

Kapitel 12.02: Chemische Evolution

Inhalt

<u>Kapitel 12.02: Chemische Evolution.....</u>	<u>1</u>
<u>Inhalt.....</u>	<u>2</u>
<u>Chemische Evolution und Anfänge des Lebens.....</u>	<u>3</u>
<u>Entwicklung des Lebens auf der Erde - I - Entwicklung der Erdatmosphäre.....</u>	<u>4</u>
<u>Entwicklung des Lebens auf der Erde - II Entstehung des Lebens.....</u>	<u>4</u>
<u>Das Miller-Urey-Experiment (1953).....</u>	<u>5</u>
<u>J. Oro's Abwandlungen der Miller'schen Versuchsbedingungen.....</u>	<u>5</u>
<u>Theorie der Zellentstehung.....</u>	<u>5</u>
<u>1. Entstehung der Ursuppe:.....</u>	<u>5</u>
<u>2. Entstehung der Biomoleküle.....</u>	<u>5</u>
<u>3. Entstehung von Koazervaten (Oparin 1928).....</u>	<u>6</u>
<u>4. Entstehung von Mikrosphären: (Fox 1965).....</u>	<u>6</u>
<u>Die Bildung von Biomakromolekülen im Detail.....</u>	<u>7</u>
<u>Mitwirkung von Mineralien und Gesteinen.....</u>	<u>7</u>
<u>Bildung präbiotischer Strukturen (Zellvorläufer) und präbiotischen Stoffwechsels.....</u>	<u>8</u>
<u>a) Selbstreproduktion von Biomolekülen:.....</u>	<u>8</u>
<u>b) Entstehung abgegrenzter, zellähnlicher Gebilde.....</u>	<u>9</u>
<u>c) Stoffwechsel (Energiegewinnung).....</u>	<u>10</u>
<u>Entstehung echter Zellen durch Endosymbiose.....</u>	<u>11</u>
<u>Belege, welche für die Endosymbiontenhypothese sprechen:.....</u>	<u>11</u>
<u>Evolution der Stoffwechselwege zur Energiegewinnung.....</u>	<u>12</u>

Chemische Evolution und Anfänge des Lebens

Evolution wird in der Regel auf der Ebene der Lebewesen betrachtet. Man kann aber davon ausgehen, dass Evolution sich im Wesentlichen auf der Ebene der Gene, Eiweiße, Hormone und Moleküle abspielt.

Diese Betrachtungsweise findet man auch bei den frühen Philosophen (**Aristoteles**: „Aale entwickeln sich aus Würmern und Würmer wiederum aus Schlamm.“) sowie als Urzeugungshypothese im Mittelalter (**16. Jh.** aus Mehl, Weizenkörnern und einem ungewaschenen Hemd kann man in 21 Tagen Mäuse züchten.“ sowie **Johannes Kepler 1605**“Das ganze All ist von einem fortwährend gestaltenden Geist beseelt, der weiß, was aus jeder überschüssigen Materie am besten zu machen sei. So verwandelt er den Schweiß der Frauen und Hunde in Flöhe und Läuse, den Tau in Heuschrecken und Raupen, den Morast in Frösche, die Erde in Pflanzen, das Aas in Würmer, den Kot in Käfer ...“).

Diesen frühen Überlegungen haben natürlich noch nicht die wahren Ursachen der chemischen Evolution erkannt, was vor allem daran lag, dass die Chemie als Wissenschaft erst im Entstehen war.

Entwicklung des Lebens auf der Erde - I - Entwicklung der Erdatmosphäre

1. Zunächst lag eine H₂-Atmosphäre vor (wie bei allen heißen Himmelskörpern im All)
2. Nach und nach entstand durch Vulkantätigkeit eine Uratmosphäre (reduzierende Atmosphäre) (ohne O₂).
3. Durch entstehende Pflanzen bildete sich die jetzige Atmosphäre (oxidierende Atmosphäre mit 21% O₂, ca. 0,3% CO₂, 78% N₂)

Entwicklung des Lebens auf der Erde - II Entstehung des Lebens

Alle Lebewesen enthalten die gleichen chemischen Grundelemente: C, O, H, N, S, P.
Diese liegen in der Regel gebunden in organischen Stoffen (Kohlenhydrate, Fette, Eiweiße) und Nährsalzen vor.

Das Miller-Urey-Experiment (1953)

Miller führt mit seinem Experiment den Nachweis der abiotischen Entstehung von organischen Substanzen. Er war damit der Erste, der die chemische Evolution bewies.

Chemische Evolution: Phase, während der sich auf abiotischem Weg jene Moleküle bildeten, aus denen sich Lebewesen aufbauen.

Das Experiment:

Stanley Miller und Harold Clayton Urey führten ein Experiment durch, bei dem er ein Reaktionsgemisch, ähnlich der frühen Erdatmosphäre, aus Wasser (H₂O), Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃) und Wasserstoff (H₂) herstellte. Dieses Gemisch wurde nun für mehrere Tage elektrischen Entladungen ausgesetzt.

Miller entdeckte nach Ablauf einiger Tage in der Lösung organische Moleküle:

Er stellte fest, dass zuerst die Bausteine der Makromoleküle (Aminosäuren, organische Basen (aus HCN), Zucker, Fette usw.) entstanden, dann fand die Synthese der Biopolymere/ Biomakromoleküle (Proteine, Nukleinsäuren) statt.

J. Oro's Abwandlungen der Miller'schen Versuchsbedingungen

Wird anstelle der elektrischen Blitze UV-Licht als Energiequelle eingesetzt, so kann man die Bildung von Aminosäuren schon innerhalb weniger Stunden beobachten!

C-Quelle: Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Kohlenstoffdioxid

N-Quelle: molekularen Stickstoff (N₂)

Energiequelle UV-Licht

=> Bildung von Aminosäuren

Der Biologe Juan Oro zeigte 1961 mit einem ähnliche Experiment (er fügte u.a. Formaldehyd hinzu!), dass die gebildeten Aminosäuren weitere Biomoleküle entstehen.

Erstmalig gelang ihm so der Nachweis der Entstehung von Adenin in der Ursuppe:

Zusätzliche Ausgangsstoffe:

HCN, H₂O, Formaldehyd

Produkte in Oro's Experiment:

Serin

Ribose

Adenin

Aus Ribose, Phosphat und Adenin entsteht unter Energie ATP (der biologisch universelle Energieträger). So war auch die Basis für die Entstehung von RNA gelegt.

Theorie der Zellentstehung

Heute geht man, ausgehend von Millers Theorie davon aus, dass die Entwicklung in folgenden Stufen ablief:

1. Entstehung der Ursuppe:

Auf dem noch jungen Planeten Erde gab es Ozeane, welche durch das Gestein Salz enthielten-. Allerdings lag eine geringere Konzentration als heute in den Weltmeeren vor. Im Wasser gab es viele organische Stoffen in hohen Konzentrationen!

2. Entstehung der Biomoleküle

Durch starke radioaktive Weltraumstrahlung (eine schützende Atmosphäre gab es nicht), sowie durch Wärme und UV-Strahlung der Sonne liefen viele verschiedene chemischen Reaktionen ab. Es entstanden in Millionen von Jahren weitere organische Moleküle, zum Teil langkettige Kohlenstoffketten (Makromoleküle) und vermutlich fand eine erste Anordnung von Molekülen zu geordneten Strukturen statt.

Stufenweise (präbiotische) Entstehung komplexer organischer Moleküle:

1. Anfangs Entstehung einfacherer organischer Moleküle (z.B. Alkohole, Säuren, Purine und Pyrimidine) aus anorganischen Atomen und einfachen anorganischen Molekülen (enthielten C, O, H, N, S, P).
2. Bildung der biologischen Grundbausteine (Einfachzucker, Aminosäuren, Pyrrole, Fettsäuren, Nukleotide), d.h. komplexe organischer Moleküle entstehen aus den einfachen organischen Molekülen.
3. Entstehung der komplexen organischen Moleküle aus den Grundbausteinen (z.B. Polypeptide und Nucleinsäuren).

3. Entstehung von Koazervaten (Oparin 1928)

Die überwiegend wasserunlöslichen Makromolekülverbände bildeten im schwachen Salzwasser kleine Tröpfchenverbände (=Koazervate).

4. Entstehung von Mikrosphären: (Fox 1965)

Die Koazervate wurden vermutlich mit feinen Membranen (Doppellipidschicht) umgeben und so eingeschlossen (=Mikrosphären = zellähnliche, membranumhüllte Tröpfchengebilde);

Eigenschaften der Mikrosphären:

- Selektive Permeabilität (d.h. sie können bestimmte Stoffe anreichern)
- Wachstumserscheinungen (Abschnürungen)
- u.U. einfache Stoffwechselreaktionen

Wie dann aus solchen Mikrosphären die eigentlichen ersten lebenden Zellen wurden, ist bis heute nicht genau geklärt.

An der chemischen Evolution beteiligte Stoffe:

Gase der Uratmosphäre	H ₂ , H ₂ O, CH ₄ , NH ₃ , kein O ₂
Erste Zwischenprodukte	HCN, H ₂ C=CH ₂ , H ₃ C-CH ₃ , HCHO, (NH ₂) ₂ CO
Endprodukte	organische Stoffe
Lipide	Kohlenwasserstoffe, Fette
Carbonsäuren	z.B. CH ₃ COOH
Zucker	z.B. Desoxyribose
Aminosäuren	
Nucleinsäuren	Purine, Pyrimidine

Die Bildung von Biomakromolekülen im Detail

Die größten und langkettigsten Biomoleküle sind die Biopolymere bzw. Biomakromoleküle. Man fasst mit diesen Begriffen z.B. Proteine und Nucleinsäuren zusammen.

Man kann im Experiment beweisen, dass Nucleotide (deren Bildung Miller bewies!) in Gegenwart von Polyphosphaten und Temperaturen von ca. 55 °C zu Polynucleotiden reagieren.

- fügt man Ribose hinzu, geschieht dies eher mit 5'-2'-Verknüpfung
- fügt man Desoxyribose hinzu, entstehen Polynucleotide mit 5'-3'-Verknüpfungen.

Die Bildung derartig langer Molekülketten (=Polymerisation) benötigt Energie und erfolgt unter Wasserabspaltung (=Kondensation).

Makromolekülbildung ist eine Gleichgewichtsreaktion:

Polymerisationen können teilweise als chemische Gleichgewichtsreaktionen ablaufen (=> Einstellung eines chemischen Gleichgewichtes).

Damit bei solchen Gleichgewichten Biomakromoleküle in hoher Konzentration entstehen können ist, nach dem Prinzip des kleinsten Zwangs, dieses durch Wasserentzug möglich.

⇒ Eine Verschiebung des chemischen Gleichgewichtes hin zu höherer Biomakromolekülkonzentration ist durch Verdunstung des Wasser (z.B. in kleineren Gewässerresten, an Klippen, Felsen, Einschlüssen uvm.), Entfernen des Wassers durch Kompartimentierung (Einschluss in Membranen) oder Bildung von Koazervaten.

Mitwirkung von Mineralien und Gesteinen

All dies ist vermutlich nur an Stellen möglich gewesen, wo die chemischen Makromolekülbildungsreaktionen in kleinen Gesteinshohlräumen vor UV-Strahlung geschützt waren.

Dabei dienen die Kristalloberflächen der Gesteine können als Bindungsmatrix für wachsende Makromoleküle gedient haben.

Auf solchen Kristalloberflächen werden z.B. bestimmte Molekülformen bevorzugt (L- und D-Aminosäuren werden z.B. auf dem Mineral „Calcit“ an unterschiedlichen Stellen angelagert.).

- Aus weiteren Experimenten weiß man, dass in wässriger Lösung sich auf dem tonähnlichen Mineral „Montmorillonit“ Proteine mit einer Kettenlänge von mehr als 50 Aminosäuren (mit nahezu 100 %iger Ausbeute) bilden.
- Metallionen auf und aus den Gesteinen dienen bei solchen Bildungsreaktionen als Katalysatoren oder sie stellen Elektronen zur Verfügung. In komplexen Verbindungen werden sie auch in das Molekül eingebaut.
- Tonminerale ziehen durch ihre eigene Ladung auch geladene organische Moleküle an und binden diese.

Bildung präbiotischer Strukturen (Zellvorläufer) und präbiotischen Stoffwechsels

Nachdem nun geklärt ist, wie die biologisch wichtigen Moleküle entstanden sind, muss nun eine Theorie gefunden werden, welche die Moleküle miteinander in einem funktionierendem Stoffwechsel bringt.

Betrachtet man lebenden Zellen so führen sie ihren Stoffwechsel in voneinander abgetrennten Bereichen durch (=Kompartimente). Diese Trennung in einzelne Bereiche (z.B. Mitochondrienmatrix, Chloroplasteninneres usw.) schließen unerwünschte Reaktion aus. Desweiteren können so Konzentrationsgradienten zur Energiegewinnung aufgebaut werden.

Entstehung zellularer Gebilde:

Millers Experimente zeigten eine Ursuppe, in der Reaktionen abliefen. Tatsächlich spielten sich solche Reaktionen natürlich über Millionen von Jahren ab. Obendrein in immer neuen Konzentrationsgemischen an vielen Orten gleichzeitig.

In dieser langen Zeit fand vermutlich eine „Selbstorganisation“ der gebildeten Polymere zu geordneten Strukturen statt.

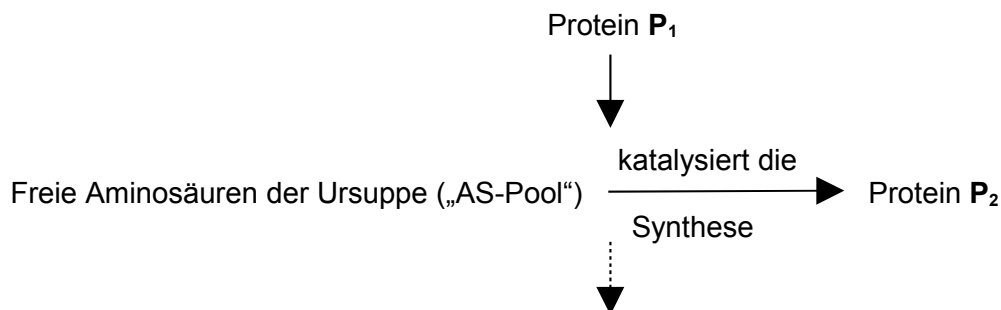
Der nächste Schritt muss eine Selbstreproduktion eines solchen organisierten Systems gewesen sein.

Leben entstand (vermutlich) in folgender Reihenfolge:

- selbstreproduzierendes System (\Rightarrow selbständige Reproduktion d. Makromoleküle)
- Bildung eines abgeschlossener Reaktionsraums (Zellstruktur)
- Entstehung eines Stoffwechsels

a) Selbstreproduktion von Biomolekülen:

- Selbstreproduktion der Proteine**



Bildung eines „autokatalytisches Systems“
mit der Fähigkeit zur Selbstreproduktion

- Selbstreproduktion der Polynucleotide**

Damit sich Polynucleotide selbstreproduzieren können, müssen Proteine und Nucleinsäuren in einer enger Wechselbeziehung stehen!

Der Biologe Manfred Eigen vermutete, dass es dazu immer einen kombinierten Protein-Polynucleotidsynthese-Zyklus (= „Eigenscher Hyperzyklus“) geben muss. Dieser wäre eine (gedankliche) Verbindung mehrerer selbstreproduzierender Protein- und Polynucleotidsysteme. Also ein Gefüge, welches Informationsmoleküle + katalytisch wirksame Moleküle nebeneinander enthält und somit ein ein sich selbst stabilisierendes, kooperatives System wäre!

Man braucht dazu also:

f.N. = freie Nucleotide

pN. = Polymerisation

Bereits auf dieser Stufe können Mutation + Selektion stattfinden. Das heißt, das von Beginn der ersten eigenen Reproduktion der Biomoleküle die Evolution startet!

Diese Theorie wird gestützt durch die Entdeckung der Ribozyme. Das sind RNA-Abschnitte, welche katalytisch wirkt (Bsp. splicen der mRNA).

b) Entstehung abgegrenzter, zellähnlicher Gebilde

Lipide sind Moleküle, welche ein polares und ein unpolares Ende haben:



Sie kommen z.B. in Form von Fettsäuren oder Tensiden vor. Treffen mehrere solcher Moleküle aufeinander, so ordnen sie sich gemeinsam, entsprechend ihrer Enden an:

einschichtige Filme an Grenzschichten (Luft/Wasser) → **Blasenbildung** → **zweischichtige Filme** (= häutige Membranen)
Einfaltung

Es können sich auf diese Weise also Biomembranen mit einer Lipiddoppelschicht bilden. Vermutlich entstanden Membranen auf folgendem Wege:

- **Koazervattröpfchenbildung** (Oparin 1928)

Koazervate sind tröpfchenförmige Ansammlungen verschiedener Makromoleküle in einer hochverdünnten Lösung (z.B. Salzlösung). In solchen Koazervaten sind bereits einfache Stoffwechselreaktionen möglich!

Die Entstehung kann man sich erklären durch anfangs tröpfchenförmige Ausfällungen, die entstehen, wenn in Lösungen hochmolekularer Stoffe ein Abbau stattfindet und die Abbauprodukte miteinander zusammenfließen. Dabei erfolgt eine Entmischung aufgrund der unterschiedlichen Polaritäten der Moleküle.

⇒ Koazervatflüssigkeit ist an Makromolekülen viel konzentrierter als die übrige Gleichgewichtsflüssigkeit.

- **Mikrosphärenbildung** (Fox 1970)

Mikrosphären sind zellähnliche Tröpfchengebilde. Sie sind komplexer und „fortgeschrittener“ als die Koazervate.

Sie können spontan beim Erhitzen bestimmter Proteine entstehen. Sie bestehen aus Proteinkügelchen von bis zu 2,5 µm Durchmesser. Man vermutet, dass sie vor allem beim Auflösen von thermischem Proteinoid und anschließendem Abkühlen in Lava entstehen

Eigenschaften der Mikrosphären:

- Die Hüllen der Mikrosphären zeigen selektive Permeabilität, d.h. In ihnen können sich bestimmte Stoffe anreichern (abhängig davon, wie gut sie jeweils die Hülle passieren können).

- Wachstumserscheinungen (Abschnürungen): Durch einfache Stoffwechselreaktionen kann es zu Anreicherungen kommen. Liegen sehr viele Stoffe innerhalb der Mikrosphäre vor, so

kann es zur Teilung durch Abschnürung kommen.

Der genaue Weg von solchen Mikrosphären hin zu den eigentlichen Zellen ist aber noch nicht genau erforscht.

- **Membranbildung**

Durch Anordnung von Fettsäuremolekülen (an beispielsweise Wasseroberflächen), könnten sich monomolekulare Membranen an der Grenzfläche bilden. Durch Wasserbewegungen könnten sich solche einfachen Membranen zusammenfalten und eine Lipiddoppelschicht bilden. Wenn sich diese dann um z.B. Koazervatröpfchen bilden, findet eine Stabilisierung durch diesen Einschluss statt.

c) Stoffwechsel (Energiegewinnung)

1. Form: Heterotrophie

Die vermutlich ersten stoffwechselaktiven Zellen waren Vorläufer von Lebewesen (=Protobionten). Sie lebten von energiereichen organischen Substanzen, welche in der Ursuppe vorlagen und nutzen gärungsähnliche Vorgänge für ihren heterotrophen Stoffwechsel!
Die energiereichen organischen Substanzen entstanden vermutlich durch abiotische Synthesen.

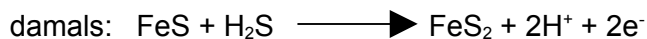
Die Konsequenz dieses Stoffwechsels war logischerweise das Verknappen und letztlich das Verbrauchen der organischen Substanzen!

2. Form: Autotrophie

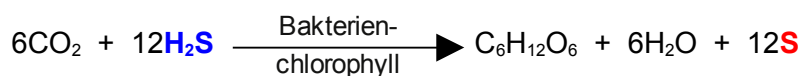
Die Neuerfindung des autotrophen Stoffwechsels war ein wichtiger Schritt. Nur so entstanden neue energiereiche Moleküle. Neben photosyntheseähnlichen Vorgängen, aus denen sich die richtige Photosynthese entwickelte, lag auch damals schon eine Chemosynthese vor:

- **CHEMOSYNTHESE**

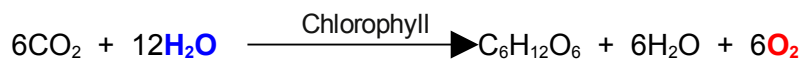
Energiegewinnung aus der Oxidation anorganischer Moleküle
heute: z.B. bei Eisen-, Schwefel- und Nitritbakterien



- **ursprüngliche PHOTOSYNTHESE** (heute noch bei Purpurbakterien zu finden)



- **eigentliche PHOTOSYNTHESE:**



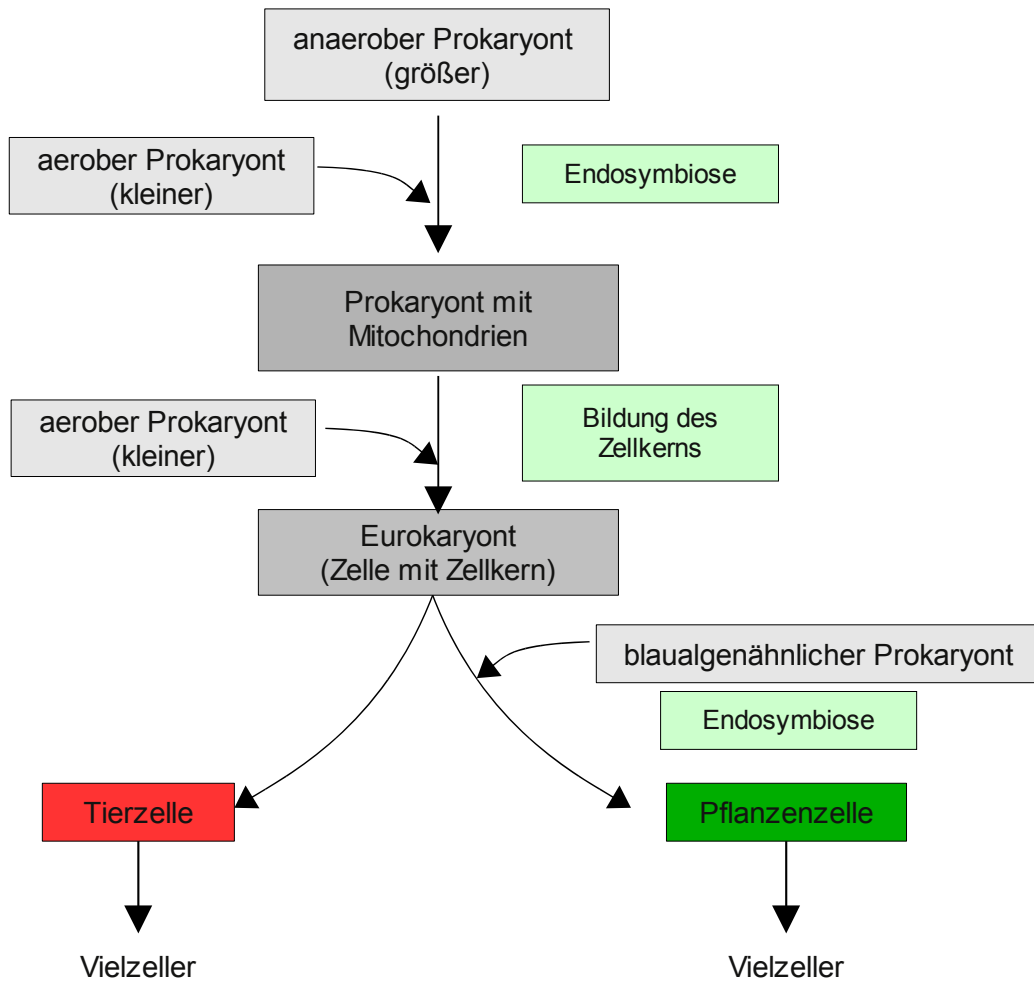
Die eigentliche Photosynthese spaltet Wasser und führt damit zur Sauerstoffproduktion!
Dies ist die Grundlage für aeroben Stoffabbau!

3. Form: Aerobe Oxidationsprozesse

Heterotrophe Organismen führen Zellatmung zur Gewinnung von Energie durch. Die Zellatmung führt durch eine vollständigere Oxidation zu einer höheren Energieausbeute im Vergleich zu Gärungsvorgängen.

Entstehung echter Zellen durch Endosymbiose

Vermutlich wurden kleiner Einzeller (Prokaryoten, also Zellen ohne Zellkern) von größeren Prokaryoten aufgenommen und nicht von diesen verdaut! Vermutlich lebten sie in Symbiose miteinander. Aus diesen kleineren Einzellern sind später die Organellen der Eukaryoten geworden.



Belege, welche für die Endosymbiontenhypothese sprechen:

- Mitochondrien + Plastiden entstehen nur durch Teilung aus ihresgleichen
- Mitochondrien + Plastiden besitzen eigene DNA und einen eigenen Proteinbiosyntheseapparat (70s-Ribosomen)
- Mitochondrien + Plastiden besitzen eine doppelte Membran mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung außen und innen.
 - innen: typisch prokaryotisch
 - außen: typisch eukaryotisch (Proteine hierfür im Zellkern codiert)
- ähnliche Endosymbionten findet man auch bei heute noch lebenden Organismen!

Evolution der Stoffwechselwege zur Energiegewinnung

Die ersten Lebewesen, waren noch sehr einfach entwickelt und einzellig. (Protobionten - Vorläufer der Lebewesen) lebten von organischen Substanzen in der Ursuppe. Ihr Stoffwechsel bestand aus gärungsähnlichen Vorgängen, bei denen sie die in der Ursuppe enthaltenen organischen Moleküle anaerob oxidierten!

Das führt zu einer Verknappung der organischen Substanzen in der Ursuppe! Es musste eine andere Möglichkeit der Energiegewinnung erfunden werden.

„Erfindung“ der autotrophen Lebensweise:

Die Chemosynthese war die erste autotrophe Ernährungsweise. Es entstanden eine Fülle von Lebewesen, welche energiereichen Schwefelwasserstoff nutzen konnten.

Daraus entwickelte sich dann eine ursprüngliche Form der Photosynthese. Man findet diese heute noch bei Purpurbakterien:



Der nächste evolutiv wichtige Schritt war die Erfindung der eigentlichen Photosynthese. Durch deren Spaltung von Wasser und der resultierenden Freisetzung von Sauerstoff war die Grundlage für den aeroben Stoffabbau und die heutige Atmosphäre gelegt.

Der nächste bedeutende Schritt war dann die Erfindung der Vielzelligkeit (Prokaryonten - Eukaryonten (Endosymbiontenhypothese!))