

Johannes Sander

# Ursprung und Entwicklung des Lebens

Eine Einführung  
in die Paläobiologie



SACHBUCH



Springer

# Ursprung und Entwicklung des Lebens

Johannes Sander

# Ursprung und Entwicklung des Lebens

Eine Einführung in die  
Paläobiologie



Springer

Johannes Sander  
Halver, Deutschland

ISBN 978-3-662-60569-1      ISBN 978-3-662-60570-7 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60570-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © Crystal light/[stock.adobe.com](http://stock.adobe.com)

Planung/Lektorat: Stephanie Preuß

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Um die Gegenwart zu verstehen ist es oft hilfreich, die Vergangenheit zu kennen. Dies gilt nicht nur für die menschliche Gesellschaft, sondern auch für das Leben auf der Erde. Innerhalb von rund vier Milliarden Jahren hat sich auf unserem Planeten eine Fülle an Leben herausgebildet. Allein schon, dass überhaupt etwas so Komplexes wie Leben entstehen konnte, gleicht schon fast einem Wunder. Bis heute wissen wir nicht mit Sicherheit, wie oft Leben im Universum vorkommt. Vielleicht sind belebte Planeten häufig, vielleicht verdanken wir unser Dasein auch nur einem seltenen Zufall. Fest steht, dass das Leben auf der Erde sehr vielfältige Formen hervorgebracht hat. In den ersten Jahrmilliarden handelte es sich dabei um Einzeller (was der Vielfalt aber keinen Abbruch tut), später kamen auch vielzellige Formen hinzu. Schließlich wurde auch das anfangs nur spärlich besiedelte Land erobert. Als „Krönung des Evolutionsprozesses“ wird häufig der Mensch betrachtet, und es lässt es sich in der Tat nicht

## VI Vorwort

leugnen, dass unsere Spezies Eigenschaften besitzt, die einzigartig sind. Nichtsdestotrotz könnten gerade diese Eigenschaften letztlich dazu führen, dass unsere Art wieder ausstirbt, wie es schon so vielen Arten auf diesem Planeten ergangen ist. Möglicherweise sind wir nur eine Episode in der Geschichte der Erde. Angesichts der Fülle der Arten, die uns vorausgingen, sollte uns dies demütig stimmen.

Dem Text wurde ein Glossar angehängt, um wichtige Begriffe nochmals separat und leicht auffindbar erklären zu können. Im Glossar erwähnte Begriffe sind im Text durch Fettdruck hervorgehoben. Zwei Stammbäume im Anhang sollen die Orientierung in den manchmal komplexen verwandtschaftlichen Beziehungen der Wirbeltiere und Pflanzen erleichtern.

Halver  
im September 2019

Johannes Sander

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Vorgeschichte: Sternenstaub</b>	1
1.1	Erste Sonnenstrahlen	4
1.2	Planetensysteme	6
<b>2</b>	<b>Die Entstehung des Lebens</b>	11
2.1	Die Quelle des Stoffwechsels	14
2.2	Der Ursprung der Erbsubstanz	17
2.3	Biomembranen	18
<b>3</b>	<b>Die Erdurzeit</b>	25
3.1	Die ersten Schritte im Archaikum	25
3.2	Das Proterozoikum	29
3.2.1	Zum Kern der Zelle	33
3.2.2	Das Leben entfaltet sich	41
3.2.3	Die Gärten von Ediacara	46
<b>4</b>	<b>Das Erdaltertum</b>	51
4.1	Der kambrische Faunensprung	52
4.2	Schriftsteine und erste Landpflanzen	61

## VIII Inhaltsverzeichnis

4.3	Ein kurzes Intermezzo: Das Silur	66
4.4	Das Devon	70
4.4.1	Ein Lehrstück der Evolution	73
4.4.2	Das Land wird grün ...	74
4.4.3	... und die Fische gehen an Land	83
4.4.4	Zum Schluss eine Katastrophe	87
4.5	Es gibt Kohle	88
4.6	Trockenheit und Salz: Das Perm	95
4.6.1	Die „Lebacher Eier“	99
4.6.2	Die Reptilien entfalten sich	100
4.6.3	Arthropoden	105
4.6.4	Das größte Massenaussterben	107
<b>5</b>	<b>Das Erdmittelalter</b>	111
5.1	Drei Schichten	112
5.1.1	Amphibien, Reptilien und Säugetiere	116
5.1.1.1	Die ersten Dinosaurier	121
5.1.2	Innovationen auch im Meer	125
5.1.3	Das Ende	129
5.2	Der Jura	131
5.2.1	Die Dinosaurier des Jura	134
5.2.2	Konkurrenz im Luftraum	138
5.2.3	Die Entwicklung der Säugetiere	141
5.2.4	Das Leben im Jurameer	144
5.3	Die Klippen von Dover	147
5.3.1	Die Dinosaurier beherrschen die Welt	150
5.3.2	Mehr als Dinosaurier	157
5.3.3	Was blüht denn da?	163
5.3.4	Die Pilze der Kreidezeit	171
5.3.5	Das Ende der Dinosaurier	172
<b>6</b>	<b>Die Erdneuzeit</b>	175
6.1	Das Alttertiär	176

6.1.1	Abkühlung	182
6.2	Das Jungtertiär	187
6.2.1	Unsere frühen Vorfahren	194
6.3	Das Quartär	200
<b>7</b>	<b>Die Entwicklung des Menschen</b>	<b>207</b>
7.1	Die frühen Vertreter der Gattung Homo	207
7.2	Die Zeit des Neandertalers	214
7.3	Der moderne Mensch	222
	<b>Anhang</b>	<b>229</b>
	<b>Glossar</b>	<b>231</b>
	<b>Literatur</b>	<b>239</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>265</b>



# 1

## Die Vorgeschichte: Sternenstaub

Ein immerwährendes Neuentstehen, Sichentwickeln und Sterben, nur, damit wieder Neues geboren werden kann: Ein so komplexes System wie das Leben auf der Erde ist keineswegs selbstverständlich. Bestimmte Voraussetzungen, die in der Natur unseres Universums liegen, entziehen sich bisher einer Begründung – etwa die exakten Werte bestimmter physikalischer Grundkonstanten, die überhaupt erst die Bildung von schweren Elementen und ausreichend langlebiger Sternen und Galaxien ermöglicht haben. Doch selbst, wenn man davon einmal absieht, ist es keineswegs sicher, dass auf einem Planeten oder Mond Leben entsteht. Die meisten Planeten und Monde unseres Sonnensystems sind wahrscheinlich unbelebt. Sicher nachgewiesen wurde Leben bisher auf keinem anderen Himmelskörper. Vermutlich hat auch der Zufall dazu beigetragen: Unser Planet hat die richtige Entfernung von der Sonne, dass flüssiges Wasser existieren kann. Und er hat die richtige Größe: Er ist weder ein Gasriese, noch zu

klein, um überhaupt eine Atmosphäre festhalten zu können. Werfen wir daher zunächst einen Blick auf die Vorgeschichte, die zur Entstehung der Erde geführt hat.

Kurze Zeit nach dem „Urknall“, der „Sekunde Null“, entstanden bei der sogenannten Urknallnukleosynthese die ersten chemischen Elemente. Damals wurden aber nur Wasserstoff – inklusive schwerem und superschwerem Wasserstoff – und Helium, sowie in geringem Maße Lithium, Beryllium und Bor gebildet. Für kohlenstoffbasierte Lebensformen waren dies indes schlechte Voraussetzungen. Damit sich auch die schweren Elemente bilden konnten, mussten zunächst Galaxien und Sterne entstehen. Dies geschah wahrscheinlich erst 180 beziehungsweise 250 Millionen Jahre nach der Sekunde Null und wird als kosmische Dämmerung bezeichnet (Hashimoto et al. 2018). Gaswolken kollabierten zu Galaxien und Sternen. Astronomen bezeichnen diese allerersten Sterne als „Sternpopulation III“ (die Zählung läuft rückwärts, es folgen also zur Gegenwart hin noch zwei weitere Generationen von Sternen, die „Population II“ und „Population I“). Sie waren wahrscheinlich sehr Masse-reich – bis zu mehreren Hundert Sonnenmassen – und hatten nur eine kurze Lebensdauer: Je massereicher ein Stern ist, auf desto höherer Flamme – genauer: mit mehr Kerntemperatur – brennt er und desto schneller verbraucht er die Energievorräte in seinem Zentrum durch Kernfusion. Dabei verschmelzen leichte Elemente zu schwereren Elementen bis zu einer Zahl von 26 Protonen (Eisen) beziehungsweise 28 Protonen (Nickel) im **Atom**kern. Sind die Energievorräte verbraucht, so können sich die Kernfusionsprozesse in der Hülle fortsetzen. Auch hierbei entstehen schwere Elemente. Explodiert ein solch massereicher Stern schließlich als Supernova, werden weitere Elemente schwerer als Eisen gebildet und außerdem zumindest ein Teil der neu gebildeten Ele-

mente ins All hinausgepustet. Diese ersten schweren Elemente sorgten im frühen Universum über eine Staub- oder eine Feinstrukturkühlung für eine Abkühlung der interstellaren Materie: Bei der Feinstrukturkühlung werden die Elektronen der Atomhüllen durch Kollisionen einzelner Atome auf ein höheres Energieniveau angehoben. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird Strahlung freigesetzt, die die Raumregion verlässt und dabei ihre Energie mitnimmt. Staubteilchen entstanden aus den ersten schweren Elementen, die sich zu Molekülen und Molekülhaufen zusammenlagerten. Kollidierten diese Staubteilchen mit Wasserstoffgas, so nahmen sie dessen Energie auf und gaben sie als Infrarotstrahlung wieder ab. Durch die Kühlungsprozesse entstanden die Voraussetzungen, damit sich auch masseärmere Sterne bilden konnten (Frebel 2008). Mehrere Zyklen von Sternneubildungen und Supernovaexplosionen bewirkten schließlich, dass sich die schweren Elemente in den Gaswolken anreicherten, die sich zwischen den Sternen befinden. Mit jeder neuen Generation von Sternen gab es also mehr schwere Elemente – womit auch die Wahrscheinlichkeit stieg, dass sich Planeten bilden konnten.

Außer den massereicheren Sternen, die in einer Supernova enden, trugen zu dieser Anreicherung aber auch kleinere Sterne bei, die ein wesentlich unspektakulärer Ende finden: Am Ende ihrer Existenz blähen sie sich als Rote Riesen auf und stoßen dabei ihre Hülle in das All ab. Weitere Quellen für schwere Elemente – vor allem Platin, Gold, Quecksilber und Uran gehören zu den schwersten Elementen – dürften Kilonovaexplosionen: Explosionen, die schwächer sind als eine Supernova und die auf die Verschmelzung zweier Neutronensterne oder eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch (beides Überreste einer Supernovaexplosion) zurückgehen könnten. Solche Kilonovae zeigen massive Gammastrahlenausbrüche.

Sie werden vom radioaktiven Zerfall der neutronenreichen Atomkerne angetrieben, die bei dem Kontakt der beiden Objekte miteinander entstehen.

## 1.1 Erste Sonnenstrahlen

Sterne wie unsere Sonne, die der dritten und damit jüngsten Sternengeneration angehören, also der „Sternpopulation I“, entstehen, wenn diffuse, interstellare Gas- und Staubwolken kollabieren. Damit eine solche, anfänglich stabile Wolke instabil wird und sich unter ihrem eigenen Gewicht zusammenzieht, braucht es entweder einen Anstoß von außen oder der durch die Temperatur des Gases erzeugte Innendruck muss langsam nachlassen (Young 2011). Als äußerer Anstoß kommen zum Beispiel die Stoßwellen einer nahen Supernova, die Kollision der eigenen Heimatgalaxie mit einer anderen Galaxie oder Magnetfelder infrage. Normalerweise ist die Masse der kollabierenden Wolke wesentlich größer, als die durchschnittliche Masse einzelner Sterne. Während des Gravitationskollapses muss es daher aufgrund von zufälligen Dichteschwankungen infolge turbulenter Strömungen zu einem Zerfall der Wolke in zahlreiche Fragmente kommen, aus denen dann jeweils die einzelnen Sterne hervorgehen. Die Sonne hatte bei ihrer Geburt also viele Geschwister. Ein möglicher Schwesterstern konnte sogar identifiziert werden: HD 162826. Der Stern der sich hinter diesen Buchstaben und Zahlen verbirgt, ist heute 110 Lichtjahre von der Sonne entfernt: Mit einem Fernglas ist er gut im Sternbild Herkules zu erkennen (Zwart 2010; Ramirez et al. 2014). Planeten wurden bei diesem Stern jedoch bisher nicht gefunden.

Mit zunehmender Dichte und Druck im Zentrum steigt die Temperatur in den Wolkenfragmenten, die zu

Sternen werden, während die Durchlässigkeit für elektromagnetische Strahlung abnimmt. Letzteres erhöht den Druck noch weiter, sodass zumindest im Zentrum dem freien Fall ein immer stärkerer Widerstand entgegengebracht wird. Dieses Stadium wird auch Protostern genannt. Solche Objekte haben noch einen Durchmesser von etwa 100 **astronomischen Einheiten**, was in etwa dem Fünffachen der Entfernung zwischen dem Planeten Uranus und der Sonne entspricht. Steigt die Temperatur im Zentrum des Protosterns weiter an, so entstehen zunächst bei einer Temperatur von 1800 Celsius aus Wasserstoffmolekülen ( $H_2$ ) Wasserstoffatome (H), bei 10.000 Celsius verliert der atomare Wasserstoff dann das Elektron seiner Atomhülle und wird so zum Wasserstoffion. Bei 100.000 Celsius ionisiert schließlich auch das Helium. Der nach außen gerichtete Druck und die nach innen gerichtete Schwerkraft gleichen sich immer mehr an, der Stern nähert sich damit seinem hydrostatischen Gleichgewicht. In diesem Stadium ist er in eine Molekülwolke eingebettet (Kokonstern) und sammelt weiter Material über eine ihn umgebende Scheibe aus Gas, Staub- und Gesteinsbrocken, die als Akkretionsscheibe bezeichnet wird (Henning 2013). Die Abstrahlung des Sterns wird zwar immer noch aus der Gravitationsenergie gedeckt, sodass der Stern weiter kontrahiert, allerdings langsamer als zuvor. Die Leuchtkraft nimmt ab, während der Druck, die Strahlungsdurchlässigkeit und die Temperatur weiter steigen. Durch die zunehmende Durchlässigkeit der Sternmaterie für Lichtquanten nimmt der Strahlungstransport zu. Überschreitet die Temperatur im Kern einen bestimmten Wert ( $\sim 2,5$  Millionen Celsius), beginnen die ersten energieliefernden Kernfusionsprozesse: Als erstes werden Deuterium beziehungsweise Lithium, Beryllium und Bor bei einer Temperatur von ein bis zwei Millionen Celsius zu Helium verbrannt. Dies erzeugt aber noch

nicht genug Energie, um die Kontraktion zum Erliegen zu bringen. Erst wenn die Kerntemperatur  $4 \times 10^6$  Celsius überschreitet, setzt die Fusion von Wasserstoff zu Helium ein und der Stern gelangt in sein thermisches Gleichgewicht.

## 1.2 Planetensysteme

Nach dem Akkretionsmodell entstehen Planetensysteme aus der kurzlebigen Akkretionsscheibe, die die jungen Sterne umgibt. Diese Scheibe besteht zunächst aus kleinen Staubpartikeln, die vor allem elektrostatisch miteinander wechselwirken. Mit der Zeit bilden sich aus diesen Staubteilchen größere Brocken. Kritisch ist hierbei die Meterbarriere (Elkins-Tanton 2017): Haben die Brocken einen Durchmesser von etwa einem Meter erreicht, so vernichten sie sich bei Stößen immer wieder gegenseitig. Elektrostatische Kräfte reichen nicht mehr, um die Objekte zusammenzuhalten. Doch erst ab einem Durchmesser von etwa 100 m wird die Schwerkraft so stark, dass sie zu einem Zusammenballen der Objekte führt. Zudem bremsen Wechselwirkungen zwischen den metergroßen Brocken und dem Gas der Scheibe die Brocken aus. Sie bewegen sich daher auf Spiralbahnen in Richtung Zentralgestirn. Möglicherweise sorgen aber Turbulenzen dafür, dass sich die metergroßen Klumpen an einigen Stellen der Scheibe, an sogenannten „Staubfällen“, konzentrieren. So können diese auch als Planetesimale bezeichneten Planetenkeime weiter wachsen, bis sie sich schließlich unabhängig vom Gas bewegen können. Einige „mausern sich“ schließlich so stark, dass aus ihnen Planetenembryos werden, die durch ihre Schwerkraft immer mehr Objekte anziehen und so ihre Bahn freiräumen. Wahrscheinlich üben die Planetesimale, solange sie noch in der Überzahl

sind, über ihre Gravitation einen Dämpfungseffekt auf die Planetenembryos aus. In der Schlussphase dürfte dieser Effekt allerdings wegfallen, sodass vorübergehend chaotische Zustände in dem Planetensystem ausbrechen: Es kommt zu Kollisionen (→ Mondentstehung) und dazu, dass einzelne Objekte aus dem System herauskatapultiert werden. Möglicherweise hat es durch Kollisionen auch mehrere Phasen der Entstehung und Neubildung von Planeten und Planetesimalen gegeben. Da die Akkretions-scheibe im Drehsinn des Sterns rotiert, umkreisen Planeten ihren Zentralstern normalerweise auch in der Rotationsrichtung und mit der Rotationsachse des Sterns. Junge Planeten sind oft noch sehr heiß und haben daher eine rote Farbe.

Die Erde ist vermutlich ursprünglich als Doppelplanet entstanden. Ihre Schwester Theia, in etwa so groß wie der Mars, stürzte allerdings vor rund 4,5 Milliarden Jahren in einem Winkel von 45 Grad auf die Gaia genannte und mit einer Rotationsdauer von nur 2,3 Stunden damals noch sehr rasch rotierende Urerde (*giant impact*) (Cuk und Stewart 2012). Dabei wurde Material aus dem durch den Einschlag völlig aufgeschmolzenen Gaia-Mantel herausgeschlagen. Hieraus hat sich später der Mond gebildet. Theias Eisenkern wäre demnach im Erdkern aufgegangen, was den geringen Eisengehalt des Mondes und damit auch seine geringe Dichte relativ zur Erde erklären könnte. Der Mantel des Protomondes oder vielleicht sogar der ganze Protomond bestand zu diesem frühen Zeitpunkt wahrscheinlich ebenfalls aus geschmolzenem Magma.

Offen ist bei diesem Modell allerdings, wie das Erde-Mond-System seinen überschüssigen Drehimpuls abgeführt hat: Möglicherweise hat die Sonne diesen aufgenommen.

Der Erdenmond ist verglichen mit dem Planeten, den er umkreist, ungewöhnlich groß. Wahrscheinlich hat

dieser Umstand wesentlich dazu beigetragen die Erdachse und damit auch das Klima auf der Erde zu stabilisieren. Der Mond dürfte somit für den dauerhaften Erhalt des Lebens auf der Erde eine große Rolle gespielt haben.

In den rund 500 Millionen Jahren, die auf den *giant impact* folgten, im sogenannten Hadaikum, bedeckte glutflüssige Lava die Erde beziehungsweise diese besaß eine zumindest noch instabile Kruste. Erst im Laufe und gegen Ende des Hadaikums kühlte die Erdoberfläche soweit ab, dass sie fest wurde und Ozeane entstehen konnten.

Das Klima auf der jungen Erde war vermutlich sehr viel kühler als heute (*faint-young-sun*-Paradoxon). Denn auch die Sonne war noch jung und besaß gerade einmal 70 Prozent ihrer aktuellen Leuchtkraft. Die Annahme von hohen Konzentrationen von Treibhausgasen wie Methan oder Kohlendioxid in der Erdatmosphäre können dieses Paradoxon zumindest teilweise auflösen.

Die Altersbestimmung von Mondgestein verrät, dass es in einem kurzen Zeitfenster vor 4,1 bis 3,7 Milliarden Jahren – also mehrere Hundertmillionen Jahre nachdem die Planeten entstanden waren – zu zahlreichen Kollisionen kleiner Körper wie **Asteroiden** oder **Kometen** mit Planeten gekommen ist, dem Großen Bombardement. Infolge dessen könnten die damals noch jungen Meere möglicherweise vorübergehend wieder verdampft sein. Die genaue Ursache für das Bombardement ist noch strittig. Als Ursache infrage kommen nach dem Nizza-Modell z. B. Wechselwirkungen zwischen den Gasriesen unter den Planeten – vor allem Jupiter und Saturn- und dem Asteroiden- bzw. dem Kuiper-Gürtel. Auch der Verlauf und das Ausmaß des Großen Bombardements sind umstritten. Möglicherweise lief es langsam aus und endete nicht abrupt wie früher angenommen (Mann 2018).

In größerer Entfernung von der Sonne könnten bei dem Bombardement wasserreiche Objekte entstanden

sein: Die Hitze des jungen Stern reichte nicht so weit, um dieses Wasser verdampfen zu lassen. Bei den Kollisionen könnten solche Objekte **organische Moleküle** auf die Erde gebracht haben (Jewitt und Young 2015). Auf Kometen wurde z. B. die Aminosäure Glycin nachgewiesen. Hauptquelle für das Wasser auf der Erde waren aber wahrscheinlich die Asteroiden und nicht die Kometen.



# 2

## Die Entstehung des Lebens

Anfangs war die Erde noch sehr heiß. Mit der Zeit kühlte sie aber immer mehr ab, sodass Wasserdampf zu Wasser kondensieren konnte. Flüssiges Wasser gibt es wahrscheinlich seit etwa 4,3 Milliarden Jahren auf der Erde. Damit waren auch die Voraussetzungen gegeben, damit sich Leben entwickeln konnte. Doch wie soll so etwas Komplexes wie das Leben einfach so entstehen? Selbst einzelne Zellen bestehen aus Tausenden von Einzelmolekülen, die alle richtig zusammenarbeiten müssen, damit die Zelle funktioniert. Betrachten wir beispielsweise die Erbsubstanz. Sie wird als Desoxyribon**nukleinsäure** (englisch kurz: DNA) bezeichnet und besteht aus vier Bausteinen (Nukleotiden): Adenosin- (A), Guanosin- (G), Thymidin- (T) und Cytidinphosphat (C), die jedes für sich selbst wieder komplexe organische Moleküle sind. In der Abfolge (Sequenz) dieser vier Bausteine ist die Erbinformation gespeichert. Jeder dieser Bausteine besteht aus einer Base (Adenin, Guanin, Thymin und Cytosin), die über einen

Zuckerrest mit einer Phosphatgruppe verbunden ist. Die Phosphatgruppen stellen jeweils den Kontakt zu dem Zuckerrest des folgenden Nukleotids her, Zuckerrest und Phosphatgruppen bilden somit das Rückgrat des Moleküls. In der variierenden Abfolge der vier Bausteine (Sequenz) der Nukleinsäuren ist letztlich die Erbinformation gespeichert.

Die Erbsubstanz muss sich bei der Teilung der Zelle verdoppeln. Nukleinsäuren besitzen dazu ideale Voraussetzungen: Sie liegen als Doppelstränge vor, wobei der eine Strang quasi eine Art Negativabdruck des anderen Strangs ist. Ein Adenosinrest des einen Stranges paart sich immer mit dem Thymidinrest des anderen Stranges und ein Guanosinrest immer mit einem Cytosinrest. Umgekehrt gilt das natürlich auch. Werden die beiden Stränge voneinander getrennt, so können die zu jedem der beiden Stränge passenden Gegenstränge leicht erzeugt werden. Die benötigten Bausteine sowie die zu ihrem Zusammenbau notwendige Energie liefert der Stoffwechsel. Dieser wiederum benötigt Enzyme, das heißt **Proteine** (= große Polypeptide), die von der DNA codiert werden. Beim Ablesen einzelner Gene wird zunächst eine Kopie der DNA erzeugt. Diese Kopie besteht aus Ribonukleinsäure (RNA), eine Substanz, die der DNA chemisch ähnelt. Allerdings dient als Zucker nicht Desoxyribose, sondern Ribose und die Base Thymin wird durch die chemisch verwandte Base Uridin ersetzt. Die Sequenz der Ribonukleinsäure wird schließlich an den **Ribosomen**, großen Strukturen, die sowohl aus Ribonukleinsäuren als auch aus Proteinen bestehen, in eine Abfolge von Aminosäure und damit in ein Protein übersetzt. Auch dieser Vorgang benötigt Bausteine und Energie, die ebenfalls der Stoffwechsel bereitstellt. Die Weitergabe der Erbsubstanz und der Stoffwechsel einer Zelle sind somit auf das engste miteinander verknüpft und können zumindest bei allen

heute existierenden Zellen nicht unabhängig voneinander gedacht werden.

Der Stoffwechsel von Lebewesen beruht vor allem auf Redoxprozessen: Bei der Reduktion nehmen Substanzen Elektronen auf, bei der Oxidation geben sie Elektronen ab. Da es immer eine Quelle (Elektronendonator, Reduktionsmittel) und einen Empfänger (Elektronenakzeptor, Oxidationsmittel) geben muss, sind Reduktion und Oxidation aneinander gekoppelt. Wir Menschen, aber auch viele andere Organismen nehmen zum Beispiel **organische Moleküle** wie Zucker oder Fettsäuren auf und oxidieren diese über die Glykolyse, beziehungsweise die  $\beta$ -Oxidation und den Citratzyklus zu Kohlendioxid. Die dabei freiwerdenden Elektronen werden schließlich auf Sauerstoff übertragen, wobei Wasser entsteht. Außerdem wird Energie frei, die der Organismus zum Leben nutzen kann.

Die Übertragung der Elektronen auf den Sauerstoff erfolgt bei uns in kleinen Organen („Organellen“), die in jeder unserer Zellen vorhanden sind, den **Mitochondrien**: Diese sind von zwei Membranen umhüllt. In der inneren Membran befinden sich Proteine, die die Elektronen aufnehmen und über mehrere Zwischenschritte an den Sauerstoff weiterreichen. Dies bezeichnet man auch als Elektronentransport- oder **Atmungskette**. Steht kein Sauerstoff zur Verfügung, so können Organismen einen Gärungsstoffwechsel betreiben. In diesem Fall dienen organische Moleküle als Empfänger für die Elektronen. Als Endprodukte verbleiben beispielsweise Alkohol oder andere organische Moleküle. Da bei einer Gärung die Kohlenstoffatome nicht vollständig zum Kohlendioxid oxidiert werden, die Oxidation also unvollständig ist, ist der Energiegewinn wesentlich geringer, als bei der Atmung. Grüne Pflanzen etwa nutzen das Sonnenlicht, um Elektronen in einen energiereichen Zustand

zu versetzen. Mit diesen Elektronen reduzieren sie dann das Kohlenstoffatom des Kohlendioxids und erzeugen somit Zucker, beziehungsweise genauer: lange, als Stärke bezeichnete Zuckerketten. Diese können sie dann nachts oder in ihren Wurzeln veratmen.

Wie genau das Leben entstanden ist, lässt sich natürlich nie mit absoluter Sicherheit sagen, da niemand dabei war und den Vorgang beobachtet hat. Um die Vorgänge dennoch besser verstehen zu können, ist es sinnvoll, zunächst einmal die Bedingungen, die auf der frühen Erde herrschten, genauer zu betrachten. Dafür bietet es sich an, das Problem in einzelne Teile zu zerlegen.

## 2.1 Die Quelle des Stoffwechsels

Das erste Zeitalter der Erdgeschichte wird als Hadaikum bezeichnet. Es beginnt mit der Entstehung des Planeten Erde und endet vor etwa vier Milliarden Jahren. Bevor es überhaupt irgendein Leben gab, bestand die Atmosphäre wahrscheinlich aus Wasserdampf, Stickstoff ( $N_2$ ), Wasserstoff ( $H_2$ ), Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), Kohlenmonoxid ( $CO$ ), Blausäure ( $HCN$ ) und vielleicht Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Methan ( $CH_4$ ) (Lloyd 2006). Das Oxidationsmittel Sauerstoff fehlte noch, die Atmosphäre war also reduzierend. Entsprechend lagen auch Eisenionen als reduzierte Fe(II)-Ionen vor. Im Gegensatz zu den stärker oxidierten Fe(III)-Ionen fehlen diesen Ionen nicht drei, sondern nur zwei Elektronen in ihrer **Atomhülle**. Die Ozeane waren damals zudem deutlich wärmer als heute (Garcia et al. 2017). Bevor Leben entstehen konnte, mussten zunächst einmal organische Moleküle entstehen. Solche Moleküle könnten mit **Meteoriten** auf die Erde gelangt sein. Teils könnten sie auch unter dem Einfluss von Blitzen in der Uratmosphäre entstanden sein,

wie das klassische Miller-Urey-Experiment zeigen konnte. Die früher postulierte Ursuppe, also eine dicke, alle Urozeane umfassende Brühe aus organischen Molekülen und Wasser, hat es aber sicher nicht gegeben. Viel wahrscheinlicher ist es, dass das Leben am Meeresboden in kleinen Gesteinsporen entstanden ist, in denen sich aufgrund ihrer geringen Größe leicht organischen Molekülen anreichern konnten. Besonders Fe(II)-Disulfide, wie zum Beispiel das Mineral Katzensgold (Pyrit:  $\text{FeS}_2$ ), könnten bei der Entstehung des Lebens eine entscheidende Rolle gespielt haben. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Eisen-Schwefel-Welt nach Günter Wächtershäuser (1990). Solche Fe(II)-Disulfide sind wie Enzyme katalytisch aktiv. Daher könnten sie unter den Bedingungen, die auf der frühen Erde herrschten, chemische Reaktionen beschleunigt haben, die zum Beispiel dem bereits erwähnten Citratzyklus weitgehend ähnelten (Keller et al. 2017; Muchowska et al. 2019).

Gute Kandidaten für die Entstehung des Lebens sind zum Beispiel basische, hydrothermale Quellen am Meeresgrund (Martin et al. 2008; Martin 2009). Diskutiert wurden und werden aber auch andere Orte, etwa Thermalquellen an Land (Damer 2016; Pearce et al. 2017). Letzterem könnte jedoch entgegenstehen, dass es damals möglicherweise noch keine größeren Festlandmassen gab. Einzelne Inseln könnte es aber durchaus gegeben haben.

Auf mittelozeanischen Rücken in der Tiefsee treten heute Thermalquellen auf, die als Black Smoker und White Smoker bekannt sind: Im Meeresboden versickert ständig Wasser. Dieses heizt sich im Untergrund dann über Magmakammern auf mehrere Hundert Grad Celsius auf und wird mit Mineralien angereichert. Tritt das Wasser dann an den Quellen wieder aus, so fallen die gelösten Mineralien durch den plötzlichen Temperaturabfall aus und erzeugen den Eindruck von weißem oder schwarzem Rauch.

Obwohl diese Smoker im Gegensatz zu dem überwiegenden Rest der Tiefsee in ihrer Umgebung reiches Leben beherbergen, sind sie wahrscheinlich nicht die besten Kandidaten für die Entstehung des Lebens. Deutlich geeigneter sind die weniger bekannten beziehungsweise oft mit den Smokern verwechselten Thermalquellen vom Typ der Lost City. Das Wasser dieser Thermalquellen ist mit nur 40 bis 90 Grad Celsius deutlich kühler, da es nicht durch Magmakammern sondern durch einen als Serpentinisierung bezeichneten chemischen Prozess erhitzt wird. Dabei reagieren Fe(II)-Ionen mit Wasser zu Fe(III)-Ionen und Wasserstoff. Außerdem ist dieses Wasser beim Austritt klar und sehr viel basischer (= höherer pH-Wert) als das umgebende Meerwasser.

Falls solche Quellen auf der frühen Erde existiert haben und es in ihrer Umgebung in porösem Gestein Eisensulfide wie Pyrit gab, so waren wesentliche Voraussetzungen erfüllt, damit ein einfacher Stoffwechsel zur Erzeugung organischer Verbindungen ablaufen konnte: In den kleinen Gesteinsporen könnte – gefördert durch die Eisensulfide – bei der Serpentinisierung gebildeter molekularer Wasserstoff dazu gedient haben, Kohlendioxid zu reduzieren, das im Meerwasser damals besonders reichlich vorkam. So könnten organische Kohlenwasserstoffe entstanden sein, die sich in den kleinen Hohlräumen leicht anreichern konnten. Durch verschiedene chemische Reaktionen können sich beispielsweise Methan, Acetat, Pyruvat und sogar bestimmte Aminosäuren gebildet haben. So jedenfalls hat es sich an rezenten Tiefseequellen gezeigt (Ménez et al. 2018). Es ist auch denkbar, dass sich größere Moleküle wie Polypeptide (= kleine Protein) oder **Nukleinsäuren** gebildet haben.

Die für diese Prozesse benötigte Energie könnte aus dem pH-Gradienten zwischen der Quelle und dem umgebenden Meerwasser stammen: Jeder Gradient strebt dazu, sich auszugleichen, dabei wird Energie frei, die genutzt werden kann. Wasserkraftwerke etwa nutzen dieses

Prinzip, um Turbinen anzutreiben, die Strom erzeugen. Noch heute verwenden auch Organismen pH-Wert-Gradienten über Zellmembranen zur Energiegewinnung. Cluster aus Eisen- und Schwefelatomen werden von vielen Enzymen als Kofaktoren genutzt. Außerdem existiert bei heute lebenden Mikroorganismen ein sehr sauerstoffempfindlicher – und damit wahrscheinlich sehr alter – Stoffwechselweg, der gut zu diesen Prozessen passen würde. Diesen als Acetyl-CoA-Weg bekannte Stoffwechselweg nutzen zum Beispiel Mikroorganismen, die im sauerstofffreien Schlamm von Seen aus molekularem Wasserstoff und Kohlendioxid Methan oder Acetat bilden (Sander 2016a).

## 2.2 Der Ursprung der Erbsubstanz

Für das Verständnis dafür, wie der genetische Apparat entstanden ist, der für die Speicherung, die Weitergabe und das Auslesen der Erbinformation zuständig ist, ist es bedeutsam, dass nicht nur **Proteine**, sondern auch **Ribonukleinsäuren** (RNA-Moleküle) chemische Reaktionen beschleunigen können. Nukleinsäuren könnten rein chemisch aus Formamid, Zuckern und anderen Substanzen entstanden sein, die sich in den hydrothermalen Gesteinsporen anreicherten (Powner et al. 2009; Niether et al. 2016). Es erscheint daher denkbar, dass es in einer frühen Phase der Entstehung des Lebens spontan entstandene RNA-Moleküle oder der RNA ähnliche Nukleinsäuren gab, die imstande waren, ihre eigene Synthese zu **katalysieren**. Einmal entstanden hätten sich solche RNA-Moleküle durch einen selbst verstärkenden Prozess immer mehr angehäuft. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der RNA-Welt. Später oder vielleicht sogar schon von Beginn an wurden die RNA-Moleküle dann wahrscheinlich von Proteinen

unterstützt: RNA-Moleküle beziehungsweise große Komplexe aus RNA-Molekülen und Proteinen – das heißt frühe Vorläufer der **Ribosomen** – katalysierten die Bildung von Proteinen. Diese wiederum katalysierten die Bildung von RNA-Molekülen. Aus dieser RNP-Welt – „P“ steht für „Protein“ – könnte sich dann unsere moderne DNA-Welt entwickelt haben. In dieser hat die – verglichen mit der Ribonukleinsäure – wesentlich stabilere Desoxyribonukleinsäure die Rolle des Informationsspeichers übernommen, während die RNA-Moleküle auf ihre katalytischen Funktionen und die Übertragung der Information zu den Ribosomen beschränkt wurde.

Problematisch bei diesem Szenario ist allerdings, dass RNA-Moleküle bei den hohen Temperaturen nahe von Thermalquellen instabil sind. Es wird daher spekuliert, ob der RNA-Welt nicht eine PNA-Welt vorausgegangen sein könnte, in der Peptidnukleinsäuren vorherrschten (Martin et al. 2008). Bei solchen Peptidnukleinsäuren besteht das Rückgrat des Moleküls nicht aus sich abwechselnden Zucker- und Phosphatresten wie bei den RNA- und den DNA-Molekülen, sondern aus einer Polypeptidkette wie bei Proteinen. Peptidnukleinsäuren sind somit Hybride aus Nukleinsäuren und Proteinen. Alternativ oder ergänzend wird außerdem überlegt, ob nicht bei der sogenannten Thermophorese Nukleinsäuren in kühleren Bereichen ansammelten (Niether et al. 2016): Bei diesem Prozess führen Temperaturunterschiede dazu, dass einzelne Moleküle unterschiedlich schnell diffundieren.

## 2.3 Biomembranen

Alle lebenden Zellen sind heute von Biomembranen umgeben, die sie von ihrer Umgebung abgrenzen. Diese bestehen aus einer Doppelschicht von Molekülen, bei

denen an einen hydrophilen (wasserliebenden) Kopf hydrophobe (wasserabweisende) Fettsäureschwänze angeheftet sind. Diese Moleküle können sich so zusammenlagern, dass die Schwänze in das Innere der Membran zeigen, während die Köpfe nach außen auf das wässrige Umgebungsmilieu hin ausgerichtet sind. Wahrscheinlich sind durch den präbiotischen Stoffwechsel irgendwann solche Moleküle und damit Membranen entstanden. Möglicherweise haben diese zunächst die Gesteinsporen voneinander abgegrenzt. Später haben sich dann einzelne, von einer Membran umgebene Tröpfchen, die in ihrem Inneren einen Stoffwechsel und Nukleinsäuren trugen, von dem Gestein gelöst.

Viele dieser ersten „Zellen“ sind wahrscheinlich wieder zugrunde gegangen oder haben den Weg zurück in das Gestein gefunden. Klare Abstammungslinien, wie wir sie bei heutigen Organismen finden, gab es damals sicher noch nicht. Vielmehr war alles eine Art „wabernde Masse“, in der genetisches Material ständig ausgetauscht wurde. Mit der Zeit bildeten sich aber doch einzelne, direkt miteinander konkurrierende Linien. Der Mikrobiologe Karl Woese hat hierfür den Begriff der *Darwinian transition* geprägt, zu Deutsch den Übergang zu einer Darwin'schen Evolution. Doch auch jetzt war immer noch ein Weg zurück zu der „wabernden Masse“ möglich. Wahrscheinlich kam es in dieser Frühphase zu einem mehrfachen Wechsel zwischen präbiotischen Zuständen und echtem Leben (Arnoldt et al. 2015).

Nimmt man an, dass das Leben nicht in der Tiefsee, sondern in Thermalquellen an Land entstanden ist, so könnte es eine elegante Erklärung für den ständigen Wechsel zwischen ersten „Zellen“ und der „wabernden Masse“ geben: Thermalquellen an Land sind durch ständig wechselnde Wasserstände gekennzeichnet. In Trockenphasen könnten sich durch chemische Reaktionen **Polymere** (zum Beispiel Nukleinsäuren, Proteine etc.)

bilden, die dann in Nassphasen von Lipidmembranen umhüllt und somit geschützt im Wasser verteilt werden, wo sie miteinander konkurrieren. Beim Übergang in die Trockenphase könnten sich diese „Protozellen“ zu einem Gel verdichten. In dieser Phase verschmelzen die einzelnen Protozellen dann zu Lamellen und vereinen sich so wieder zu einem Kollektiv, das Polymere untereinander austauschen kann (Damer und Deamer 2015).

Schließlich kristallisierten sich aber dennoch zwei Hauptlinien des echten Lebens heraus: die Bakterien und **Archaeen**. Sie unterscheiden sich so deutlich in verschiedenen Punkten – etwa in der Zusammensetzung ihrer Zellmembran und Zellwände –, dass ihr letzter gemeinsamer Vorfahre möglicherweise noch keine lebende Zelle war, sondern ein „präbiotischer Zustand“ (Kandler 1995; Martin und Russel 2003).

Ein wichtiger Faktor bei der Separation der Archaeen und der Bakterien könnte die Entwicklung von Zellwänden gewesen sein: Die Zellwände beider Gruppen unterscheiden sich erheblich voneinander (s. Abschn. 3.2.1). Zellwände verhindern auf einfache Weise, dass sich Zellmembranen unkontrolliert trennen oder verschmelzen, und damit die ungleichmäßige Aufteilung von Molekülen zwischen den Tochterzellen. Die Wände bieten Schutz vor Umwelteinflüssen und erlauben die Besiedlung von Lebensräumen, deren **osmotischer Wert** sich von dem osmotischen Wert des Zellinneren unterscheidet (Errington 2013).

Es ist keineswegs auszuschließen, dass in der Frühphase des Lebens außer den Bakterien und Archaeen auch noch weitere Entwicklungslinien existiert haben, die heute ausgestorben sind. Womöglich haben sie sich auch als Viren erhalten, das heißt als DNA- oder RNA-haltige Partikel, die keinen eigenen Stoffwechsel besitzen, sondern lebende Zellen für ihre Vermehrung nutzen. Bestimmte