Entstehung des Lebens Teil 1: Definition von Leben

Unsere Erde unterscheidet sich von den anderen bekannten Planeten vor allem durch eines: Die Existenz von Leben. Natürlich wird es andere Planeten geben, die ebenfalls Leben beherbergen und wer weiß wann, wo und ob wir jemals Kontakt zu außerirdischem Leben haben werden. Doch bleiben wir erstmal auf dem Boden der Tatsachen, bzw. auf der Erde. Diese wird von einer schier unendlichen Vielfalt an Lebensformen bevölkert: Tiere, Pflanzen, Pilze, verschiedenste Formen der Einzeller und Bakterien (Abb. 1).

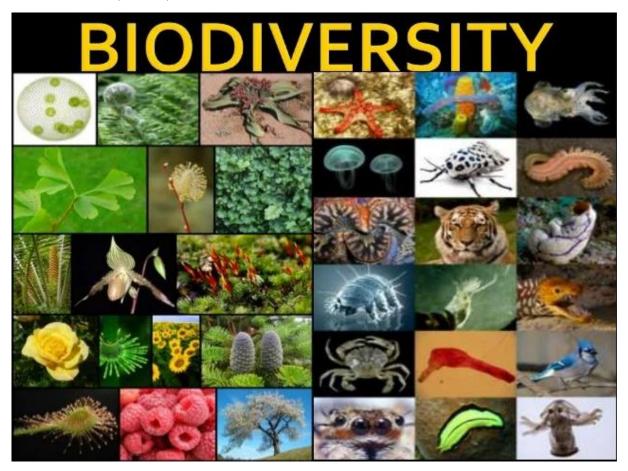


Abb. 1: Die Vielfalt des Lebens

Aber: wie entstand das Leben überhaupt? Dies ist eines der faszinierendsten und umstrittensten Themen der Wissenschaft. Im Gegensatz zu vielen anderen Bereichen der Geschichte des Lebens, haben wir nur wenige Fossilien als Anhaltspunkte. Die ältesten Fossilien, die eindeutig von Lebewesen gebildet wurden, sind Mikrofossilien von Cyanobakterien aus 3,5 Milliarden Jahre alten Gesteinen der Warrawoona-Gruppe in Westaustralien. Zusätzlich zu diesen Mikrofossilien gibt es geschichtete, gewölbte Strukturen, die als Stromatolithen bekannt sind, die von Cyanobakterienmatten (die auch heute noch solche Strukturen produzieren) aus der Warrawoona-Gruppe gebildet werden (Abb. 2). Nur wenig jünger sind zahlreiche noch bessere Mikrofossilien und

Stromatolithen aus Gesteinen in Südafrika, die auf 3,4 Milliarden Jahre datiert sind (Abb. 2).

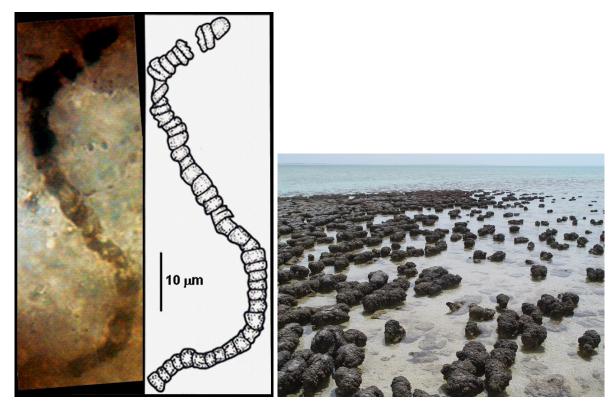


Abb. 2: Links: Fossilien aus der Warrawoona-Gruppe in Westaustralien; rechts: rezente Stromatolithen.

Bei all diesen Mikrofossilien handelt es sich um einfache Fäden mit mehreren Zellen in einer Reihe, von denen viele ausgeprägte Strukturen aufweisen, die sich kaum von ihren modernen Gegenstücken unterscheiden lassen. Wir wissen also mit Sicherheit, dass Bakterien und andere einfache prokaryotische Zellen vor 3,4 bis 3,5 Milliarden Jahren existierten, aber bisher haben wir noch keine älteren Fossilien gefunden. Das ist nicht verwunderlich, denn es gibt nur sehr wenige Orte auf der Erde mit Gesteinen, die älter als 3,5 Milliarden Jahre sind, und die meisten Gesteine, die so alt sind, wurden bereits stark verändert, dass kaum noch Fossilien vorhanden sind. Es gibt Gesteine aus Westgrönland, die charakteristische organische Moleküle enthalten, die einzigartig für lebende Systeme sind, was darauf hindeutet, dass es vor 3,8 Milliarden Jahren Leben gab (Schidlowski et al. 1979; Mojzsis et al. 1996), und dies sind die Gesteine, die auch die möglichen Stromatolithen liefern (Nutman et al. 2016, Abb. 3).

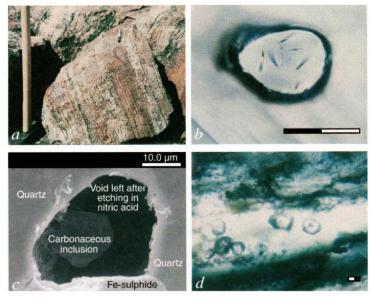
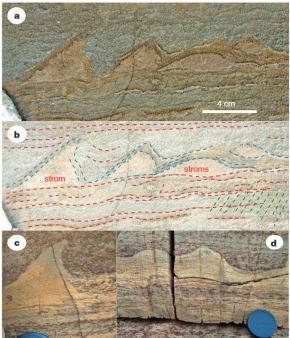


FIG. 1 a, Field exposure of the ≥3,850-yr-old Akilia island BIF³ (collected 150 km south of Isua, 63° 55′ 40″ N, 51° 41′ 30″ W; photograph by A. Nutman) in southern West Greenland, Finely alternating bands of magnetite (dark) and silicates (light) are evident on the broken-off boulder which is part of a \sim 5-m-thick section of BIF (background) on the island; the rock hammer is \sim 40 cm tall. b-d, micrographs of anhedral, oblate apatite grains and associated carbon in early Archaean BIF. b. View of an apatite crystal in amphibole (grunerite), from the Akilia island BIF. The apatite was etched in 2% HNO₃ (120 s at room temperature) to uncover an envelope of opaque carbonaceous matter at the grain boundary; linear features in the crystal are fission tracks from the decay of intrinsic radionuclides revealed by the etching process (b and d are optical micrographs in transmitted light, oil immersion lens, plane polarized). c, Scanning electron micrograph of void left after treating apatite in 2% HNO₃ (1,800s at room temperature), revealing an acidresistant carbonaceous inclusion (centre) typical of those analysed by ion microprobe. d, Quartzitic microband from the Pilbara craton sediments, Western Australia, containing groupings of apatites with cores of organic matter along thin laminae of organic rich chert. Scale bars in b and d, 20 µm: scale bar in c,



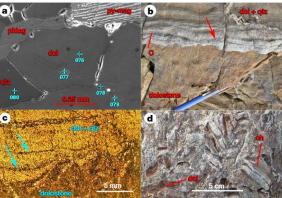


Figure 2 | ISB stromatolite mineralogical textures and site B and C occurrences. a, SEM image showing quartz (qtz) and dolomite (dol) equilibrium, with phlogopite (phlog) and pyrite + magnetite (py-mag). Blue crosses with numerals are energy dispersive spectra analytical sites. b, Site B dolostone (dolostone) has domical interface with cross-laminated dolomitic sandstone (dol + qtz; image top). The red arrow indicates erosional scouring of a layer. 'C' indicates the site of the thin section in c. Pen for scale. c, Photomicrograph from the domical interface, showing draping of phlogopite + dolomite layers (blue arrows) within sediment immediately above a dolostone domical structure. d, Site C breccia with layered chert (ch) and dolomite (dol) jumbled clasts.

Abb. 3: 3,8 Mrd. Jahre alte Fossilien aus Grönland

Sicherlich ist es wahrscheinlich, dass sich das Leben bereits vor 3,8 Milliarden Jahren etabliert hat. Da es sich bei diesen frühesten Fossilien um winzige verkohlte Schichten handelt, die in Hornsteinen und Feuersteinen konserviert sind, liefern sie kaum Hinweise auf die chemischen Prozesse, die zur Entstehung von Leben geführt haben. Alle organischen Verbindungen in ihnen sind längst durch Hitze und Druck in andere Kohlenstoffverbindungen umgewandelt worden (normalerweise reiner Kohlenstoff in Form von Graphit). Wir haben nur ihre Formen, um zu zeigen, dass sie einmal lebendige Dinge waren. Für frühere Stadien dieses Prozesses können wir nicht auf die Fossilienaufzeichnungen zurückgreifen. Stattdessen müssen experimentellen Ansatz wählen, bei dem wir die Beschränkungen nutzen, die uns durch unser Wissen über die Erdgeschichte und die Natur der organischen Chemie auferlegt werden, um mögliche Lösungen zu finden. Natürlich bezeichnen einige Leute (vor allem Kreationisten) dies als "Rätselraten" und weigern sich, irgendeinen der

experimentellen Beweise für das Verständnis der Ursprünge des Lebens zu akzeptieren. Sie ziehen es vor, einfach zu sagen: "Gott hat es getan". Sie können natürlich ihre Meinung äußern, aber die Hypothese des Übernatürlichen ist einfach nicht überprüfbar und führt zu nichts. Die Wissenschaftler haben vielleicht nicht alle Antworten auf dieses sehr komplexe und schwierige Problem, aber sie bleiben nicht untätig oder ergeben sich vor dem unwissenschaftlichen übernatürlichen Ansatz. Sie versuchen ständig neue experimentelle Ansätze und haben (wie wir bald sehen werden) enorme Fortschritte gemacht - viel mehr als den Kreationisten bewusst ist.

Die Wissenschaft, wie das Leben auf der Erde entstanden ist, bezeichnet man als Abiogenese, manchmal auch chemische Evolution genannt.

Wichtig ist hier anzumerken, dass die Abiogenese nicht gleichzusetzen ist mit der Evolutionstheorie Darwins, auch wenn es in vielen Bereichen Überschneidungen gibt. Diese setzt nämlich an, als das Leben schon in einfachsten Formen existierte und sich durch natürliche Auslese an die Umweltbedingungen anpasste.

Das heißt nichts anderes, als dass sich die Evolutionsbiologie mit der Entwicklung der Lebewesen befasst als dieses schon existierte. Sie gibt keinerlei Auskunft über die Entstehung des Universums, unserer Erde oder der Entstehung des Lebens. Auch wenn sicherlich Begriffe wie "chemische Evolution" fallen, so haben sie trotz ihres Namens nichts mit Evolution im eigentlichen Sinne zu tun. Damit es nicht zu Verwechslungen kommt, werde ich den Begriff Abiogenese statt chemischer Evolution nutzen. Natürlich sind auch das Universum, die Elemente und unsere Erde durch natürliche Prozesse entstanden. Hierzu gibt es eine ganze Videoreihe und dazugehörige Texte meinerseits, die ihr euch gerne anschauen könnt. Und wenn die Erde auf natürliche Weise entstanden ist, so trifft dies auch auf das Leben zu.

Leben definieren

Doch zuerst: Was ist eigentlich Leben? Bereits in den 1940er Jahren stellte Erwin Schrödinger die Frage "Was ist Leben?" Sein unter dem gleichen Titel 1944 in englischer Sprache erschienenes Buch "What is Life?" (**Schrödinger**, **1944**, **1984**) beruht auf Vorlesungen, die Schrödinger 1943 an der Universität Dublin gehalten hatte. Er suchte eine Antwort auf die Frage, "Wie lassen sich die Vorgänge in Raum und Zeit, welche in der räumlichen Begrenzung eines lebenden Organismus vor sich gehen, durch die Physik und Chemie erklären?" – Ohne Zweifel hatte dieses Buch einen maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung der modernen Biologie, werden doch bestimmte Entwicklungslinien der Molekularbiologie schon angedeutet.

Welche Merkmale haben wir z. B. auch mit Pflanzen, Pilzen und Bakterien gemeinsam, sodass wir von Leben sprechen können? Die Wissenschaftstheorie fordert von den Wissenschaften die Klärung von Begriffen als eine ihrer wichtigsten Aufgaben. So erhebt sich zwangsläufig die Forderung nach einer Definition des Phänomens "Leben".

Das Paradoxe: es ist gar nicht so einfach eine völlig befriedigende Definition des Lebens zu liefern, die auch wirklich alle Lebewesen miteinschließt – auch in Hinblick auf die Frage, ob und welches Leben es auch außerhalb der Erde gibt. Oder ob z. B.

Viren als Lebewesen gelten oder nicht. Kommen noch Aspekte der künstlichen Intelligenz dazu, wird es sogar noch komplexer.

Erkenntnisse aus philosophischen Überlegungen zur Sprache zeigen, dass Versuche, Leben zu definieren, zu einem Dilemma führen, ähnlich dem, Wasser definieren zu wollen, bevor eine Theorie über Moleküle existierte. Beim Fehlen einer analogen Theorie über die Natur lebender Systeme, ist eine endlose Kontroverse über eine Definition von Leben unvermeidlich (Cleland & Chyba 2002).

Es gibt noch keine, von allen mit diesem Phänomen befassten Wissenschaftlern akzeptierte, eindeutige Definition des Begriffes Leben (**Barrow 1994, Cleland & Chyba, 2002**). Dies ist aber auch kein Wunder, fand man doch bisher mehr als 100 Merkmale und Eigenschaften, die "Leben" charakterisieren (**Clark 2002**). Es gibt aber eine gewisse Übereinstimmung darüber, welche Kennzeichen für ein lebendes System notwendig sind.

Bei der Definition von Leben ergibt sich eine zwingend nötige Beschränkung auf minimales Leben, d. h. auf einfachste Lebensformen. Diese Form von Reduktion ist erforderlich, um zu einer klaren Unterscheidung von Belebtem und Unbelebtem zu kommen. Eine Definition minimalen Lebens erlaubt es, die komplexen Eigenschaften höherer Lebewesen, wie z. B. Bewusstsein, Intelligenz oder Ethik auszusparen und zu ignorieren. Dabei sollte die Unterscheidung von lebend und nichtlebend experimentell möglichst einfach überprüfbar sein und die Definition sollte heutiges Leben, aber auch hypothetische Vor-Lebensformen einschließen. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es eine ganze Reihe an Arbeiten, die sich mit der Definition von Leben befassen, sie sind im Literaturverzeichnis vermerkt (Barrow 1994, Clark 2002, Cleland & Chyba 2002, Eigen 1999; Feinberg & Shapiro 1980, Horowitz & Miller 1962, Kauffman 1996, Luisi 1998, Koshland jr. 2002, Rauchfuß 2005, Ruiz-Mirazo et al. 2004, Schreiber 2019, Smith & Szathmary 1995, 1999).

Wir wollen aber zusammenfassen auf welche Charakteristika von Leben wir uns konzentrieren wollen (Abb. 4).



Abb. 4: Kennzeichen von Lebewesen

- 1. Lebewesen haben einen Stoffwechsel, auch Metabolismus genannt. Der Stoffwechsel ist die Gesamtheit der chemischen Prozesse in einem Lebewesen, die als Folge zur Umwandlung von Stoffen führt und steht damit für die Aufnahme, den Transport und die chemische Umwandlung von Stoffen in einem Organismus sowie die Abgabe von Stoffwechselendprodukten an die Umgebung. Diese biochemischen Vorgänge dienen dem Aufbau und der Erhaltung der Körpersubstanz (Baustoffwechsel) sowie der Energiegewinnung (Energiestoffwechsel) und damit der Aufrechterhaltung der Körperfunktionen.
- Reizbarkeit ist ebenfalls ein Kennzeichen von Lebewesen. Lebewesen können über Rezeptoren physikalische und chemische Reize aus der Umwelt empfangen und entsprechend ihrer artspezifischen Zusammensetzung und Struktur darauf reagieren.
- 3. Lebewesen sind in der Lage sich selbst aufrechtzuerhalten. Man spricht von Homöostase. Homöostase erzeugt ein dynamisches Gleichgewicht und ist damit ein essenzielles Prinzip für die Lebenserhaltung und Funktion eines Organismus.
- 4. Fortpflanzung und Vererbung sind ein weiteres Merkmal von Lebewesen. Die Fortpflanzung stellt sicher, dass Individuen einer neuen Generation entstehen. Man unterscheidet dabei zwischen asexueller und sexueller Vermehrung.
- 5. Lebende Systeme sind durch das funktionale Zusammenwirken von Nukleinsäuren und Proteinen gekennzeichnet. Alle Lebewesen benutzen doppelsträngige Desoxyribonucleinsäuren (DNA) als genetisches Material. Auch die RNA zählt zu den Nukleinsäuren. Die Nukleinsäuren dienen dabei als Vorlage für ihre eigene Synthese und für die Synthese der verschiedenen Proteine. Diese sorgen u.a. durch Stoffwechsel und den Aufbau der Lebewesen.
- 6. Die Nachkommen einer Generation sind nicht mit ihren Eltern identisch. Es gibt also Variation, hervorgerufen durch Mutationen der DNA oder durch Rekombination der Gene durch sexuelle Fortpflanzung und anderen Mechanismen. Variationen sind die Grundlage der Evolution, denn durch verschiedene Umweltbedingungen sind bestimmte Variationen vorteilhafter. Leben erzeugt also nicht nur sich selbst, sondern verändert sich. Evolution ist somit ein ständiger Begleiter des Lebens.
- 7. Leben existiert in Form abgegrenzter Einheiten. Die Zelle stellt den Elementarorganismus der Lebewesen dar. Sie besitzt alle Kennzeichen des Lebendigen. Zellen entstehen aus Zellen durch Teilung oder durch Verschmelzen zweier oder mehrerer Zellen.

Viren werden demnach nicht zu den eigentlichen Lebewesen gezählt, sondern als Zellparasiten betrachtet, da sie nicht alle Merkmale des Lebens erfüllen.

LUCA

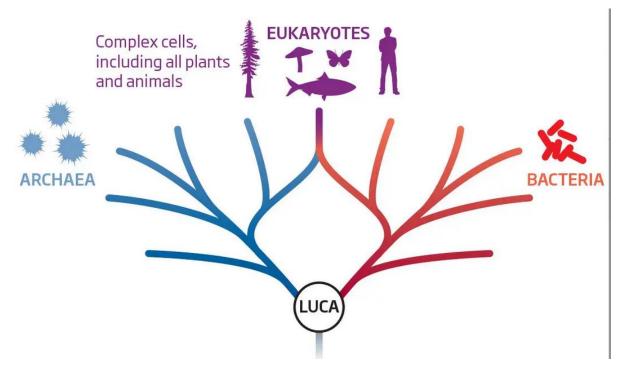


Abb. 5: Last Universal Common Ancestor (LUCA)

Wir haben aufgrund biochemischer Daten gute Gründe anzunehmen, dass sämtliche auf der Erde existierenden Lebewesen von nur einem einzigen Vorfahren abstammen. Es muss eine Zelle gewesen sein, die es zum ersten Mal schaffte, zu wachsen und sich zu teilen, ohne dass die Tochterzellen gleich wieder abstarben. Die Nachkommen mussten so lange überleben, bis sie sich selbst wieder geteilt hatten – ein Prozess, der bis heute fortdauert. Diese erste Zelle wird LUCA genannt (Last Universal Common Ancestor), der letzte gemeinsame Vorfahre aller lebenden Pflanzen, Pilze und Tiere, inklusive der Menschen. Für die Bildung von LUCA muss es bereits lange vorher eine fortwährende Produktion von Molekülen gegeben haben, die die notwendigen Grundbausteine für das Experiment Leben bereitstellten. Hierzu gehören die organischen Basen wie Adenin oder Guanin, Aminosäuren oder die Lipide, die für den Aufbau der Zellwände erforderlich sind. Bausteine allein reichen aber nicht. Benötigt wurden Reaktionsräume, in denen die Versuche zum Zusammenbau komplexerer Verbindungen ablaufen konnten. Es reichten kleine Kavernen oder Porenräume, in denen eine Anreicherung der Moleküle stattfinden konnte. Ihre Konzentration muss mindestens so hoch gewesen sein, dass sie sich untereinander genügend oft trafen und miteinander reagieren konnten. Gefordert war eine sehr große Anzahl von kleinsten Laboratorien – untereinander verknüpft, mit wechselnden Bedingungen, Materialnachschub und einer Müllabfuhr für nicht brauchbare Bestandteile. Hohe Molekülkonzentrationen bergen allerdings auch ein neues Problem: Die Variation, die Anzahl unterschiedlicher Moleküle ist so groß, dass es besonderer Prozesse der Auswahl das funktionsfähige bedarf. um für Leben Verbindungen herauszukristallisieren. Unter solchen Bedingungen muss sich die biologische Zelle LUCA gebildet haben, das erfolgreichste System, das jemals auf der Erde entstanden ist.

Damit soll sich diese Videoreihe befassen. Wir werden versuchen zu ergründen, wie die ersten organischen Moleküle, z. B. Aminosäuren, entstanden sind, wie das Genom und die Stoffwechselprozesse entstanden, wie sich die ersten komplexen Zellen bildeten, aus Einzellern Vielzeller entstehen können und auch warum es sowas wie Sex gibt. Es ist hilfreich, um Wissen aufzufrischen, sich nochmal meine Reihe zur Zellbiologie anzuschauen, bei dem diese grundlegenden Prozesse erklärt werden.

Wir werden aber im nächsten Beitrag erstmal einen kurzen historischen Überblick über die wichtigsten Ideen und Prozesse zur Entstehung des Lebens vorstellen.

Literatur

Barrow J. (1994): Theorien für Alles. Rowolt, Hamburg

Clark B. (2002): Second Astrobiology Conference, NASA-Ames Research Center http://www.astrobiology.com/asc2002/abstrct.html

Cleland, C.E., Chyba, C.F. (2002): Defining 'Life'. Orig Life Evol Biosph 32, 387–393 https://doi.org/10.1023/A:1020503324273

Eigen M. (1995): What will endure of 20th century biology? In: Murphy M. P., O`Neill L. A. J. (eds.): What is Lilfe? – The Next Fifty Years. Cambridge University Press, pp 5-23

Feinberg G., Shapiro R. (1980): Life beyond earth: the intelligent earthling's guide to life in the universe. William Morrow, New York

Horowitz, N. H., Miller, S. L. (1962): Progress in the Chemistry of the Natural Products, 20, 423.

Kauffman, S. A. (1996): At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity. Penguin, London

Koshland, D. E. Jr. (2002): Special essay. The seven pillars of life. Science 22;295(5563):2215-6. doi: 10.1126/science.1068489. PMID: 11910092.

Luisi P. L. (1998): About various definitions of life. Orig Life Evol Biosph. 28(4-6):613-22. doi: 10.1023/a:1006517315105. PMID: 9742731.

Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman, and C. R. L. Friend. (1996): Evidence for life on Earth by 3800 million years ago. Nature 384:55–59.

Nutman, A. P., V. C. Bennett, C. R. L. Friend, M. J. van Kranendonk, and A. R. Chivas (2016): Rapid emergence of life shown by 3700-million-year-old microbial structures. Nature 537:535–538.

Rauchfuß, H. (2005): Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens. Springer, Heidelberg

Ruiz-Mirazo, K., Peretó, J. & Moreno, A. A Universal Definition of Life: Autonomy and Open-Ended Evolution. Orig Life Evol Biosph 34, 323–346 (2004). https://doi.org/10.1023/B:ORIG.0000016440.53346.dc

Schidlowski, M., P. W. U. Appel, R. Eichmann and C. E. Junge (1979): Carbon isotope geochemistry of the 3.7 x 109 yr old Isua sediments, West Greenland; implications for the Archaean carbon and oxygen cycles. Geochimica Cosmochimica Acta 43:189–200.

Schreiber, U. C. (2019): Das Geheimnis um die erste Zelle. Dem Ursprung des Lebens auf der Spur. Springer

Schrödinger E (1944) What is Life? Cambridge University Press

Schrödinger E (1987) Was ist Leben? Piper, München

Szathmáry, E., Smith, J. The major evolutionary transitions. Nature 374, 227–232 (1995). https://doi.org/10.1038/374227a0

Szathmáry, E., Smith, J. (1999): The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language.. Oxford University Press