

Chemische und biologische Evolution

Wie das Leben entstand

Obwohl fossile Zeugnisse von Lebewesen nur die letzten rund 600 Millionen Jahre abdecken, können wir dank chemischer Experimente auch die Vorgeschichte rekonstruieren. Dieser Blick in die Vergangenheit wirft zukunftsweisende Fragen nach dem biologischen Sinn des Lebens auf.

Wenn Astrobiologen darüber nachsinnen, wann, wie und wo Leben im Universum entstanden sein könnte, dann dient

klagte ihn die Inquisition der Gotteslästerung an, weil sein Weltbild keinen Platz für das Jenseits und keinen Zeitpunkt für das Jüngste Gericht vorsah. Hinzuzufügen wäre, dass in diesem Weltbild auch der Urknall keinen Platz hätte. Giordano Bruno wurde nach acht Jahren Kerker in Venedig auf dem Scheiterhaufen verbrannt.



Biobuella Wikipedia
Giordano Bruno
1548 – 1600

gh

ihnen die Entwicklung auf der Erde derzeit noch als einziger Anhaltspunkt. Vergleicht man die 4,55 Milliarden Jahre der Erdgeschichte mit einem 24-Stunden-Tag, dann verfügen wir nur zwischen 21 und 24 Uhr über umfassende fossile Dokumente des Lebens. Im gesamten Tagesverlauf davor tappen wir weitgehend im Dunkeln; nur gelegentlich fällt ein Schlaglicht auf bestimmte Stationen der Entstehung und Entwicklung des Lebens.

Bis etwa bis 3 Uhr mögen auf der Erde Bedingungen geherrscht haben, wie wir sie heute von vielen Exoplaneten her kennen: Hohe Temperaturen, ständige elektrische Entladungen in Form von Blitzen, geringer atmosphärischer Druck und ein Gas-

gemisch, das vorwiegend reaktive kohlen- und stickstoffhaltige Moleküle wie Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) enthält. Den Beweis, dass unter genau diesen lebensfeindlichen Bedingungen organische Verbindungen entstehen können, verdanken wir dem kalifornischen Biologen Stanley Miller: Er erzeugte 1952 in seinem berühmten „Ursuppen-Experiment“ unter den Extrembedingungen der frühen Atmosphäre organische Moleküle, insbesondere Nucleotide und Aminosäuren als Bausteine des Lebens. Auf welche Weise daraus aber Nucleinsäuren und Proteine und letztlich fortpflanzungsfähige Lebewesen entstehen können, ist bis heute lediglich Gegenstand von Vermutungen.

Im Zentrum aller Theorien stehen komplexere biochemische Moleküle, allen voran die Ribonucleinsäuren (RNA = *ribonucleic acid*), die an zahlreichen Lebensvorgängen beteiligt sind. Man findet ihre Bausteine als universelle Energiequelle ATP oder als Co-Faktoren NAD und FAD bei enzymatischen Reaktionen. In unterschiedlichen Varianten (mRNA, tRNA, rRNA) vermitteln sie aber vor allem zwischen dem genetischen Bauplan des Lebens (DNA) und seiner funktionellen Umsetzung (Protein).

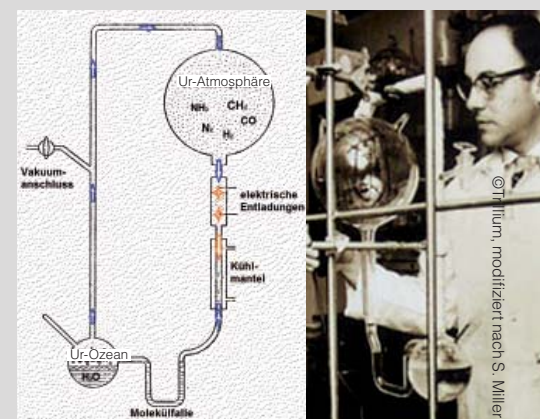
1989 entdeckten die mit dem Nobelpreis ausgezeichneten US-Biochemiker Sidney Altman und Thomas Cech eine ganz besondere RNA-Klasse, die Ribozyme. Diese

sind nicht wie die mRNA reine Vermittler zwischen DNA und Proteinen, sondern vereinigen Struktur und Funktion im selben Molekül. Ribozyme sind somit eine Art „belebter Materie“ und gelten deshalb als molekulare Vorstufe des Lebens. Die 1986 durch den Nobelpreisträger Walter Gilbert aufgestellte und inzwischen weithin akzeptierte „RNA-Welt-Hypothese“ besagt, dass frühe Lebensformen wohl statt der heute bekannten drei Klassen von Biomolekülen (DNA, RNA, Proteine) nur eine einzige Ur-RNA enthielten, die aber schon alle primitiven Lebensfunktionen wie Vermehrung und evolutionäre Anpassung ermöglichte.

Ribozyme sind eine Art „belebter Materie“

Das Ursuppen-Experiment

Stanley Miller leitete Wasserdampf durch ein der Uratmosphäre ähnliches Gasgemisch, das er mit elektrischen Entladungen zündete. Nach etwa einer Woche sammelten sich in einer „Molekülfalle“ verschiedene Nucleinsäure- und Proteinbausteine an.



Diese Hypothese erfuhr im Jahr 2000 eine spektakuläre Bestätigung, als US-Wissenschaftler die Struktur und Funktion der sogenannten Ribosomen aufklärten. Diese RNA-Protein-Komplexe sind die Proteinfabriken aller lebenden Zellen, in denen die einzelne Aminosäuren zu langen Ketten zusammengefügt werden. Für diese grundlegende Funktion des Lebens – und hier liegt der Knackpunkt – benötigen sie ausschließlich RNA; die Proteine sind nur Strukturelemente. Damit liegt der Schluss nahe, dass RNA vor den Proteinen entstand. Erdgeschichtlich kann man die Entstehung der RNA-Welt frühestens auf eine Zeit vor 3,5 Milliarden Jahren – im Zeitraffer also gegen fünf Uhr – datieren, als sich die Erde auf Temperaturen abgekühlt hatte, unter denen hitzeempfindliche RNA stabil ist.

Und dann ging – in erdgeschichtlichen Dimensionen gemessen – plötzlich alles ganz schnell; aus etwa der selben Zeit stammen erste fossile Funde, die auf Photosynthesevorgänge hinweisen: die Stromatolithen (griech. *stroma* = Schicht, *lithos* = Stein).

Zeugen urzeitlichen Lebens

Stromatolithen sind geschichtete Kalkausfällungen, die in Sedimentgesteinen als Folge mikrobieller Photosynthese auftreten (kleines Bild). Die ältesten derartigen Formationen sind 3,5 Milliarden Jahre alt, doch auch heute noch findet man in ökologischen Nischen mit extrem salzhaltigem Wasser Bakterienkolonien, die solche Kalkschichten bilden.



Stromatolithen in Australien. Quelle: Wikipedia

Sie sind das Produkt von Einzellerkolonien (sog. Biofilmen), die unter Sonneneinwirkung CO₂ (Kohlensäure) binden, dadurch ein alkalisches Milieu erzeugen und so unlöslichen Kalk (Kalziumkarbonat) ausfällen.

Direkte fossile Nachweise dieser koloniebildenden Mikroorganismen gibt es nicht. Aber durch Rückwärts-Extrapolation der genetischen Eigenschaften ihrer Nachkommen kann man sich heute ein recht genaues Bild von den letzten gemeinsamen Urahnen machen, aus denen die Vielfalt heutiger Lebensformen hervorgegangen ist; ihr wissenschaftlicher Name ist LUCA (*Last Universal Cellular Ancestor*). Diese Urzelle muss bereits DNA, RNA und Proteine besessen haben, sowie eine recht durchlässige Membran, die den Austausch von Erbinformation erleichterte.

Mehr als 200 ihrer Proteine findet man in leichten Variationen auch in heutigen Zellen wieder, und eine ganze Reihe archaischer Lebensvorgänge, wie die Verwendung von ATP zur Energiegewinnung oder die Proteinbiosynthese durch Ribosomen, müssen wir von LUCA geerbt haben. Was wir *nicht* von LUCA haben, ist die Verwendung von Glycerinestern als Membranlipide; offenbar war die Evolution der Zellmembran zu LUCAs Zeit noch im Fluss; ihre Nachkommen fanden dann ganz unterschiedliche Lösungen für die Optimierung ihrer Barrieren zur Abkapselung von der Außenwelt.

Nach LUCA fächerte sich das Leben auf. Aus Archaeen und Bakterien sowie einer Kombination von Vertretern dieser beiden entstand vermutlich die dritte Domäne, der auch wir Menschen angehören, nämlich die Eukaryonten. Ihr entscheidend neues Merkmal war ein Zellkern, in dem der genetische Bauplan – nun nicht mehr aus RNA, sondern der stabileren DNA bestehend – durch eine zweite Membran sorgfältig geschützt aufbewahrt wird.

Aus der Kenntnis dieser Entwicklungsgeschichte heraus mag man spekulieren, dass der tiefere biologische Sinn und damit vielleicht auch die einfachste Definition des Lebens darin besteht, sich zu replizieren und dabei die eigene genetische Ausstattung an die Nachkommen weiterzugeben. Dies wird im Erfolgsfall von der Evolution belohnt; wer es nicht tut, scheidet aus dem Spiel aus. Treibt man diese Sichtweise ins Extrem, dann lassen sich alle Erscheinungsformen des Lebens, von Einzellern über vielzellige Lebewesen bis hin zu Bienen-, Ameisen- und Menschenstaaten, als Hilfsmittel betrachten, um die eigene DNA besser vermehren zu können.

Geht man noch einen Schritt weiter, dann erfüllen auch die inzwischen ungezählten Würmer und Viren, die den Cyberspace der Computerwelt bevölkern, diese Lebensdefinition zumindest partiell. Ihr genetischer Code besteht zwar nicht aus Nukleotiden, sondern aus Folgen von Nullen und Einsen. Aber obwohl sie nur virtuell existieren, replizieren sich diese „Wesen“ und schützen ihren Code gegen fremde Eingriffe. Für die Vermehrung benötigen sie neben einem Computer auch eine Internet-Verbindung und eine mit Sicherheitslücken behaftete Software; das sind sozusagen die Umweltbedingungen, die den Lebensraum dieser Würmer darstellen. Auch alle Lebewesen auf der Erde sind in der einen oder anderen Weise von Dingen abhängig, die unser Lebensraum zur Verfügung stellt. Mit dem Fortschritt der Technik wird es wohl zunehmend schwieriger, eine Grenze zwischen biologischen und elektronischen „Lebewesen“ zu ziehen. 🌸



Prof. Kevin W. Plaxco

Department for Chemistry & Biochemistry
University of California, Santa Barbara