

SONDERDRUCK  
aus

3 | 2024

**VBio**

Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland



**ÖKOLOGIE**  
Blühphänologische  
Variation



**DINOPHYCEEN**  
Botschafter  
gegen Artensterben

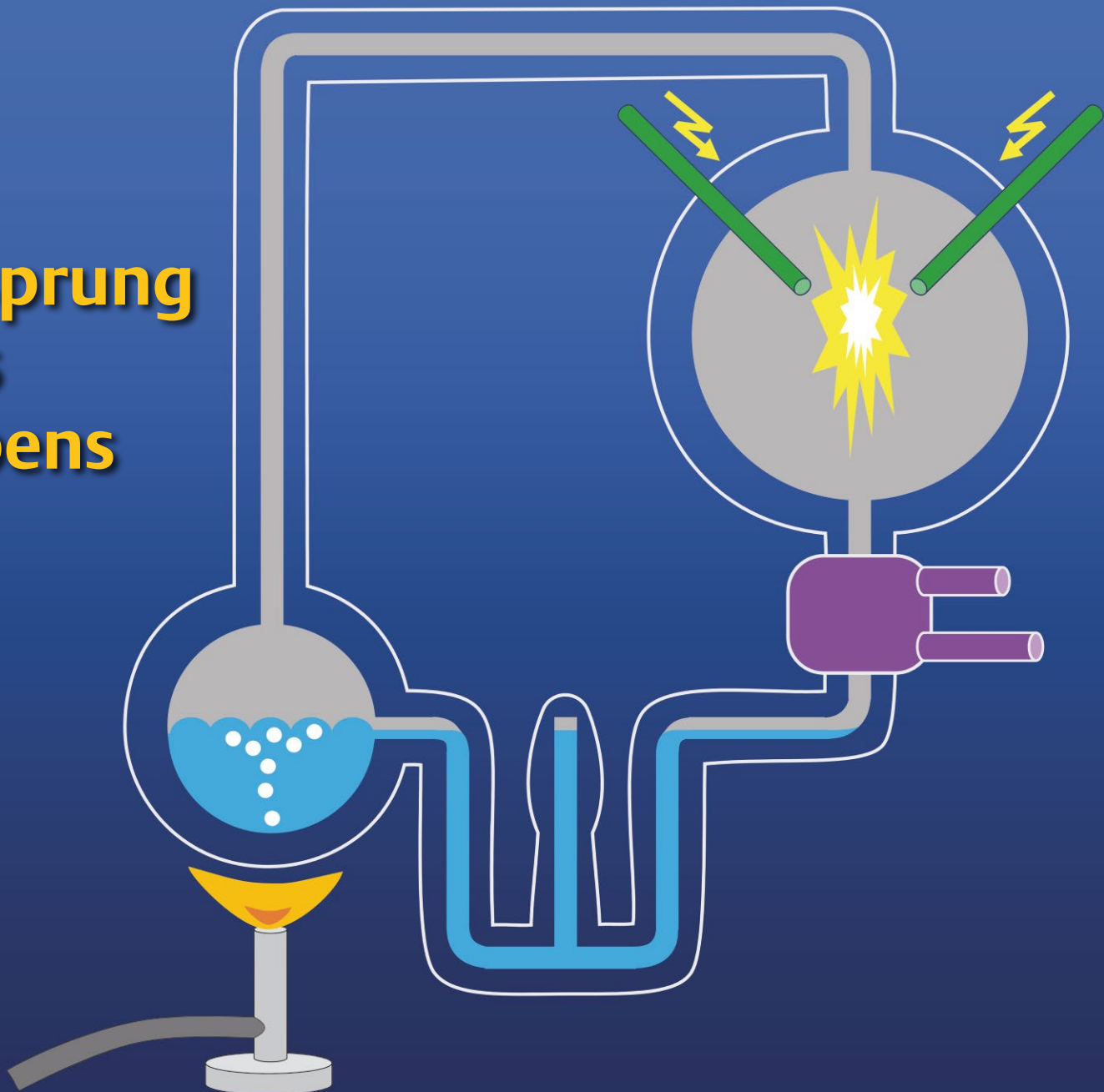


**GEWÜRZ  
PFLANZEN**  
Ätherische Öle  
in Lippenblütlern

# BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Ursprung  
des  
Lebens**



# Anaerobier lösen das Rätsel Über den Ursprung des Lebens

WOLFGANG BUCKEL



**ABB. 1** Stanley L. Miller, ca. 1999 hinter seiner Apparatur.  
Foto: www.wikipedia.com, gemeinfrei.

*Seit der Antike fragen Menschen nach dem Ursprung des Lebens. Aber erst seit 100 Jahren haben sich Wissenschaftler damit theoretisch auseinandergesetzt. In den letzten 30 Jahren haben Mikrobiologen, Biochemiker, Geologen und Meeresbiologen experimentell überprüfbare Vorstellungen zur Entstehung des Lebens auf der Erde entwickelt.*

Für Aristoteles (384–322 v. Chr.) war die Spontanzeugung oder Urzeugung – *génesis autómotos* – neben der sexuellen und vegetativen Fortpflanzung die dritte Art der Entstehung von Lebewesen. Erst in der Neuzeit wurde die Urzeugung durch Experimente von Francesco Redi (1626–1697) und Lazzaro Spallanzani (1729–1799), beide Professoren in Pisa, in Frage gestellt. Nochmal 100 Jahre später überzeugte Louis Pasteur (1822–1895) durch ähnliche Experimente mit moderneren Methoden die wissenschaftliche Gemeinschaft. Damit war die Theorie der Urzeugung endgültig gestorben.

Charles Darwin (1809–1882), der Begründer der modernen Evolutionstheorie (*On the origin of species by means of natural selection*, 1859 [1]) hat in seinem großartigen Werk nur einen Satz zum Ursprung des Lebens beigetragen: „Ich nehme an, daß wahrscheinlich alle organischen Wesen, die jemals auf dieser Erde gelebt, von irgendeiner Urform abstammen, welcher das Leben zuerst vom Schöpfer eingehaucht worden ist.“ Es ist aber zweifelhaft, ob Darwin dies selbst geschrieben hat. Es ist ein deutsches Zitat aus Ernst Häckels Schriften. Später hat Darwin in einem Brief erwähnt, dass das Leben „*perhaps in a warm little pond*“ entstanden sei. Vielleicht hat das Darwin mehr nebenbei unter Häckels Einfluss erwähnt. Ernst Haeckel (1834–1919) wird in Deutschland als Darwins „Bulldogge“ bezeichnet, da er in vielen Schriften Darwins Abstammungslehre verbreitet und bekanntgemacht hat.

Haeckel war auch sehr beeindruckt von den Erfolgen der in Deutschland aufblühenden organischen Chemie, insbesondere durch die Synthese des bisher nur aus biologischem Material erhältlichen Harnstoffs (1828), den Friedrich Wöhler (1800–1882) aus dem anorganischen Salz Ammoniumcyanat durch Isomerisierung erstmals gewonnen hat. In der darauffolgenden 44-jährigen Zusammenarbeit mit Justus von Liebig (1803–1873) legten beide die Grundsteine der chemischen Ausbildung an Deutschlands Universitäten, die Studenten aus der ganzen Welt anlockte. So schrieb Haeckel in seiner „*Natürlichen Schöpfungsgeschichte*“ (1874) [2]: „Da wir jetzt imstande sind, in chemischen Laboratorien ähnlich zusammengesetzte Kohlenstoffverbindungen künstlich herzustellen, so liegt durchaus kein Grund für die Annahme vor, daß nicht auch in der freien Natur sich Verhältnisse bilden, unter denen ähnliche Verbindungen entstehen könnten. Erst seitdem

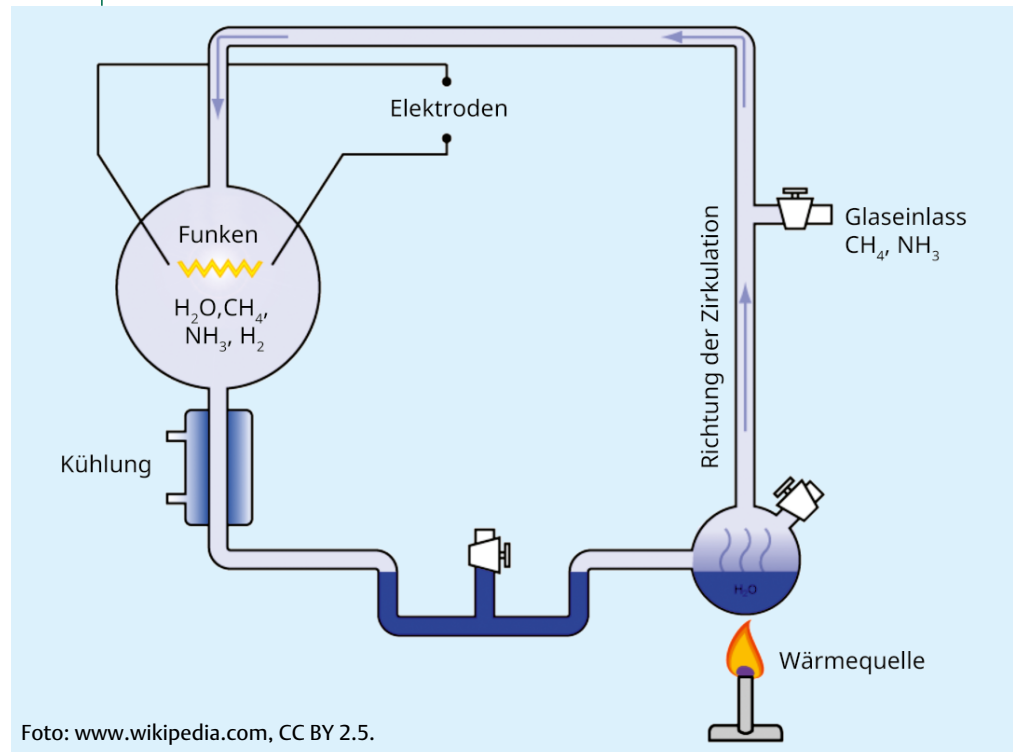
wir mit den höchst wichtigsten Moneren (Bakterien) bekannt geworden sind, erst seitdem wir in ihnen Organismen kennengelernt haben, welche gar nicht aus Organen zusammengesetzt sind, welche bloß aus einer einzigen Verbindung bestehen und dennoch wachsen, sich ernähren und fortpflanzen, ist jene Hauptschwierigkeit gelöst, und die Hypothese der Urzeugung hat dadurch denjenigen Grad von Wahrscheinlichkeit gewonnen, welcher sie berechtigt, die Lücke zwischen Kants Kosmogonie und Lamarcks Deszendenztheorie auszufüllen.“

### Heterotrophe Entstehung des Lebens?

Sicher unter dem Einfluss von Häckels Spekulationen haben 50 Jahre nach deren Veröffentlichung zwei sehr unterschiedliche Wissenschaftler Theorien zur Entstehung des Lebens entwickelt: Alexander Iwanowitsch Oparin (1894–1980), ein russischer Chemiker, und John Burdon Sanderson Haldane, bekannt als J. B. S. Haldane (1892–1964), ein britischer Universalgelehrter (engl. *polymath*). Beide haben eine Uratmosphäre angenommen, aus der sich durch Zufuhr von Energie organische Moleküle entwickeln sollten. Oparin dachte (1924), dass aus Eisenkarbid (als Kohlenstoffquelle) mit Wasserdampf, Ammoniak und Wasserstoff unter elektrischen Entladungen erst kleine organische Moleküle entstehen würden, die spontan lipidartige Bläschen (Coacervate) bilden, die zu einem zellähnlichen Zustand evolvieren. Später (1936) ersetzte er dann das Eisenkarbid durch Methan. Dagegen bestand Haldanes Uratmosphäre (1929) aus Wasser,  $\text{CO}_2$  und Ammoniak, aus der sich mit der intensiven ultravioletten Strahlung der Sonne eine Vielzahl von organischen Substanzen bilden sollte: Zucker und besonders Aminosäuren, die Bestandteile der Proteine. Alle diese in Wasser gelösten Produkte sollten so konzentriert worden sein, bis sie die Konsistenz einer dicken Suppe erreicht haben. Aus dieser „Suppe“ sollten sich die ersten Organismen entwickelt haben. Heute spricht man von Ursuppe oder im Englischen von *primordial soup*.

Um diese Spekulationen durch ein Experiment zu erhärten, beauftragte der Nobelpreisträger Harold Urey seinen Doktoranden Stanley L. Miller (1930–2007), eine geschlossene Apparatur zu bauen, in der man eine hypothetische Uratmosphäre elektrischen Entladungen aussetzen konnte (Abbildungen 1 und 2). Er füllte in die Apparatur Wasser, entfernte jeglichen Luftsauerstoff und gab die Gase  $\text{CO}_2$ , Wasserstoff und Ammoniak dazu. Dann

ABB. 2 | STANLEY MILLERS APPARATUR



erhitzte er das Wasser zum Kochen und ließ Funken zwischen den Elektroden sprühen. Nach dieser Behandlung kondensierte er den Wasserdampf und führte das Wasser und die darin enthaltenen Produkte zum Kochgefäß zurück, worauf wieder Wasserdampf mit  $\text{CO}_2$  und Ammoniak unter Blitzen reagierte. Nach einer Woche kontinuierlichen Betriebs analysierte Miller die erhaltene Lösung und fand darin neben viel Teer tatsächlich mehrere Aminosäuren, die in Proteinen vorkommen. Seine Ergebnisse veröffentlichte Miller 1953 in der Fachzeitschrift *Science* [3]. Da es ungewöhnlich war und auch heute ist, dass Doktoranden ihre Ergebnisse ohne Doktorvater oder -mutter publizieren, wird dieses Experiment häufig als Miller-Urey-Experiment bezeichnet. Miller wurde weltberühmt, weil viele meinten, dass damit der Ursprung des Lebens gelöst worden sei.

#### IN KÜRZE

- Louis Pasteur **widerlegte 1860 die Urzeugung**, an die man seit der Antike glaubte.
- Stanley L. Miller zeigte 1953, dass sich Biomoleküle unter einer „Uratmosphäre“ zwar bilden, aber **kein Leben hervorbringen**.
- Der Stoffwechsel **der Essigsäure-bildenden anaeroben Bakterien** kann den Ursprung des Lebens erklären.
- Hydrothermale Unterwasserschloten (40–100 °C) wie die heutigen am Atlantischen Rücken werden als **Geburtsorte des Lebens** angenommen.



## ERNÄHRUNGSWEISEN VON LEBEWESEN

Heterotrophe Lebewesen sind auf organisches Material als Kohlenstoffquelle angewiesen (Tiere, Pilze und die meisten Bakterien).

Autotrophe Lebewesen stellen die benötigten organischen Stoffe aus dem anorganischen CO<sub>2</sub> selbst her (Pflanzen und einige Bakterien).

Zusätzlich kann die Energiequelle durch die Vorsilbe „chemo-“ oder „photo-“ angegeben werden. Beispielsweise sind Pflanzen photoautotroph und Tiere chemo-heterotroph.

In meinem Chemiestudium (1959–1965) hatte ich von Millers Entdeckung gehört und war deshalb sehr erstaunt, dass ich 20 Jahre später einen Brief von so einem berühmten Mann erhielt. Miller hatte meine Adresse von dem an der *University of California* in Berkeley forschenden Mikrobiologen und Biochemiker Horace Albert Barker erhalten, in dessen Labor ich in den Jahren 1970/71 als Postdoc gearbeitet hatte. Miller bat mich in seinem Brief, mit einem von mir isolierten Enzym Messungen zur Berechnung von Bildungsenergien von kleinen biochemischen Molekülen durchzuführen. Ich habe das gern getan und die Ergebnisse zusammen mit Miller 1987 im *European Journal of Biochemistry* publiziert [4]. Ende der 1990er Jahre schrieb mir Miller, dass er nach Deutschland käme und mich in Marburg besuchen könnte. Ich habe ihn sofort zu einem Vortrag in unserem Biochemischen Kolloquium eingeladen. Als ich ihn am Bahnhof abholte, erzählte er mir: *“On the railway from Frankfurt airport to Marburg I made a stopover in Geissen (Gießen) and visited the Liebig Museum”* [5]. Wir waren alle sehr auf Millers Vortrag gespannt, aber zu unserer Enttäuschung berichtete er nur über die Ergebnisse seiner Doktorarbeit vor über 40 Jahren. Die Frage von einem Marburger Kollegen, ob sich sein Gebiet nach seiner Doktorarbeit weiterentwickelt habe, musste er verneinen. Damit hat Miller allen Zuhörern gezeigt, dass zwar unter präbiotischen Bedingungen biologische Moleküle entstehen können, wie diese sich aber zu Proteinen und Nukleinsäuren zusammenfügen und daraus Leben entsteht, konnte er uns nicht sagen. Somit ist die Forschung zur Entstehung des Lebens keinen Schritt weitergekommen, als Darwins Vorstellung von einem nährstoffreichen *„warm little pond“*. Millers epochalen Arbeit (1953) folgten nur wenige Wissenschaftler mit eigenen Publikationen auf diesem Gebiet. Im gleichen Jahr – das dadurch zum Geburtsjahr der heutigen Molekularbiologie und Gentechnik mit sicher hunderttausenden Folgepublikationen wurde [6] – veröffentlichten James D. Watson (\*1928) und Francis H. Crick (1916–2004) die Struktur der Desoxyribonukleinsäure (DNA).

### Panspermie – Leben aus dem All?

Den Prozess, der auf die spontane Bildung von Aminosäuren folgen sollte, würde man als chemoheterotrophen Ursprung des Lebens bezeichnen. Heutzutage sind aber viele Wissenschaftler überzeugt, dass Leben nur aus anorganischen Ver-

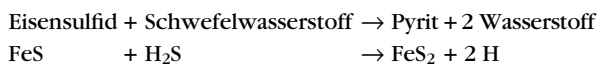
bindungen wie CO<sub>2</sub> und Wasserstoff, also chemoautotroph, entstanden sei. Demzufolge gibt es zwei sehr unterschiedliche Theorien zur Entstehung des Lebens: heterotroph und autotroph (siehe hierzu auch Kasten „Ernährungsweisen von Lebewesen“). Bevor ich darauf näher eingehe, möchte ich kurz die Frage behandeln, ob das Leben überhaupt auf der Erde und nicht woanders entstanden sei. Um die Suche nach der Entstehung des Lebens auf der Erde zu umgehen, wurde im 19. Jahrhundert – bald nachdem Louis Pasteur der Urzeugung den Todesstoß versetzt hatte – die Panspermie-Hypothese entwickelt (von altgriechisch pan, überall und sperma, Samen): Das Leben sei auf einem oder vielen Orten im Weltall entstanden und von dort vor etwa vier Milliarden Jahren auf die Erde gelangt, möglicherweise durch Meteoriten. Einer der prominentesten Vertreter dieser Hypothese war Sir Francis Crick. Zwar enthält einer der bekanntesten und bestens untersuchten Meteoriten – der Murchison-Meteorit, der 1969 in Australien in der Nähe von Murchison, Victoria, niedergegangen war – einige der in Proteinen vorkommenden Aminosäuren, aber keine lebende Zelle. Enthielte der Meteorit Lebewesen, wäre die Entstehung des Lebens nur ins Weltall verschoben und die Frage bliebe ungelöst: heterotroph oder autotroph?

Die Panspermie-Hypothese ist immer noch aktuell: Am 14. April 2023 ist die Jupiter-Sonde *“Juice” (Jupiter icy moons explorer)* der *European Space Agency (ESA)* erfolgreich mit einer Ariane-Rakete Richtung Jupiter gestartet, den sie mit seinen Monden ab 2031 umkreisen soll. Ihre Mission ist es, nach Leben oder Lebensbedingungen unter den Eismänteln der Monde Europa, Ganymed und Kallisto zu suchen. Der 1 km dicke Eismantel Ganymeds besteht aus mehreren Schichten Eis und salzhaltigem Wasser, das durch das Salz und die Wärme vom Inneren des Mondes flüssig bleibt und Leben enthalten könnte. *“Juice”* soll 2035 auf Ganymed abstürzen und die Oberfläche untersuchen. Durch Verwerfungen und kaltem Vulkanismus (Kryovulkanismus) wird das Wasser auf die Oberfläche des Mondes Ganymed gespült und der chemischen Analyse zugänglich. Auch der Nachweis von Acetat (Essigsäure) kann auf Leben hindeuten (siehe weiter unten).

### Chemoautotropher Ursprung des Lebens?

Um aus der Sackgasse des heterotrophen Ursprungs herauszukommen, lag es nahe, den Stoffwechsel der vermutlich ältesten Organismen, der autotrophen anaeroben Bakterien als Vorbild zu nehmen. Der Chemiker und Patentanwalt Dr. Günter Wächtershäuser hat als erster einen solchen Stoffwechsel benutzt, um eine völlig neue Theorie zur Entstehung des Lebens zu entwickeln. Wächtershäuser hat in Marburg Chemie studiert und hat als Patentanwalt erst in den USA und dann in München sehr erfolgreich gearbeitet. In den 1980er Jahren begann er sich mit philosophischer Hilfe durch Karl Popper mit dem Ursprung des Lebens theoretisch zu beschäftigen. Wächtershäuser hielt faszinierende Vorträge, die mich und viele meiner Kollegen begeisterten [7].

Was benötigt man zur Bildung eines primitiven Stoffwechsels aus  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ )? Wächtershäuser benutzte den reversen Zitronensäurezyklus des anaeroben grünen Schwefelbakteriums *Chlorobium limicola*, der bei jedem Umlauf 2  $\text{CO}_2$  zu aktivierter Essigsäure (Acetyl-CoA) reduziert. Weitere  $\text{CO}_2$ -Addition (Carboxylierung) liefert Brenztraubensäure (Pyruvat), Zitronensäure (Citrat) und 2-Oxoglutarat. Aus Pyruvat, Oxalacetat und 2-Oxoglutarat entstehen mit Ammoniak leicht die häufigen Aminosäuren Alanin, Aspartat und Glutamat. Im ‚normalen‘ Zitronensäurezyklus der aeroben Organismen wird die aktivierte Essigsäure mit Sauerstoff unter Bildung von Energie in Form von ATP und Wärme zu 2  $\text{CO}_2$  und 2  $\text{H}_2\text{O}$  oxidiert. Als Energiequelle, die die Bildung dieser Intermediate antreibt, kommt Sonnenlicht wie bei *C. limicola* sicher nicht in Frage, da die Photosynthese komplexe Pigmente benötigt. Wächtershäuser hatte eine geniale Idee: die Bildung von Pyrit ( $\text{FeS}_2$ , Katzensgold) aus Eisensulfid ( $\text{FeS}$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), wobei Wasserstoff in *statu nascendi* (H) entsteht, der vermutlich leicht  $\text{CO}_2$  reduziert.



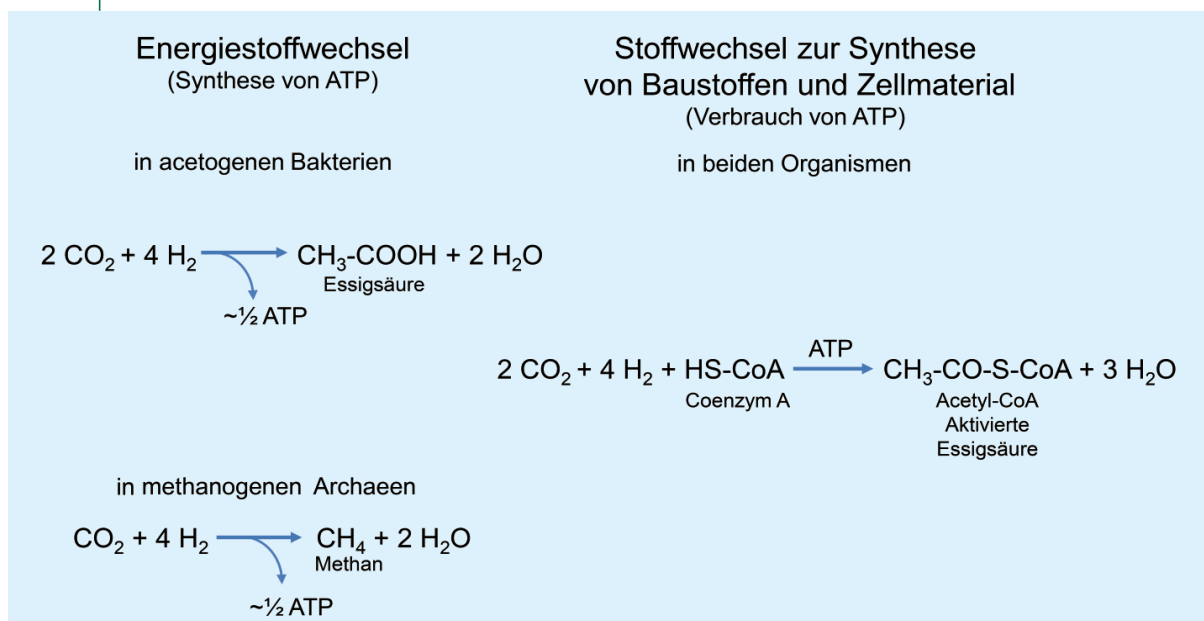
Der Begriff in *statu nascendi* (im Zustand der Geburt, des Entstehens) bedeutet, dass Wasserstoff (H) in der sehr reaktionsfähigen und energiereichen atomaren Form entsteht. Kurz danach bildet sich aus zwei H-Atomen der stabile gasförmige Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ).

Der primitive Stoffwechsel muss zu einem verbesserten Stoffwechsel und letztendlich zu einem Organismus evolviert. Alle Intermediate des reversen Zitronensäure-

zyklus sind 2–3-fach negativ geladen und bleiben daher an der positiv geladenen Oberfläche des Pyrits hängen. Einfach negativ geladene, neutrale oder positiv geladene Moleküle verschwinden im Ozean und werden damit von einer Evolution ausgeschlossen. So wird der reverse Zitronensäurezyklus bevorzugt und weiter optimiert.

Durch seine Theorie und Vorträge hat sich Wächtershäuser als ernst zu nehmender Wissenschaftler etabliert und wurde von der Universität Regensburg zum Professor ernannt. So gelang es ihm, Mittel von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu bekommen, um seine Theorien experimentell zu bestätigen. Die Technische Universität München stellte ihm ein Labor zur Verfügung, in dem er mit der Chemikerin Dr. Claudia Huber experimentell zu forschen begann. In ihren Veröffentlichungen war aber von Pyrit und dem reversen Zitronensäurezyklus nicht mehr die Rede. Dafür arbeiteten die Forscher mit der Reduktion von  $\text{CO}_2$  mit Wasserstoff zur aktivierten Essigsäure (Acetogenese), einen Weg, den noch heute die acetogenen Bakterien für ihren Energie- und Baustoffwechsel verwenden (Abbildung 3). Methanogene Archaeen nutzen die Methanogenese für ihren Energiestoffwechsel, während sie ebenfalls über die Acetogenese Zellmaterial synthetisieren. Acetogenese und Methanogenese sind die einzigen in der Natur vorkommenden Wege der  $\text{CO}_2$ -Fixierung, die keine zusätzliche Energie benötigen. Die notwendige Energie liefert die Reduktion von  $\text{CO}_2$  mit  $\text{H}_2$  selbst. Trotzdem ist diese Reduktion ein chemisch schwieriger Prozess, der nur mit einem geeigneten Katalysator abläuft. Da Huber und Wächtershäuser diesen Katalysator nicht hatten, ersetzten sie  $\text{CO}_2$  durch das leichter reduzierbare Kohlenmonoxid (CO) und behandelten es zusammen mit  $\text{H}_2$  und

**ABB. 3 | STOFFWECHSELWEGE AM URSPRUNG DES LEBENS**



**Die beiden Stoffwechselwege von heutigen anaeroben Bakterien und Archaeen (siehe Kasten „Archaea und Bacteria“) zu Acetat und Methan sind die einzigen bekannten  $\text{CO}_2$ -Fixierungen, die Energie abgeben statt zu verbrauchen.**

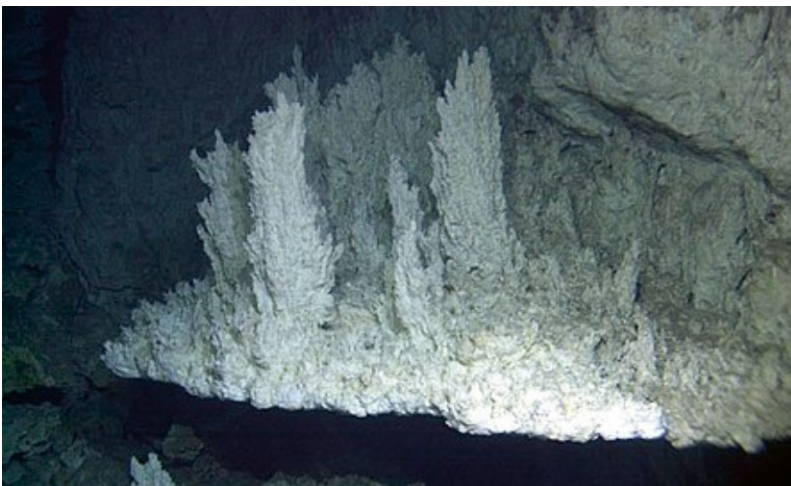
## ARCHAEA UND BACTERIA

Beide sind Einzeller ohne Zellkern, deren DNA sich im Zytoplasma befindet. Sie werden daher im Gegensatz zu den Eukaryoten (Tiere, Pflanzen und Pilze mit echtem Zellkern) Prokaryoten genannt. Deren Zellen haben ein ca. 1000-fach kleineres Volumen als die der Eukaryoten. Archaea (Archaeen) und Bacteria (Bakterien) unterscheiden sich durch den Aufbau der Zellmembran und der Zellwand. Archaea sind durch ihren genetischen Apparat näher mit Eukaryoten verwandt als Bacteria.

H<sub>2</sub>S in einer wässrigen Suspension aus Nickelsulfid, Eisensulfid und Selen als Katalysatoren bei 100 °C. Die Bildung von aktivierter Essigsäure (Acetylmethylsulfid) aus CO konnte mit Anilin als Acetanilid nachgewiesen werden [8]. Die Forscher betrachten diese Bildung der aktivierten Essigsäure als die ursprüngliche (primordiale) Initiationsreaktion für den Ursprung des Lebens. Allerdings gab es in der Uratmosphäre wahrscheinlich kein CO.

### Ursprung des Lebens in hydrothermalen Schloten?

Hydrothermale Schloten in den Ozeanen sind durch die *Black Smoker* (schwarze Raucher) bekanntgeworden. An der Bruchlinie des Atlantischen Rückens, wo der amerikanische und der afrikanische Kontinent auseinander driften, wird 400 °C heißes, schwefelwasserstoffhaltiges und durch Metallsulfide schwarz gefärbtes Wasser in den sauerstoffreichen kalten Ozean gepumpt. Schwefelbakterien oxidieren den Schwefelwasserstoff mit dem Sauerstoff aus dem Meerwasser zu Schwefel und Schwefelsäure und gedeihen dabei prächtig. Diese Bakterien bilden wiederum die Nahrung für eine riesige Vielfalt von Muscheln und Krebsen, die man um die *Black Smoker* herum findet. Da aber Leben sicher nicht im sauerstoffreichen Wasser, sondern unter anaeroben Bedingungen entstanden ist, müsste dies bei 400 °C geschehen sein, was aber unmöglich ist. Die bis jetzt festgestellte obere Temperaturgrenze von Leben liegt



**ABB. 4 Weiße kalkige hydrothermale Schloten von Lost City.** Foto: National Science Foundation (University of Washington/Woods Hole Oceanographic Institution) über Wikimedia Commons.

bei 112 °C, bei der das Archaeum *Methanopyrus kandleri* gerade noch wachsen kann.

Neben den *Black Smokers* gibt es 15 km westlich der Bruchlinie Quellen, die weniger heiß sind und auf einem 3800 m hohen Unterwasserplateau in 700 m Wassertiefe gefunden wurden. Auf dem Plateau stehen bis zu 60 m hohe Calcit-, Aragonit- und Brucit-Kamine mit zarten bis massiven Zinnen, die an das verlorene Land Atlantis erinnern und *Lost City* genannt wurden (Abbildung 4). Das aus den Kaminen ausströmende alkalische heiße Wasser (pH 9, 40–70 °C) enthält CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Methan (CH<sub>4</sub>) und Kalziumkarbonat. Beim Austritt in den Ozean kristallisiert das Karbonat und bildet die bizarren Kamine. Der Wasserstoff, dessen Reduktionskraft bei dem alkalischen pH 9 gegenüber dem neutralen pH 7 erheblich erhöht ist, stammt aus der Serpentinisierung des Eisen(II)-haltigen Olivins, der dem Wasser (H<sub>2</sub>O) den Sauerstoff entzieht, wobei der Eisen(III)-haltige Serpentin übrigbleibt. Durch die vulkanische Aktivität im Untergrund von *Lost City* wird Olivin immer neu gebildet, so dass kontinuierlich Wasserstoff entsteht. Die heutigen Schloten sind mit Bakterien und Archaeen bewachsen, von denen letztere das Methan aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> erzeugen [9, 10].

Mehrere Autoren, insbesondere William F. (Bill) Martin (\*1957, Professor für Mikrobiologie an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf) und Michael J. Russell (\*1939, *California Institute of Technology*, Pasadena, USA), postulieren, dass die Bedingungen, wie sie in *Lost City* und ähnlichen Schloten herrschen, ideale Geburtsstätten des Lebens gewesen sein könnten [11]. Während *Lost City* nur einige tausend Jahre alt ist, könnten solche Bedingungen auch im Ozean des Hadaikums vor 4,5–4,0 Milliarden Jahren geherrscht haben. Vor 4,5 Milliarden Jahren ist die Protoerde mit Theia, einem Gestirn von der Größe des heutigen Mars, zusammengestoßen und verschmolzen. Aus dieser Kugel hat sich der Mond abgetrennt, die flüssige Erde ist fest geworden und hat sich so weit abgekühlt, dass der Wasserdampf mit CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre als Regen kondensierte und die Ozeane füllte. Fossile Funde deuten daraufhin, dass es vor 4,0 Milliarden Jahren sehr wahrscheinlich schon erstes Leben gab, das innerhalb von „nur“ 500 Millionen Jahren entstanden ist [12].

Die zur Entstehung des Lebens notwendige Energie kommt in *Lost City* also direkt aus dem heißen Erdinneren und nicht von der Sonne oder von atmosphärischen Entladungen (Gewittern). Aus CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S könnten sich in Gegenwart von Eisen, Nickel, Cobalt und Selen einfache Aminosäuren gebildet haben, da die genannten Metalle mit H<sub>2</sub> die Reduktion von CO<sub>2</sub> katalysieren konnten [13]. Kürzlich wurde experimentell gezeigt, dass metallisches Eisen, das in den Schloten vorkommt, den Wasserstoff so aktiviert, dass er CO<sub>2</sub> reduzieren kann [14] (vergl. Wächtershäusers *in statu nascendi*). Eine weitere Hürde war die Reduktion von atmosphärischem Stickstoff (N<sub>2</sub>) zu Ammoniak (NH<sub>3</sub>), der zur Synthese von Aminosäuren und den Bausteinen der Nukleobasen, aus denen RNA und



DNA bestehen, benötigt wird. Auch dabei könnte das metallische Eisen in den Schloten eine wichtige Rolle gespielt haben.

Die für die heutige Acetogenese notwendigen Coenzyme haben Strukturen, die mit denen der Nucleobasen – Pyrimidine und Purine – verwandt sind. Somit bildet die Evolution der Acetogenese eine Brücke zum genetischen Apparat. Die aus den Schloten heraustretende *primordial soup* (Ursuppe) war für die Entwicklung von Leben sicher zu dünn. Im Elektronenmikroskop sieht man aber auf der Innenseite der Schlote winzige Poren, die als Vorläufer von Zellen angesehen werden können. Darin könnte sich die Ursuppe konzentriert und weiter zu Zellen entwickelt haben.

Aus den „Zellen“ im Inneren der Schlote entstand vermutlich vor 4,0 Milliarden Jahren zum ersten Mal fortpflanzungsfähiges Leben, aus dem nach etwa 200 Millionen Jahren „Luca“ (*Last universal common ancestor*) hervorging [14]. Dieser hat sich in zwei verschiedene Richtungen weiterentwickelt: zur Acetogenese und zur Methanogenese hin (Abbildung 3). Die Zellen mit Acetogenese bildeten die Vorstufen der heutigen Bacteria und diejenigen mit Methanogenese waren die Vorläufer der heutigen Archaea.

### Zusammenfassung

Die seit der Antike herrschende Auffassung der Urzeugung wurde in der Neuzeit experimentell widerlegt. Versuche zur heterotrophen Entstehung des Lebens führten im 20. Jahrhundert in eine Sackgasse. CO<sub>2</sub>-Fixierungswege von anaeroben Bakterien und Archaeen gaben in den vergangenen 30 Jahren Hinweise für einen autotrophen Ursprung, welcher vor vier Milliarden Jahren in hydrothermalen alkalischen Schloten stattgefunden haben könnte. Derartige Schlote befinden sich heute neben der Bruchlinie des Atlantischen Ozeans zwischen Nordafrika und Nordamerika und wurden 2001 zum ersten Mal beschrieben.

### Summary

#### About the origin of life

The concept of primordial spontaneous generation, which has prevailed since antiquity, has been experimentally refuted in modern times. Attempts to generate life via a heterotrophic origin led to a dead end in the 20<sup>th</sup> century. In the past 30 years, however, the CO<sub>2</sub> fixation pathways of anaerobic bacteria and archaea have indicated an autotrophic origin. This may have taken place in similar hydrothermal alkaline vents, which today are found close to the spreading axis of the Mid-Atlantic Ridge between the North American and the North African continent.

### Schlagworte:

Urzeugung, Panspermie, heterotroph, autotroph, anaerobe Bakterien und Archaeen, lat. Bacteria et Archaea, CO<sub>2</sub>-Fixierungswege, Pyritbildung, hydrothermale Schlote, Wasserstoff in *statu nascendi*, aktivierte Essigsäure.

### Literatur

- [1] C. Darwin (1872). *The Origin of Species by Means of Natural Selection*. 6th Edition. John Murray, London 1872.
- [2] E. Haeckel (1874). *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, 5. Auflage, Berlin, S. 301
- [3] S. L. Miller (1953). A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* 117, 528–9.
- [4] W. Buckel, S. L. Miller (1987). Equilibrium constants of several reactions involved in the fermentation of glutamate. *Eur. J. Biochem* 264, 565–569.
- [5] Das Liebig Museum befindet sich in Gießen in der Nähe des Bahnhofs. Wegen eines Brandschadens ist es leider bis auf Weiteres wegen Bauarbeiten nur für Gruppen mit Buchung geöffnet (12.05.2024).
- [6] J. D. Watson, F. Crick (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature* 171, 737–738.
- [7] G. Wächtershäuser (1988). Before enzymes and templates: theory of surface metabolism. *Microbiol Rev.* 52, 452–484.
- [8] C. Huber, G. Wächtershäuser (1997). Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe,Ni)S under primordial conditions. *Science* 276, 245–247.
- [9] D. S. Kelley et al. (2001). An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30 degrees N. *Nature* 412, 145–149, <https://doi.org/10.1038/35084000>. Dieser Artikel enthält weitere Aufnahmen von *Lost City*.
- [10] D. S. Kelley et al. (2005). A serpentinite-hosted ecosystem: The *Lost City* hydrothermal field. *Science* 307, 1428–1434. In diesem Artikel findet man eine Zeichnung, die die Geologie und Topographie von *Lost City* darstellt.
- [11] W. F. Martin, M. J. Russell (2007). On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 362, 1887–1925.
- [12] N. Mrnjavac et al. (2023). The Moon-Forming Impact and the Autotrophic Origin of Life. *Chempluschem* 88(11): e202300270. <https://doi.org/10.1002/cplu.202300270>.
- [13] F. L. Sousa et al. (2018). Native metals, electron bifurcation, and CO<sub>2</sub> reduction in early biochemical evolution. *Curr Opin Microbiol.* 43, 77–83. [doi.org/10.1016/j.mib.2017.12.010](https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.12.010)
- [14] M. Brabender et al. (2024) Ferredoxin reduction by hydrogen with iron functions as an evolutionary precursor of flavin-based electron bifurcation. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 121: e2318969121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2318969121>.

### Verfasst von:



Wolfgang Buckel, geb. 1940, studierte Chemie an der Ludwigs-Maximilian-Universität in München. Diplom 1965, Promotion 1968, Postdoktorand in München (1968) und Berkeley, Kalifornien (1970–71). Akademischer Rat/Direktor an der Universität Regensburg (1969–1987), Habilitation 1975, Professor für Mikrobiologie an der Philipps-Universität Marburg (1987–2008). Fellow der Max-Planck-Gesellschaft am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg (2008–2017). Arbeiten zum Mechanismus und zur Bioenergetik enzymatischer Reaktionen in anaeroben Bakterien, insbesondere mit Coenzym B12 und ATP abhängigen Radikalreaktionen. Entdeckung und Mechanismus der Flavin-basierten Elektronen-Bifurkation.

#### Korrespondenz

Prof. Dr. Wolfgang Buckel  
Am Köppel 8  
35043 Marburg  
Email: [buckel@staff.uni-marburg.de](mailto:buckel@staff.uni-marburg.de)

Nach einem Vortrag, den der Autor bei der Versammlung der Marburger Gelehrtenesellschaft am 15. November 2022 gehalten hat.



Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM  
FÜR DIE**

**BIEWISSENSCHAFTEN**

### **Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:**

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland.
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf.
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“.
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie.



[www.vbio.de](http://www.vbio.de)

**Jetzt beitreten!**

