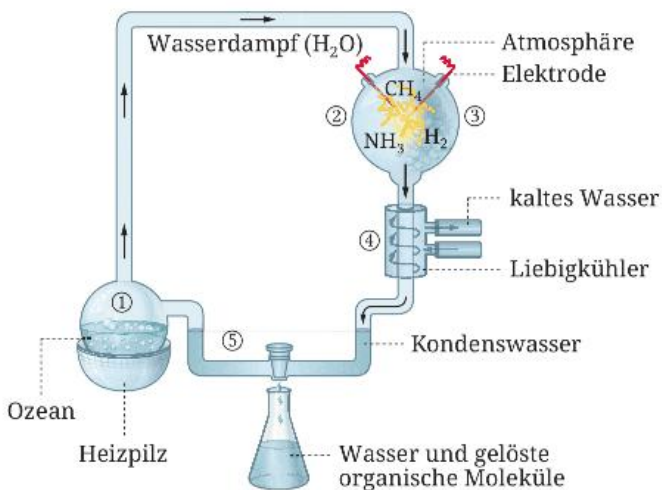


Ablauf der Evolution



136.1 Stanley MILLER und sein Experiment



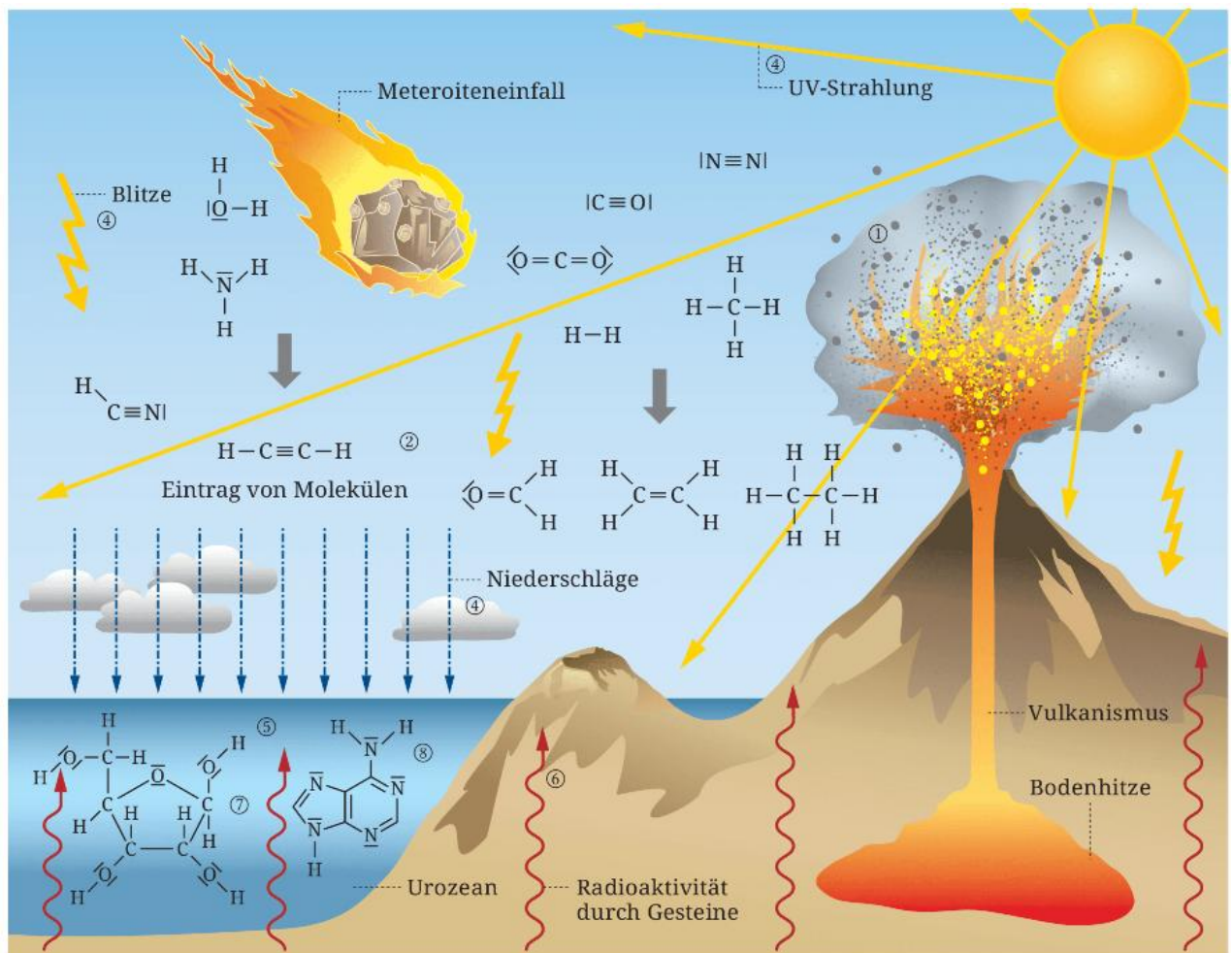
136.2 Versuchsaufbau des MILLER-Experiments

MILLER simulierte in einem Rundkolben einen Ur-ozean, der erhitzt wurde ①. Von dort verdampfte Wasser (H_2O) in einen weiteren Rundkolben mit einer künstlichen Atmosphäre aus vorwiegend Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3) und Wasserstoff (H_2) ②. Im Rundkolben simulierte MILLER mithilfe von Elektroden Blitze, welche die Reaktionsenergie für die Entstehung von Biomolekülen bereitstellen sollten ③. Das Gasgemisch kondensierte in einem Kühler ④ und wurde fortwährend in den ersten Rundkolben zurückgeführt ⑤. Nach etwa einer Woche zeigten sich grünlich-gelbe Verfärbungen und schließlich eine teerartige, schwarze Substanz. Unter den Reaktionsprodukten fand MILLER Biomoleküle wie Aminosäuren und Nukleinbasen. Variationen der Versuchsbedingungen führten später auch zu Fetten.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre in MILLERS Experiment entspricht dem Kenntnisstand der 1950er Jahre und beruht auf Analysen von Vulkangasen, die wahrscheinlich auch auf der Urerde ausgestoßen wurden. Nach neueren Gesteinsuntersuchungen bestand die **Uratmosphäre** wahrscheinlich vorwiegend aus Stickstoff (N_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). Daneben kamen auch Methan (CH_4), Kohlenstoffmonooxid (CO), Ammoniak (NH_3) und Wasserstoff (H_2) vor. Also enthielt die Uratmosphäre vermutlich weit weniger CH_4 und NH_3 , aber mehr CO_2 als von MILLER angenommen. MILLERS Experimente wurden von anderen Forschern auch unter diesen aktualisierten Bedingungen vielfach wiederholt und meist kam es auch unter diesen Bedingungen zur Bildung von Biomolekülen.

Ohne Biomoleküle ist kein Leben denkbar. Bevor es Leben gab, mussten sich also Biomoleküle spontan und abiotisch gebildet haben. MILLERS Ergebnisse bestätigten genau dies und bewiesen damit die Theorie einer **chemischen, präbiologischen Evolution**, der Entstehung von Biomolekülen auf der unbelebten Urerde.

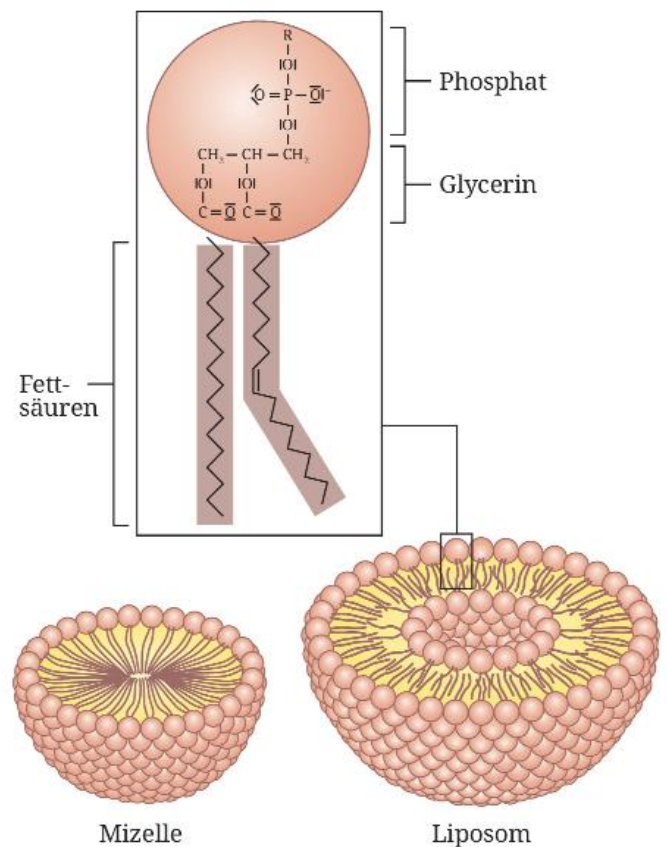
Vor über vier Milliarden Jahren führte das Abkühlen der Urerde zur Verfestigung der Erdkruste. Dieser Prozess wurde häufig durch gewaltige Vulkaneruptionen oder Meteoriteneinschläge unterbrochen. Aus Vulkanen und Gesteinen entwichen größere Mengen von Gasen (siehe Abbildung). Aus diesen Molekülen entstanden in der Uratmosphäre wahrscheinlich zunächst etwas komplexere anorganische Moleküle wie Ethan, Ethen und Formaldehyd. Die dafür notwendige Reaktionsenergie stammte vermutlich aus UV-Strahlung und Blitzen. Vor 4,2 Milliarden Jahren kondensierte dann erstmals Wasser in großen Mengen, sodass sich der globale Wasserkreislauf in Gang setzte. Polare Moleküle in der Atmosphäre lösten sich im kondensierten Regenwasser und reicherten sich in Urozeanen an. Im Wasser waren außerdem anorganische Salze gelöst, die chemische Reaktionen katalysierten. Außerdem kamen in den Urozeanen Polyphosphate vor, als mögliche Energieträger chemischer Reaktionen. Daneben gab es weitere natürliche Energiequellen wie Vulkane und Gesteine, die radioaktive Strahlung abstrahlten. Die eingetragenen Moleküle reagierten wahrscheinlich weiter zu Biomolekülen. Einige Forscher gehen davon aus, dass beträchtliche Mengen von Biomolekülen aus dem All eingetragen wurden.



137.1 Möglicher Ablauf der chemischen Evolution

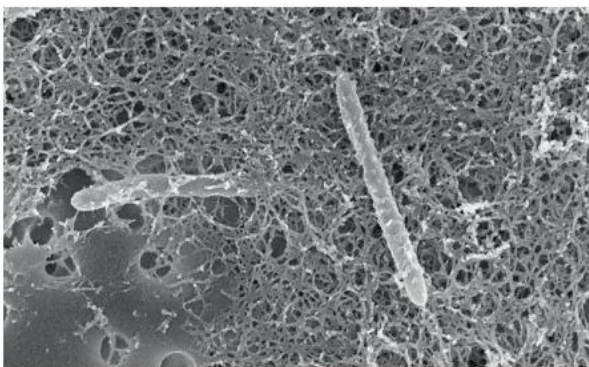
Entstehung von Zellen

Während die ersten Zellen wahrscheinlich sichtbare Spuren hinterlassen haben, ist es dagegen unbekannt, wie sich diese Zellen auf der Urerde aus Biomolekülen überhaupt erst gebildet haben. Nach der gängigen Theorie zur Entstehung des Lebens waren die ersten Vorläufer lebender Zellen **Protobionten** (gr. *prōtos*, frühester). Sie bildeten sich wahrscheinlich in den Ur-ozeanen, indem sich abiotisch entstandene Makromoleküle zusammenlagerten. Alle biochemischen Voraussetzungen zur Bildung von Leben waren bereits vor etwa vier Milliarden Jahren gegeben. Die Konzentration der Biomoleküle war vermutlich aber zu gering, sodass sie nicht miteinander in Wechselwirkung treten konnten. Als Voraussetzungen für die Entstehung von Zellen mussten sich Biomoleküle in Reaktionsräumen angereichert haben. Auf diese Weise konnten sich erste Protobionten mit einfachen Stoffwechselreaktionen gebildet haben.



142.2 Vesikel und Mizellen

Energiestoffwechsel und Evolution



144.1 Bakterien der Art *Desulforudis audaxviator*

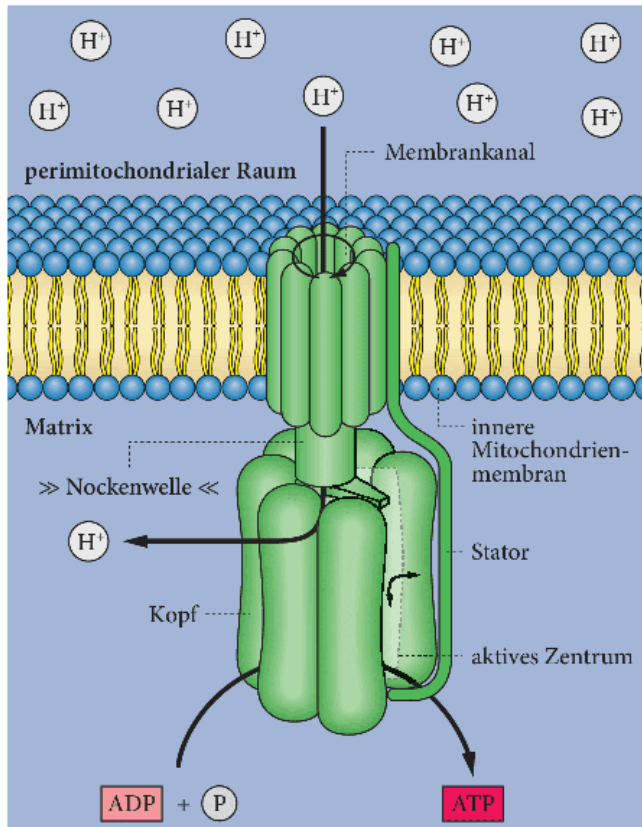
Minenarbeiter einer südafrikanischen Goldmine stießen bei Bohrungen in fast drei Kilometern Tiefe auf einen Hohlraum. Dort fanden sie in dem uralten Gestein Wasser, das seit 25 Millionen Jahren eingeschlossen war. Biologen untersuchten dieses Wasser und fanden darin tatsächlich lebende Bakterien (Abb. 144.1). Diese Bakterien der Art *Desulforudis audaxviator* leben dort vollkommen isoliert bei 60 °C, ohne Sauerstoff und verfügbare organische Stoffe in absoluter Dunkelheit. Darüber hinaus sind sie dort ständig natürlicher radioaktiver Strahlung ausgesetzt.

Alle heterotrophen Bakterien sind abhängig von energiereichen, organischen Molekülen ihrer Umgebung, wie etwa Glukose. Sie oxidieren die Moleküle und entziehen den Molekülen dabei Elektronen, die sie auf Coenzyme wie das NADP^+ übertragen. Diese nutzen sie dann zur Synthese von Biomolekülen.

Im Lebensraum *D. audaxviator* stehen aber wie auf der Uerde keine organischen Moleküle zur Oxidation zur Verfügung. Die ersten Zellen mussten also andere

Energiequellen erschlossen haben. *D. audaxviator* nutzt als Energiequelle die scheinbar lebensfeindliche radioaktive Strahlung seines Lebensraums. Denn durch die Strahlung werden die Wassermoleküle in Wasserstoffperoxid und Wasserstoff gespalten. Letztere oxidieren die Bakterien mithilfe von Sulfationen aus dem Gestein zu Protonen. Sie nutzen die Protonen dann zum Aufbau des Konzentrationsgradienten, der die ATP-Synthase antreibt. Außerdem übertragen sie Elektronen auf Coenzyme zum Aufbau von Biomolekülen. Als Kohlenstoffquelle nutzen sie dabei Carbonate aus den Gesteinen ihrer Umgebung.

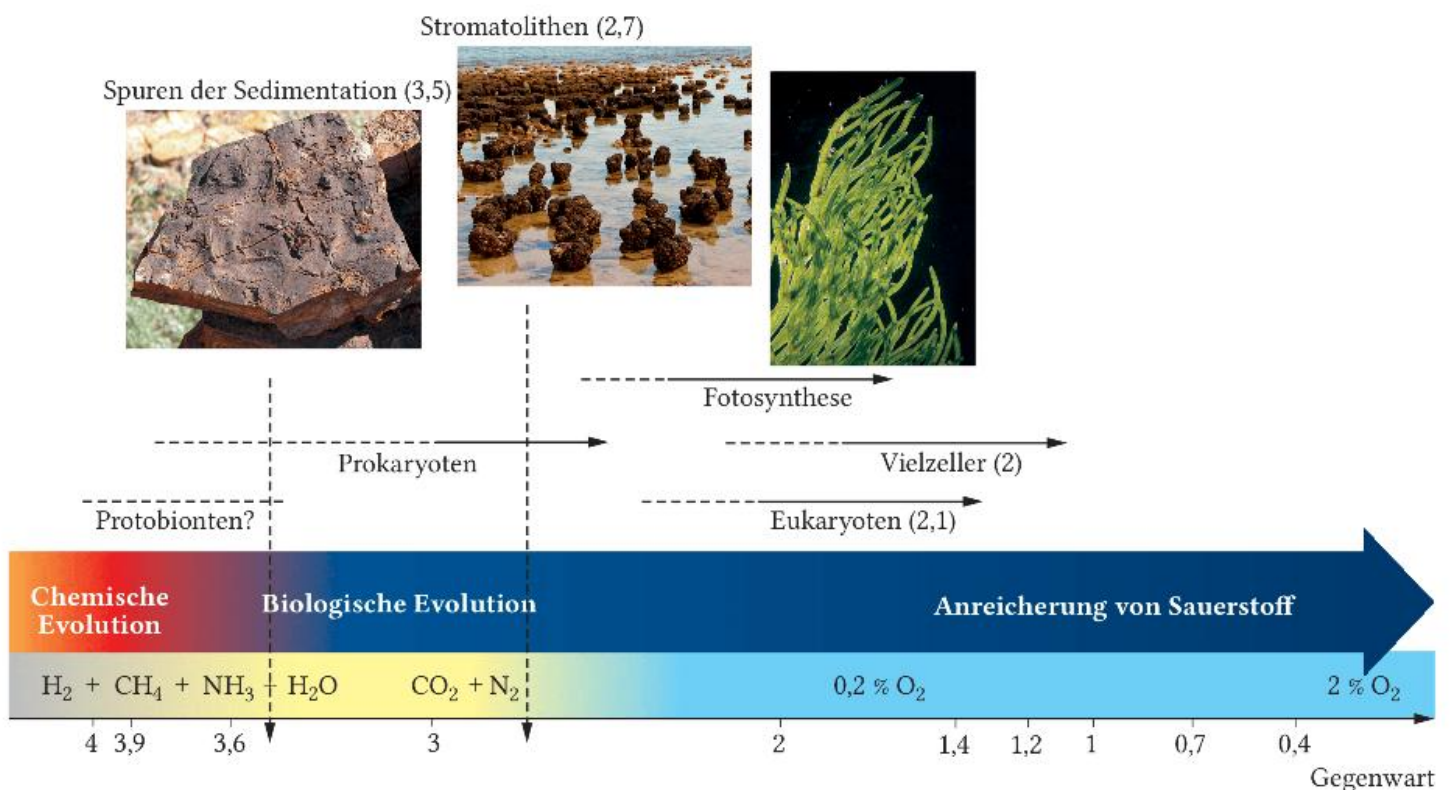
Die Energiebereitstellung von *D. audaxviator* basiert letztlich ausschließlich auf geophysikalischen Prozessen im Erdinneren. Unter ähnlichen Bedingungen könnten auch erste Zellen Wasserstoffmoleküle aus der radiolytischen Spaltung von Wasser als Energieträger genutzt haben. Darüber hinaus könnten auch weitere Energieträger wie Pyrit oder Schwefelwasserstoff genutzt worden sein.



144.2 Funktionsweise der ATP-Synthase

Der entscheidende Schritt in der Evolution der Fotosynthese war die lichtabhängige Spaltung von Wasser, die Fotolyse. Dabei werden die Bindungselektronen des Wassermoleküls in eine Elektronentransportkette eingeschleust. Als Spaltprodukt entstehen Protonen. Deren Konzentrationsgradient liefert wiederum die Energie für ATP-Synthasen. Als Nebenprodukt wird molekularer Sauerstoff freigesetzt, der sich in den Ozeanen und der Atmosphäre anreichert. Geologische Untersuchungen datieren den Beginn der Anreicherung atmosphärischen Sauerstoffs vor etwa 2,3 Milliarden Jahren. In fossilen Stromatolithen, etwa 2,7 Milliarden Jahre alt, finden sich Mikroorganismen, die heutigen Fotosynthese betreibenden Cyanobakterien sehr ähnlich sind. Wahrscheinlich waren also Vorfahren der Cyanobakterien die ersten Lebewesen in den Urozeanen, die Fotosynthese betrieben (Abb. 145.1).

Die Anreicherung von Sauerstoff in der Atmosphäre veränderte das Leben auf der Erde nachhaltig. Denn für die meisten Lebewesen war Sauerstoff ein giftiges Gas, das durch seine oxidierende Wirkung viele organische Verbindungen zerstörte. Dies übte einen starken Selektionsdruck aus und war letztlich die Voraussetzung für die Evolution der sauerstoffabhängigen Zellatmung und damit der Eukaryoten und Vielzeller.



145.1 Die Entstehung zentraler Stoffwechselreaktionen im Verlauf der Evolution

2.3 Evolution der Eukaryoten

Die ältesten bekannten Fossilien von Eukaryoten sind 2,1 Milliarden Jahre alt. Dabei handelte es sich um marine Einzeller. Diese Eukaryoten waren wesentlich größer als die bis dahin ausschließlich vorkommenden Prokaryoten und zeigten bereits alle Merkmale moderner eukaryotischer Zellen: wie Chromosomen mit linearer DNA in einem membranumschlossenen Bereich, einem Cytoskelett und vor allem biochemische Reaktionen in eigenen Kompartimenten.

Es gibt eine Vielzahl von Belegen dafür, dass Eukaryoten nicht allein über schrittweise Evolution durch natürliche Selektion aus Prokaryoten entstanden sind, sondern durch Aufnahme unabhängiger Prokaryoten. Chloroplasten und Mitochondrien zeigen eine Reihe von Besonderheiten, welche diese Hypothese stützen:

- Sie besitzen eine eigene, ringförmige DNA.
- Sie vermehren sich durch Zweiteilung.
- Sie besitzen bakterienähnliche Ribosomen.
- Sie sind von einer doppelten Membran umgeben.
Die innere Membran ähnelt in ihrem Aufbau der Membran bestimmter Prokaryoten.

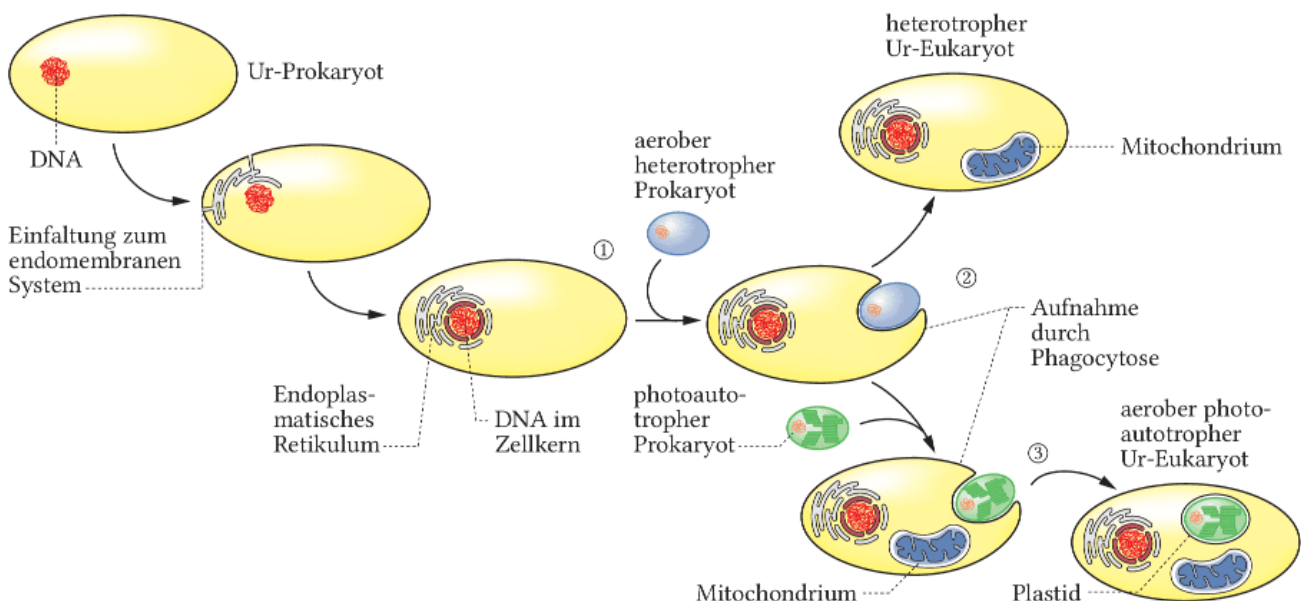
Genetische Analysen bestätigen tatsächlich, dass Mitochondrien von aeroben Purpurbakterien und Chloroplasten von Cyanobakterien abstammen.

Nach der **Endosymbiontentheorie** (gr. *endon*, innen, gr. *syn*, zusammen, gr. *bios*, Leben) wurden Bakterien von den Vorfahren eukaryotischer Zellen als Nahrung aufgenommen, aber nicht verdaut (Abb. 146.1). Die

aufgenommenen Prokaryoten lebten in einer mutualistischen (lat. *mutuus*, Gegenseitigkeit) Symbiose zum gegenseitigen Nutzen in der Wirtszelle weiter. So könnte zunächst der Zellkern durch Membraneinfaltungen ①. Anschließend wurden aerobe Bakterien durch Phagocytose (gr. *phagein*, fressen) mit Membraneinstülpungen umschlossen und aufgenommen ②. Einige dieser Eukaryoten nahmen später außerdem Cyanobakterien auf, die zu Chloroplasten wurden ③. Letztlich wurden im Laufe der Evolution viele Gene der ursprünglich unabhängigen Prokaryoten in den Zellkern verlagert, so dass Mitochondrien und Chloroplasten zu Zellorganellen ihrer Wirtszellen wurden.

Neueste Untersuchungen deuten auf eine Entstehung der Eukaryoten vor etwa 2,7 Milliarden Jahren hin und damit 600 Millionen Jahre früher als durch Fossilien belegt. Zu dieser Zeit kam es zur Sauerstoffanreicherung in der Atmosphäre. Dies könnte einen Selektionsdruck zugunsten von Eukaryoten mit Mitochondrien ausgeübt haben, welche die aerobe Zellatmung und damit das Überleben in einer Sauerstoffatmosphäre erst ermöglichten.

- 1 Fassen Sie die Evolution der Eukaryoten in einem Fließdiagramm zusammen.
- 2 Begründen Sie, weshalb die Besonderheiten von Mitochondrien und Chloroplasten für die Endosymbiontentheorie sprechen.



146.1 Entstehung der Eukaryoten nach der Endosymbiontentheorie