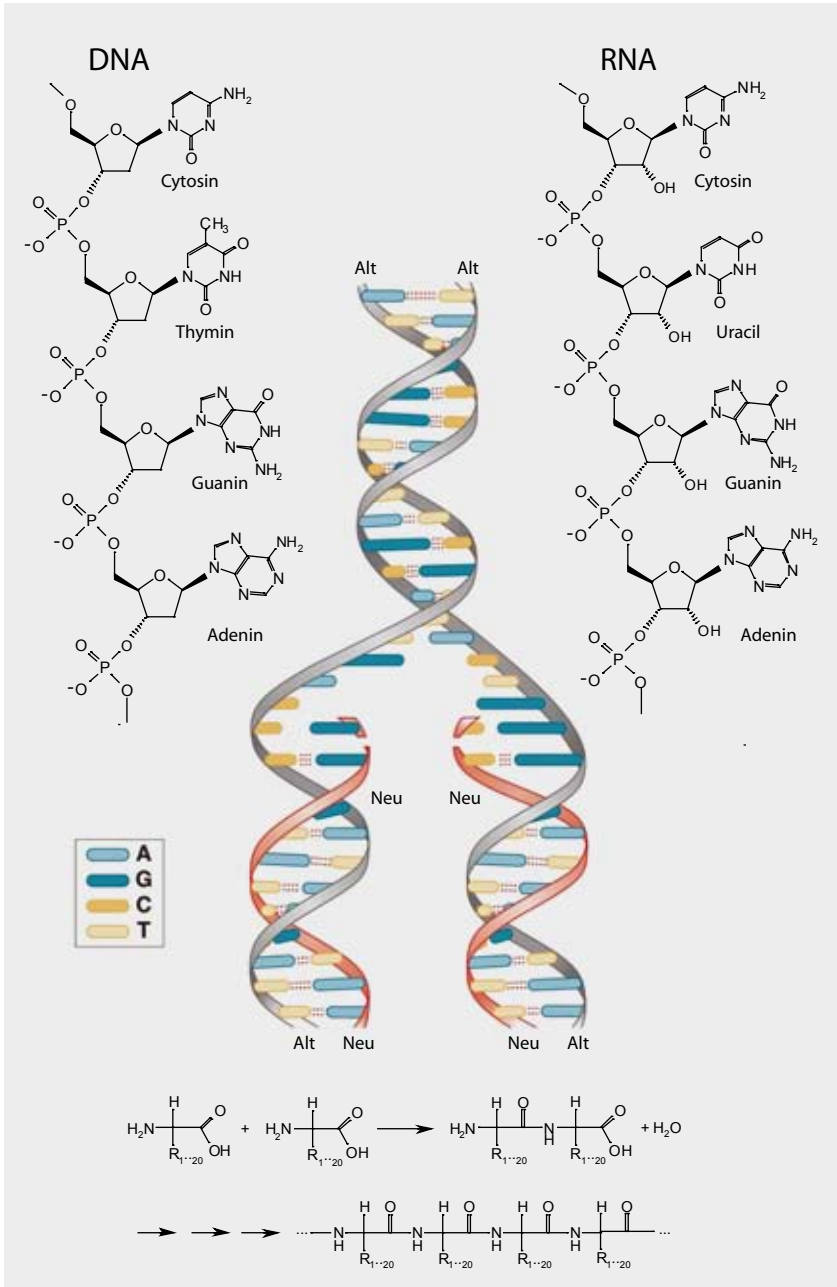
ist nichts anderes als die DNA. Ein Gen ist ein Abschnitt der DNA, der die Sequenzinformation für ein bestimmtes Enzym (Protein) enthält.

Wegen der unterschiedlichen Natur der Monomeren, muss die Sequenzinformation auf dem Weg von der DNA zum fertigen Protein von einer ›chemischen Sprache‹ in eine andere übersetzt werden – ein Prozess, für den man folgerichtig die Bezeichnung ›Translation‹ festgelegt hat. Bei dieser informationsgesteuerten Synthese spielen RNAs, das sind mit DNA strukturell eng verwandte, aber nicht identische Makromoleküle (**Abb. 4** rechts), die Rolle von Informationsüberträgern – daher die Bezeichnung ›Messenger-RNA‹ oder ›mRNA‹.

Auch für die Synthese von mRNA per Umschreiben (›Transkription‹) eines Gens von DNA in RNA braucht es Enzyme und ebenso braucht es solche für die Katalyse der vielfältigen chemischen Umwandlungen, mittels deren die Monomeren von DNA, RNA und Proteinen aus einem Angebot chemisch simpler Nährstoffe synthetisiert werden. Gemeinsam bilden alle diese Reaktionen ein chemisches Stoffwechselnetzwerk (›Metabolismus‹) aus ungefähr 1000 oder mehr Einzelkomponenten; dem entspricht die Anzahl verschiedener Enzyme und – als Minimalabschätzung – die der Gene, die in einem einfachen mikrobiellen Genom versammelt sind.²³

Selbstreplizierende chemische Systeme haben es früh gelernt, die Früchte ihrer metabolischen Anstrengungen nicht mit Konkurrenten zu teilen; sie tun dies durch Kompartimentierung, die den Metabolismus und seine Nutznießer, die Makromoleküle, räumlich beieinander hält. Dazu haben sie eine Barriere entwickelt, eine in sich geschlossene Mem-

23 Kleinere mikrobielle Genome sind bekannt – so besitzt das in Fußnote 4 erwähnte Bakterium *Mycoplasma genitalium* nur 485 für Proteine kodierende Gene. In diesem, wie in allen ähnlichen Fällen hat der Organismus jedoch keinen kompletten Stoffwechsel, sondern zapft als Parasit seinem Wirt vorgefertigte metabolische Zwischenprodukte ab.



bran von nur molekularer Dicke – vergleichbar der Gummihaut eines Luftballons. Im Innenraum dieser, für Moleküle aller Art undurchlässigen Membran ist das gesamte chemische System versammelt und gegen die Außenwelt abschottet. Diese ›Erfindung‹ markiert die Geburt der Zellen und somit die von Organismen im engeren biologischen Sinn. Biomembranen lassen jedoch einen selektiven, sorgfältig kontrollierten ›chemischen Grenzverkehr‹ zu: Nährstoffe werden aus der Umgebung der Zelle aufgenommen und Abfallstoffe ausgeschieden. Zellen sind also ›offene Systeme‹ – und dies nicht nur in chemischem Sinn: sie sind zudem von Energie durchströmt: nutzbare Energie wird aufgenommen (in Form chemisch energiereicher Nährstoffe bzw. als Sonnenlicht) und ›Prozeßwärme‹ an die Umgebung abgeführt.

Die hier skizzierten Eigenschaften sind universelle Gemeinsamkeiten *allen* Lebens auf der Erde und diese Eigenschaften sind somit allesamt bereits für den jüngsten gemeinsamen Vorfahr aller heutigen Lebewesen zu unterstellen (›LUCA‹ für ›last universal common ancestor‹) – dies verlangt die Logik, wie sie oben für die Anatomie der Vordergliedmaßen von Vertebraten skizziert wurde.²⁴ Gesicherte evolutive Retrodiktion und geologische Spuren enden, wie es scheint, gemeinsam bei bereits hochentwickelten, komplexen Zellen und jeder versuchte Blick tiefer in die Vergangenheit muss sich notwendig auf *Annahmen* stützen, die – jede für sich – auf Plausibilität zu untersuchen sind und die desto mehr gelten, je größer – innerhalb des Gesamtkonzepts Retrodiktion – ihre Vorhersagekraft ist und je besser man die Vorhersagen experimentell testen kann.

Die Lücke, die es zu füllen gilt, ist die zwischen den geochemischen und geophysikalischen Bedingungen vor 4,4 Milliarden Jahren und dem integrierten Funktionsmechanismus eines simplen Einzelllers. Dies ist eine gewaltige Lücke, denn von der tatsächlichen Komplexität auch der einfachsten Zellen gibt der oben entwickelte Abriss allenfalls eine schwache Ahnung. Beim Versuch, Szenarien für einfachere Vorläufer moderner Zellen aufzustellen, stellt die wechselseitige Abhängigkeit von DNA

24 Ein besonders starkes Argument für die Richtigkeit des LUCA-Konzepts: Die Gemeinsamkeiten *aller* bekannter Lebewesen erstreckt sich auch auf den Genetischen Code, das heißt den Regelsatz, der bei der Translation je eine beliebige Sequenz von drei Nukleotiden der RNA mit genau einer Aminosäure des entstehenden Proteins verknüpft. Es sind keine chemischen Prinzipien bekannt, die diesen einen beobachteten Regelsatz gegenüber der sehr großen Anzahl denkbarer Alternativen auszeichnen würden und man nimmt daher an, dass der Genetische Code das Resultat einer *einmaligen*, zufällig entstandenen Festlegung ist (›frozen accident‹). Danach hätten alle bekannten Lebewesen *einen* gemeinsamen Vorfahr.

und Proteinen ein besonders vertracktes Problem dar: Nützliche Enzyme sind nur als Produkte informationsgesteuerter Synthese, also nicht ohne DNA, vorstellbar und die Synthese von DNA braucht die Beteiligung von Enzymen. Wie soll man sich in einer zu postulierenden, frühen Lebenswelt ohne DNA und Proteine den gleichzeitigen Auftritt von *beidem* – in sinnvoll miteinander verzahnter Weise vorstellen?

Die RNA-Welt

Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts, rund dreißig Jahre nach der epochemachenden Arbeit von Watson und Crick zur Struktur der DNA,²⁵ erschütterte eine sensationelle Nachricht das bislang festgefügte Weltbild der Molekularbiologen: Zwei Labors meldeten unabhängig voneinander, dass bestimmte Ribonukleinsäuren (RNAs) die Träger katalytischer Aktivität sein konnten.^{26 27} Mit diesen ›Ribozymen‹ waren die proteinischen Enzyme ihrer bislang exklusiven Stellung als Biokatalysatoren beraubt! Damals schon seit längerem bekannt, aber eher als eine exotische Ausnahme betrachtet, waren einige Bakteriophagen mit RNA-Genomen und direkter RNA → RNA Replikation – ohne Umweg über eine Zwischenkopie aus DNA,²⁸ mit dieser Eigenschaft machte die RNA gleich noch einem anderen Makromolekül seine scheinbare Alleinstellung streitig: der DNA.

Der amerikanische Biochemiker Walter Gilbert (*1932) hat beides in einer gemeinsamen Sicht vereinigt und zu einer Hypothese gebündelt, die er 1986 in einem Kommentar von weniger als einer Seite Umfang in der Zeitschrift *Nature* unter der Überschrift *The RNA World* vorgestellt hat.²⁹ Gilbert hatte erkannt, dass sich mit den beiden erwähnten, in der Biologie heutiger Lebewesen wie Findlinge dastehenden Eigenschaften von RNA ein einfacher Ausweg aus dem Dilemma anbietet, das die funk-

25 J. D. Watson and F. H. C. Crick: *Molecular Structure of Nucleic Acids*. *Nature* 171, 737-738 (1953).

26 K. Kruger, P. J. Grabowski, A. J. Zaug, J. Sands, D. E. Gottschling and T. R. Cech: *Self-Splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena*. *Cell* 31, 147-157 (1982).

27 C. Guerrier-Takada, K. Gardiner, T. Marsh, N. Pace and S. Altman: *The RNA Moiety of Ribonuclease P is the Catalytic Subunit of the Enzyme*. *Cell* 35, 849-857 (1983).

28 B. Spiegelman, I. Haruna, I. B. Holland, G. Beaudreau and D. Mills: *The Synthesis of a Self-Propagating and Infectious Nucleic Acid with a Purified Enzyme*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 54, 919-927 (1965).

29 W. Gilbert: *The RNA World*. *Nature* 319, 618 (1986).

tionale Dichotomie und gegenseitige Abhängigkeit von Genetischer Information (DNA) einerseits und Katalyse metabolischer Reaktionen (Proteine) andererseits für die Entstehung des Lebens bedeutet. Er postulierte, dass in einer frühen Phase der Evolution die beiden Funktionen Informationsspeicherung *und* Katalyse in nur *einem* Makromolekül, der RNA, vereint waren. Demnach wären Proteine und DNA Spätankömmlinge auf der Bühne der Evolution, die ihre Durchsetzung der Tatsache verdanken, dass sie für ihre jeweilige Spezialaufgabe besser ausgestattet sind als RNA. Diese wäre mit dem Siegeszug von DNA und Proteinen zu einem bloßen Informationsüberträger degradiert worden – allerdings nicht in allen Fällen, weshalb einzelne Überbleibsel der RNA-Welt noch heute zu besichtigen sind.

Die Vorstellung der RNA-Welt trägt alle Merkmale einer guten wissenschaftlichen Hypothese: Sie reduziert eine zuvor konzeptionell verwickelte Situation auf eine sehr viel einfachere, sie macht Vorhersagen und diese sind experimentell überprüfbar: Eventuell weitere zu entdeckende, natürliche Ribozyme sollten – wie schon die beiden ersten Vertreter – speziell solche Reaktionen beschleunigen, von denen man erwarten kann, dass sie bereits in der RNA-Welt oder am Übergang von einer reinen RNA- zu einer RNA-Protein-Welt benötigt wurden (Synthese und post-synthetische Prozessierung von RNA selbst und Verknüpfung von Aminosäuren zu linearen Multimeren). Ferner sollte es gelingen, Ribozyme im Labor synthetisch zu erzeugen – als Beschleuniger vermuteter RNA-Welt Reaktionen und anderer.

All dies ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten in einer großen Anzahl von Einzelfällen glänzend bestätigt worden, was der RNA-Welt-Hypothese zu allgemeiner Anerkennung verholfen hat. Es sieht ganz so aus, als hätten wir es tatsächlich geschafft, einen einfacheren evolutiven Vorläufer des heutigen makromolekularen Stoffwechsels mit seiner Trias aus DNA, RNA und Proteinen in Umrissen zu rekonstruieren. Die Frage ist nunmehr: Wieviel näher bringt uns dies dem eigentlichen Ursprung? Die Antwort darauf fällt sehr viel nüchterner aus.

Die Monomerbausteine der RNA, die Nukleotide, sind sehr subtil aufgebaute, empfindliche Substanzen, speziell in chemisch aktivierter, für die Polymerisation geeigneter Form. Ohne die Verfügbarkeit dieser Substanzen ist eine RNA-Welt schlechterdings nicht vorstellbar und ihre geordnete Synthese aus einfachen Ausgangsstoffen ist in der heute zu beobachtenden Biochemie ein vielstufiger Prozess mit hohen Ansprüchen an Biokatalyse. Somit steht man vor einem erneuten Dilemma: Wie konnten polymerisierbare Nukleotide in einer ›Prä-RNA-Welt‹ ohne katalytisch aktive Biopolymere entstanden sein? Der hohen Plausibilität

der RNA-Welt als unmittelbarer Vorläufer der heutigen Lebensformen steht ihre hohe Einstiegskomplexität gegenüber, die sich bis heute – trotz vielfältiger Versuche – jeder weiteren Reduktion auf einfachere Anfangsgründe entzogen hat.

Zurück zu den Wurzeln

Der Eintritt in die RNA-Welt war der Übergang von spontaner, niedermolekularer (präbiotischer) Chemie in das Zeitalter von Makromolekülen, die ein chemisches Netzwerk durch selektive Katalyse kontrollieren und ihre eigene Synthese durch Abruf gespeicherter Information lenken. Um diesen Eintritt vollziehen zu können, brauchte es das Zusammenspiel von vier Komponenten: Material, Energie, Katalyse und Konzentration. Auf der Ebene der Polymerisationsreaktion ist die Frage nach dem Material per Definition gelöst: dies sind die Nukleotide. ›Energie‹ ist die chemische Energie, die nötig ist, um Nukleotide in wässrigem Milieu, gegen den überwiegenden Trend der Rückreaktion (*i.e.* Kettenbruch durch Hydrolyse) zu polymerisieren; ›Katalyse‹ heißt vor Auftritt der ersten RNA-polymerisierenden Ribozyme Reaktionsbeschleunigung ohne Hilfe informationsgesteuert synthetisierter Makromoleküle und, letztlich, bedeutet das Problem ›Konzentration‹, dass Polymerisation nur möglich ist, wenn die Monomerbausteine nicht in extrem verdünnter Lösung vorliegen.

Auf der darunter liegenden Ebene der Entstehung der Nukleotide ihrerseits stellt sich die Frage nach den vier Komponenten in analoger Weise aufs Neue; hier allerdings ist die Frage nach dem Ausgangsmaterial mindestens ebenso ungelöst, wie die nach Energie und Katalyse – lediglich das Konzentrationsproblem könnte ein wenig abgemildert sein.

Für alles, was vor dem Eintritt der Evolution in die RNA-Welt liegt, lässt sich aus den heutigen biochemischen und genetischen Gegebenheiten kein ähnlich kohärentes und umfassendes Bild rekonstruieren: Retrodiktion ist hier nur in Einzelaspekten sinnvoll anzuwenden. In dieser Situation erscheint es attraktiv, ganz an den Anfang zu springen und – in Gedanken oder an der Laborbank – Experimente zur Chemie der sehr frühen Erde durchzuführen, in der Hoffnung, dabei auf Moleküle zu stoßen, deren Beteiligung an Lebensprozessen (oder lebensbildenden Prozessen) offensichtlich ist oder zumindest sehr wohl möglich erscheint.

Diese Vorgehensweise hat in den Versuchen von Stanley Miller (1930-2007) aus dem Jahr 1953 einen berühmten Präzedenzfall, durch den die Suche nach dem Ursprung des Lebens als eine experimentelle Disziplin

eigentlich erst begründet wurde.³⁰ Miller hat als junger Doktorand im Labor des Kosmochemikers Harold C. Urey (1893-1981) in einem Glaskolben eine hypothetische frühe Erdatmosphäre, bestehend aus Wasserdampf, Methan, Ammoniak und Wasserstoff nachgestellt und durch diese Mischung hindurch elektrische Entladungen zwischen zwei in den Kolben ragenden Elektroden (›Blitze‹ als Energiequelle!) geschickt. In der so entstehenden, komplexen Produktmischung ließen sich etliche ›lebensnahe‹ Verbindungen nachweisen – allen voran Aminosäuren desselben Typs, wie man sie als Monomerbausteine in den Proteinen findet. Diese energiereichen und strukturell differenzierten Moleküle, so das weitere Szenario, wurden mit dem Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen und haben, gelöst im Ozean, eine kräftige Ursuppe (›primordial soup‹) gebildet, aus der letztlich das Leben durch weitere, noch zu charakterisierende, chemische Umsetzungen hervorgegangen sein könnte.

Das Millersche Szenario war ein halbes Jahrhundert lang das dominierende Paradigma in der Debatte um den Ursprung des Lebens, ist in jüngerer Zeit aber zunehmend in die Kritik geraten. Der gravierendste Einwand ist dieser: Die von Miller und Urey angenommene Zusammensetzung der frühen Atmosphäre ist wahrscheinlich unrealistisch. Statt von Methan, Ammoniak und Wasserstoff wurde sie eher von Kohlendioxid und Stickstoff dominiert – und eine solche nicht-reduzierende Mischung liefert unter ›Miller-Bedingungen‹ kaum organische Verbindungen.

Die Vorstellung einer Ursuppe ist mit dem möglichen Wegfall der Millerschen Erklärung, wie ihre Komponenten entstanden sein sollen, noch nicht widerlegt. Ein zweites Szenario für chemische Anreicherung des Urozeans geht von spektroskopischen Beobachtungen des interplanetaren und interstellaren Raums aus: Dort sind erstaunlich komplexe Kohlenstoffverbindungen nachgewiesen worden³¹ und es gibt eine Klasse von Meteoriten (›carbonaceous chondrites‹), mit denen organisches Material auf die Erde gelangt – bis in heutige Zeiten: Der Meteorit, der 1969 nahe Murchison, Victoria (Australien), niederging, ist ein berühmter Vertreter dieser Klasse, der neben Aminosäuren und vielem anderen auch heterozyklische Basen enthält, wie sie in den Nukleinsäuren DNA und RNA vorkommen.³² Das Problem mit der meteoritisch angereicherten

30 S. L. Miller: *A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions*. Science 117, 528-529 (1953).

31 W. M. Irvine: *Extraterrestrial Organic Matter: A Review*. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 28, 365-383 (1998).

32 Z. Martins, O. Botta, M. L. Fogel, M. A. Sephton, D. P. Glavin, J. S. Watson, J. P. Dworkin, A. W. Schwartz and P. Ehrenfreund: *Extraterrestrial nucleobases in the Murchison meteorite*. Earth and Planetary Science Letters 270, 130-136 (2008).

Suppe ist die schwierige Abschätzung, wie groß der Eintrag organischen Materials auf die frühe Erde denn tatsächlich war, das heißt, wieviel chemische Energie zur Verfügung stand, um die lange Durststrecke bis zur ›Erfindung‹ der Fixierung von Kohlenstoff durch biologische Reduktion von Kohlendioxid (mit Hilfe des Sonnenlichts) zu überstehen.

Auch wenn man die frühere Existenz einer hinreichend ›dicken‹ Uruppe – unabhängig von der Frage ihrer Entstehung – akzeptiert und damit die Fragen nach Ausgangsmaterial und Energie für gelöst hält, bleiben mindestens zwei Probleme des Anschlusses an eine spätere RNA-Welt: Die Mischung müsste polymerisationsfähige Nukleotide hervorbringen (oder Monomere eines einfacher gebauten und später untergegangenen Vorläufers der RNA) und diese Monomeren müssten zu evolvierbaren Polymeren verknüpft werden – als Wasserausschlussreaktion bei wahrscheinlich hoher Verdünnung in Wasser als Reaktionsmedium.

Nun läuft allerdings die selektive Entstehung wohldefinierter, strukturell hochdifferenzierter Reaktionsprodukte aus einer wilden Mischung von Ausgangsstoffen jeder Intuition eines synthetisch arbeitenden Chemikers zuwider, der üblicherweise alle Hände voll zu tun hat, der allgegenwärtig lauern den Tendenz zum Eintreten des genauen Gegenteils zu wehren – zu seinem Leidwesen nur allzu oft erfolglos. Ohne die Hilfe makromolekularer Katalysatoren scheint in der komplexen chemischen Dynamik der vermuteten Uruppe Ordnung nur per Selbstorganisation zu schaffen, eine Leistung, für die sich zur Ausgabe (›Dissipation‹) nutzbarer Energie noch Autokatalyse durch positive reaktionskinetische Rückkopplungsschleifen³³ gesellen muss. Unter solchen Bedingungen kann

33 Ein einfaches Beispiel autokatalytischer Rückkopplung: Ein Stoff A wird in B umgewandelt, wobei die direkte Reaktion $A \rightarrow B$ beliebig langsam sein soll. Es gibt aber einen zweiten Weg: $A + B \rightarrow C \rightarrow 2B$ (die Nettoreaktion ist offenbar dieselbe). Wenn die Teilreaktion $C \rightarrow 2B$ sehr schnell ist, dann wird die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion proportional zum Produkt der Konzentrationen der beiden Komponenten A und B und wenn ferner der Vorrat an A laufend aufgefüllt wird, steigt die Reaktionsgeschwindigkeit linear mit der Konzentration des Endprodukts B. Autokatalyse im hier illustrierten Sinn ist zu unterscheiden von Katalyse, wie sie von einem Enzym vermittelt wird. Letzteres ist in die metabolische Reaktionskette, die es beschleunigt, nicht unmittelbar integriert, sondern ist in seiner Rolle eher vergleichbar einem Schraubstock, in den ein Werkstück zur Bearbeitung eingespannt und aus dem das fertige Produkt entlassen wird. Diese, auf der Erscheinungsebene leicht zu treffende Unterscheidung setzt allerdings auf einer tieferen Gemeinsamkeit auf: Die Synthese der Enzyme selbst speist sich letztlich aus den Stoffwechselprodukten, sodass sich auch hier Rückkopplungsschleifen schließen. Autokatalytische Reaktionszyklen wie der ein-

sich ein dynamisches Netzwerk zu einem Zustand stabilisieren, das einen stetigen und die Gesamtpopulation letztlich dominierenden Ausstoß weniger Molekülsorten erzeugt – im Prinzip wenigstens. Sollte es je gelingen, die chemische Globalgleichung ›Suppe \rightarrow RNA‹ in sinnvolle Einzelschritte zu entwickeln, dann wohl allenfalls in der skizzierten Weise. Wie dies (gegebenenfalls) im Detail aussehen könnte, ist völlig offen, aber die Betrachtung möglicher präbiotischer Chemie unter dem übergreifenden Aspekt der Dynamik komplexer Systeme rückt mit guter Berechtigung derzeit in den Fokus der Forschung.

Energiegetriebene chemische Dynamik fernab des Gleichgewichts, die man – siehe oben – offenbar ohnehin braucht, macht nun zudem die ganze Annahme einer Ursuppe unnötig, wenn man die Quelle der chemische Energie nicht im Weltall oder der frühen Erdatmosphäre, sondern auf der Erde selbst, bzw. auf dem Meeresboden sucht. Diesen Ansatz verfolgt Günter Wächtershäuser (*1938) seit den 1980er Jahren; er ist in diesem Band mit einem eigenen Artikel vertreten, weshalb hier einige wenige Sätze der Zusammenfassung genügen.

Auseinanderdriftende Platten der ozeanischen Erdkruste bilden in den Weltmeeren zigtausende von Kilometern lange Risslinien, unter denen Magma aus dem Erdmantel aufsteigt und für aktiven Unterwasservulkanismus sorgt. Sich dort auftuende Gesteinsspalten wirken auf eindringendes Meerwasser wie Durchlauferhitzer, was zur Bildung hydrothermaler Schloten führt, die in überkritischem Wasser gelöste Mineralstoffe wie Sulfide von zweiwertigem Eisen und Nickel ausstoßen. Dieses Material fällt bei der plötzlichen Abkühlung aus und bildet üppige Wolken feinverteilter, schwarzer Partikeln – daher der Name ›black smoker‹ für diese Schloten (Abb. 5) und man darf annehmen, dass es sie auf der frühen Erde in mindestens ebenso großer Zahl und Aktivität gegeben hat.

Die frisch gefällten Sulfide sind mit flüchtigen Bestandteilen des vulkanischen Auswurfs (Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff) im chemischen Ungleichgewicht und gehen mit diesen Reaktionen ein. Vor Aufkommen der mikrobiellen und der (späteren) pflanzlichen Photosynthese war neben der Atmosphäre auch das Meerwasser nahezu frei von molekularem Sauerstoff und unter diesen ›anoxischen‹ Bedingungen konnte normales Eisen(II)sulfid (FeS) mit Schwefelwasserstoff (H₂S) zu Pyrit (FeS₂) reagieren. Dieser Prozess liefert Elektronen, die zur Reduktion von Koh-

gangs skizzierte (und kompliziertere) gibt es auch im heutigen Metabolismus, wiewohl jeder einzelne Schritt enzymatisch katalysiert ist. In einem interessanten Ansatz wird daher unterstellt, derartige autokatalytische Reaktionszyklen könnten enzymatisch unkatalysierte Vorläufer in der präbiotischen Chemie gehabt haben.

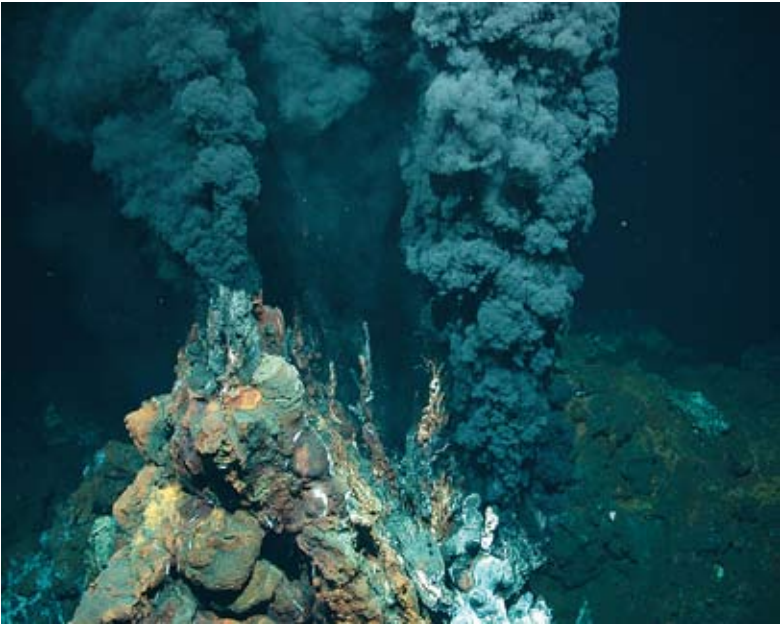


Abb. 5: Ausstoß von feinverteiltem Eisen(II)sulfid und anderen Stoffen aus dem Schlot eines unterseeischen »Black Smoker«; Logachev Hydrothermalfeld, mittelatlantischer Rücken Zentraler Atlantik. Foto: Marum, Bremen.

lendioxid genutzt werden können – mit dem Ergebnis der Fixierung von Kohlenstoff in organischen Verbindungen.

Ausgehend von diesem verblüffend einfachen Grundgedanken konnte Günter Wächtershäuser eine erstaunliche Fülle chemischer Umsetzungen plausibel machen – und viele davon unter modellierenden Laborbedingungen inzwischen experimentell belegen (darunter zum Beispiel die Synthese von Aminosäuren und einfachen Aminosäureoligomeren). Zudem konnte er das Auftreten positiv rückgekoppelter, also autokatalytischer Reaktionszyklen glaubhaft machen. Dies und mehr hat Günter Wächtershäuser in dem Postulat eines »Pionierorganismus« gebündelt, den er sich als eine Art dynamischen, organischen Belags molekularer Schichtdicke auf mineralischem Substrat vorstellt (man beachte, dass diese Annahme gleichzeitig eine elegante Lösung des Verdünnungsproblems vorschlägt). Vorstellbar ist das gesamte Szenario offensichtlich für eine erdgeschichtliche Zeit, zu der bereits Kruste und Ozean existiert haben, nach neueren Erkenntnissen also etwa ab -4,4 Gyr (vergl. oben).

Information zuerst versus Metabolismus zuerst

Die Idee einer nachhaltigen geochemischen Energiequelle und eines von ihr getriebenen ›Pionierorganismus‹ hat der Diskussion der präbiotischen, chemischen Evolution eine neue Dimension hinzugefügt. Diese Öffnung hat auch den Streit um ein weiteres Ei-Henne-Problem belebt: den um die zeitliche Reihenfolge des Erscheinens von Metabolismus und genetischer Information. Die beiden Lehrmeinungen konkurrieren um die Erklärung der frühesten, für die Lebensentstehung relevanten Autokatalyse. Grob vereinfacht verläuft die Trennungslinie wie folgt:

Gemäß dem Paradigma ›Information zuerst‹ waren kleine RNA-Moleküle, die sich in zyklischer Verkettung von Katalyse gegenseitig bei der Replikation assistierten, die frühesten, zum Leben hinführenden, autokatalytischen Systeme (vergleiche Aufsatz von Manfred Eigen in diesem Band). Diese haben sich zunächst evolutiv auf hoher Rate hinreichend genauer Replikation verfeinert. Als der Vorrat der Ursuppe an Nukleotiden zur Neige ging, waren zusätzliche Ribozyme gefragt, die deren Synthese aus anderen, zunächst nicht genutzten Komponenten der Ursuppe katalysierten (und die mit Hilfe eines RNA-replizierenden Ribozyms ebenfalls kopiert werden mussten). Ungefähr auf diese Weise ist gemäß ›Information zuerst‹ der Stoffwechsel in die Welt gekommen.

In Gegensatz dazu könnte der Wächtershäusersche ›Pionierorganismus‹, oder ein vergleichbares dynamische System ausschließlich niedermolekularer Chemie, sich ohne das Anlegen eines genetischen Gedächtnisses ein ganzes Stück weiter differenziert, das heißt hinsichtlich Stoffensembles erweitert und hinsichtlich Ineinandergreifen von Reaktionszyklen verfeinert haben – gestützt auf nichts als einfachstes Rohmaterial, Energiedissipation und autokatalytische Rückkopplung. Dies ist eine derzeit noch spekulative, aber – ihrer schlichten Schönheit halber – höchst attraktive Hypothese. Eines darf man dabei allerdings nicht vergessen: Genetische Stoffwechselkontrolle ist ein universelles Faktum allen uns bekannten Lebens – ob zuerst oder nicht: irgendwann *ist* sie entstanden, und sie hat sich durchgesetzt. Sich vorzustellen, wie ein bereits hochdifferenziertes chemisches Netzwerk sich selbst einen genetischen Apparat überstülpen soll, ist schwierig. Solange die Verfechter von ›Metabolismus zuerst‹ darauf keine überzeugende Antwort haben, muss der Wert des Paradigmas daran gemessen werden, ob es gelingt, eine *frühe* Verflechtung mit katalytischen, replikationsfähigen Polymeren in das Bild zu integrieren. In anderen Worten: Es könnte sein, dass die beiden verfeindeten Lager sich auf jeweils nur einen von zwei in Wirklichkeit untrennbar zusammengehörenden und ihrer konzeptionellen Synthese harrenden Aspekte kaprizieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit den ersten Sätzen dieses Aufsatzes wurde die Frage »Was ist Leben?« vorläufig beiseite geschoben. Die Frage bleibt unergründlich, aber im Verlauf einer Diskussion des Ursprungs des Lebens nähert man sich dem Problem unausweichlich dadurch an, dass zumindest Licht auf einige *Attribute* des Lebens geworfen wird. Diese Attribute sind:

- Stoffumsatz fern des chemischen Gleichgewichts.
- Dissipation nutzbarer Energie chemischen oder physikalischen Ursprungs.
- Lenkung der Stoff- und Energieströme durch selektiv offene Kompartimente (Zellen) hindurch.
- Anhaltende Genese und Akkumulation von Information.
- Schaffen von Ordnung und Geschwindigkeit im metabolischen Reaktionsnetzwerk durch katalytisch aktive Makromoleküle (Enzyme).
- Informationsgesteuerte Synthese der Enzyme ihrerseits.
- Abruf dieser Information aus einem chemischen Langzeitspeicher (DNA).
- Weitergabe der Information von einer Zellgeneration zur nächsten, basierend auf identischer Verdopplung der DNA.

Ganz ohne Zweifel sind diese Attribute bei der Entwicklung des Lebens aus primitiven chemisch/physikalischen Anfangsgründen der Erde (oder sonstwo – im Fall von Panspermie) nicht gleichzeitig aufgetreten; das geologische Protokoll der Erdgeschichte gibt jedoch keine Hinweise auf den historischen Verlauf des stufenweisen Prozesses der Akquisition dieser Attribute (speziell der Reihenfolge) bis hin zu bereits modern anmutenden Mikroorganismen. Retrodiktion, ausgehend von Fakten der heutigen Biochemie und Genetik erlaubt es, hinter den Zeithorizont geologischer Spuren zu extrapolieren – aber nicht beliebig weit. Am anderen Ende bietet eine Mischung aus hartem Wissen und klugem Raten über die Verhältnisse auf der sehr frühen Erde den Ausgangspunkt für das Aufstellen überprüfbarer Modelle von chemischen Prozessen, die möglicherweise auf das Leben hinführten. Ein Treffen der beiden wissenschaftlichen Zeitreisen gegenläufiger Richtung ist derzeit nicht in Sicht. Vermehrte Kenntnisse der Geologie (und möglicherweise Biologie) anderer Himmelskörper können nützlich für die Klärung von Fragen zum irdischen Leben sein – das »Große-Bombardement- Szenario«, als ein Beispiel, stützt sich wesentlich auf Untersuchungen an Mondmaterial, das Apollo-Astronauten in den 1970er Jahren mitbrachten.

Die Suche nach dem Ursprung des Lebens ist ein Blick zurück in der Zeit. Wir wissen wenig vom Ausgangszustand, und die möglichen Ent-

wicklungen von dort zur Gegenwart sind äußerst vielfältig. Alles was wir tun können, ist, von diesem dicken Bündel denkbarer Trajektorien nach und nach einzelne oder ganze Gruppen als unmöglich oder unplausibel abzuschälen. Dies ist jeweils erst dann möglich, wenn man eine spezielle Option hinreichend klar beschrieben hat. Beim gegenwärtigen Stand der Forschung sind besonders dringend plausible und experimentell überprüfbare Szenarien gesucht, die eine Brücke vom Zustand der frühen Erde zur RNA-Welt schlagen. Somit teilt die Erforschung des Ursprungs des Lebens mit jeder ganz normalen naturwissenschaftlichen Disziplin ein wesentliches Merkmal: sie lebt vom Aufstellen und Verwerfen von Hypothesen. Niemand weiß derzeit, wie weit man diesen Eingrenzungsprozess wird treiben können; der in den letzten Jahrzehnten erzielte Fortschritt ist jedoch sehr ermutigend.

Danksagung: Der Autor dankt Joachim Reitner für geowissenschaftliche Unterrichtung und Überlassung von Fotos (Abb. 1-3).