

# Die junge Erde: Erste Biomoleküle entstehen

Mit Bezug zu Physik und Biochemie für die Oberstufe

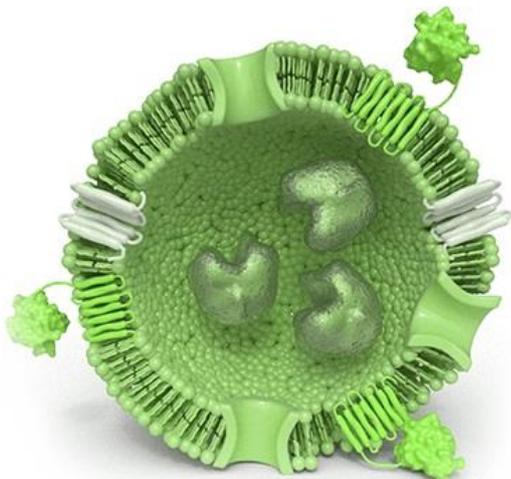
Aus der Reihe **FIDS!** - **Forschung in die Schule!**  
Fakultät für Physik der LMU München

**Zusammenarbeit von:**

Dr. Pascal Eitner und Prof. Dr. Juan Gaviria

**Dr. Cecilia Scorza**

Koordinatorin



Materialien

Wissenschaftliche Hintergründe

Aktivitäten und Aufgaben

Anwendungen in der aktuellen Forschung

## Zielsetzung

Wenn die Wissenschaftler versuchen, Fragen nach dem Ursprung der Materie, des Universums, der Planeten oder des Lebens zu beantworten, gibt es nur eine sichere Erkenntnis: Es gibt noch keine endgültigen Antworten auf diese Fragen!

Die Forscher versuchen dennoch, Licht in die Anfangszeit des Universums zu bringen. Dazu ist es unerlässlich, dass sie die Bedingungen nachvollziehen, die im frühen Universum geherrscht haben müssen, und diese dann in eigens entworfenen Experimenten modellieren und simulieren.

Die vielleicht wesentlichste Frage ist: Wie konnten die komplexen Moleküle, die für die Bildung lebender Strukturen notwendig sind, aus einfachen chemischen Verbindungen gebildet werden? Das möchten wir in diesem Modul versuchen zu verstehen!

# Inhaltsverzeichnis

## Die junge Erde: Erste Biomoleküle entstehen

3.1 Leben braucht Energie.....	4
3.2 Katalysatoren erzeugen erste Bausteine.....	5
3.3 Biomoleküle entstehen.....	6
3.4 Reaktionsräume gesucht!.....	7
3.5 Entstand das Leben in „Weißen Rauchern“?.....	8
Exkurs 1. Das Braun-Lab: Porensysteme als Reaktor für die Entstehung des Lebens? .....	9
<b>Aktivitäten .....</b>	<b>10</b>
Aktivität 1 – Das Blue-Bottle-Wunder .....	10
Aktivität 2 – Kartoffel versus Braunstein.....	111
<b>Literaturquellen.....</b>	<b>13</b>
<b>Bildnachweise.....</b>	<b>13</b>

# Die junge Erde: Erste Biomoleküle entstehen

## 3.1 Leben braucht Energie

Leben ist ein hochgeordneter Zustand der Materie. Im Unterschied zu einem ebenso geordneten, aber unbelebten Kristall beruht die Ordnung in einer Zelle allerdings auf einem Fließgleichgewicht: Biomoleküle werden ständig produziert, repariert und wieder abgebaut. Fast alle Bestandteile eines Lebewesens werden im Laufe der Zeit ausgewechselt, so wie das Wasser in einem Fluss immer wieder erneuert wird, ohne dass der Fluss seine Identität wechselt. So wird z. B. unsere Oberhaut etwa alle 30 Tage komplett erneuert, indem neue Hautzellen an der Basis gebildet werden und im Laufe der Zeit nach außen wandern, wo sie nach einem Monat abfallen. Alle Lebewesen brauchen zur Aufrechterhaltung dieses Fließgleichgewichts Energie, mit der sie die notwendige Arbeit verrichten können: chemische Arbeit bei der Herstellung neuer Biomoleküle, mechanische Arbeit bei der Bewegung von Zellbestandteilen oder ganzer Zellen und elektrische Arbeit beim Ladungstransport oder der Signalverarbeitung.

Auf der frühen Erde standen verschiedene Energieformen zur Verfügung: Strahlungsenergie von der Sonne, Wärmeenergie durch Vulkanismus, Bewegungsenergie durch Strömungen und Winde, elektrische Energie, die sich durch atmosphärische Blitze entlud sowie chemische Energie, die in organischen und anorganischen Verbindungen steckte (Abbildung 1). Um etwas so Empfindliches wie Leben zu ermöglichen, mussten zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Erstens musste die zur Verfügung stehende Energiedosis klein genug sein, um nur behutsame Veränderungen in den Zellvorläufern zu bewirken. Zweitens musste diese Energiequelle über Jahrtausende stabil vorhanden sein, da eine Unterbrechung der Energiezufuhr den im Entstehen befindlichen Lebensprozess sofort beendet hätte. Vulkanische Aktivität, Gewitter oder Wellengang sind durch ihre heftigen Schwankungen also ungeeignet und unzuverlässig obendrein. Strahlung dagegen ist meist so energiereich, dass sie Biomoleküle zerstört. Im Wasser, wo das Leben entstanden sein muss, wird gefährliche Strahlung zwar schnell absorbiert, aber damit ist sie auch nicht mehr nutzbar. Damit bleibt die chemische Energie übrig, um die ersten Lebensprozesse in Gang zu setzen.

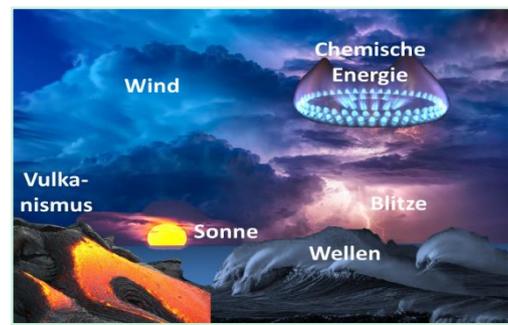


Abbildung 1: Energieformen, die dem Leben auf der Erde zur Verfügung stehen. (Grafik: P. Eitner)

Es fällt auf, dass alle Organismen – vom einfachen Bakterium bis zum komplizierten Säugetier – in Bezug auf den Energiestoffwechsel sehr einheitlich sind, obwohl auch andere Wege prinzipiell denkbar wären. Alle Lebewesen nutzen energiereiche Phosphatverbindungen – allem voran ATP (Adenosin-Tri-Phosphat) – als universelle Energiewährung (siehe Modul 4.3). Zur Herstellung von ATP greifen alle Zellen

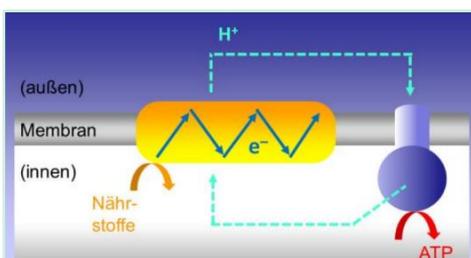


Abbildung 2: Die meisten Organismen gewinnen Energie durch Zellatmung. (Grafik: P. Eitner)

auf denselben Mechanismus zurück (Abbildung 2): Während energiereiche Elektronen, die z. B. aus den Nährstoffen stammen, innerhalb der Biomembran über eine Kette von Redoxmolekülen fließen, werden Protonen von innen nach außen gepumpt. Der entstehende Protonengradient führt zu einem passiven Rückfluss in das Zellinnere. Dieser Rückfluss erfolgt an einem spezialisierten Molekül, das –

gleich einer Nanomaschine – durch den Protonenfluss zur ATP-Herstellung angetrieben wird.

Wenn also von allen Möglichkeiten der Energienutzung allein der Protonengradient bei allen Lebewesen zu finden ist, lässt das Rückschlüsse auf die Bedingungen, unter denen das Leben auf der frühen Erde entstanden ist, zu. Noch heute existieren in der Tiefsee Orte (siehe Modul 3.5), die ähnliche Rahmenbedingungen bieten: eine langfristige und moderate Stoff- und Energiezufuhr, aber vor allem natürlich auftretende Protonengradienten.

### 3.2 Katalysatoren erzeugen erste Bausteine

Energie wird benötigt, um chemische Reaktionen zu ermöglichen, die nicht spontan ablaufen – so genannte endergone Reaktionen. Dazu gehören Vorgänge, bei denen Vorstufen von Biomolekülen oder die Moleküle selbst zusammengesetzt oder umgebaut werden. Wie wir in Modul 3.1 gesehen haben, sind nicht alle auf der Erde vorhandenen Energiequellen dazu geeignet, diese Reaktionen anzutreiben. Hinzu kommt, dass die Reaktionen mit großer Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit stattfinden müssen, damit so etwas Kompliziertes wie lebende Zellen entstehen können. Um durch den Stoffwechsel bestimmte Stoffe kontrolliert und zu einem präzisen Zeitpunkt zur Verfügung stellen zu können, ohne dass andere Reaktionen beeinflusst werden, ist ein Trick unverzichtbar: Damit eine Reaktion abläuft, muss deren sogenannte Aktivierungsenergie gezielt gesenkt werden (Abbildung 3).

Diese Wirkung ist typisch für Reaktionsbeschleuniger oder Katalysatoren. Auch wenn diese sogenannten Enzyme in Lebewesen überwiegend aus Eiweiß bestehen, müssen schon vor der Entstehung des Lebens einfache, anorganische Katalysatoren vorhanden gewesen sein, die bevorzugt die Bildung von Biomolekülen und ihren Vorläufern ermöglichen haben.

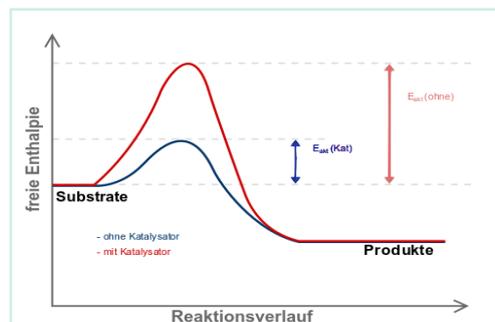


Abbildung 3: Reaktionsverlauf mit und ohne Katalysator. (Grafik: Verändert nach Matthias M. CC BY-SA 3.0)

Auf der frühen Erde gab es sicherlich schon anorganische Verbindungen wie Eisensulfid-Mineralien (z. B.  $FeS_2$ , Pyrit), die katalytisch wirksam sind. Sie entstehen auch heute noch durch vulkanische Aktivität in der Tiefsee, wo sie von Hydrothermalquellen freigesetzt werden (Modul 3.5). Eisen-Schwefel-Mineralien bieten eine positiv geladene Oberfläche und binden bevorzugt negativ geladene oder polare Moleküle. Pyrite sind unter bestimmten Voraussetzungen in der Lage, Kohlendioxid ( $CO_2$ ) sowie Wasserstoff ( $H_2$ ) zu adsorbieren und daraus Ameisensäure ( $H-COOH$ ) zu machen. Zwar können auch andere Bindungspartner an der Pyrit-Oberfläche miteinander reagieren, aber am bedeutsamsten ist ihre Fähigkeit, aus anorganischen Vorstufen wie  $CO_2$  und  $H_2$  erste organische Verbindungen zu synthetisieren, die als Bausteine für Biomoleküle dienen können. Im Gegensatz zu Enzymen sind anorganische Katalysatoren nicht hitzeempfindlich, was ein Vorteil ist, weil chemische Reaktionen in heißer Umgebung schneller verlaufen. Welche Produkte am Pyrit-Katalysator entstehen, hängt maßgeblich vom pH-Wert ab, also der Verfügbarkeit von Protonen ( $H^+$ ) und negativ geladenen Molekülen ( $OH^-$ ). Da das Kohlenstoffatom im Kohlendioxidmolekül reduziert werden muss, um zur Ameisensäure zu werden, muss der Katalysator Elektronen übertragen: Es handelt sich also bei Pyrit um ein Redoxsystem. Auf der anderen Seite kann Pyrit genug Energie für endergone Prozesse zur Verfügung stellen, wenn es beispielsweise mit Wasserstoff ( $FeS_2 + H_2 \rightleftharpoons FeS + H_2S$ ) reagiert.

Auch heute noch finden sich in den allermeisten Zellen Eisen-Schwefel-Cluster. Sie sind an die innere Membran der Mitochondrien gebunden, wo sie als Teil der Redoxkette agieren, mit deren Hilfe Elektronen von Wasserstoff auf Sauerstoff übertragen werden. Dabei wird über die Bildung eines Protonengradienten ATP gebildet. Obwohl mittlerweile fast nur noch Katalysatoren aus Eiweiß – die oben erwähnten Enzyme – in den Organismen zu finden sind, ist an dieser fundamentalen Bereitstellung von Stoffwechselenergie also immer noch ein anorganischer Baustein beteiligt. Vielleicht ist dies ein Relikt aus der Frühzeit der Evolution, als es zwar noch keine Zellen gab, aber die grundlegenden Stoffwechselfvorgänge langsam entstanden.

### 3.3 Biomoleküle entstehen

Nachdem die ersten organischen Bausteine aus anorganischen Vorstufen (z. B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) entstanden waren, konnte die Produktion der Biomoleküle beginnen. Letztere bestehen überwiegend aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und Phosphor (P) und zeichnen sich durch die Fähigkeit aus, lange Ketten mit vielfältigen chemischen Eigenschaften zu bilden. Für die Entstehung von komplexen Biomolekülen war es also eine Voraussetzung, dass sich die einzelnen Bausteine zu den meist kettenförmigen Polymeren (griech. *poly* = viel, *meros* = Teil) wie Kohlenhydraten, Lipiden, Proteinen und Nukleinsäuren verbinden konnten. Auch diese sogenannte Polymerisation erfolgte vor der Entwicklung der ersten Zellen. Schon 1961 konnten Forscher nachweisen, dass zentrale Bausteine der DNS und des Energiestoffwechsels wie Adenin und Guanin durch die Verknüpfung von Cyanwasserstoff (HCN) in erwärmter wässriger Lösung gebildet werden.

Die Entstehung von Aminosäuren, Alkoholen, Carbonsäuren und anderen primären Reaktionsprodukten in der Frühzeit der chemischen Evolution wurde durch die Anwesenheit von mineralischen Katalysatoren (Modul 3.2) gefördert. Dieselben Minerale müssen auch die Produkte adsorbiert und die Polymerisation vorangebracht haben. Das Ergebnis waren neuartige Makromoleküle, die sich in übergeordnete Strukturen auffalten und räumlich auf spezifische Weise anordnen konnten (Modul 3.4). Da alle chemischen Reaktionen ein Gleichgewicht zwischen Produkten und Edukten anstreben, scheint der Zerfall der Makromoleküle schon vorprogrammiert zu sein. Allerdings sind die Bindungen z. B. zwischen Aminosäuren so stabil, dass sie sich nicht spontan lösen. Das erhöht die Verweilzeit der Polymere in der Lösung um ein Vielfaches. Außerdem kann sich das Gleichgewicht auf die Seite der Produkte – sprich der Polymere – verschieben, wenn die Konzentration der Edukte hoch genug ist.

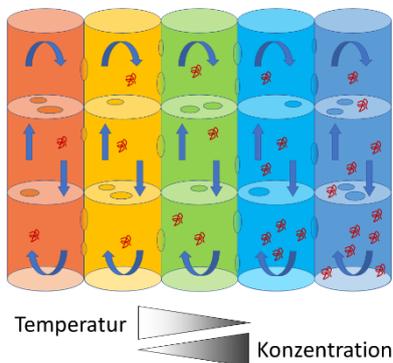


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Aufkonzentrierung in einem Porensystem. Blaue Pfeile: Kreisströmung. Rot: Polymere (Grafik: J. Gaviria und P. Eitner)

Möglicherweise gab es darüber hinaus einen Vorgang zur Aufkonzentrierung der Produkte. Neuere Berechnungen zeigen, dass dafür ein Temperaturgradient in Kombination mit einem Netzwerk von Poren ausreichend gewesen sein könnte (siehe Exkurs AG Braun). Verantwortlich für den Effekt sind zwei physikalische Prozesse: die Konvektion und die Thermophorese. Konvektion bedeutet, dass eine erwärmte Flüssigkeit nach oben aufsteigt, sich dort abkühlt und wieder absinkt, wodurch sich in der Folge eine kontinuierliche Kreisströmung ausbildet. Unter Thermophorese versteht man Molekülbewegungen aufgrund von Temperaturunterschieden: meist von heiß nach kalt (Abbildung 4). Die Molekülgröße beeinflusst dabei die Diffusionsgeschwindigkeit, d. h. große Moleküle wandern langsamer

als kleine und tendieren daher dazu, sich über lange Zeit zu sammeln, sofern die Gefäßgrenzen für große Moleküle weniger durchlässig sind als für kleine. Experimente haben gezeigt, dass ein Zusammenspiel von Konvektion und Thermophorese tatsächlich für eine theoretische Konzentrierung von Nukleotiden – den Bausteinen der Erbinformation – um den Faktor 1000 und höher sorgen kann. Erst als durch diese Prozesse genügend viele Polymere auf engem Raum gelöst und konzentriert waren, konnten Stoffwechselprozesse in Gang kommen, die später auch in lebenden Zellen auftraten.

### 3.4 Reaktionsräume gesucht!

Die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion hängt von den drei Parametern Aktivierungsenergie, Temperatur und Konzentration ab. Alle drei werden durch das Reaktionsgefäß beeinflusst. So senkt ein Katalysator an der Gefäßwand die Aktivierungsenergie, die Wärmeleitfähigkeit des Gefäßes verändert die durch Wärmezufuhr von außen erreichte Temperatur oder hält die Temperatur länger konstant, und die Konzentration der Stoffe kann durch die Kleinheit des Gefäßes gesteigert werden. Am schnellsten laufen die Reaktionen ab, wenn gleichzeitig ein Katalysator, hohe Temperaturen und winzige Reaktionsräume (Kompartimente) gegeben sind. So ein Szenario könnte auf der frühen Erde in Hydrothermalquellen der Tiefsee verwirklicht gewesen sein (siehe Modul 3.5).

Die Vorstellung einer „Ursuppe“ in flachen Gezeitentümpeln kann der Forderung nach den notwendigen Reaktionsräumen im Mikroliter-Maßstab ( $1 \mu\text{l} = 10^{-6} \text{l}$  oder  $1/1000 \text{ ml}$ ) nicht gerecht werden. Warum müssen die ersten Kompartimente so klein gewesen sein? Die Reaktionskinetik gibt die Rahmenbedingungen vor. Damit die ersten Biomoleküle und deren Vorstufen hinreichend schnell reagieren konnten, musste die Konzentration (Teilchenzahl pro Volumen) hoch genug sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Teilchen begegnen, ist umso höher, je mehr von ihnen in einem gegebenen Volumen vorhanden sind. Da die organischen Moleküle aber schon sehr viel Zeit zu ihrer Entstehung brauchen, dauert es in großen Volumina viel zu lange, bis die Teilchenzahl hoch genug ist. In mikroskopisch kleinen Kompartimenten geht das um viele Größenordnungen schneller (siehe auch Modul 6.1). Außerdem stehen auf diese Weise womöglich Millionen von Reaktionsgefäßen für die chemische Evolution bereit, in denen die verschiedensten Varianten von Stoffumwandlungen getrennt voneinander stattfinden können.

Es ist wahrscheinlich kein Zufall, dass alle lebenden Zellen eine Hülle aus Lipiden tragen. Die Zellmembran enthält zwar auch die verschiedensten Proteine, aber es sind Lipide, die in wässriger Lösung spontan zur Bildung von Aggregaten neigen. Diese Zusammenschlüsse können kleine Kügelchen (Micellen) ohne Hohlraum oder sogar Bläschen (Vesikel) bilden, die einen Teil der wässrigen Lösung einschließen und von einer Doppelschicht aus Lipiden umhüllt sind. Damit sind alle Voraussetzungen für einen funktionierenden Stoffwechsel ohne Zelle – also ohne Leben – gegeben.

### 3.5 Entstand das Leben in „Weißen Rauchern“?

Wenn das Leben, wie wir es kennen, auf der Erde entstanden ist, in welcher Umgebung können wir seinen Ursprung vermuten? Drei Komponenten müssen dafür vorhanden gewesen sein: flüssiges Wasser, gelöste Verbindungen mit essenziellen Elementen (vor allem C, H, O, N, P, S) und Energie liefernde Moleküle, um die mit dem Leben einhergehenden endergonen Prozesse zu speisen. Es gibt mehrere Orte, die diesen Anforderungen gerecht werden, wie z. B. den Ozean, den Meeresboden, das Land oder Risse in der Erdkruste. Aber unter all diesen Orten scheinen die „Weißen Raucher“ besonders geeignet zu sein (Abbildung 5). Darunter versteht man Schloten, die aus dem Meeresboden der Tiefsee wachsen und warmes Wasser ausstoßen, das viele Mineralstoffe enthält und alkalisch reagiert.

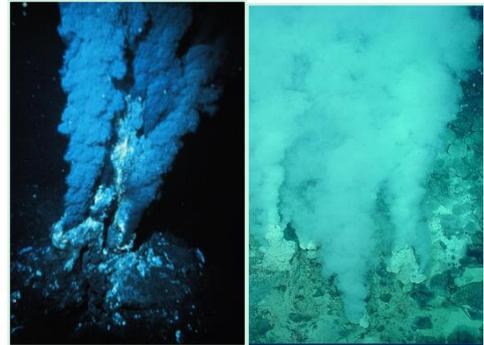


Abbildung 5: Hydrothermale Schloten am Meeresboden: „Schwarze“ Raucher (links) und die „weiße“ Variante (rechts) (Fotos: NOAA).

Hydrothermale Schloten bilden sich in der Nähe von Regionen, in denen tektonische Platten aneinanderstoßen. Sie entstehen durch die Reaktion der Erdkruste mit Meerwasser, das durch Risse im Meeresboden einsickert. Dort findet sich Olivin ( $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ ), ein Mineral mit einem hohen Gehalt an zweiwertigen Eisen- und Magnesiumionen bei gleichzeitig niedrigem Silikatgehalt. Das Meereswasser hydroxyliert Olivin, oxidiert das  $\text{Fe}^{2+}$  zu  $\text{Fe}^{3+}$  und transformiert das Mineral dadurch zu Serpentin ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Bei dieser sogenannten Serpentinisierung (Abbildung 5) werden  $\text{H}_2^-$  und  $\text{OH}^-$ -Ionen in die umgebende Flüssigkeit abgegeben, wodurch diese stark alkalisch wird (pH 9- 11) und als starkes Reduktionsmittel wirken kann. Die Umwandlung von Olivin zu Serpentin ist außerdem eine

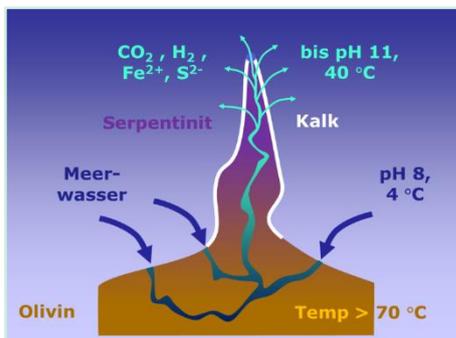


Abbildung 6: Bis das Meerwasser wieder aus den Schloten austritt, verändert sich seine Zusammensetzung durch chemische Prozesse. (Grafik: P. Eitner).

exotherme Reaktion, sodass sich die Flüssigkeit moderat erwärmt (70-90 °C). Die erwärmte Lösung steigt vom Meeresboden auf und mischt sich mit dem frischen Meerwasser, wodurch es zu Fällungsreaktionen kommt. Die mineralischen Niederschläge, die dabei entstehen, türmen sich über viele Jahrhunderte zu röhrenartigen, porösen Gebilden – den Schloten – auf, die bei „Weißen Rauchern“ im Gegensatz zu den kurzlebigen „Schwarzen Rauchern“ sehr beständig sind. Während Letztere schnell wachsen und nach einigen Jahrzehnten in sich zusammenbrechen, schätzen Wissenschaftler das Alter von „Weißen Rauchern“ auf mehrere tausend

Jahre.

Schon in der Frühzeit der Erde vor vier Milliarden Jahren standen solche Schloten als natürliche elektrochemische Reaktoren zur Verfügung, in denen heiße, alkalische,  $\text{H}_2$ -reiche Flüssigkeiten aus dem Inneren der Schloten mit dem kälteren, sauren,  $\text{CO}_2$ -reichen Meerwasser in einem Labyrinth von Mikroporen (Durchmesser 20 - 30  $\mu\text{m}$ ) vermischt wurden. Die in diesen Poren enthaltenen Eisensulfid-Cluster konnten zudem als Katalysator für die Synthese von kleinen, organischen Molekülen wie Ameisensäure ( $\text{H-COOH}$ ) fungieren (siehe Modul 3.2). Als Motor für diese Synthesen könnten Protonengradienten haben, die sich aus den unterschiedlichen pH-Werten des Meerwassers und der Schlotflüssigkeit ergeben. Das würde erklären, weshalb alle lebenden Zellen auch heute noch Protonengradienten für die Energieumsetzung nutzen (Abbildung 6).

„Weiße Raucher“ erfüllen in nahezu idealer Weise die Bedingungen für die Bildung von Biopolymeren am Beginn der Entstehung des Lebens, denn sie verfügen über ...

- a) ... eine ständige Zufuhr von Energie (z. B. in Form von Wärme und pH-Gradienten),
- b) ... eine zuverlässige Kohlenstoff-Quelle (z. B. in Form von gelöstem  $\text{CO}_2$ ),
- c) ... winzige Reaktionsräume, die eine Aufkonzentrierung der Reaktanten erlauben,
- d) ... anorganische Katalysatoren, um bestimmte Reaktionen zu beschleunigen,
- e) ... viel Zeit.

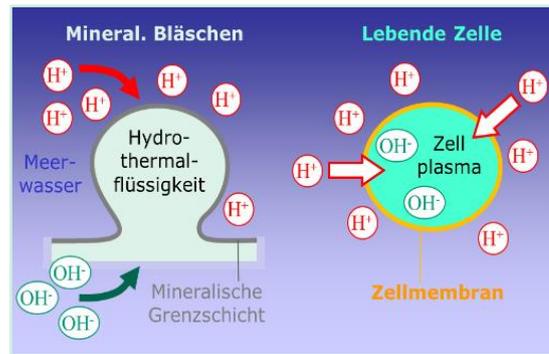


Abbildung 7: Protonentransport an präbiotischen Bläschen könnten die Grundlage für die Energiegewinnung erster Zellen gelegt haben. (Grafik: P. Eitner).

Gerade der letzte Punkt erfordert vom Entstehungsort eine große Stabilität, die bei „Weißen Rauchern“ gegeben scheint. So konnten sich genügend Biomoleküle bilden, um Stoffwechselreaktionen in Gang zu setzen – noch bevor die ersten Zellen entstanden waren.

## Exkurs 1. Das Braun-Lab: Porensysteme als Reaktor für die Entstehung des Lebens?

Es gibt zwei Ansätze, mit denen Wissenschaftler dem Ursprung des Lebens nachspüren. Die Topdown-Variante ermittelt, welche Bestandteile der heutigen Zellen möglicherweise schon früher in einfachen Lebensformen zu finden waren. Dagegen versucht der Bottomup-Ansatz zu verstehen, wie die Bausteine des Lebens durch abiotische Prozesse in der Frühzeit der Erde entstanden sein könnten. Unter allen vorgeschlagenen Hypothesen stechen die folgenden hervor: (1) die „RNA-Welt“ als eine Phase vor der zellulären Organisation des Lebens, (2) der Ursprung dieses präbiotischen Stoffwechsels in hydrothermalen Schloten („Weiße Raucher“). Dort sind es geochemische Prozesse, die die Elemente und die Energie für die Synthese der Biomoleküle, ihre Verkapselung und Replikation bereitgestellt haben. Eine der Hauptschwächen des hydrothermalen Schlot-Szenarios bei der Entstehung von Leben war das Problem der Konzentration. Auf der einen Seite neigen im Ozean alle Moleküle dazu, verdünnt zu werden, während auf der anderen Seite für die Synthese von organischen Polymeren eine hohe Konzentration von Monomeren erforderlich ist.



Prof. Dieter Braun, LMU Physik

Die in Dieter Brauns Arbeitsgruppe durchgeführten Forschungsarbeiten an der Fakultät für Physik der LMU München untersuchen Systeme außerhalb ihres Gleichgewichtszustandes (z. B. Effekte von thermischen Gradienten und Nass-Trocken-Zyklen an der Phasengrenze von Flüssigkeiten und Gasen). Diese Arbeiten gaben dem Verständnis der frühen Evolution einen entscheidenden Impuls, indem sie zeigten, dass Temperaturgradienten in hydrothermalen Schloten zusammen mit dem dort vorhandenen Porennetzwerk eine erstaunliche Aufkonzentrierung von Molekülen von bis zum 1000fachen erreichen können. Derartige Porensysteme sind somit auch gute Kandidaten für Reaktoren der RNA-Synthese, weil sie das Problem der Verdünnung der Bausteine im Meerwasser lösen. Somit könnten sie der Ausgangspunkt einer RNA-Welt sein, in der RNA-Moleküle katalytische Fähigkeiten erlangten, die ihnen beispielsweise ermöglichten, sich selbst zu verdoppeln (Koonin, 2007). Derartige Ribozyme existieren noch heute. Später entstanden dann Aminosäuren, wodurch die reine RNA-Welt zur RNA-Protein-Welt wurde.

# Aktivitäten

## Aktivität 1 – Das Blue-Bottle-Wunder

### Hintergrund:

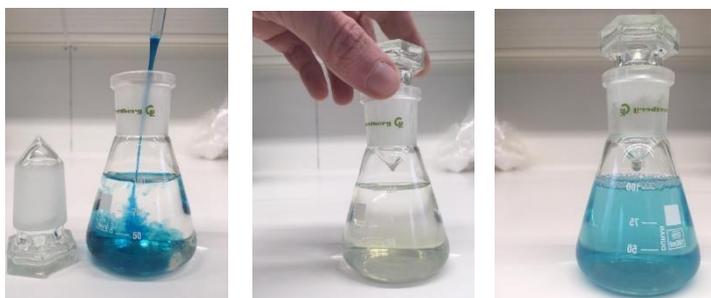
Lebewesen, die das Sonnenlicht nicht für die Energieversorgung nutzen können wie beispielsweise die Tiere, beziehen ihre Energie aus der Oxidation von chemischen Verbindungen. Man bezeichnet sie deshalb als „chemotroph“ (griech. *trophein* = sich ernähren). Bei einer Oxidation werden energiereiche Elektronen von einem Donor auf einen Akzeptor übertragen. In der Zelle werden solche Elektronen häufig über eine Kette von Molekülen weitergereicht, die bei der Annahme reduziert und bei der Abgabe oxidiert werden. Man nennt sie Redoxsysteme. Die beteiligten Moleküle können dabei Arbeit verrichten, beispielsweise Protonen über die Membran transportieren und dadurch einen Gradienten aufbauen. Der vorgestellte Versuch stellt ein Modell für die Elektronenübertragung durch ein Redoxsystem dar. Die Aldehydgruppe der Glukose reduziert in alkalischer Lösung Methylenblau (Me) zum farblosen Leukomethylenblau (LMe) und wird dabei selbst zur Carboxylgruppe oxidiert. Leukomethylenblau wird durch Luftsauerstoff wieder zum farbigen Methylenblau rückoxidiert.

### Material:

- großer verschließbarer Kolben (0,5 - 1 Liter) mit Glas- oder Gummistopfen
- 40 g Glukose
- 5 g Natriumhydroxid (Vorsicht: ätzend!)
- 0,2 g Methylenblau oder fertige Methylenblau-Lösung
- 400 ml destilliertes Wasser
- Stickstoffflasche

### Durchführung:

Lösen Sie die Glukose im Wasser, geben Sie festes Natriumhydroxid hinzu und schütteln Sie die Lösung. Erstellen Sie ggf. eine Lösung aus 0,2 g Methylenblau in 100 ml Wasser und fügen Sie davon 5 ml zur Glukose-Lösung hinzu. Verschließen Sie den Kolben luftdicht mit einem Gummistopfen und beobachten sie einige Minuten die Farbänderung, schütteln Sie den Kolben anschließend stark und lassen sie ihn dann 1 bis 2 Minuten ruhig stehen. Dieser Vorgang kann mehrfach wiederholt werden.



1. Erstellen Sie die Reaktionsgleichung.



2. Erklären Sie, wie lange sich der Vorgang wiederholen lässt.

*Bis der Luftsauerstoff oder die Glukose vollständig verbraucht sind.*

3. Ersetzen Sie die Flaschenluft durch Stickstoff und wiederholen Sie den Versuch. Beschreiben Sie die Änderung und erläutern Sie diese.



*Mit Stickstoffatmosphäre bleibt die Lösung farblos, weil Stickstoff nicht als Oxidationsmittel wirkt. Das Leukomethylen kann nicht mehr rückoxidiert werden.*

4. Legen Sie dar, welche Funktion Glukose in der Glykolyse hat.

*Der Zucker liefert die energiereichen Elektronen in Form von Wasserstoff, die letztlich für die ATP-Synthese nötig sind.*

Hier können Sie ein Video dazu anschauen!

<https://drive.google.com/file/d/16FeT8FPQTbY3T2qQ5oDJzwHcfNvZPDtE/view?usp=sharing>

## Aktivität 2 – Kartoffel versus Braunstein

### Hintergrund:

Für chemische Reaktionen gilt allgemein die Van't-Hoff-Regel, nach der eine Erhöhung der Temperatur um 10 °C die Reaktionsgeschwindigkeit um den Faktor 2-3 steigert. Um Stoffwechselreaktionen in der Zelle auch bei niedrigen Temperaturen zu beschleunigen, nutzen Lebewesen organische Katalysatoren, die man Enzyme nennt. Es handelt sich dabei um Proteine. Ein Enzym, das in (fast) allen Zellen vorkommt, ist die Katalase. Sie zersetzt das bei der Zellatmung als Nebenprodukt entstehende Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) – eine sehr aggressive Substanz, die über freie Sauerstoffradikale alle möglichen Moleküle angreifen und verändern kann. Dieselbe Zersetzung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  lässt sich auch mit dem anorganischen Katalysator Braunstein ( $\text{MnO}_2$ ) erreichen. Im Unterschied zum Enzym ist das Mineral jedoch nicht hitzeempfindlich.

### Material:

- 3 kleine Stücke frische Kartoffel
- 2 Spatelspitzen Braunstein ( $\text{MnO}_2$ )
- 5 Reagenzgläser + Halter oder 5 Petrischalen
- 25 ml Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
- 10 ml destilliertes Wasser
- Bunsenbrenner oder Wasserbad

## Durchführung:

Ein Stück Kartoffel wird im Wasserbad ein paar Minuten gekocht. Etwas Braunstein im leeren (!) Reagenzglas (RG) oder Petrischale erhitzen.

Ansatz 1 (RG1):

Wasser + rohe Kartoffel

Ansatz 2 (RG2):

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + rohe Kartoffel

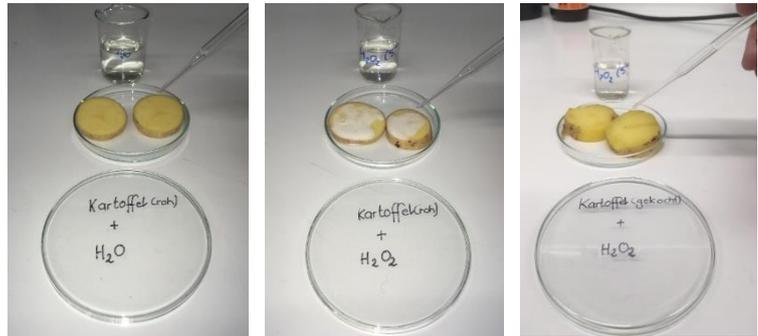
Ansatz 3 (RG3):

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + gekochte Kartoffel

Ansatz 4 (RG4):

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + kalter Braunstein

Ansatz 5 (RG5): H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + erhitzter Braunstein



1. Erstellen Sie die Reaktionsgleichung.



2. Notieren Sie Ihre Beobachtungen und erklären Sie eine Nachweismethode für das austretende Gas.

*Ansatz 1: Keine Reaktion*

*Ansatz 2: Bläschenbildung*

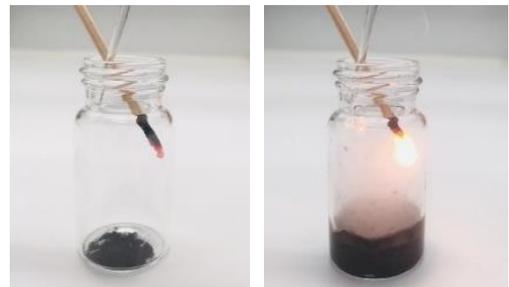
*Ansatz 3: Keine Reaktion*

*Ansatz 4: Bläschenbildung*

*Ansatz 5: Heftige Bläschenbildung*

*Nachweis mit der Glimmspanprobe (Fotos):*

*Ein glühender Holzspan flammt in Sauerstoff kräftig auf.*



3. Erläutern Sie, welchen Einfluss der erhitzte Braunstein auf die Reaktion hat.

*Die Gasbildung ist stärker, weil die Zersetzungsreaktion stärker abläuft*

4. Erklären Sie, warum die Kartoffel nach dem Erhitzen keine Reaktion mehr zeigt.

*Die Kartoffel enthält das Enzym Katalase, das aus Protein besteht und denaturiert wurde. Da Proteine durch Erhitzen ihre dreidimensionale Raumstruktur zufällig verändern, verliert das aktive Zentrum seine Passform. Daher kann das Substrat nicht mehr an das Enzym binden, und die Reaktion kann nicht mehr ablaufen.*

## Literaturquellen

[1] Gargaud M, Martin H, López-García P, Montmerle T, Pascal R (2012) *Young Sun, Early Earth and the Origins of Life*. *Young Sun, Early Earth and the Origins of Life*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22552-9>

[2] Koonin E V (2007) An RNA-making reactor for the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702699104>

## Bildnachweise

Titelseite: Rogers AD, Tyler PA, Connelly DP, Copley JT, James R, et al. ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:East\\_Scotia\\_Ridge\\_-\\_Plos\\_Biol\\_04.tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:East_Scotia_Ridge_-_Plos_Biol_04.tif)), „East Scotia Ridge - Plos Biol 04“, Angepasst von Juan Gaviria, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/legalcode>

Abbildung 3: Matthias M. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiediagramm-Enzymreaktion.svg#file>), „Energiediagramm-Enzymreaktion“, Text und Kontext von J. Gaviria/P. Eitner, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>