



# Wo kamen die monomeren Grundbausteine komplexer organischer Moleküle her?

Hypothesen:

Die monomeren Grundbausteine (einfache Aminosäuren, organische Basen, einfachste Kohlenhydrate etc.) sind bereits im kosmischen Raum in einer Molekülwolke oder im präsolaren Nebel entstanden und durch Meteorite auf die Erde gelangt.

Die monomeren Grundbausteine sind auf der frühen Erde entstanden und angereichert worden → „Ursuppe“

**Beispiel:** Kohlige Chondrite (z.B. Allende, Murchinson)

Aminosäuren – Diaminosäuren (2 NH<sub>2</sub>-Gruppen)

→ ERDE → Peptid-Nukleinsäuren - Ribozyme

Es gibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass präbiotisches Material durch Meteorite auf die Erde gelangt ist und sich im Urmeer angereichert hat. Die „Chemische Evolution“ kann also bereits im kosmischen Raum ihren Ausgang genommen haben.

# Entstehung organischer Moleküle auf der Erde - Ursuppentheorie

Bedingungen auf der frühen Erde ( vor mehr als 4.2 Milliarden Jahren)



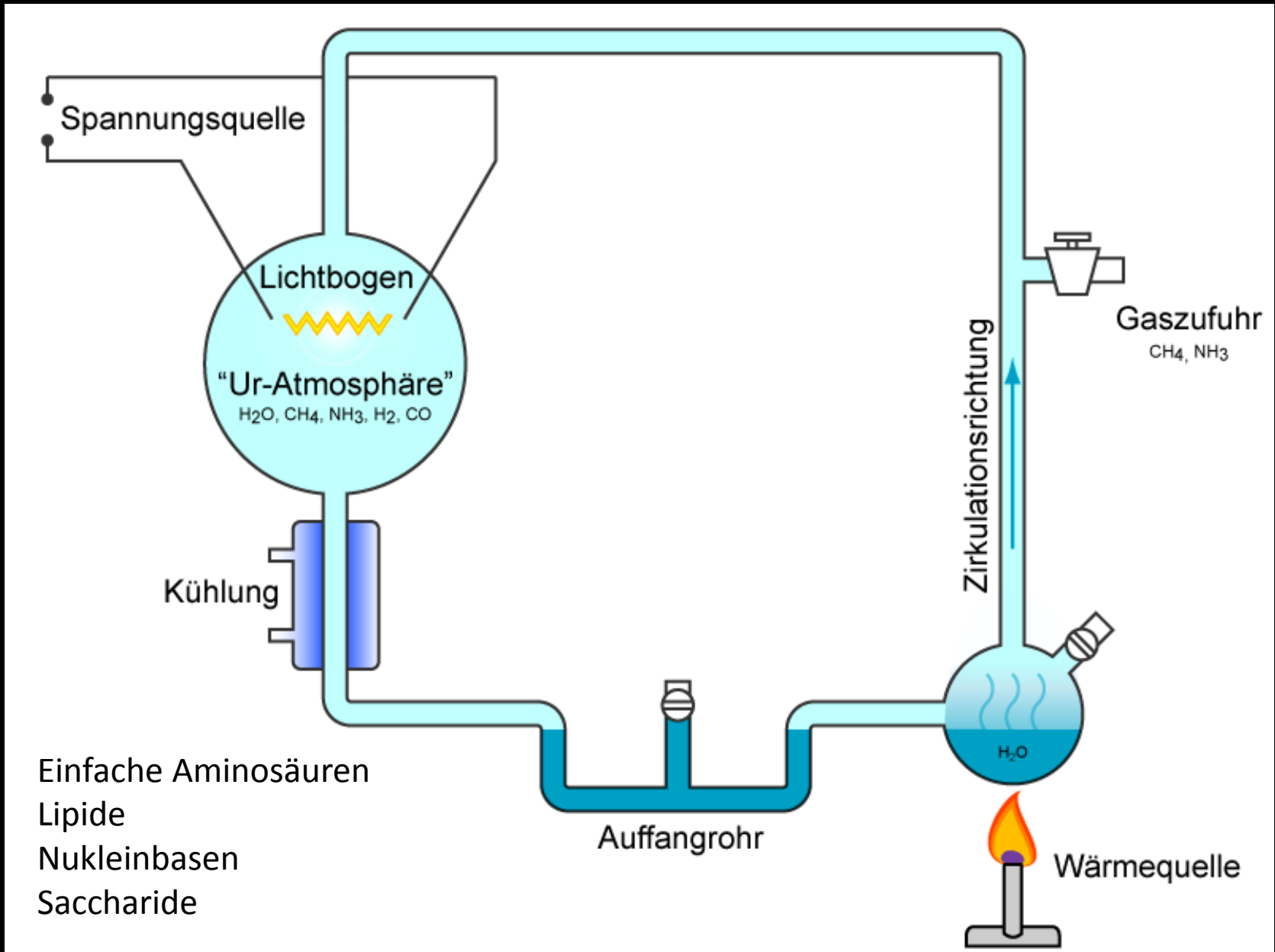
- Erster Urozean
- reduzierende Atmosphäre (Stickstoff, Wasser, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid)
- Keine Ozonschicht, hohe elektrische Aktivität der Atmosphäre (Blitze)
- Starkes Bombardement von Meteoriten (4.2 ... 3.8 Ga)
- Starke vulkanische Aktivität (Riftvulkanismus, Inselbogenvulkanismus)
- trotz geringer Leuchtkraft der Ursonne (*faint sun problem*) herrschte ein Treibhausklima

Die Frage, ob unter diesen Bedingungen die molekularen Grundsubstanzen, die für die Chemische Evolution notwendig sind, gebildet werden können, läßt sich experimentell untersuchen.

→ **Urey-Miller-Experimente**

Problem: Die Frage läßt sich nur prinzipiell beantworten, da die konkreten Bedingungen, die damals auf der Uerde herrschten, nicht mit genügender Genauigkeit bekannt sind.

# Das „Ur“ –Urey-Miller-Experiment von 1953



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

Die Versuche („man nehme Luft, Wasser und Energie“) von Urey und Miller zeigten

- 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) daß 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 (Archaeobakterien) führt zu der Vermutung, daß nicht im „warme Meer“, sondern vielmehr in extremen Bereiche in diesem Meer die Wiege des Lebens zu suchen ist

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

→ Minerale

Warum?

- 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  $\text{NH}_3$

- 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, dass 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)

aber event. auch Meereis (Hauke Trinks)

## Warum Minerale?

1. Minerale bestehen hauptsächlich aus Ionenkristallen, die eine geladene Oberfläche besitzen (Pyrit z.B. positive)
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 Energielieferanten für Polykondensationsreaktionen dienen
4. Lösung des Chiralitätsproblems



# 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 zugelassen haben.

## 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, Schwefelwasserstoff) 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



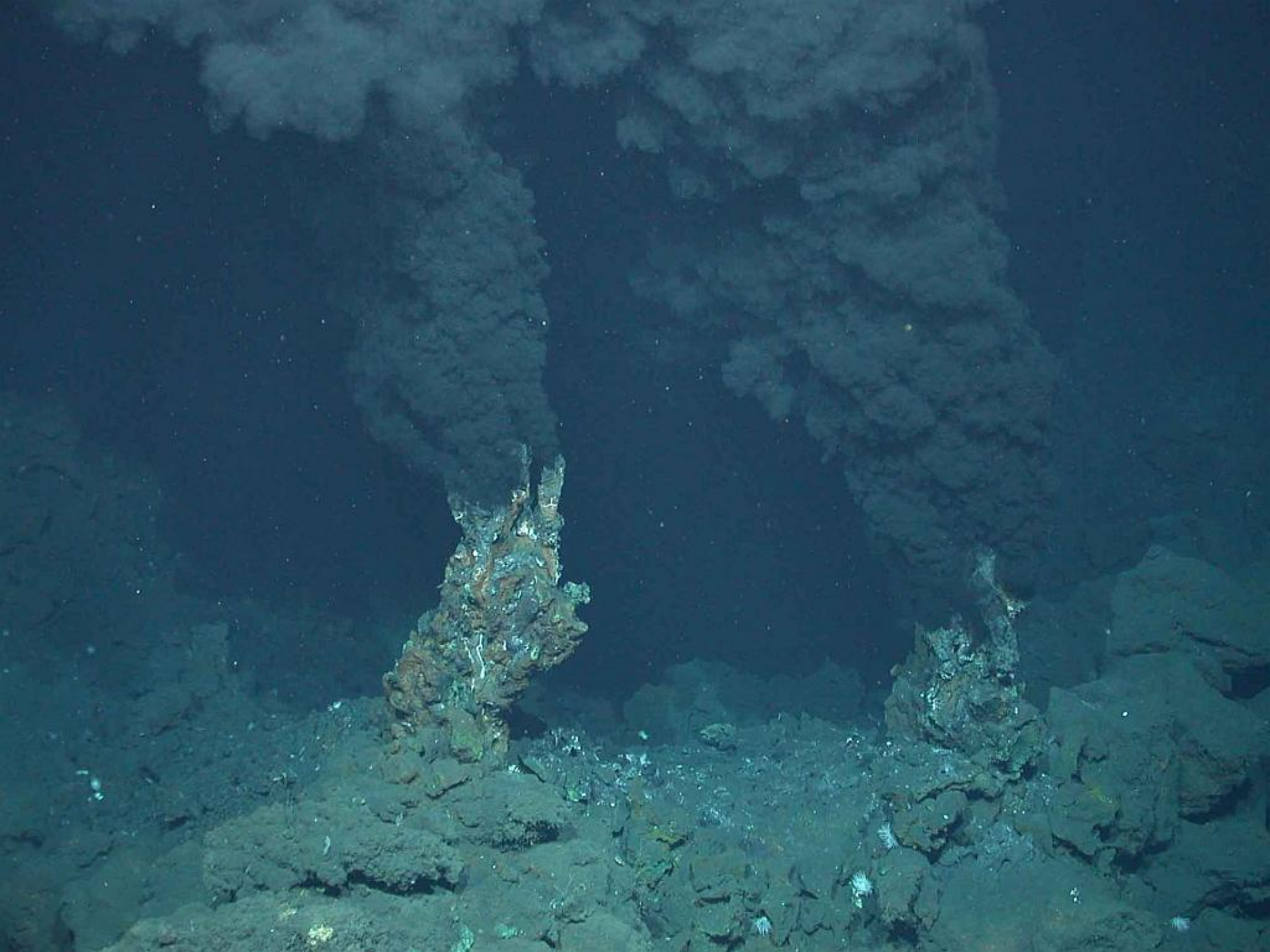






Figure 1. Transform faults. These strike-slip faults cut across the oceanic ridge.

OUTH AMERICA

AMAZON



# Das Wächterhäuser-Modell

**Ausgangspunkt:** Die primitivsten heute existierenden Lebewesen sind extremophile Archaen

**Thermophile:** Organismen, die optimal an hohe Temperaturen (80 °C und mehr) angepaßt sind

**Barophile:** Organismen, die optimal an hohen hydrostatischen Druck angepaßt sind

**Halophile:** Organismen, die optimal an hohe Salzkonzentrationen angepaßt sind

**Alkaliphile:** Organismen, die optimal an einen hohen pH-Wert (pH 9 und höher) angepaßt sind



Obwohl die Entstehung des Lebens der experimentellen Wissenschaft wahrscheinlich weitgehend verschlossen bleiben wird („Chemische Evolution im Reagenzglas“), sind doch Teilaspekte der theoretischen Forschung zugänglich („Könnte es so gewesen sein?“).

1. Aufklärung der Reaktionsketten zur Bereitstellung chemischer Energie  
(z.B. Bildung von Pyrit aus Eisen-II und Schwefelwasserstoff – *Thiobacillus ferrooxidans*)
2. Synthetisierung hochmolekularer Verbindungen auf Kristalloberflächen  
(aus monomeren Ausgangsmolekülen -> Purin- und Pyrimidinbasen, Aminosäuren, Lipide, Kohlenhydrate (Zucker) -> Bausteine für weitere Verkettungen)

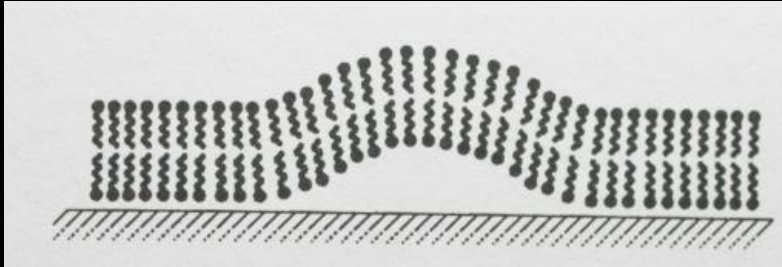


## Eisen-Schwefel-Welt

Aufgrund der Reduzierung der Freiheitsgrade von Molekülen, die an Kristallflächen gebunden sind, verbessert sich entscheidend die Reaktionskinetik für aufbauende Reaktionen (Polymerisationen, Polykondensationen)

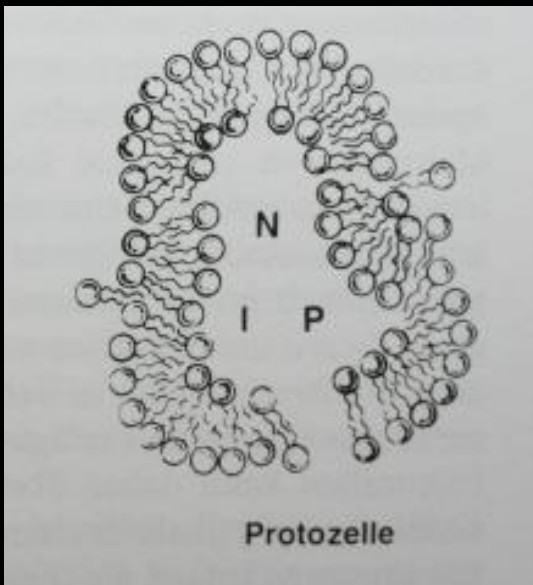
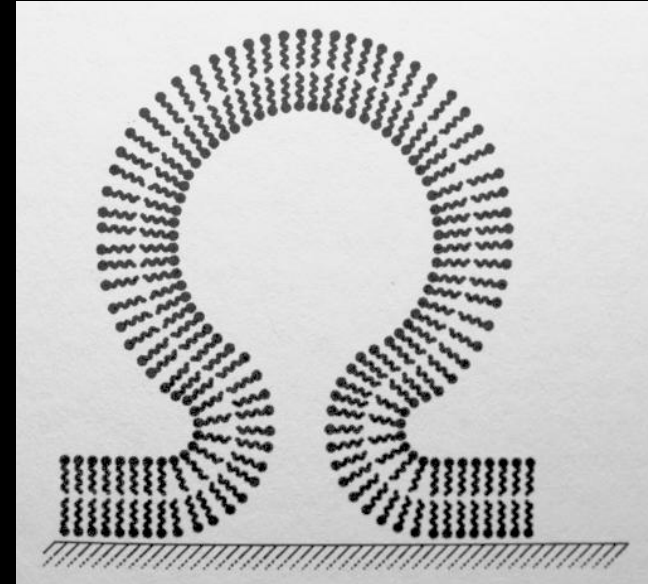
Die in der „Eisen-Schwefel-Welt“ synthetisierten organischen Makromoleküle stellen die Ausgangsstoffe für weitere Reaktionen und erste Strukturbildungen dar

→ **lipide Membrane**

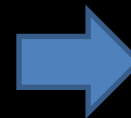


**Entstehung von abgeschlossenen  
Reaktionsräumen**

**METABOLITE**



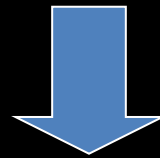
In solchen Reaktionsräumen könnten sich die ersten selbstreplizierenden Enzyme (Ribozyme) in Form von Ur-RNA gebildet haben, die einer Selbstoptimierung fähig waren



**RNA-Welt**

# Informationsmoleküle als Ausgangspunkt der Entstehung lebender molekularer Systeme?

- Moleküle, die sich selbst replizieren können, sind einem natürlichen Auswahlprozeß fähig
- Moleküle, die sich selbst replizieren können, müssen ihren eigenen Aufbau irgendwie kodieren
- Moleküle, die sich selbst replizieren, müssen der Autokatalyse fähig sein



Vermutung: Ausgangspunkt einer evolutionären Selbstoptimierung von Molekülen war eine primitive RNA (Ribozym)

- RNA:**
- Proteingerüst mit Nukleotid-Matrizen
  - hat autokatalytische Fähigkeiten (kann sich z.B. selbst schneiden)
  - ist mutationsfähig

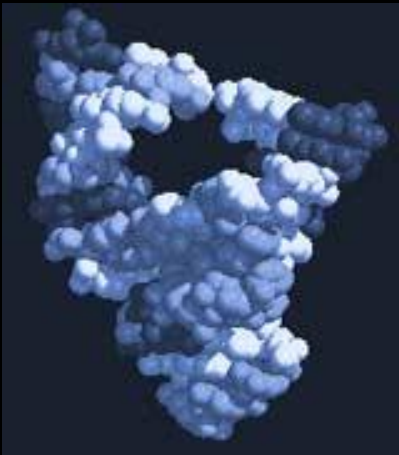
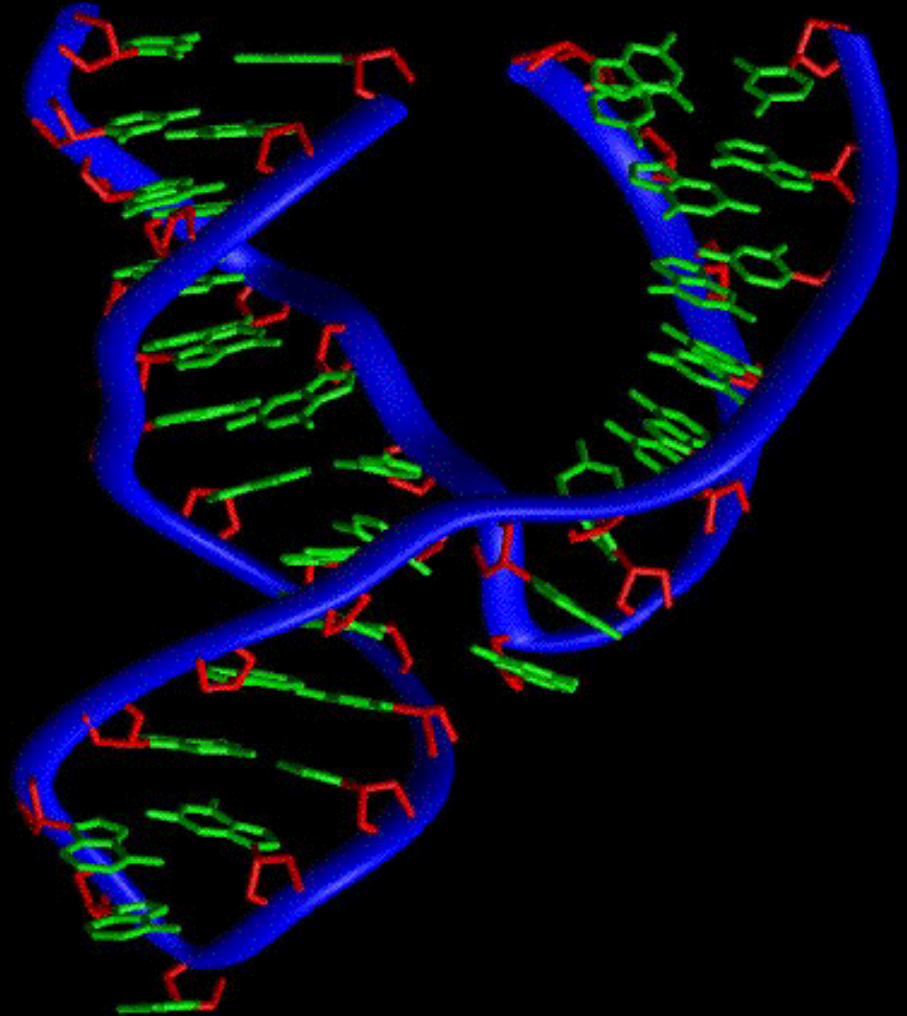
→ **Selbstoptimierung über einen Hyperzyklus** (Manfred Eigen)



# Ein „Ribozym“

katalysiert organo-chemische  
Reaktionen

1989 Nobelpreis für Sidney Altman  
und Thomas R. Cech



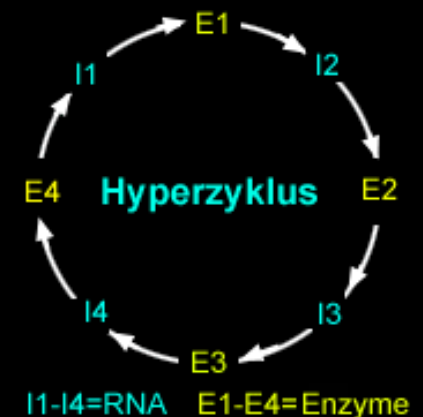
Die RNA wie die DNA besitzt die genetische Information um sich zu reproduzieren, braucht aber Proteine, um diese Reaktion zu katalysieren; Proteine wiederum können zwar diese Reaktionen katalysieren, sich aber nicht ohne die Information der DNA reproduzieren.

# Selbstop Optimierung von Molekülen und Reaktionsketten

- RNA verwendet eigene Nukleotidmatrize um ein identisches RNA-Molekül als Anhängsel zu produzieren
- „Schneidet“ sich anschließend selbst, so daß zwei Replikanten entstehen
- Mutationen in der Nukleotidmatrize führen nach den Mechanismen der Darwinschen Evolution zur Optimierung einzelner RNA-Spezies
- Vermutlich wurden auch die ersten Peptidketten durch diese RNA katalysiert. Mit der Zeit erwiesen sich die Proteine aber als die besseren Enzyme. So kam es dann vermutlich zur Arbeitsteilung zwischen Proteinen als Enzyme und der RNA als Informationsträger.

## HYPERZYKLUS

- Ab einer gewissen Komplexität erfolgte das Umschreiben der Informationen in der Nukleotidmatrize in die stabilere DNA
- Entwicklung des Transkriptions – Translationsmechanismus





Am „Ende“ der RNA-Welt stand ein hypothetischer Organismus, der genau an der Grenze zwischen abiotischer und biotischer Welt steht

Anorganischer Teil stellt die Energie zur Verfügung

Organischer Teil synthetisiert organische Stoffe aus Monomeren, die der Umgebung (hydrothermale Wässer) entnommen werden



Am Ende der chemischen Evolution stand ein durch Lipidmembranen geschützter **Pionierorganismus**, der aufgrund autokatalytischer Rückkopplungsmechanismen die Fähigkeit zur Replikation erlangte



Mittels der Darwinschen Selektionsmechanismen konnte jetzt die biologische Evolution beginnen – Leben ist entstanden

# Was lehrt uns das?

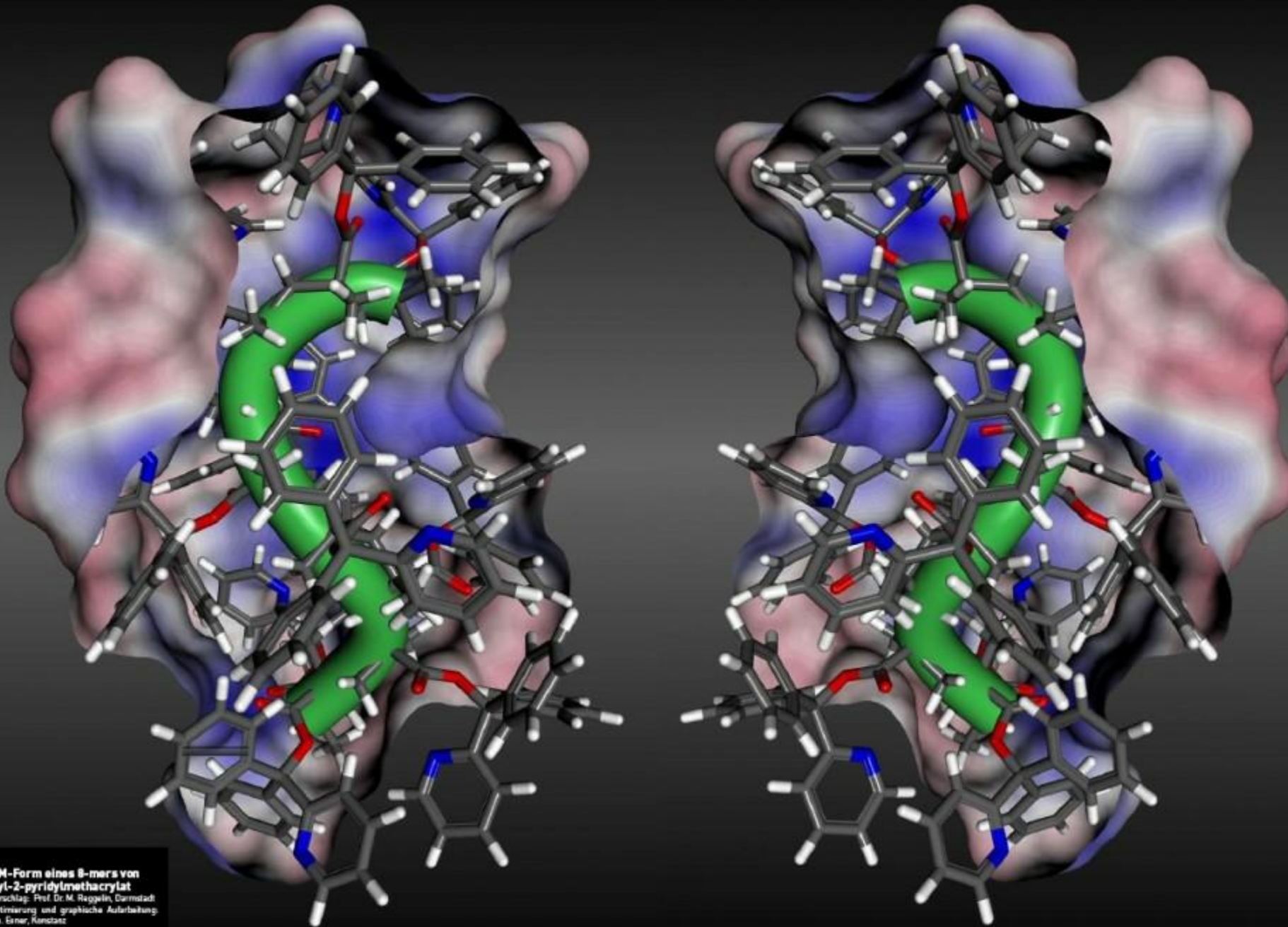
1. Die chemische Evolution muß sehr schnell vonstatten gegangen sein  
Zeitaufwand ~ 300 Millionen Jahre
2. Hypothese: unter günstigen Umweltbedingungen ist die Entstehung von Leben ein sehr wahrscheinlicher Vorgang

→ „Leben“ an sich sollte ein recht häufiges Phänomen im Kosmos sein

Trotzdem ist das Problem der „Lebensentstehung“ auf keinsten Weise gelöst. Es gibt aber Ansatzpunkte, welche die prinzipiellen Wege aufzeichnen, „wie es passiert sein könnte“

Die heute noch existierenden „primitivsten“ Lebensformen (Archaea) sind immer noch tausendfach komplexer als die ersten Pionierorganismen

# Nächstes Mal: Die Entstehung der Chiralität



**P- und M-Form eines 8-mers von Diphenyl-2-pyridylmethacrylat**  
Strukturvorschlag: Prof. Dr. M. Reggelin, Darmstadt  
Strukturoptimierung und graphische Aufarbeitung:  
Prof. Dr. Th. Ermer, Konstanz