

Wie LUCA, die Urzelle des Lebens, entstand

Alle Lebewesen der Erde stammen von einer gemeinsamen Urzelle ab. Doch unter welchen Bedingungen entwickelt sich tote Materie zu Leben? Mit Antworten auf diese Frage unterstützen Biochemiker die Suche nach ausserirdischem Leben.

Von Oliver Mühlemann

Woher kommen wir? Wie ist das Leben entstanden? Plausible Antworten auf diese für unser Selbstverständnis und unsere Weltanschauung so zentralen Fragen haben während der letzten 200 Jahre vor allem die Naturwissenschaften geliefert – allen voran Charles Darwin mit seiner einfachen, eleganten und x-tausendfach bestätigten Evolutionstheorie. Sie erklärt schlüssig, wie sich die heutige Vielfalt an Lebewesen aus gemeinsamen, identischen Urzellen entwickelte: Durch einen sich wiederholenden Prozess von kleinen Veränderungen in einigen Nachkommen dieser Urzellen, bei welchem jeweils diejenigen Formen überlebten, die sich in ihrer Umgebung am besten vermehren konnten.

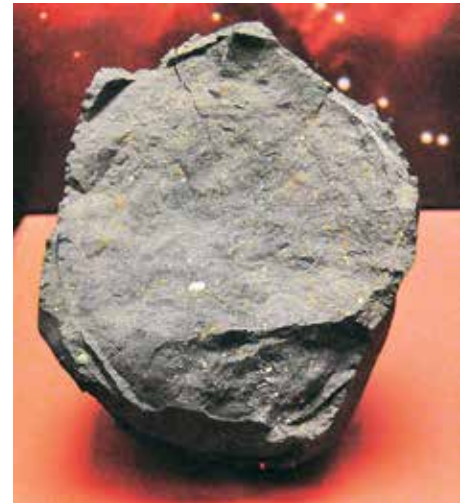
Noch weit weniger klar ist hingegen, wie diese Urzelle entstand, die in der Fachwelt LUCA heisst: «Last Universal Common Ancestor», also «letzter gemeinsamer Vorfahre». Diskutiert werden mehrere Szenarien. Ich beschreibe hier jenes, das gegenwärtig unter den Experten den grössten Konsens genießt.

Bevor wir aber über den Ursprung des Lebens diskutieren können, müssen wir definieren, was wir mit «Leben» überhaupt meinen. Lebende Materie (z. B. Bäume, Bakterien oder Menschen) unterscheidet sich von abiotischer Materie (z. B. Mineralien, Wasser, Luft) dadurch, dass sie sich selber replizieren kann. Dies setzt erstens ein Genom voraus (also ein Informationsspeichersystem) und zweitens einen Stoffwechsel. Dafür muss sich diese minimale Lebensform von der Umgebung, mit der sie Stoffe austauscht, abgrenzen, was in allen uns bekannten Lebensformen durch eine sogenannte Lipidmembran geschieht. Sobald wir ein solches selbstreplizierendes System haben – und sei es auch noch so primitiv –, setzt die oben beschriebene darwinsche Evolution ein. Doch warum sind wir Naturwissenschaftler eigentlich so sicher, dass alles heute bekannte Leben einen gemeinsamen Ursprung hat? Weil die zentralen Moleküle des Lebens, der genetische Code und die chemischen Reak-

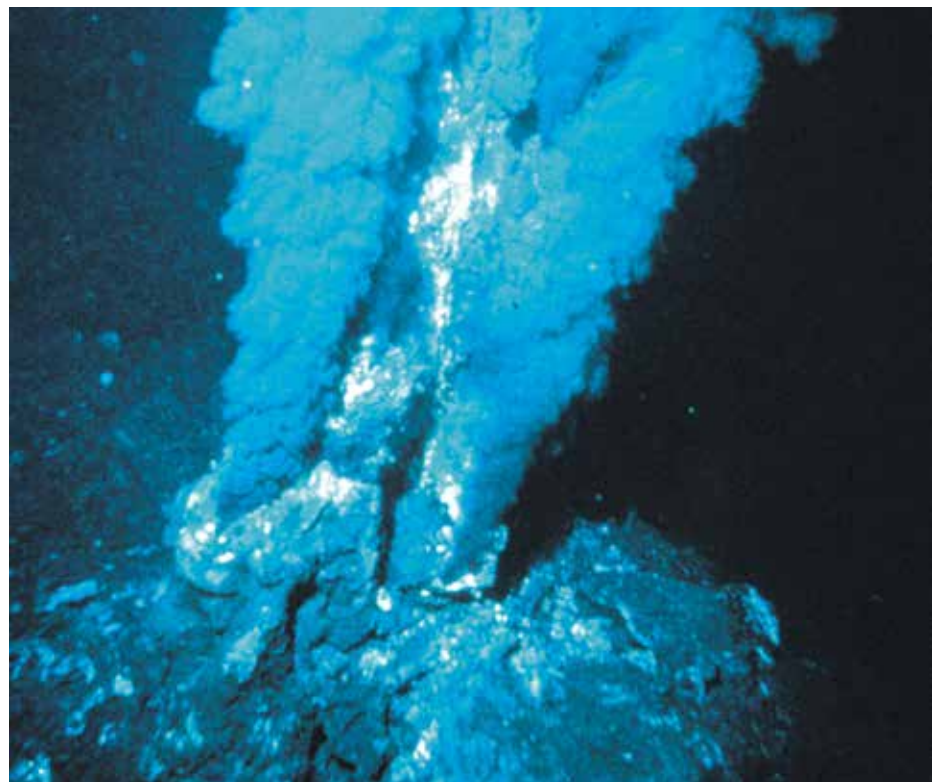
tionen in allen drei Domänen des Lebens (Archaeen, Bakterien und Eukaryonten) dieselben sind.

Stammt LUCA von der Erde oder aus dem All?

In 3,5 Milliarden Jahren alten Sedimenten haben Geologen Ablagerungen gefunden, die von Cyanobakterien ähnlichen Organismen stammen: Dies deutet darauf hin, dass es bereits damals einzellige Lebensformen gab, die wahrscheinlich Photosynthese betrieben. Das ist bemerkenswert früh in der Erdgeschichte, wenn man sich vergegenwärtigt, dass die Erde sich vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aus einer glühenden Gaskugel zu bilden begann. Erst vor rund 4 Milliarden Jahren war diese genügend abgekühlt, dass sich auf der Oberfläche eine feste Kruste bildete und schliesslich



Meteoriten brachten vor rund vier Milliarden Jahren anderswo entstandene organische Moleküle auf die Erde; im Bild ein Stück des 1969 in Australien gelandeten «Murchinson-Meteoriten». Wikimedia Commons



Gleichzeitig entstanden beispielsweise bei Unterwasser-Vulkanausbrüchen auch auf der Erde organische Moleküle. Wikimedia Commons

das Wasser kondensieren konnte, das während der darauffolgenden 200 Millionen Jahre durch unzählige Meteoriteneinschläge auf die Erde transportiert wurde. Somit waren die Umweltbedingungen, die Leben auf der jungen Erde ermöglichen, erst vor 3,8 bis maximal 4 Milliarden Jahren gegeben – und nach geologischen Zeitmassstäben bereits «kurz» danach gab es auf der Erde einzellige Organismen.

Dies lässt zwei verschiedene Interpretationen zu: Entweder konnte LUCA relativ rasch hier auf der Erde aus vorhandenen organischen Verbindungen entstehen. Oder LUCA entstand bereits früher woanders im Universum und ist mit einem Meteoriten hierher gekommen. Die zweite Interpretation hatte in den 1960er Jahren viele Anhänger, weil man damals davon ausging, dass die Entstehung von LUCA ein extrem unwahrscheinliches Ereignis gewesen sein müsse, da viele verschiedene zufällige Prozesse gleichzeitig am gleichen Ort hätten stattfinden müssen. Demnach sei es wahrscheinlicher, dass dies früher woanders im Universum geschehen sei als in einem Zeitfenster von nur 300 Millionen Jahren auf der Erde.

Heute überwiegt die Meinung, dass die Entstehung von Leben wenig mit einem glücklichen Zufall zu tun hat, sondern aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Materie unweigerlich geschieht, sobald erstens flüssiges Wasser, zweitens eine Reihe von organischen Molekülen und drittens anorganische Oberflächen wie etwa Lehm vorhanden sind, die als Katalysatoren chemische Reaktionen begünstigen. Auf dieser heutigen Sichtweise gründet auch die Hypothese, dass Leben mehrfach im Weltall entstanden sein muss und immer wieder entsteht. Am Center for Space and Habitability (CSH) der Universität Bern sucht man deshalb gezielt mit spektroskopischen Methoden nach Signaturen von Leben (z. B. einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre) bei Exoplaneten, die sich in der sogenannten «habitablen Zone» befinden (siehe Seite 23).

Biomoleküle entstehen spontan und vielerorts

Für die Frage, wie aus abiotischen chemischen Reaktionen LUCA entstanden sein könnte, spielt es nur eine untergeordnete Rolle, ob dieser Vorgang auf der Erde oder anderswo stattgefunden hat. Erste experimentelle Hinweise zur möglichen Entstehung von LUCA haben Stanley Miller und Harold Urey in den 1950er Jahren mit ihrem inzwischen weltberühmten «Ursuppen»-Experiment geliefert. Dabei simulierten sie in einem geschlossenen System im Labor die Bedingungen, die wahrscheinlich vor 4 Milliarden Jahren auf der Erde herrschten: Wasser (H₂O) und eine reduzierende Atmosphäre bestehend aus Wasserstoff (H₂), Schwefelwasserstoff (H₂S), Ammoniak (NH₃), Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoff (N₂). Um die damalige andauernde Vulkantätigkeit und die gewaltigen Gewitterstürme zu simulieren, wurde das Wasser in einem Kreislauf verdampft und wieder kondensiert, und mittels Elektroden wurden in der Gasphase Blitze erzeugt. Nachdem Miller und Urey ihr Experiment eine Weile laufen gelassen hatten, analysierten sie ihre Ursuppe und fanden darin eine Vielzahl von organischen Molekülen, unter ihnen viele Bausteine der drei für alle heutigen Organismen zentralen Makromolekülsorten (Nukleinsäuren, Proteine und Lipide).

Das Ursuppenexperiment stützt somit die Hypothese, dass sich auf der frühen Erde spontan die zentralen Bausteine des Lebens (Aminosäuren, Fettsäuren, Purine und Zucker) aus einfachen anorganischen Verbindungen bilden konnten. Ob dies nun eher bei Unterwasservulkanausbrüchen oder in langsam austrocknenden seichten Lagunen geschah, macht keinen wesentlichen Unterschied. Zudem zeigen chemische Analysen von Meteoriten, dass diese ebenfalls viele organischen Moleküle beinhalten. Das belegt erstens, dass diese Moleküle auch andernorts im Universum entstehen, und deutet zweitens darauf hin, dass ein beträchtlicher Teil der organischen

Verbindungen vor rund 4 Milliarden Jahren während des 200 Millionen Jahre andauernden intensiven Meteoriten-Bombardements zur Erde kamen.

Biomoleküle verketteten sich zu RNA-Makromolekülen

Diese einzelnen Lebensbausteine lagerten sich in der Folge an Oberflächen von Tonmineralien an, wodurch sich ebenfalls spontan erste Makromoleküle bilden konnten. In Laborversuchen konnten beispielsweise an der Oberfläche von Montmorillonit (Lavaerde) aus aktivierten Ribonukleotiden, den Bausteinen für Ribonukleinsäuren (RNA), Ketten mit bis zu 50 Nukleotiden polymerisiert werden. RNA ist diejenige Makromolekülsorte, die bei der Entstehung des Lebens wahrscheinlich die Schlüsselrolle gespielt hat: Denn diese linearen Ketten aus vier verschiedenen, durch Phosphodiester verknüpften Ribonukleosiden (Adenosin, Guanosin, Uridin und Cytidin) können sowohl genetische Information speichern als auch als Enzyme funktionieren. In allen heutigen Lebewesen hat die chemisch sehr ähnliche, aber stabilere Desoxyribonukleinsäure (DNA) die Funktion als Speicher der genetischen Information übernommen, nur einige Viren haben auch heute noch ein RNA-Genom (z. B. HIV und das Grippevirus). Die enzymatischen Aktivitäten werden in heutigen Zellen grösstenteils von Proteinen abgedeckt, aber einige ganz alte und zentrale enzymatische Reaktionen wie etwa die Proteinsynthese werden auch heute noch durch RNA katalysiert, was ebenfalls darauf hindeutet, dass LUCA und seine ersten Nachkommen RNA-Enzyme (sogenannte Ribozyme) und noch keine Proteinenzyme hatten.

RNA-Moleküle kopieren sich selbst

Das klassische «Huhn-Ei»-Problem der Genomreplikation, nämlich dass die Replikation des Genoms ein Enzym benötigt, das im Genom selber kodiert sein muss, wird durch RNA mit seiner Doppelfunktion als

Informationsspeicher und Enzym auf elegante Weise gelöst. Man kann sich also das einfachste selbstreplizierende System als ein RNA-Molekül denken, das die Fähigkeit hat, aus Ribonukleotiden eine Kopie von sich selbst zu synthetisieren. Verschiedene Experimente haben die Hypothese, dass Leben mit RNA-basierten Systemen begonnen habe, in den letzten Jahren gestützt, so dass diese Theorie in der Fachwelt heute breit akzeptiert ist.

Zu unserer eingangs erwähnten Definition von «Leben» gehört aber nebst der Fähigkeit zur Selbstreplikation auch noch ein Stoffwechsel. Deshalb würden wir eine sich selbst replizierende RNA noch nicht als Lebewesen anerkennen, und aus demselben Grund gelten Viren auch nicht als lebendig. Die wichtige Erkenntnis ist hier, dass die Grenze von dem, was wir als lebendig bezeichnen, willkürlich und von unserer Definition des Begriffs «Leben» abhängig ist, dass aber der Übergang von abiotischen Prozessen zu ersten Urzellen eine graduelle Entwicklung darstellt.

Molekül landet in Wasserkügelchen mit Fettsäurenhülle

Ein Stoffwechsel bedingt, wie bereits erwähnt, die Abgrenzung unserer entstehenden Urzelle von der Umwelt. Erst eine Barriere, die einen von der Umwelt abgetrennten Innenraum schafft und somit die freie Diffusion von Molekülen verhindert, ermöglicht die lokale Anreicherung und Abreicherung von verschiedenen Stoffwechselprodukten. Damit haben wir die Zelle als Grundeinheit des Lebens definiert. Da alle heutigen Zellen sich von der Umwelt durch eine Doppelmembran aus wasserabstossenden Fettsäuren mit gegen aussen und innen gerichteten wasserlöslichen Kopfgruppen abgrenzen, können wir davon ausgehen, dass auch LUCA von

einer solchen Lipiddoppelmembran umgeben war. Die dazu nötigen Fettsäuren wurden auf der jungen Erde durch Vulkan-tätigkeit gebildet oder durch Meteoriten aus dem All gebracht.

Da die Fettsäuren nicht wasserlöslich sind, bilden sie eine Schicht auf der Wasseroberfläche von der Dicke eines Moleküls, aus der sich durch Bewegung des Wassers (z. B. durch Rühren im Labor oder durch einen Geysirausbruch auf der jungen Erde) wassergefüllte Kügelchen mit einer aus Fettsäuren gebildeten Doppelmembran-Hülle bilden. Wenn nun solche sogenannten Mizellen zufälligerweise ein oder mehrere RNA-Moleküle mit einer enzymatischen Funktion enthalten, haben wir eine Urzelle mit einem Stoffwechsel.

Überall füllen sich Tümpel mit Leben

Mizellen sind dynamische Gebilde: Sie können durch Einlagerung zusätzlicher Fettsäuren wachsen. Zwei Mizellen, die zusammenstossen, können zu einer grossen Mizelle fusionieren, wobei ihre Inhalte gemischt werden. Und wenn eine Mizelle eine gewisse Grösse erreicht hat, bei der die Oberflächenspannung der Membran zu gross wird, dann teilt sie sich spontan in kleinere Mizellen auf.

Es braucht jetzt nicht mehr viel Fantasie, um sich vorzustellen, wie vor fast 4 Milliarden Jahren in einem Tümpel mit genügend Fettsäuren und Ribonukleotiden eine sich selbstreplizierende RNA in einer Mizelle landete, sich dort drin vermehrte und durch fortlaufende Teilung der Mizellen der Tümpel sich schliesslich mit immer mehr Mizellen mit selbstreplizierenden RNA-Molekülen füllte. Die Replikation der RNA war nicht sehr genau und es passierten bei vielen Kopiervorgängen immer wieder kleinere Veränderungen in der RNA-Sequenz.

Die aufmerksame Leserin hat es wohl erkannt: Wir haben nun bereits eine Urzellenpopulation, die sich nach dem klassischen darwinschen Evolutionsmechanismus immer weiter entwickeln kann. Ein paar dieser veränderten Kopien konnten plötzlich nicht nur sich selber kopieren, sondern auch andere RNA-Moleküle, die sich zufälligerweise in derselben Mizelle befanden, was ungeahnte neue Entwicklungsmöglichkeiten eröffnete. Spätestens ab diesem Zeitpunkt war die Entwicklung von immer komplexeren Zellen in vollem Gang.

LUCA setzt sich durch

Man kann es kaum genug hervorheben: Das hier beschriebene Szenarium ist keine Aneinanderreihung vieler höchst unwahrscheinlicher Ereignisse, sondern hat sich auf der jungen Erde wahrscheinlich tausend- wenn nicht millionenfach abgespielt und spielt sich auch jetzt immer noch überall im Universum ab, wo die Bedingungen für die beschriebenen chemischen Prozesse gegeben sind (auch auf der Erde). Aber ab einem bestimmten Zeitpunkt war eine dieser Urzellenpopulationen so erfolgreich, dass sie alle anderen anfänglich noch existierenden, aber etwas weniger fitten Populationen verdrängt hatte und auch sich immer wieder neu entwickelndes Leben gegen diese bereits weiterentwickelten Zellen keine Chance mehr hatte. Diese erfolgreiche Population war LUCA, der gemeinsame Vorfahre allen uns bekannten Lebens.

Kontakt: Prof. Dr. Oliver Mühlemann, Departement für Chemie und Biochemie, Mitglied im wissenschaftlichen Ausschuss des Center for Space and Habitability, oliver.muehlemann@dcb.unibe.ch