

Informationsmaterial

Die Entwicklung der Urerde – Vom Urknall bis zu ersten lebenden Zellen

In der ersten Millionstel Sekunde nach dem Urknall müssen sich die vier fundamentalen Kräfte gebildet haben: die Gravitationskraft, die elektromagnetische Kraft sowie die Starke und die Schwache Kraft. Nach etwa einer Tausendstel Sekunde, bei ungefähr 1 Billion Grad entstanden aus Strahlungsenergie Protonen, Neutronen und Elektronen – die Bauteile der Atome – sowie andere Teilchen und deren Antimaterie. Was nach 1 Minute von Materie und Antimaterie, die sich gegenseitig fast völlig auslöschen, übrigblieb, bildete die Kerne von Wasserstoff, Deuterium und Helium und damit die Grundlage aller heute noch vorhandenen Materie. Ein paar hunderttausend Jahre nach dem Urknall war das Universum noch immer 3000 Grad heiß, aus den Atomkernen entstanden die Elemente Wasserstoff und Helium, der Elektronennebel verzog sich, die Materie verklumpete – es entstanden Sterne und Galaxien.

Durch Kernfusionen entstanden auf den Sternen die „leichteren“ Elemente, Sternenexplosionen (Supernovas) ließen auch „schwerere“ Elemente entstehen. Als Folge einer solchen Supernova bildeten sich aus der verbliebenen Materie unsere Sonne und die Planeten unseres Sonnensystems.

Die ersten 700 Millionen Jahre der Erdgeschichte werden auch als formative Phase bezeichnet: Meteoriten- und Kometeneinschläge wirken maßgeblich auf die Entwicklung und Gestaltung der Erde ein (Thoms 2005).

Die Uratmosphäre

Die Atmosphäre bestand (wahrscheinlich) zunächst nur aus Wasserstoff und Helium. Die Gase konnten aufgrund ihrer Leichtigkeit von der Gravitationskraft der Erde nicht festgehalten werden und verflüchtigten sich in den Weltraum. Vulkanische Entgasungen der Erde und der Einschlag von Meteoriten und Kometen bewirkten die Entstehung einer zweiten Atmosphäre, in der Kohlendioxid und Wasserdampf dominierten (Thoms 2005). Alle bisher entwickelten Modelle über die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre der Urerde sind allerdings hypothetisch. Luftproben aus dieser Entwicklungsphase der Erde stehen für Analysen nicht zur Verfügung und auch die ersten Gesteine liefern nur Informationen mit beschränkter Aussagekraft (Rauchfuß 2005). Die Erdatmosphäre hat sich in ihrer Zusammensetzung einige Male drastisch verändert. Es gilt aber als sicher, dass die Uratmosphäre keinen freien Sauerstoff enthielt. Die These von der stark reduzierenden

Ursprung des Lebens – Die Entwicklung der Uerde (Information)

Uratmosphäre wurde durch die sensationellen Experimente von Urey und Miller (Miller 1953) bestätigt. Doch bereits 2 Jahre zuvor, im Jahr 1951, wies der amerikanische Geochemiker William Rubrey darauf hin, dass höchstwahrscheinlich insbesondere vulkanische Ausgasungen (Exhalationen) mit hohem CO₂-Anteil die Hauptquelle für die Gase der Uratmosphäre darstellten.

Der Urozean (die Hydrosphäre)

Unumstritten stellt flüssiges Wasser die wichtigste Voraussetzung für alle Phasen der Biogenese dar. Wasser zeichnet sich durch eine Reihe von außergewöhnlichen Eigenschaften aus. Es müsste, entsprechend seinem Molekulargewicht, unter den Standardbedingungen unserer Erde wie H₂S, CO₂ und SO₂ ebenfalls als Gas vorliegen. Den flüssigen Zustand verdankt Wasser der Ausbildung von Wasserstoffbrücken zwischen den H₂O-Molekülen. Die hervorragenden Eigenschaften als Lösungsmittel sind in der polaren Natur der Wassermoleküle begründet. Die Wechselwirkungen biochemisch wichtiger Substanzen mit Wasser verlaufen äußerst komplex (Rauchfuß 2005).

Wasser kommt in allen drei Aggregatzuständen fast überall im Kosmos vor: Als Eis oder in flüssiger Phase auf den Satelliten des äußeren Sonnensystems einschließlich der Saturnringe, in Gasform in den Atmosphären von Venus, Mars, Jupiter und auch bei Kometen. Die Sonderstellung der Erde unter den terrestrischen Planeten (Erde, Mars, Venus) zeigt sich insbesondere in der Verfügbarkeit von freiem Wasser. Auf Venus und Mars konnte bisher praktisch noch kein freies Wasser nachgewiesen werden.

Auf die Frage wie das Wasser auf die sich bildende Erde gelangte, gibt es bisher noch keine gesicherten Antworten. Es werden aber zwei Herkunftsquellen für möglich gehalten:

- (a) eine interne Quelle durch Ausgasung nach Akkretion des Erdkörpers (Akkretion ist das Wachstum durch äußere Anlagerung aufgrund von Gravitations- oder auch Adhäsionskräften) oder
- (b) eine externe Quelle durch Einschläge von wasserhaltigen Kometen und Asteroiden.

Chemische Evolution

Der Prozess der Synthese biochemisch wichtiger Moleküle aus einfachsten Molekülen und einigen chemischen Elementen unter den (hypothetischen) Bedingungen der frühen Erde wird auch als „chemische Evolution“ bezeichnet.

Wissenschaftler gehen heute davon aus, dass sich zunächst kleinere „Baustein“-Moleküle bildeten, wie Amino- und Fettsäuren und auch Nucleinsäurebasen, aus denen dann

Ursprung des Lebens – Die Entwicklung der Uerde (Information)

Makromoleküle entstanden. Für die Entstehung bzw. Quelle dieser „Baustein“-Moleküle werden verschiedene Hypothesen diskutiert, von denen bis heute keine vollständig bestätigt oder widerlegt werden konnte (Rauchfuß 2005):

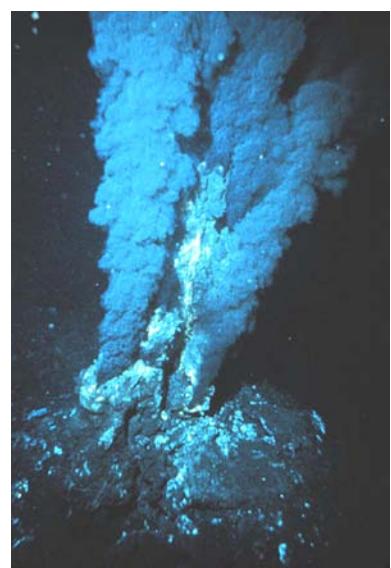
- (i) Die „Baustein“-Moleküle wurden aus kleineren Molekülsorten (CO , CO_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , NH_3 , ...) in der Erd-Atmosphäre, in der Hydrosphäre oder auf der Lithosphäre der jungen Erde gebildet.
- (ii) Die „Baustein“-Moleküle wurden durch Meteoriten oder Kometen auf die Erde transportiert.
- (iii) Eine Kombination dieser Quellen: Durch Meteoriten oder Kometen eingetragene Substanzen wurden auf der Erde weiter umgesetzt und verändert.

Eines der wichtigsten Modell-Experimente zur Synthese der ersten Biomoleküle unter den Bedingungen der präbiotischen Erde stammt von Miller & Urey. Sie simulierten die nach der Oparin-Haldane-Hypothese geforderte reduzierende Uratmosphäre der Erde (Miller 1953) und konnten nachweisen, dass unter diesen Bedingungen tatsächlich Biomoleküle entstehen.

Die Versuche von Miller wurden von vielen Wissenschaftlern immer wieder wiederholt. Einige fügten der Uratmosphäre noch weitere Verbindungen hinzu, andere verwendeten andere Energiequellen. In allen Versuchen entstanden die von Miller entdeckten organischen Biomoleküle. Da Miller 1953 allerdings noch keine differenzierte Analysemethoden hatte, konnte er nur 5 Aminosäuren nachweisen. Millers Nachfolger haben 22 weitere Aminosäure-Varianten nachgewiesen und gezeigt, dass nach einer Zeitspanne von mehreren Tagen sogar **Nukleotide**, **Monosaccharide** und **Fettsäuren** durch chemische Reaktionen und verschiedene Zwischenschritte entstehen können. Millers Experiment wurde damit zur Grundlage der experimentellen Erforschung der chemischen Evolution.

Mittlerweile weiß man jedoch, dass die Uratmosphäre nicht so aufgebaut war, wie Miller es angenommen hatte. Zudem wird angenommen, dass die organischen Biomoleküle höchst wahrscheinlich auch nicht in der Atmosphäre entstanden sind, sondern an Orten, die den Bedingungen des Experiments sehr ähnlich sind: unterirdische heiße Vulkanschlote, die man „**Schwarze Raucher**“ nennt.

Die ersten Zellen könnten in den Poren und Hohlräumen von Mineralien am Rand dieser „**Schwarzen Raucher**“



„Schwarzer Raucher“ in der Tiefsee
 ©OAR/National Undersea Research Program (NURP); NOAA
 Quelle: <http://www.photolib.noaa.gov/htmls/nur04506.htm>

Ursprung des Lebens – Die Entwicklung der Uerde (Information)

entstanden sein. An ihnen tritt Wasser aus, welches Wasserstoff (H_2), Sulfide (HS^-) und Ammoniak (NH_3) mitführt. Dieses Wasser ist über 100°C Grad heiß und alkalisch (basisch). Tritt es aus dem Schlot aus, trifft es auf kühleres ca. 20°C kaltes Wasser, welches sauer ist und mineralische Eisen(Fe)- und Nickel(Ni)-Ionen und Kohlenstoffdioxid (CO_2) enthält. Beim Aufeinandertreffen reagieren die Substanzen miteinander und es kommt zur Ausfällung von Eisen(Nickel)-Sulfiden (**Pyrit**), Karbonaten, Kieselerde und Ton. Diese sammeln sich am Rand der hydrothermalen Quellen und bilden kleine Kammern aus. Die stark exotherme Reaktion, die zur Bildung von Pyrit führt, bietet eine hervorragende Energiequelle für die Bildung von Fettsäuren, Aminosäuren und weiteren Verbindungen (Martin & Russell 2002).

Aus den präbiotisch-chemischen Experimenten und anderen Erkenntnissen wurde deutlich, dass sich viele organische Verbindungen im Labor herstellen lassen, die im (Zell-)Stoffwechsel eine zentrale Rolle spielen. Alle ‚Ursuppen‘-Theorien haben allerdings gemein, dass sie davon ausgehen, dass sich unter chaotischen Bedingungen (Nähr-)Stoffe bilden, die sog. ‚Ursuppe‘, aus der durch Selbstorganisation Ordnung und Leben entsteht. Dies bringt verschiedene Probleme mit sich (Thoms 2005):

(1) Die spezifische Polymerisation der Moleküle: Die Polymerisation von Molekülen an sich ist chemisch ein einfacher Vorgang. Polymere sind für das Leben von universeller Bedeutung, so ist die DNA beispielsweise ein Polymer aus Nukleinsäuren und ein Protein ein Polymer aus Aminosäuren. Kompliziert wird das System, wenn es wie bei DNA und Proteinen auf die spezifische Abfolge der Bauteile ankommt, denn in dieser spezifischen Abfolge ist die genetische Information enthalten. Die Anordnung der Moleküle in einer informationscodierenden Reihenfolge erscheint also wie ein großer, unwahrscheinlicher Zufall.

(2) Die Bildung selbst-replizierender Systeme: Das erste Molekül, das seine eigene Vermehrung katalysiert, steht vor dem Problem, dass es entweder zu lang oder zu kurz ist. Das Molekül muss eine bestimmte Mindestgröße haben, da es eine gewisse Mindestinformation in sich tragen muss, die es zu einem Replikatormolekül werden lässt. Je länger ein solches Polymer wird, desto exakter muss die Kopie erfolgen, um seine Funktion als Replikator zu erhalten. Je kürzer das Polymer jedoch ist, desto ungenauer wird es ‚sich kopieren‘ und damit das Risiko eingehen, seine Replikatorfunktion zu verlieren. Eine aufwendige Fehlerkorrektur findet man erst in modernen, viel komplexeren Enzymen.

Ursprung des Lebens – Die Entwicklung der Uerde (Information)

Manfred Eigen (1971) löste dieses Paradoxon durch sein Modell des ‚Hyperzyklus‘, indem man den Replikator in einzelne Teile zerlegt: Molekül I₁ fördert die Vermehrung von I₂, I₂ die von I₃ usw. Die Replikatoren wurden in diesen Zyklen immer wieder durch kleine Fehler in der Kopie abgewandelt, einige waren nicht mehr replikationsfähig, andere verbesserten dadurch ihre Funktion. Im Laufe dieser Evolution müssen sich die Replikatoren schließlich mit Membranhüllen umgeben haben, innerhalb derer sich dann Stoffwechselzyklen entwickelten (Shapiro 2007). Hyperzyklen sind auch heute vielfältig zu finden, so stellt z.B. ein jedes Ökosystem einen vernetzten Hyperzyklus dar. Der von Eigen postulierte Hyperzyklus basiert allerdings auf der Annahme, dass die Entstehung des Lebens mit der Entstehung informationstragender Einheiten (z.B. RNA) gleichzusetzen ist. Dies würde bedeuten, dass Information vor der Funktion existierte (RNA-Welt). Bis heute finden darüber weitreichende Diskussionen statt.

(3) Die Bildung von Zellen. Auch die Bildung von Zellen als Reaktionsräume ist schwierig in den Ablauf dieser Prozesse der Entstehung des Lebens einzuordnen. Ob es Zellen bereits vor ersten Stoffwechselprozessen gab oder erst nachdem erste Metaboliten oder selbst-replizierende Systeme entstanden waren, ist nach wie vor ein viel diskutiertes Thema (Shapiro 2007). In den 1930er Jahren entwickelte der Chemiker Günter Wächtershäuser die interessante Theorie, dass mineralische Oberflächen maßgeblich an der Entstehung des Lebens beteiligt waren. Er postuliert einen chemi-autotrophen Lebensursprung, indem er alle grundlegenden biochemischen Stoffwechselreaktionen auf Oberflächenmetaboliten der Eisen-Schwefel-Welt (ESW) zurückführt. Damit wären Stoffwechselreaktionen vor den selbst-replizierenden Systemen vorhanden gewesen. Die Selektion der Metaboliten bestünde dann in ihrer Weiterexistenz und der Erweiterung des chemischen Repertoires im Gegensatz zu ihrer Verstoffwechselung oder Entfernung. Erste Zellhüllen entstanden Wächtershäuser zufolge, nachdem die ersten langgestreckten amphipathischen Moleküle entstanden waren, die eine Fettschicht auf den Mineralien bildeten, die die ersten Semizellen und später erste Zellen formten (Thoms 2005).

Die RNA-Welt wie auch die Eisen-Schwefel-Welt sind jede für sich überzeugende Modelle der Lebensentstehung. Die Eisen-Schwefel-Welt erklärt überzeugend, wie erste Stoffwechselwege entstanden sein könnten, die RNA-Welt postuliert ein einleuchtendes Modell der Entstehung eines selbst-replizierenden Systems vor DNA und Proteinen (Shapiro 2007).

Bisher ist es den Wissenschaftlern allerdings noch nicht gelungen, die beiden Theorien in Einklang zu bringen und die Entstehung des Lebens zufriedenstellend zu klären.

Literatur & links:

- Eigen, M. (1971). Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. *Die Naturwissenschaften* 58(10): 465-523.
- Martin, W. and M. J. Russell (2002). On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society London* 358: 59-85.
- Miller, S.L. (1953). A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* 117: 528-529.
- Rauchfuß, H. (2005). Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Shapiro, R. (2007). Ein einfacher Ursprung des Lebens. *Spektrum der Wissenschaft* 11: 65-72.
- Thoms, S.P. (2005). Ursprung des Lebens. Fischer Kompakt, Frankfurt a.M.

From soup to cells – the origin of life.

http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/0_0_0/origsoflife_01 (letzter Zugriff: September 2012)