System Erde (35) Der Planet Erde im Archaikum – Entstehung des Lebens

Die Erde im frühen Archaikum vor ca. 3.8 Milliarden Jahren

Sonneneinstrahlung ca. 25%- 30% geringer als heute

Wärmefluss aus dem Erdinneren ca. 2.5 – 3 mal größer als heute

Erde war bis vor ca. 3.6 Milliarden Jahren einem starken (aber abflauenden) Meteoriten-Bombardement ausgesetzt

Es waren nur wenige und relativ kleine Kontinentalkerne (Kratone) sowie eine Vielzahl von Inselbogenvulkanen im Bereich destruktiver Plattengrenzen vorhanden. Die Kratone wuchsen durch Akkretion bis zum Beginn des Proterozoikums auf ca. 60% der heutigen Fläche an.

Der größte Teil der Erde war von einem Urozean, der reich an gelösten Mineralen und Salzen war, bedeckt (Entstehung erster chemischer Sedimente)

Im Bereich der konstruktiven Plattengrenzen erfolgte genauso wie über hot-spot- als auch Inselbogenvulkane eine starke Entgasung des Erdmantels mit einem großen Einfluss auf die Chemie der Uratmosphäre (kein Sauerstoff, extremer Treibhauseffekt) → viele Stellen mit Black-Smokern

Die Erdatmosphäre im Archaikum

Die Zusammensetzung der Atmosphäre im ersten Abschnitt des Archaikums war fundamental anders als heute. Die heutige Atmosphäre mit dem sehr hohen Stickstoff- und Sauerstoffanteil ist weitgehend biogenen Ursprungs. Ohne Leben hätte sich die Erde wahrscheinlich zu einem Planeten mit ausufernden Treibhaus-effekt ähnlich der Venus entwickelt.

Wie stellt man sich die Entstehung der Uratmosphäre vor?

1. Es gibt keine gesicherten Erkenntnisse (z. B. in Form von in Eis einge-schlossenen Luftblasen) über die Zusammensetzung der Uratmosphäre

2. Die Rekonstruktion hält sich an folgende Quellen atmosphärischer Gase:

   → Zusammensetzung der Gase, die heute durch vulkanische Aktivität freigesetzt werden unter Berücksichtigung, das die Entgasungsvorgänge im Archaikum bedeutend intensiver waren

   → Eintrag von Gasen durch Kometenkerne im Zeitalter des großen Bombardements

   → Verlust bestimmter Bestandteile in den Weltraum (H, He), Änderung der chem. Zusammensetzung durch exogene Einflüsse (z.B. UV-Strahlung)

Während des Hadaekums hat die Erde einmal durch den „Mondimpakt“ und später noch mehrfach durch weitere große Impakte ihre gesamte bis dahin gebildete Atmosphäre verloren.

Die Uratmosphäre entstand durch die Entgasung des Erdmantels und hatte wahrscheinlich folgende Zusammensetzung:

Wasserdampf / Kohlendioxid / Wasserstoff / Kohlenmonoxid / Edelgase / Stickstoff / Schwefelwasserstoff (kein Sauerstoff und kein Methan)

→ eine schwach reduzierende Atmosphäre ist am wahrscheinlichsten, da die Ausbildung nach der Entstehung des Metallkerns erfolgt ist

→ CO_2-Anteil muss um den Faktor 100 bis max. 1000 größer gewesen sein als heute, damit im Zusammenwirken mit Wasserdampf ein Treibhauseffekt aufrecht erhalten werden konnte, der die globalen Temperaturen über den Gefrierpunkt von Wasser hob (*alles noch sehr unsicher, Stichwort Methan*).

Die ursprüngliche These, dass es sich bei der Uratmosphäre um eine stark reduzierende Atmosphäre handelte (die nur Wasserstoff, Wasser, Methan und Kohlenmonoxid enthalten hat), wird nicht mehr aufrechterhalten. Sie ist bei den „großen Impakten“ der Erde verlustig gegangen ...

Unter diesen unwirtlichen Bedingungen muss die Entstehung des Lebens stattgefunden haben.

<u>Chemische bzw. fossile Hinweise („Biosignaturen“) für Leben aus dem Archaikum:</u>

Erhöhter Anteil von leichten Kohlenstoff in sedimentär eingelagerten und metamorph umgewandelten Sedimenten

→ Isua-Sedimente, Alter ca. 3,7 Milliarden Jahre (gilt als ältestes wahrscheinliches Relikt von Leben)

Schwefel mit einem erhöhten Anteil des Isotops mit der Massezahl 32

→ Mikroorganismen, die Schwefel als Energiequelle nutzen, bewirken eine Anreicherung dieses Isotops

→ Schwefelablagerungen an Pyrit-Kristallen in 3,5 Milliarden Jahre alten Gesteinen aus Westaustralien; Eindeutig: Alter 2,5 Milliarden Jahre

Die Pyritkristalle entstanden wahrscheinlich im Bereich von heißen untermeerischen Quellen (Black Smoker)

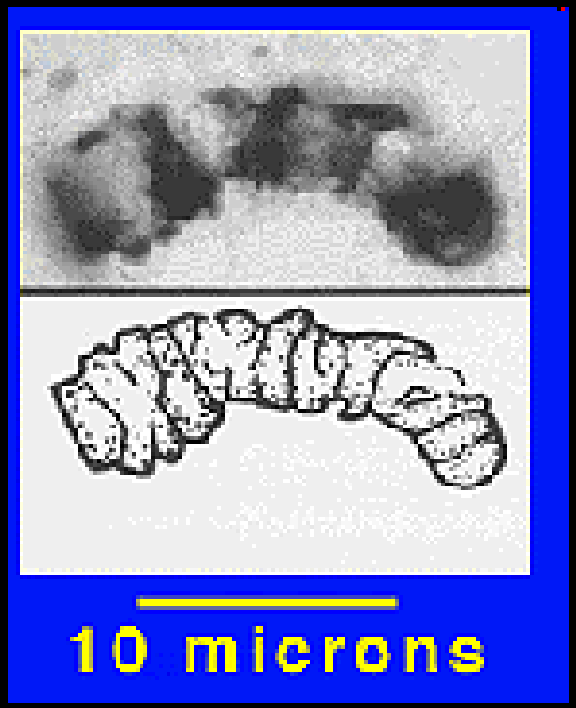
Stromatolithe

Fossile und rezennte Stromatolithe

Nachweisbar seit 3,5 Milliarden Jahren (Australien)

Stromatolithen sind biogene Sedimentgesteine aus teils sehr feinschichtigem Kalk. Es handelt sich bei den Stromatolithen um Kalkablagerungen, die durch marine benthonische Cyanobakterien (früher fälschlich auch als Blaugrünalgen bezeichnet) verursacht werden. Die Cyanobakterien bilden Biofilme (Mikrobenmatten), in denen Partikel eingefangen und gebunden werden. Durch die Stoffwechsel-Aktivitäten der Biofilme, und zwar durch die Alkalisierung des Milieus infolge ihrer Kohlenstoffdioxid-Assimilation, gibt es aber auch eine Mineralisation von Karbonaten.

Mikrofossilien, insbesondere von Cyanobakterien



Versteinerte Überreste von mikroskopisch kleinen Zellen. Zu den ältesten Funden gehören perlschnurartige Fäden in 3,5 Milliarden Jahre alten marinen Sedimentgesteinen aus dem Nordwesten Australiens.

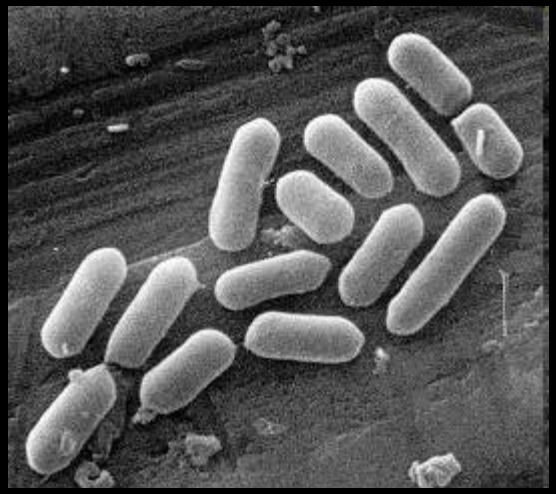
Was folgt aus der Datierung der ersten Lebensspuren?

Es ist sicher, dass bereits vor 3,5 Milliarden Jahren (d. h. im Paläoarchaikum) Cyanobakterien die Meere bzw. Schelfbereiche der Urkontinente besiedelt haben.

Die Entstehung des Lebens (Biogeneses) muss demnach in dem Zeitraum zwischen ca. 4 Milliarden und 3,8 / 3,7 Milliarden Jahren stattgefunden haben.

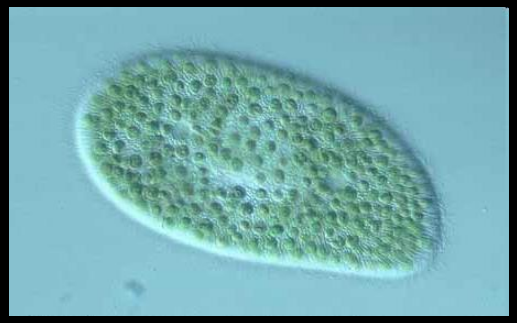
Frage:

Durch welche natürliche Prozesse entsteht aus weitgehend anorganischer Materie eine Materieform, die man als „lebend“ bezeichnen kann?



Was ist Leben?

Es gibt z.Z. keine allgemein akzeptierte Definition von „Leben“. Man ist sich aber weitgehend über eine Anzahl von Eigenschaften einig, durch die sich unbelebte Materie von lebendiger Materie unterscheidet.



Problem: Wir kennen nur „irdisches“ Leben

Eigenschaften irdischen Lebens

1. Lebensprozesse sind an **flüssiges Wasser** gebunden. Alle Lebewesen bestehen zu einem erheblichen Teil aus Wasser. Sie sind (immer !) aus Zellen zusammengesetzt, die von Membranen umschlossen sind.

   → KOMPARTIMENT

   Die Trennung von „Innen“ und „Außen“ schützt den Organismus und ermöglicht das Ansammeln von Stoffen und deren chemischen Reaktionen.

   Leben beruht immer auf der Kohlenstoffchemie.

2. Die Zellen sind aus organischen Makromolekülen zusammengesetzt, die aus Kohlenstoff-Wasserstoff-Gerüsten und einigen weiteren chemischen Elementen wie Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Sauerstoff sowie verschiedener Metalle bestehen.

→ **Biomoleküle**

- Kohlenhydrate
- Lipide
- Nukleinsäuren (enthalten organische Basen)
- Proteine (Polymere aus Aminosäuren)

→ Kohlenhydrate → Energiestoffwechsel

→ Lipide → Membranen, Energiespeicher

→ Nukleinsäuren → Erbinformation, genetischer Code, Proteinsynthese

→ Proteine → Zellmembranen, Zellorganellen, Enzyme

3. Lebewesen sind **energetisch offene Systeme**, die aus ihrer Umwelt Energie aufnehmen und einen Stoffwechsel unterhalten. Das grundlegende Prinzip der Energiegewinnung ist dabei die **Verbrennung** (Oxidation). Es existieren aber auch Mikroorganismen, die ihre Energie aus Schwefelverbindungen beziehen.

4. Der Stoffwechsel beruht auf **spezifischer Katalyse**. Die Katalysatoren einer Zelle heißen **Enzyme** und bestehen (meist) aus Eiweißverbindungen. Sie sind sowohl funktionell als auch strukturell sehr spezifisch und können meistens nur eine oder wenige Reaktionsketten katalysieren.

5. **Homöostase**: Regulationsmechanismen ermöglichen, dass ein Lebewesen in unterschiedlichen Umgebungen zurechtkommt und dabei nicht aus dem chemischen oder biologischen Gleichgewicht gerät.

6. Leben folgt immer einem **genetischen Programm**. Jede Zelle enthält dieses Programm vollständig auf ihren Chromosomen. Chromosomen enthalten Gene, die aus **DNA**-Strängen bestehen. Die DNA kann in eine DNA-ähnliche Form umgeschrieben werden. **RNA** wiederum ist die Vorlage für die Herstellung von Enzymen und anderen Proteinen. Die genetische Information fließt immer von der DNA über die RNA hin zum Protein (Proteinsynthese).

7. Zellen können sich teilen und fast identische Tochterzellen als Nachkommen bilden. Der DNA-Doppelstrang wird dabei kopiert (**Replikation**). Bei höheren Lebewesen mit sexueller Vermehrung kommt es dabei zu einer **Rekombination** einfacher väterlicher und mütterlicher Chromosomensätze.

8. Das **genetische Programm** eines Lebewesens kann sich im Laufe der Zeit verändern (**Mutationen**). Daher können sie sich graduell an unterschiedliche oder sich langsam ändernde Umwelten anpassen.

Die wichtigsten Säulen des Lebens sind also

→ Kompartimentierung
→ Energiestoffwechsel
→ Katalyse
→ Regulation
→ Wachstum
→ Programm
→ Reproduktion
→ Anpassung

Das Leben zeichnet sich durch eine in der unbelebten Natur einzigartigen Komplexität aus, die eine Reduktion auf einfache chemische und physikalische Gesetzmäßigkeiten aussichtslos erscheinen lassen. Lebensvorgänge sind aber prinzipiell physikalisch- chemisch erklärbar.

Wie war der Weg von den monomeren Grundbausteine der Lebensmoleküle bis zum ersten lebenden Molekülverbund?

Die Versuche von Urey und Miller zeigen

a) das unter den anäroben Bedingungen der Erdatmosphäre vor 4 Milliarden Jahren einige wichtige organische Grundbausteine (Aminosäuren, Nukleinbasen, Essigsäure etc.) gebildet werden konnten, aber nicht alle unbedingt notwendigen (z. B. Pentosen)

--> Theorie von Haldane und Oparin

b) der Anreicherungsgrad in den damaligen Ozeanen („Ursuppe“) aber viel zu gering war, um über Reaktionsketten Funktionsmoleküle (insbesondere Peptide) auf eine noch unbekannte Art und Weise zu erzeugen

Die (heutige) Existenz von einer unerwartet großen Vielfalt von extremophilen Mikroorganismen (Archaebakterien) führt zu der Vermutung, dass nicht im „warme Meer“ sondern vielmehr in extremen Bereichen in diesem Meer die Wiege des Lebens zu suchen ist

Neben „Luft“, „Wasser“ und Energie fehlt noch eine dritte Zutat: Minerale

Polymerisationsreaktionen benötigen Energie, Katalysatoren und Schutz vor Umwelteinflüssen, welche die Reaktionsprodukte wieder in ihre Bausteine zerlegen

Der Aufbau von Polypeptiden benötigt Stickstoff in einer geeigneten Form:

--> Ammoniak NH_3

Polymerisationsreaktionsketten müssen ohne Enzyme funktionieren

In wässriger Lösung sind Polymerisationsreaktionen eher unwahrscheinlicher, Abbaureaktionen dagegen wahrscheinlicher (Reaktionskinetik)

Es müssen geschützte Reaktionsräume vorhanden sein, die eine Anreicherung mit den Reaktionsprodukten ermöglichen

--> Entstehung autokatalytischer Reaktionsketten

Deshalb wurde die Vermutung geäußert, das die Oberflächen von bestimmten Mineralen bei der Ursynthese von z.B. Aminosäuren eine wichtige Rolle gespielt haben:

Tonminerale (z.B. Kaolinit)
Feldspate
Eisensulfide (z.B. Pyrit)

Warum Minerale?

1. Minerale bestehen hauptsächlich aus Ionenkristallen, die eine geladene Oberfläche besitzen

2. In den Oberflächen von Mineralen können sich kleine Poren bilden, die als abgeschlossene Reaktionsräume und zum Schutz vor äußeren Einflüssen dienen

3. Bestimmte Minerale können als Katalysatoren und als Energielieferant für Polykondensationsreaktionen dienen

Wo auf der Erde erfolgte die Ursynthese der Grundbausteine des Lebens?

In der Atmosphäre und den oberen Bereichen der Urmeere wahrscheinlich nicht, da die dortigen Umweltbedingungen (erhöhte UV-Strahlung, Bombardement durch kosmische Kleinkörper) stabile organische Verbindungen nicht zulassen

Vermutung: Hydrothermale Quellen in der Tiefsee

- Es existieren noch heute eine Vielzahl extrem spezialisierter thermophiler Archebakterien, die an das anerobe Milieu von heißen Quellen ideal angepaßt sind

- Entdeckung eines kompletten Ökosystems, welches ihren Energiebedarf durch Reduktion von schwefelhaltigen Mineralien (z.B. Pyrit) deckt (Black Smoker)

- Pyrit hat als Mineral ideale Eigenschaften zur Katalyse von langkettigeren organischen Molekülen wie z.B. Polypeptiden und Kohlenhydraten

- Tiefseestandorte sind gegenüber schädlicher Umwelteinflüsse ziemlich sichere Standorte

Ausbeute von Miller-Experimenten unter der Bedingung einer Uratmosphäre und der von hydrothermalen Quellen mit Pyrit-Magnetit-Präsenz in MikroMol

Aminosäure	Funkenentladung	Hydrotherm. Reaktion
Glycin	630	9275
Alanin	340	847
Serin	-	26
Aspariginsäure	4	281
Glutaminsäure	6	81
Isoleucin	-	52

(Holm und Anderson, 1995)