



*Kein Mensch kann die unendlich erscheinende Zeitspanne ermessen, die das biologische Leben auf unserem Planeten umfasst. Dennoch ist es möglich, fast von Beginn an die Auswirkungen des letzten gemeinsamen Vorfahren aller Lebewesen zu verstehen. Allein es fehlt die Kenntnis seines Ursprungs.*

# Der Ursprung des Lebens

„Die“ Herausforderung der Wissenschaft  
Von Ulrich Schreiber, Oliver J. Schmitz  
und Christian Mayer

Eine der kompliziertesten Fragen der Wissenschaft lautet, wie ist das Leben entstanden. Die Kompliziertheit erklärt sich sehr schnell. Das Leben umfasst unser gesamtes irdisches Weltbild, welches in seiner Komplexität so weit entwickelt ist, dass einfache Betrachtungen fast unmöglich scheinen. Für die Entwicklung bis zum Jetzt war Zeit notwendig, eine Zeit, die jeden menschlichen Erfahrungshorizont unendlich weit übersteigt. Vielleicht 3,5 bis 3,8 Milliarden Jahre oder mehr. Dieser erforderliche Zeitraum, notwendig für die Entwicklung eines biologischen, denkenden Wesens, macht den Zugang zum Verständnis über

die ersten Schritte bis zum Heute so schwer verständlich. Wenig ist bekannt über die Bedingungen der frühen Erde. Wie war die Atmosphäre zusammengesetzt, wann gab es wieviel Wasser, Berge, Seen? Welchen Einfluss hatte der Mond nach seiner Bildung? Nicht ohne Grund klingt in vielen Äußerungen früherer Forscher zu diesem Thema die resignierende Aussage an, dass es vermutlich nie gelingen wird, die zum Leben führenden Prozesse jemals zu erkennen.

Lange bevor es LUCA gab (Last Universal Common Ancestor), der letzte gemeinsame Vorfahre aller lebenden Einzeller, Pflanzen, Pilze

und Tiere, inklusive Menschen, muss es eine fortwährende Produktion von Molekülen gegeben haben, die die notwendigen Bausteine für das Experiment Leben bereitstellten. Bausteine allein reichen aber nicht. Benötigt wurden Räume, in denen die Versuche zum Zusammenbau komplexerer Verbindungen ablaufen konnten. Räume, in denen die Konzentration der Moleküle so hoch war, dass sie sich überhaupt treffen und miteinander reagieren konnten, eine große Anzahl von kleinsten Laboratorien, untereinander verknüpft, mit wechselnden Bedingungen, Materialnachschub und Müllabfuhr für nicht brauchbare

Bestandteile. Unter solchen Bedingungen muss sich die biologische Zelle LUCA gebildet haben, das erfolgreichste System, das jemals auf der Erde entstanden ist. Von ihr ausgehend wurde fortan die Erde in eine einzigartige Entwicklung geführt. Angefangen von der Atmosphäre, Verwitterung, Erosion und Sedimentation, über Bodenbildung, Bewuchs und tierischen Aktivitäten bis schließlich zu allem, was der Mensch verändert und geschaffen hat. Alles was wir heute auf der festen Erdoberfläche sehen, ist letztlich das Ergebnis der erfolgreichen Vermehrung von LUCA.

Warum forschen wir an einem so weit zurück liegenden Ereignis?

Neugier ist eine wesentliche Eigenschaft des Menschen, die eine der Hauptursachen für die dynamische Entwicklung der Spezies ist. Wenn sich der Nebel, der über dem Ursprung liegt, lichtet, bleibt weniger Raum für Spekulationen über die Bedeutung des Lebens und letztlich die des Menschen. Seit der Mensch abstrakt denken kann, beschäftigt ihn die Frage des „Woher“ und des „Wohin“. Erst wenn das „Woher kommen wir?“ verstanden ist, lassen sich Fragen wie das „Wohin gehen wir?“ oder „Warum existieren wir?“ fundierter diskutieren. Aber neben der mehr philosophischen Sichtweise gibt es grundlegende Interessen von Seiten der Biochemie, Pharmazie und Medizin, die mit der Kenntnis der ersten Schritte des Lebens einen völlig neuen Zugang für das Erkennen heute stattfindender Prozesse in den Zellen bekommen werden.

Werden die Vorgänge in lebenden Körpern betrachtet, tut sich eine extrem komplizierte, auf das feinste abgestimmte Welt chemischer und physikochemischer Prozesse auf, die noch weit davon entfernt ist in ihrer Gesamtheit aufgeschlüsselt zu werden. Nur wenige Spezialist\*innen sind in der Lage, einzelne Schritte in der Vielfalt der Reaktionen zu verstehen. Dennoch lassen sich Grundprinzipien mit Modellen aus der technischen uns

vertrauten Welt erkennen. Alles was in einer Zelle an Reaktionsritten abläuft, ist eingebunden in zwangsläufig aufeinander folgende Reaktionen, die jeweils die nächsten Schritte vorgeben. Als Vergleich kann ein Spielzeug dienen, bei dem eine Kugel an der höchsten Stelle einer Rollbahn eingesetzt wird und die vorgegebene Bahn in zahlreichen Windungen durchläuft. Hierbei stößt sie andere Kugeln an, die wiederum zur Seite in eigenen Bahnen rollen und dort weitere Kugeln mit jeweils zugehörigen Rohrleitungen, Kanälen oder Rinnen in Gang setzen. Unterwegs werden Schalter und Mechanismen passiert, die spezielle Funktionen starten. Das Ganze wird jeweils beendet, wenn die Kugeln ihr tiefstes Niveau erreicht haben. An dieser Stelle ist Energie von außen nötig, um sie wieder in ihre Ausgangsposition zu bringen. Jede Aktion an einer der Kontaktstellen oder Schalter kann nur dann stattfinden, wenn vorher genau die Abfolge der Kugelbewegungen erfolgt ist, die zur weiteren Reaktion notwendig ist. Was in dem komplizierten Spielkasten mechanisch abläuft, erfolgt in der Zelle nacheinander durch chemische Reaktionen. Fällt eine Reaktion aus, das würde dem Verklemmen einer Kugel auf ihrem Weg nach unten entsprechen, bricht die Folge ab und das System stirbt. Was wir heute sehen, ist in Anlehnung an dieses Rollbahnmodell eine unendliche Anzahl verzweigter Bahnen, auf denen ständig Bewegung durch rollende Kugeln stattfindet. Die Energie, die notwendig ist, um die Kugeln immer wieder in ihre höchsten Positionen zu bekommen, wird durch gezielte Aufnahme von außen in Form von Nahrung gedeckt.

Aus der heutigen Anzahl an Rollbahnen und deren Abhängigkeiten zueinander auf die Anfänge dieses System zu schließen, ist bisher nicht gelungen und erscheint unmöglich. Gesucht wird die erste Bahn mit der ersten Kugel, nach der sich alle weiteren Bahnen entwickelten. Hierbei muss es nicht

in Zahlen zu beziffernde Versuche gegeben haben, diese erste Bahn mit immer neuen Varianten zu kombinieren. Nur die einzelne Kombination, die eine Fortschreibung des Prinzips erlaubte, blieb erhalten. Alle anderen Ansätze wurden zwangsläufig abgebrochen.

## Die Rohstoffe

Das Verständnis zum Entstehen des Lebens lässt sich am leichtesten gewinnen, wenn Beispiele aus der uns bekannten technischen Welt herangezogen werden. Am ehesten bietet sich hierfür die Entwicklung der Fortbewegungsmittel an. Lange bevor es das erste Auto gab, wurden in verschiedenen Teilen der Welt Erfahrungen mit Werkstoffen, speziell dem Eisen oder auch mit Substanzen wie Erdöl und später Gummi arabicum gewonnen. Das Rad als technisches Hilfsmittel, Kabel für Elektrizität, Blech- und Glastechnik für Gehäuse und Scheiben, die Kenntnisse zu all diesen Komponenten waren erforderlich, um das erste Auto zu bauen. Material und Kenntnisse mussten an einer Stelle konzentriert zur gleichen Zeit zusammengeführt werden. Schnell mutierten die primitiven ersten Fahrzeuge zu leistungsfähigen Autos. Parallel drängten die Motoren in andere Transportmittel, in Schiffe, Flugzeuge, U-Boote oder Motorräder. Die Evolution in der Technik, gesteuert unter anderem durch das Kaufverhalten und politische Vorgaben, führte zu immer diffizileren Produkten. Die, die nicht mithalten konnten, wurden vom Markt genommen. Die Evolution der Tierwelt führte in ähnlicher Weise zur Inbesitznahme der Räume Wasser, Land und Luft.

Das Analogon aus der Technik zeigt auf, dass die für eine Zelle notwendigen Moleküle nicht an der Stelle gebildet werden mussten, an der sie für komplexere größere Komponenten gebraucht wurden. Notwendig waren das Zusammenführen in einem Reaktionsraum und

das Ansammeln zu einer Konzentration, die überhaupt erst notwendige Reaktionen ermöglichte. Es ist nicht vorstellbar, wieviel Reaktionsversuche notwendig waren, um die ersten funktionsfähigen Teile der „biologischen Rollbahn“ zu erhalten. Sicher ist jedoch, dass es eine ständige Zufuhr von Komponenten gegeben haben muss, mit denen experimentiert werden konnte, ohne ein Defizit zu erzeugen. Andererseits entstanden aus den Fehlversuchen nahezu zu 100 Prozent Abfallprodukte, die beseitigt werden mussten. Eine zu hohe Konzentration organischer Moleküle führt zu einem Erstickender Reaktionsprozesse. Dieser Vorgang wurde erst in jüngster Zeit erkannt und wird als Teerproblem bezeichnet [1].

### Die Historie

Die bis hier aufgezeigten Aspekte sind das Ergebnis vorangegangener Forschungen zum Thema Entstehung des Lebens. Während die älteren Arbeiten eher theoretische Ansätze verfolgten, gab es mit einem der bekanntesten Experimente der Wissenschaft einen ersten Hinweis auf die Möglichkeit, unter den Bedingungen der frühen Erde tatsächlich Bausteine des Lebens zu erhalten. Durchgeführt wurde das Experiment von den Chemikern Stanley Miller und Harold C. Urey. In einer Versuchsanordnung, bei der eine angenommene Uratmosphäre elektrischen Entladungen ausgesetzt worden war, gelang es ihnen, aus Methan und anorganischen Verbindungen Aminosäuren und einfache Fettsäuren zu gewinnen [2]. Für eine weiterführende Betrachtung gab es viele Probleme, die unter anderem mit der Unsicherheit der Zusammensetzung der Atmosphäre und den viel zu geringen Konzentrationen der entstandenen Moleküle in einem Ozean zusammen hingen. Aus diesen Gründen wurden zahlreiche weitere Möglichkeiten für die Herkunft organischer Moleküle gesucht und unterschiedlichste



Ansätze hierzu veröffentlicht. Prominente Beispiele sind die Entstehung organischer Moleküle im Weltall und deren Transport zur Erde durch Meteoriten [3], ihre Bildung in heißen Tümpeln oberhalb des Meeresspiegels [4] oder im Umfeld von Weißen oder Schwarzen Rauchern [5]. Dabei handelt es sich um erst seit einigen Jahrzehnten bekannte hydrothermale, metallsulfidbeladene Quellen auf dem Grund der Ozeane. Zahlreiche Reaktionen in Verbindung mit mineralischen Oberflächen von Tonen oder Eisensulfiden (Pyrit) wurden untersucht. Sie alle brachten interessante Teilergebnisse, die zeigten, dass auf der Ur-Erde eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Entwicklung organischer Verbindungen bestand. Allerdings waren es bisher immer singuläre Ansätze, denen eine Anbindung an das Gesamtprojekt Zelle fehlte. So wurde zum Beispiel das Problem der Molekülkonzentration unter dem Aspekt der Eisbildung untersucht. Kleinste Flüssigkeitsreste können während des Gefrierprozesses in die aus Süßwasser bestehenden Eiskristalle eingeschlossen werden und hohe Konzentrationen der im Ausgangswasser vorhandener Substanzen erreichen. Allerdings fehlt auch hier die Antwort auf die Frage, wo und wie die notwendigen Moleküle entstanden und ob sie überhaupt im Wasser vorlagen.

### Die Forschung an der Universität Duisburg-Essen

Die Probleme und Fragezeichen, die sich aus den bisherigen Modellvorstellungen zur Entstehung des Lebens ergeben haben, führten zu Überlegungen, einen bisher völlig außer Acht gelassenen Raum für diese Thematik zu betrachten: tiefreichende, wassergefüllte Bruchzonen der kontinentalen Erdkruste. Auslöser waren Untersuchungen zu speziellen tektonischen Strukturen in der Eifel in den Jahren nach der Jahrtausendwende. Dort wurden

Seitenverschiebungen gefunden, die senkrechte, bis in den Erdmantel reichende Bruchzonen darstellen. Sie bilden vielerorts Kanäle zur Tiefe, aus denen auch heute noch Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Spurengase (Ammoniak,  $\text{NH}_3$ , Wasserstoff,  $\text{H}_2$ , Edelgase) austreten. An ihnen stiegen Magmen auf, die an der Oberfläche als Laven ausflossen und die quartären Vulkane der West- und Ostifel speisten. Die Bruchzonen sind mit Fluiden, mineralisierten Wässern und Gasen gefüllt. Sie stellen hydrothermale Systeme mit deutlich zunehmenden Temperaturen und Drucken zur Tiefe dar. In ihnen kristallisieren Minerale wie Quarz oder Kalzit, die die Öffnungen einengen oder ganz verschließen. Erdbebenaktivitäten mit geringsten Stärken halten diese Bahnen offen, sodass über Zeiträume von Zehn oder Hunderten Millionen Jahre ein ständiger Stoffaustausch gegeben ist.

Irgendwann kam die Frage auf, ob die heutigen Verhältnisse nicht teilweise auch auf die junge Erde mit bereits ersten gebildeten kleinen Kontinenten übertragen werden

kann. Die kontinentale Kruste ist von besonderer Bedeutung. Sie ist heute im Durchschnitt 30 Kilometer mächtig, sehr inhomogen aus einer großen Vielfalt an Gesteinstypen aufgebaut und kühler als die ozeanische Kruste. Bei letzterer liegen die Mächtigkeiten von wenigen Kilometern nahe der ozeanischen Rücken bis etwas über zehn Kilometer in den alten Krustenteilen nahe der Subduktionszonen. Eine plausible Abschätzung der kontinentalen Krustenentwicklung zeigt, dass vor vier Milliarden Jahren bereits 25 Prozent der heutigen kontinentalen Kruste vorhanden war [6]. Die restliche äußere Hülle der Erde bestand aus einer wenige Kilometer mächtigen ozeanischen Kruste. Das heißt, sie war ausschließlich aus basaltischem Gestein zusammengesetzt und wesentlich heißer als die kontinentale Kruste. Diese hatte im betrachteten Zeitraum allerdings einen höheren geothermischen Gradienten, der vielleicht doppelt so hoch war wie der heutige. Auf jeden Fall gab es einen ausreichend hohen Anteil kontinentaler Kruste, die aus tektonischen Gründen Bruchzonen besessen haben musste. Sie wurden



(1) Hochdruckanlage zur Simulation von Verhältnissen innerhalb der Erdkruste bis 10 km Tiefe. Die eigentliche Hochdruckzelle befindet sich in dem schwarzen Zylinder links von der Bildmitte. Sie erlaubt die kontinuierliche Beobachtung von Reaktionen sowie die Zugabe und Entnahme von Substanzen bei einem konstanten Druck von bis zu 1.000 bar. Quelle: Ulrich Schreiber, auf dem Bild zu sehen ist Dr. Maria Davila Garvin

wie die heutigen als Aufstiegswege für Gase und Magmen genutzt.

Die heutigen Seitenverschiebungen zeichnen nur ein schwaches Abbild der Situation, wie sie bei Bruchzonen der jungen kontinentalen Kruste vorhanden gewesen sein musste. Ein wesentlicher Anteil der atmosphärischen Gase wurde von Beginn an durch diese Störungszonen aus dem Mantel abgegeben. Sie waren die Ausgangssubstanzen der organischen Chemie. Das bedeutet, dass die Rohstoffe für die biologische Entwicklung in einer unbegrenzten Menge zur Verfügung standen. Hierzu gehören Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff, Wasserstoff, Ammoniak oder auch Schwefelverbindungen.

In der technischen Chemie werden mit Hilfe der Fischer/Tropsch-Synthese unter hohen Drucken und Temperaturen aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff langkettige organische Moleküle hergestellt (z.B. für Benzin). Verschiedene metallische Katalysatoren sorgen für eine hohe Ausbeute bei der Reaktion. Gleiche Voraussetzungen sind und waren in der Erdkruste vorhanden. Die Bruchzonen sind rau und bieten eine hohe Zahl an kleinen Vorsprüngen und Taschen, in denen sich aufsteigende Gase sammeln können. Gase nehmen ab einer spezifischen Temperatur und einem spezifischen Druck einen besonderen Phasenzustand ein. Sie werden überkritisch, ihre Dichte beträgt etwa die Hälfte von der einer Flüssigkeit. Für  $\text{CO}_2$  findet der Übergang in der Kruste ab etwa 750 Metern Tiefe statt. Darunter verhält sich das überkritische  $\text{CO}_2$  wie ein organisches Lösungsmittel, das gleichzeitig eine sehr niedrige Oberflächenspannung besitzt. In ihm können unpolare organische Substanzen gelöst werden, die im Wasser nicht löslich sind. Da die Dichte von überkritischem  $\text{CO}_2$  geringer ist als Wasser, steigt es aus der Tiefe in Form von Tropfen auf und transportiert Moleküle zur Oberfläche, die unter höheren Dru-



(2) Ca. 3 Mia. Jahre altes Sedimentgestein (Konglomerat) mit hydrothermalen Quarzgeröllen, Jack Hills, Australien.  
Quelle: Ulrich Schreiber

cken und Temperaturen gebildet wurden. Sammeln sich diese Tropfen in den Taschen und Vorsprüngen der Störungszone, entstehen jedes Mal kleine Autoklaven. In ihnen und besonders an der Grenzfläche zum Wasser sind Reaktionen möglich, die im Wasser allein nicht stattfinden können. Zwischen 1.000 und 750 Metern Tiefe, je nach Dichte der überstehenden Wassersäule, werden die überkritischen  $\text{CO}_2$ -Tröpfchen unterkritisch. Es entsteht  $\text{CO}_2$ -Gas, eine neue Phase, in dem die organischen Bestandteile nicht mehr in Lösung gehalten werden können. Die Substanzen fallen aus und konzentrieren sich in der verbliebenen wässrigen Lösung und in ebenfalls vorhandenen kleinen Autoklaven an der Grenzfläche von Wasser zu Gas. In der Gasphase bilden sich kleine, durch oberflächenaktive Bestandteile stabilisierte Wassertropfen, die an der Grenze zur wässrigen Phase in zellähnliche Gebilde (Vesikel) übergehen. Diese wiederum reichern weiteres organisches Material in ihren Membranen an.

Ein entscheidender Rohstoff für die Bildung der RNA oder DNA ist Phosphor beziehungsweise Phosphat. Phosphat verbindet sich an der Erdoberfläche mit

Kalzium zu dem schwerlöslichen Mineral Apatit und steht möglichen organisch-chemischen Entwicklungen nicht mehr zur Verfügung. Die kontinentale Kruste ist aus verschiedensten Gesteinen aufgebaut, in denen Apatit teilweise als Hauptmineral vorkommt. Kommt Apatit mit heißen hydrothermalen Lösungen in Kontakt, löst es sich auf und liefert somit den notwendigen Rohstoff, der als Rückgrat der RNA und DNA eine Schlüsselfunktion besitzt. Somit sind in tiefreichenden, gasführenden Bruchzonen alle erforderlichen Ausgangsstoffe in großer Menge verfügbar. Sie können in unterschiedlichen Tiefen mit unterschiedlichen Druck/Temperaturbedingungen und pH-Werten zu größeren Molekülen reagieren, mit aufsteigenden Fluiden transportiert und in einer schmalen Zone aufkonzentriert werden. Dass Lipide, Aminosäuren und organische Basen unter hydrothermalen Bedingungen gebildet werden können, ist bereits durch Experimente belegt.

### Versuche

Es wird deutlich, dass die Störungszonen der kontinentalen Kruste mit Kontakt zum Erdmantel ideale



Voraussetzungen für organisch-chemische Reaktionen bieten. Von Vorteil ist weiterhin, dass die Verhältnisse über sehr lange Zeiträume, Zehner Millionen Jahre, stabil sind, keine zerstörerische UV-Strahlung auftritt und Meteoriteneinschläge geringen Einfluss haben. Bedingungen, die man an der Erdoberfläche vergeblich sucht. Es liegt nahe, dass mit der Kenntnis relativ gut definierter Rahmenbedingungen Experimente durchgeführt werden können, die Zugang zu einzelnen Entwicklungsschritten für die Entstehung des Lebens ermöglichen. Aus diesem Grund wurde an der Universität Duisburg-Essen eine Hochdruckanlage angeschafft, mit der in einer Reaktionskammer Bedingungen der Verhältnisse simuliert werden können, wie sie in den obersten zehn Kilometern der kontinentalen Kruste auftreten (Abb. 1). Die Kammer wird für die Experimente zur einen Hälfte mit Wasser befüllt, die andere Hälfte mit  $\text{CO}_2$ , das bis in den überkritischen Zustand komprimiert wird. Hineingegeben werden organische Moleküle wie Fettsäuren, Aminosäuren oder RNA-Bausteine, je

nach Fragestellung und verfügbarer anschließender Analysemöglichkeit.

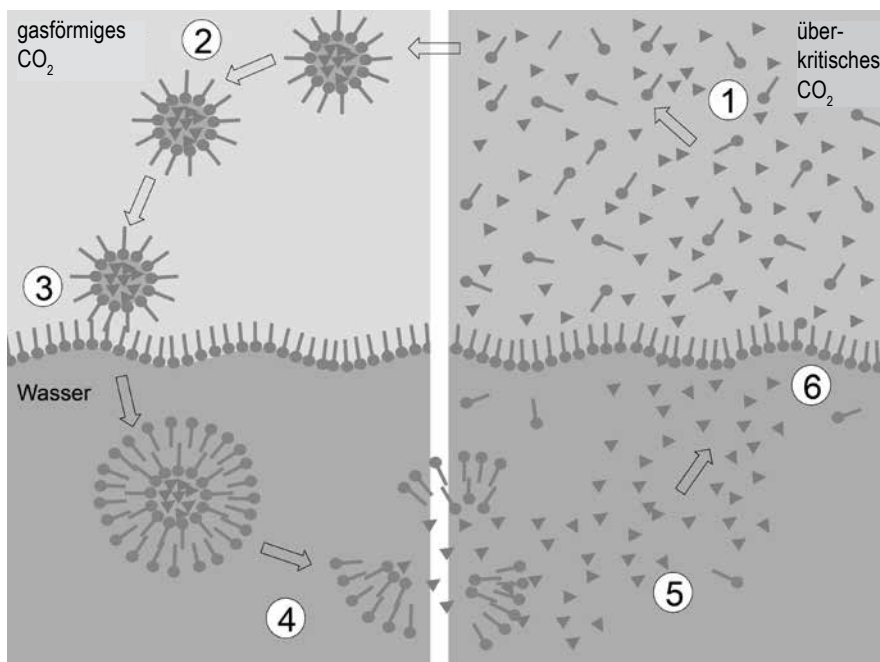
### Die Rückkopplung

Aus hydrothermalen Lösungen kristallisieren in der Erdkruste bei Abkühlung Minerale wie zum Beispiel Quarz aus, die mit genügend Raum zum Wachsen gut ausgebildete Bergkristalle bilden. Sind sie milchig trüb, enthalten sie Flüssigkeitseinschlüsse, die aus dem Wasser-Gas-Gemisch bestehen, wie es zur Zeit des Wachstums in der Zone vorhanden war. Aus diesen Überlegungen wird deutlich, dass es „eingefrorene“ Dokumente über die organische Chemie in hydrothermalen Quarzen geben muss, die aus der Zeit stammen, in der sie kristallisiert sind. Je älter die Quarze sind, desto mehr nähert man sich der Zeit, in der es noch keine biologische Aktivität an der Erdoberfläche gab. Aus diesem Ansatz heraus wurden in zwei Geländekampagnen in Australien präkambrische Quarze beprobt, um deren Flüssigkeitseinschlüsse auf organische Komponenten zu analysieren. Besonders interessant waren hierbei Quarzgerölle eines Konglo-

merats, das in einer drei Milliarden Jahre alten Schichtenfolge der Jack Hills in Westaustralien vorkommt (Abb. 2). In diesem Sedimentgestein wurden bereits die ältesten Zirkone der Erde mit einem Alter von 4,3 Milliarden Jahren gefunden [7]. Die Zirkone sind wie alle Komponenten eines Sediments an anderer Stelle entstanden, später durch die Erosion freigelegt und zum Ort der Sedimentation transportiert worden. Genauso wie auch die einzelnen Quarzgerölle, deren Alter nicht näher bestimmbar ist. Bei der Analyse der Quarze besteht aber die Chance, dass neben wenig mehr als drei Milliarden Jahre alten Geröllen auch solche dabei sind, die noch vor dem Auftreten von LUCA in den Spalten kristallisierten, vielleicht vor mehr als vier Milliarden Jahren, und erst später freigelegt, abgetragen und beim Transport gerundet wurden. Können nachfolgende Kontaminationen ausgeschlossen werden, was zum Beispiel durch Kontrolle der Isotopenzusammensetzung möglich ist, liegen in diesen Quarzen Dokumente der ersten Entwicklungsschritte in Richtung organischer Chemie oder größerer Moleküle vor.

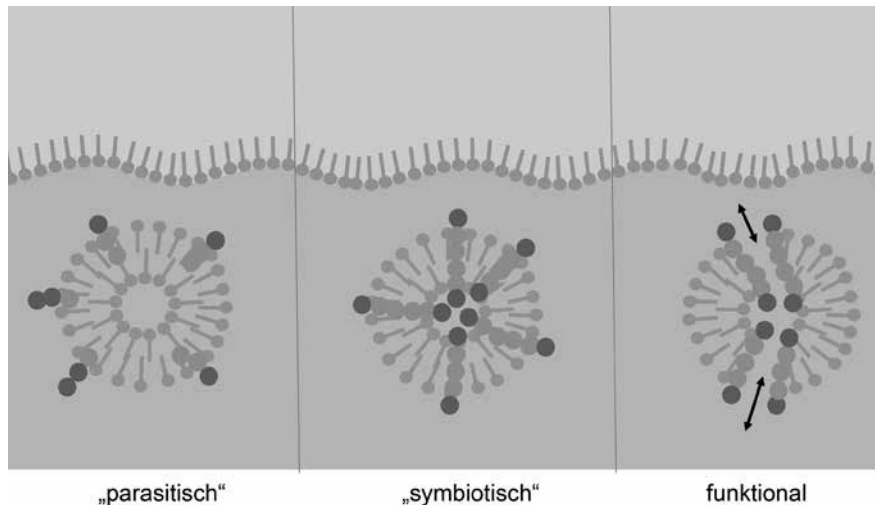
Eine genaue Analyse der Einschlüsse durch Oliver Schmitz (Applied Analytical Chemistry) an der UDE lieferte den Beleg für das Vorhandensein einer reichhaltigen organischen Chemie in dem frühzeitlichen hydrothermalen System der Erdkruste. Sie enthält langkettige Moleküle mit endständigen funktionalen Gruppen ebenso wie kleinere organische Einheiten, die in ähnlicher Form auch im Metabolismus einer lebenden Zelle auftreten. Insgesamt bilden sie die perfekte Mischung, um darauf weitere Schritte der präbiotischen Chemie aufzubauen.

Vielleicht war es Zufall, dass Proben in den Jack Hills genommen wurden, die genau diese Verhältnisse anzeigen. Vielleicht sind aber auch ohnehin die meisten der Gerölle mit einer vergleichbaren Chemie



(3) Schematische Darstellung der zyklischen Entstehung von Vesikeln in einem Wasser- $\text{CO}_2$ -System. Details zum Ablauf sind im Text beschrieben.

Quelle: Christian Mayer



(4) Mögliche Schritte einer Selektion von Peptid-Molekülen im Sinne einer molekularen Evolution: „parasitisch“ (das Peptid ist integriert und vor molekularem Abbau geschützt), „symbiotisch“ (das Peptid ist geschützt, stabilisiert aber auch gleichzeitig das Vesikel), funktional (das Peptid stabilisiert das Vesikel weiter durch Abbau von Konzentrationsgradienten, indem es Kanäle bildet).

Quelle: Christian Mayer

ausgestattet. Eine geplante weitere Probennahme wird es zeigen. Die Flüssigkeitseinschlüsse besitzen eine erstaunlich vielfältige Zusammensetzung, die zum Teil noch deutliche Fragen aufwirft [8]. Die Analysenergebnisse besitzen für weitere Überlegungen und vor allem für die Experimente im Labor einen hohen Wert. Durch sie werden bestimmte Schritte des Modells überprüfbar, eine Möglichkeit, an die in den bisherigen Modellvorstellungen nicht zu denken war.

### Das Vesikel-Experiment

Eine bislang ungeklärte Frage war die Bildung der Vesikel unter präbiotischen Bedingungen, die letztlich die Grundlage einer Zelle bedeutet. Sie vereint alle Komponenten in einem Kompartiment, die zur Reproduktion erforderlich sind. Eine erstaunlich einfache Möglichkeit zeigt sich in einem Experiment in der Hochdruckkammer (Abb. 3). Eine Mischung aus langkettigen Aminen und Fettsäuren (Stecknadelform in Abb. 3), wie sie in den Flüssigkeitseinschlüssen der hydrothermalen Quarze zu erwarten sind, werden in die Reaktionskammer

überführt und unter Temperaturen und Drucken der oberen Kruste gehalten. Mit einem gesteuerten Druckverlust wechselt das vorher überkritische  $\text{CO}_2$  in den gasförmigen Zustand (Schritte 1 und 2 in Abb. 3). Sofort bildet das im überkritischen  $\text{CO}_2$  gelöste Wasser einen Nebel aus zahllosen Wassertröpfchen und sammelt alle organischen Moleküle ein, die nicht mehr im Gas verbleiben können. Die Amine und Fettsäuren bilden eine Hülle auf der Außenhaut und sinken langsam zur Grenzfläche des unteren Wasserkörpers (Schritt 3 in Abb. 3). Auch hier haben sich Amine und Fettsäuren in einer charakteristischen Orientierung angereichert und bilden wie ein Ölfilm auf dem Wasser eine durchgehende Bedeckung der Grenzfläche. Beim Kontakt der sinkenden Wassertröpfchen mit der Grenzfläche umschließt sofort ein Teil des Lipidfilms die ankommenden Tröpfchen mit einer zweiten Hülle (Schritt 4 in Abb. 3). Fertig ist das Vesikel, das in seinem Aufbau der Membranstruktur einer Zelle ähnelt [9]. Es besteht innen aus Wasser mit geringem ionischen und erhöhtem organischen Anteil, außen aus einer Lipid-Doppelschicht, ein Aufbau

der als Grundlage einer Protozelle gelten kann. Der eindeutige Nachweis des Vesikelaufbaus gelang mit Hilfe der Kernresonanzspektroskopie (NMR) [9]. Aus den ersten Messungen ergaben sich darüber hinaus Hinweise auf Konzentrationsgradienten, die in einer späteren Entwicklung der Vesikel als Energiequelle von Bedeutung sind: Die Wassertröpfchen sammeln während der Kondensation im  $\text{CO}_2$ -Gas eine Vielzahl organischer Moleküle ein. Nach dem Absinken in das Wasser ist die Konzentration dieser Moleküle im Tröpfchen gegenüber dem umgebenden Wasser um Größenordnungen höher. Auf der anderen Seite sind in dem kondensierten Wassertröpfchen keine Salze gelöst. Das Wirtswasser in den hydrothermalen Störungszonen ist hieran aber deutlich angereichert. Aus diesen Gefällen könnte eine erste Protozelle die Energie für einen einfachen Metabolismus geschöpft haben. Die Schritte 5 und 6 in Abbildung (3) kennzeichnen den Abbau der Vesikel und den Neubeginn des Lebenszyklus.

In einem weiteren Versuch kann die Bildung und Selektion von einfachen Vorstufen von Proteinen, den Peptiden gezeigt werden. Nach Zugabe von zwölf in hydrothermalen Systemen generierbaren Aminosäuren entstehen kurzkettige Peptide, die innerhalb von Tagen bis Wochen Längen von bis zu 18 Einheiten erreichen. Von besonderem Interesse ist nun die Frage nach einer möglichen Selektion von zum Membranaufbau passenden Peptiden [10]. Ein erster längerfristiger Betrieb der Versuchsanordnungen ergab erste Hinweise, dass eine wechselseitige Beeinflussung von Vesikeln und Peptiden zu einer chemischen Evolution führt, die bereits jetzt schon zu größeren Peptid-Molekülen mit möglichen Funktionen geführt hat (Abb. 4). Die Versuchsreihe hierzu, eine der spannendsten in der Essener Origin-of-Life-Forschung, wird derzeit intensiv weiterbetrieben.





Christian Mayer. Foto: Vladimir Unkovic

## Aussicht

Die begonnenen Experimente in Verbindung mit Analysen präkambri-scher Quarzeinschlüsse zeigen sehr vielversprechend, dass fluidführende Bruchzonen der kontinentalen Erdkruste beste Voraussetzungen für das Experiment „Leben“ geliefert haben. Ergänzende Untersuchungen australischer Quarze können weitere Hinweise auf organisch-chemische Ausgangsstoffe liefern, die eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung des Lebens gespielt haben. Erste Hinweise auf die Existenz komplexerer Moleküle sind in den bislang untersuchten Proben bereits gefunden worden. Darauf aufbauend werden die Laborversuche gezielt auf die Fragestellung der chemischen Evolution ausgerichtet. Neben Experimenten zur Vesikel- und Peptidentstehung wird eine Versuchsreihe zur Verknüpfung von RNA-Bausteinen größeren Raum einnehmen. Hier stellt sich sofort die Frage, wie das Problem der gegenseitigen Abhängigkeit von Funktion der Enzyme und Information der Speicher (RNA, DNA) gelöst werden kann. Mit der Kenntnis der ersten grundlegenden Schritte zur Entstehung des Lebens bietet sich die Chance, schlüssige Vorstellungen zu entwickeln, die letztlich den komplexen Weg bis zum letzten gemeinsamen Vorfahren allen Lebens aufzeigen.

---

## Summary

The research on the origin of life presents a unique challenge for human research as it deals with a singular and possibly unique event which occurred approximately four billion years ago. Not only the processes leading to the first living cell, but even the conditions under which they have evolved are inaccessible to scientific observation and therefore highly speculative. However, a single terrestrial environment is more open

to detailed consideration: the early Earth's crust. In this most outer layer of the planetary body, tectonic fault zones must have existed, systems of interconnected cracks and cavities which were filled with volatile media like water and carbon dioxide. These systems offered large temperature and pressure gradients, a constant supply of hydrothermally formed organic compounds and efficient protection against destructive external influences. All in all, they may have presented the ideal environment for the formation of protocells and early stages of life. In a recent research project at the UDE, an analysis of inclusions in quartz crystals which have formed in this environment exhibited a large variety of organic compounds which could have formed the basis for prebiotic chemistry. In connection with these results, experiments are performed which prove the formation of key cellular ingredients and of primitive cell-like structures under the conditions of fault zones. Moreover, most recent experiments prove a beginning molecular evolution which can lead to stabilizing and potentially functional units in the "cell" membranes.

---

### Anmerkungen/Literatur

- 1) S.A. Benner, H.J. Kim, M.A. Carrigan, „Asphalt, water, and the prebiotic synthesis of ribose, ribonucleotides and RNA. Acc. Chem. Res. 45, 2025 (2011).
- 2) S.L. Miller, "A production of amino acids under possible primitive earth conditions", Science 117, 528 (1953).
- 3) J.G. Lawless, "Amino acids in the Murchison meteorite", Geochim. Cosmochim. Acta 37, 2207 (1973).
- 4) B.R.T. Simoneit, "Prebiotic organic synthesis under hydrothermal conditions: an overview", Adv. Space Res. 33, 88 (2004).
- 5) W. Martin, J. Baross, D. Kelley, M.J. Russell, "Hydrothermal vents and the origin of life", Nature Rev. Microbiol. 6, 805 (2008).
- 6) T.M. Harrison, A.K. Schmitt, M.T. McCulloch, O.M. Lovera, "Early ( $\geq 4.5$  Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, 18O, and Ti

thermometry results for Hadean zircons", Earth Planet Sci Lett 268:476–486 (2008).

- 7) A.J. Cavosie, S.A. Wilde, D. Liu, P.W. Weiblen, J.W. Valley, "Internal zoning and U–Th–Pb chemistry of Jack Hills detrital zircons: a mineral record of early Archean to Mesoproterozoic (4348–1576 Ma) magmatism", Precambrian Res. 135:251–279 (2004).
- 8) U. Schreiber, C. Mayer, O.J. Schmitz, P. Rosendahl, A. Bronja, M. Greule, F. Keppler, I. Mulder, T. Sattler, H.F. Schöler, „Organic compounds in fluid inclusions of Archean quartz – analogues of prebiotic chemistry on early Earth", PLOS ONE 12(6): e0177570
- 9) C. Mayer, U. Schreiber, M.J. Dávila, „Periodic vesicle formation in tectonic fault zones – an ideal scenario for molecular evolution", Origins of Life and Evolution of Biospheres 45, 139 (2015).
- 10) C. Mayer, U. Schreiber, M. Dávila, "Selection of prebiotic molecules in amphiphilic environments", Life 7 (1), 3 (2017).

### Die Autoren

**Ulrich Schreiber** studierte Geologie an der Technischen Universität Clausthal, wo er nach ergänzenden Semestern Chemie 1987 auch seine Promotion über geochemisch/vulkanologische Fragestellungen der Puna Nordwest Argentiniens abschloss. Anschließend war er Assistent und Oberassistent am Geologischen Institut der Universität Bonn. Seine Habilitation galt der Erforschung magmatotektonischer Zusammenhänge des vulkanischen Westerwaldes. 1996 wurde er zum Professor für Allgemeine Geologie an der damaligen Gesamthochschule Essen berufen. Hier übernahm er zwei Mal das Amt des Dekans im Fachbereich 9 vor, bzw. in der Fakultät für Biologie nach der Fusion sowie das des Prorektors in der finalen Phase der Fusion. Schwerpunkte seiner Forschung umfassen neben Untersuchungen zu rezenten Gasaufstiegsprozessen in der Eifel die Standorterfassung von Waldameisen auf gaspermeablen Störungszonen, die Energiespeicherung in stillgelegten Kohlebergwerken (Untertägiges Pumpspeicherwerk) sowie die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Sein besonderes Interesse liegt darüber hinaus an der Erforschung der Entstehung des Lebens.

**Christian Mayer** studierte Chemie an der Universität Stuttgart und der University of Cincinnati, Ohio, USA. Er promovierte im Jahr 1990 am Institut von Prof. Gerd Kothe über die Anwendung von Kernresonanz-Methoden auf biologische Membranen. Nach seiner Promotion arbeitete er abwechselnd in der Zentralen Forschungsabteilung der Fa. Hoechst AG (Frankfurt) sowie im Forschungslabor von Polymer Composites Inc. (Winona, USA). Im Jahr 1996 folgte er einem Ruf an die damalige Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. Mit der Fusion der Universitäten Duisburg und Essen wechselte er an den Standort Essen. Als Professor für Physikalische Chemie beschäftigt er sich unter anderem mit der Anwendung von Methoden

der Kernmagnetischen Resonanzspektroskopie auf Kapseln und Vesikel und seit einigen Jahren auch mit Forschung zur Entstehung des Lebens.

**Oliver J. Schmitz** studierte Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) und promovierte im Jahr 1997 in der Analytischen Chemie bei Prof. Siegm. Gäb. Nach seiner Promotion arbeitete er insgesamt drei Jahre an der LMU München und im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg, bevor er als wissenschaftlicher Assistent zurück an die BUW ging. Dort erhielt er 2009 einen Ruf auf eine W2-Professur für Analytische Chemie und gründete zusammen mit zwei Kollegen die Firma iGenTraX UG. 2011 wurde er einer der zwei Gründungsdirektoren des interdisziplinären Zentrums für Reine und Angewandte Massenspektrometrie bevor er dann 2012 den Ruf auf eine W3-Professur für Angewandte Analytische Chemie an der Universität Duisburg-Essen annahm. 2013 erhielt er den Gerhard-Hesse Preis für Chromatographie und beschäftigt sich in Essen mit der Analyse von komplexen Proben und der Entwicklung von Ionenquellen für die Massenspektrometrie.