



Modul 8

Entstehung und Entwicklung des Lebens

Begleittext für Lehrkräfte

Erhard Lipkow, Hanno Kinkel, Ulf Neubert und Frank Siemer

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ als Hypertext bzw. die Materialien als pdf-Dateien, Videos, Interaktionen, Animation usw. über ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion zur Verfügung.

Alle kursiven Begriffe werden im Glossar erklärt und alle unterstrichenen Begriffe sind zu Positionen verlinkt, die weitere Informationen liefern.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.



Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: <http://www.ipn.uni-kiel.de>

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde“ dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema „System Erde“ wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert. Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist.

Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (<http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de>).

© 2005

Alle Rechte beim

Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)

Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.



Forschungsdialog: System Erde

Kontakt

Ulrike Gessener

Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften an der Universität Kiel
Olshausenstr. 62
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121

E-Mail: gessner@ipn.uni-kiel.de

<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

Autoren dieses Moduls:

Dr. Erhard Lipkow, Dr. Hanno Kinkel, Ulf Neubert,
Dr. Frank Siemer

Geowissenschaftliche Beratung:

Dr. H. Kinkel (Universität Kiel)

Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:

CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH
interactive in science (Düsseldorf)

Texte: Päivi Taskinen (IPN)

Herausgeber:

Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Dr. Sylke Hlawatsch



Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Zielsetzung und Begründung	4
2	Sachinformation	4
2.1	Überblick	4
2.2	Vertiefende Darstellung	8
2.2.1	Theorien zur Entstehung des Lebens	9
2.2.2	Weiterentwicklung biotischer Moleküle	15
2.2.2	Altersbestimmung von Gesteinsserien	19
2.2.3	Fauna und Flora im Karbon	21
2.2.4	Entstehung von Kohle im Karbon	27
2.2.5	Wechselwirkungen zwischen den Sphären	29
3	Didaktische Information	34
3.1	Lernziele	35
3.2	Hinweise zu den Lernvoraussetzungen	38
3.3	Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen	38
3.4	Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien	39
4	Vorschläge für den Unterrichtsverlauf	41
5	Literatur	42
6	Unterrichtsmaterialien	45

Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR

Baustein 2: Simulationsexperimente zur Entstehung präbiotischer Moleküle

Baustein 3: Hypothesen zur Entstehung von Leben

Baustein 4: Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre

Baustein 5: Kohlebildung und das Klima im Karbon

Baustein 6: Die Grube Messel - eine Goldgrube für Paläontolog(inn)en



1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Das Modul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“ gibt einen Überblick über aktuelle Theorien zur Entstehung des Lebens und über die Entwicklung der Biosphäre in der Erdgeschichte. Dabei werden die jeweiligen Wechselbeziehungen zwischen den abiotischen Sphären Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und der Biosphäre aufgezeigt.

Die Schüler/innen vollziehen anhand historischer Versuche den Erkenntnisweg zur Widerlegung der „Urzeugung“ sowie exemplarisch die naturwissenschaftliche Arbeitsweise nach. Sie erkennen, dass aus lebloser Materie durch Einwirkung von Energie biotische Moleküle entstanden sind und erfahren wie die Entstehung des Lebens vor ca. 3,8 Milliarden Jahren stattgefunden haben könnte. Sie lernen aktuelle Theorien zur Entstehung des Lebens kennen und erfassen die Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei der Erforschung weit zurückliegender Prozesse. Die Entwicklung der Biosphäre wird weitgehend eigenständig erarbeitet. Vertiefend werden Wechselbeziehungen zwischen den Sphären im Verlauf der Erdgeschichte dargestellt. Die Lernenden sollen erkennen, dass die heute vorliegende Deutung über die Entwicklung der Biosphäre ein Ergebnis der interdisziplinären geowissenschaftlichen Arbeitsweise ist.

Inhaltlich stehen zwei Fragen im Mittelpunkt dieses Moduls:

1. Welche Bedingungen ermöglichten die Entstehung und Entwicklung des Lebens?
2. Welche Beziehungen bestehen zwischen der Biosphäre und den anderen Teilsystemen der Erde?

Kooperative und schülerorientierte Arbeitsformen bilden den methodischen Schwerpunkt des Moduls. Die Genese des Wissens erfolgt über die Anwendung naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsmethoden. Die Materialien sind geeignet, die Entstehung und Entwicklung des Lebens in einem systemischen Zusammenhang zu betrachten.

2 Sachinformation

Nach dem heutigen Kenntnisstand ist die Erde der einzige Planet in unserem Sonnensystem, auf dem es Leben gibt. Die vor ca. 3,8 Milliarden Jahren auf der Erde existierenden Verhältnisse von Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre waren notwendige Grundvoraussetzungen für die Entstehung von Leben, also auch der Biosphäre. Ohne im einzelnen zu wissen, wie und wo die Entstehung des Lebens stattgefunden hat, gibt es mehrere wissenschaftlich fundierte Hypothesen zur Entstehung des Lebens.

Zwischen der Entwicklung erster prokaryotischer Lebewesen und der Vielfalt der Biosphäre wie wir sie heute kennen, liegt ein stetiger Evolutionsprozess von rund 3,8 Milliarden Jahren. Auch die Erdoberfläche würde heute ganz anders aussehen, wenn es keine Lebewesen auf der Erde gäbe. Die Biosphäre war und ist noch immer eine prägende Kraft auf die übrigen Sphären. Die Sachinformationen sind in zwei Stufen gegliedert,

2.1 Überblick

Entstehung des Lebens

Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren hat sich die Erde als selbständiger Planet gebildet. Ungefähr 800 Millionen Jahre danach war die Erde so weit abgekühlt, dass sich Vorstufen des Lebens bilden konnten. Vor ca. 3,8 Milliarden Jahren entstanden unter den Bedingungen der Uratmosphäre durch Einwirkung von Energie aus anorganischer Materie organische Moleküle. Diese Moleküle waren Bausteine für die Synthese noch größe-



rer Moleküle. Im Laufe relativ kurzer Zeit, vielleicht weniger Millionen Jahre, erwarben diese Moleküle die Fähigkeit sich zu vervielfältigen.

Bei diesen Vorstufen der Lebewesen gab es schon einen Wettbewerb um begrenzte Ressourcen: Selektion setzte ein. Gut angepasste Varianten hatten bessere Überlebenschancen und konnten sich nach Entwicklung der Vermehrungsfähigkeit auch häufiger in die nächste Generation einbringen. Wahrscheinlich spielte auch der Zufall eine Rolle, weshalb aus der Vielzahl von vorliegenden Molekülen nur bestimmte als Bausteine für die Lebewesen ausgewählt wurden. So gibt es z. B. keinen funktionalen Grund dafür, dass heute in allen Lebewesen nur linksdrehende L-Aminosäuren vorkommen und nicht die genau spiegelbildlich aufgebauten D-Aminosäuren, die ursprünglich vermutlich genauso häufig vorkamen (HAZEN 2001).

Wie bei fast allen Prozessen, die in der frühen Phase der Erdgeschichte stattgefunden haben, so ist es bis heute auch nicht möglich, den genauen Ablauf der Entstehung des Lebens zu rekonstruieren. Zum einen liegen aus der Anfangsphase keine Zeugnisse vor, denn von den ersten ursprünglichen Lebewesen gibt es keine Fossilien. Bis auf wenige Ausnahmen liegen Fossilien erst von Lebewesen vor, die Hartteile besitzen (s. Abb. 1). Zum anderen ist es schwierig, Analogieschlüsse von der heutigen Erdoberfläche auf die vor ca. 3,8 Milliarden Jahren existierende zu ziehen. Zur Zeit der Lebensentstehung herrschten auf der Erdoberfläche andere Bedingungen als heute. So gab es z. B. keinen freien Sauerstoff, der heute Bedingung für fast sämtliches Leben auf der Erde ist. Deshalb enthalten alle Hypothesen zur Entstehung des Lebens viele Unwägbarkeiten.



Abbildung 1: Fossile Belemniten, Fundort Helgoland. Viele Belemnitenarten sind Leitfossilien für die obere Kreidezeit. (Foto: S. HLAWATSCH, IPN)

Sicher ist, dass während der frühen chemischen Evolution kleine kohlenstoffhaltige Moleküle entstanden sind. Unklar ist der „Ort“ des Geschehens. In Frage kommen die „Ursuppe“ im Urozean, Gesteine, das Weltall, das Eis oder eine Kombination solcher Orte (Theorien zur Entstehung des Lebens). In den nächsten Schritten sind Molekülkomplexe entstanden, welche irgendwann die Fähigkeit zur Vermehrung erlangten. Innerhalb weniger Millionen Jahre sind daraus wahrscheinlich schon Protolebewesen mit einer Hüllmembran aus Fettsäuren hervorgegangen. Dieser Entwicklungsschritt umfasst einen relativ kurzen geologischen Zeitraum. Verhältnismäßig früh haben sich aus den mikroskopisch kleinen, einfach aufgebauten prokaryotischen Einzellern die Archaea und die Eubakteria sowie erste eukaryotische Einzeller mit echtem Zellkern, aus denen später die vielzelligen Lebewesen hervorgingen, entwickelt. So genannte Stromatolithen - durch Prokaryoten gebildete kalkhaltige Sedimentstrukturen - zählen zu den ältesten bisher gefundenen Fossilien.

Entwicklung des Lebens

Die Weiterentwicklung von den ersten selbständig lebenden Zellen zu vielzelligen Lebewesen mit Hartteilen hat fast zwei Milliarden Jahre gedauert. Erst gegen Ende des Präkambriums (so genannte „Ediacara Fauna“) und verstärkt zu Beginn des Kambriums vor 542 Millionen Jahren hat eine sprunghafte Entwicklung von Vielzellern begonnen. Aus dieser Zeit liegen Fossilien als versteinerte Zeugen verschiedener Gruppen von Pflanzen und Tieren vor. Alle diese Organismen haben im Wasser gelebt.

Die Entwicklung neuer Arten im Kambrium erfolgte nach einem großen Aussterbeereignis (Massenaussterben) der bis dahin existierenden Lebewesen („Ediacara Fauna“). Das Hervorgehen zahlreicher neuer Arten aus wenigen gemeinsamen Vorfahren innerhalb relativ kurzer Zeit wird als adaptive Radiation bezeichnet.



Adaptive Radiationen gehen stets mit signifikanten Umweltänderungen einher, da sich durch veränderte Umweltbedingungen neue Möglichkeiten und Probleme für die vorhandenen Lebewesen ergeben. Arten, die nicht in der Lage sind auf die veränderte Situation zu reagieren, sterben aus. Dadurch ergeben sich für überlebende Arten neue ökologische Nischen, die im Zuge einer Artaufspaltung neu besiedelt werden.

Massenaussterben und adaptive Radiationen werden von der Wissenschaft zur Einteilung der Geschichte der Biosphäre in einzelne geologische Erdzeitalter und Perioden genutzt, da sich durch diese Ereignisse das Bild der Erde jeweils grundlegend veränderte. Dennoch finden Evolutionsprozesse ständig und auch außerhalb der deutlich sichtbaren Umbrüche statt. Alle heute existierenden Lebewesen stammen von Vorformen ab, die eine Evolution durchgemacht haben. Es haben also beständige Selektionsprozesse zu der heutigen Biosphäre geführt. Nach den erstmals von STENO beschriebenen Prinzipien des „Aktualismus“ und „Uniformismus“ lassen sich die unterschiedlichen Erdschichten von Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) als ein Ergebnis der kontinuierlichen Ablagerung von Sedimenten deuten.

Die darin enthaltenen Fossilien geben nicht nur Aufschluss über das Artenspektrum der Biosphäre zu einer bestimmten Zeit. Anhand der Verteilung von Fossilien lassen sich auch Rückschlüsse auf das Klima in vergangenen geologischen Perioden ziehen. Darüber hinaus lassen sich Fossilien zur relativen Altersbestimmung von Gesteinsschichten nutzen (s. Abb. 11). Dabei nutzt man das Vorkommen so genannter Leitfossilien innerhalb der verschiedenen Schichten. Die Fossilien jeder Schicht sind eine lokale Stichprobe der Lebewesen zur Zeit der Gesteinsentstehung (Sedimentation). Einige Arten kommen nur in bestimmten Gesteinsschichten, dafür aber dort massenhaft vor. Sie sind charakteristisch für ein bestimmtes Erdzeitalter. Durch den Vergleich dieser Leitfossilien an unterschiedlichen Fundorten erhalten Wissenschaftler/innen eine Zeitskala mit einer festen Abfolge geologischer Perioden. Durch die Position verschiedener fossilisierter Arten in den Schichtenfolgen kann das relative Alter auch von räumlich getrennten Schichten weltweit ermittelt werden. Auf den Kenntnissen über Sedimente verschiedener Zeitepochen mit darin enthaltenen Fossilien konnte Charles DARWIN seine Evolutionstheorie stützen.

Anhand dieser versteinerten Zeugnisse unterteilen Geowissenschaftler/innen die Geschichte der Biosphäre in vier Erdzeitalter (s. Abb. 2). Das Präkambrium (3,8 Milliarden Jahre vor heute - 542 Millionen Jahre vor heute), das Paläozoikum (Erdaltertum, 542 - 251), das Mesozoikum (Erdmittelalter, 251 - 65) und das Känozoikum (Erdneuzeit, 65 - heute). Die Erdzeitalter werden wiederum in verschiedene geologische Perioden unterteilt. Das Präkambrium besteht aus Archaikum und Proterozoikum. Das Paläozoikum enthält die Perioden Kambrium, Ordovizium, Silur, Devon, Karbon und Perm. Das Mesozoikum beinhaltet die Perioden Trias, Jura und Kreide und das Känozoikum wird unterteilt in die Perioden Paläogen und Neogen. Das Paläogen beinhaltet die Serien Paläozän, Eozän und Oligozän, das Neogen die Serien Miozän, Pliozän, Pleistozän und Holozän.

Die geologischen Zeitalter und Perioden waren nicht gleich lang. So dauerte z. B. das Devon mehr als doppelt so lang wie das Silur. Dennoch sind diese Einteilungen nicht willkürlich gesetzt, sondern anhand deutlicher Veränderungen der in den Gesteinsschichten enthaltenen Fossilienarten. So repräsentiert jedes Erdzeitalter und - etwas weniger ausgeprägt - auch jede Periode eine andere Phase in der Geschichte der Biosphäre. Beispielsweise markiert der Übergang zwischen Silur und Devon das Auftreten erster sporentragender Gefäßpflanzen auf dem Festland. Das Mesozoikum war das Zeitalter der Saurier und seit Beginn des Känozoikums dominieren die Blütenpflanzen und Säugetiere.



Zeitalter	Periode	Serie	Alter in Mio. Jahren	bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Biosphäre
Känozoikum	Neogen	Holozän (Neuzeit)		historische Zeit - kulturelle Evolution des Menschen
			0,01	
		Pleistozän		Eiszeitalter
			1,8	
		Pliozän		Beginn der Eiszeiten Australopithecus
			5	
		Miozän		Ausbreitung der Gräser und Kräuter erste Vorfahren des Menschen
Paläogen		Oligozän	23	erste Menschenaffen
		Eozän	34	Radiation der Säugetiere, die meisten modernen Ordnungen entstehen
		Paläozän	55	Radiation der Blütenpflanzen
		65		
Zeitalter	Periode		Alter in Mio. Jahren	bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Biosphäre
Mesozoikum			65	
		Kreide		großes Massensterben († Saurier, † Ammoniten) erste Blütenpflanzen (Bedecktsamer) Gondwana zerbricht
			145	
		Jura		erste Vögel Pangäa zerbricht in die Kontinente Laurasia und Pangäa Radiation der Saurier
		199		
	Trias		erste Saurier und Säugetiere nacktsamige Pflanzen beherrschen die Landschaft	
Paläozoikum			251	
		Perm		großes Massensterben (ca. 80 - 90% aller Arten) Radiation der Reptilien
			299	
		Karbon		ausgedehnte Wälder Radiation der Insekten und Amphibien erste Reptilien
			359	
		Devon		erste Samenpflanzen (Nacktsamer) erste Gefäßpflanzen an Land (Rhynia) erste Landtiere (Gliederfüßer, Insekten) erste Amphibien
			416	
	Silur		Ammoniten, Kiefer tragende Fische † Trilobiten erste Landpflanzen	
		443		
	Ordovizium		Auftauchen erster Wirbeltiere (kieferlose Fische) Zeitalter der Trilobiten	
		488		
	Kambrium		adaptive Radiation der Tiere, die meisten rezenten Tierstämme tauchen auf; Entwicklung von Skeletten bei vielen Arten	
Präkambrium			542	
		Proterozoikum		650 Ediacara-Fauna 1000 erste mehrzellige Fossilien 2500 Riffe aus Stromatolithen in der Atmosphäre beginnt sich Sauerstoff anzusammeln erste eukaryotische Fossilien
			2500	
	Archaikum		3500 älteste prokaryotische Fossilien 3800 Entstehung des Lebens auf der Erde	
		4600		

Abbildung 2: Übersicht über die Erdzeitalter und geologische Perioden. Die Farbgebung der Erdzeitalter und Perioden entspricht den Festlegungen der INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY.

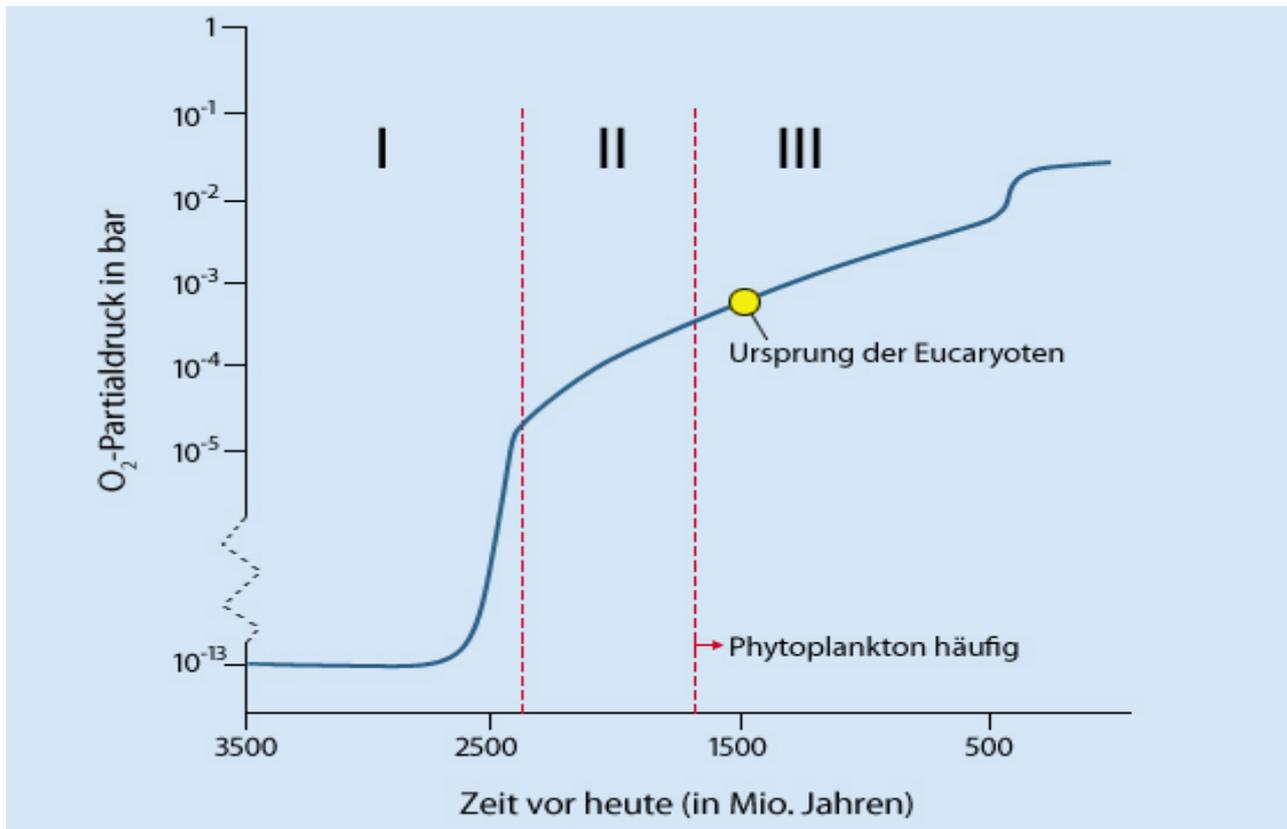


Abbildung 3: Vereinfachte angenommene Veränderung des Sauerstoffpartialdrucks in der Geschichte der Atmosphäre seit 3,5 Milliarden Jahren (nach WINDLEY 1995). I = reduzierende Atmosphäre, II = oxidierende Atmosphäre, III = aerobe Stoffwechselreaktionen möglich. Erst die allmähliche Anreicherung des Sauerstoffs durch Fotosynthese betreibende Organismen ermöglichte die Evolution bis zu den heute bekannten eukaryotischen Lebensformen.

Die sich ständig ändernde Gestalt der Erdoberfläche (Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre) war seit Beginn der Biosphäre prägend für die Evolution der Lebewesen. Umgekehrt nimmt aber auch die Biosphäre großen Einfluss auf die Entwicklung der übrigen Sphären. Z. B. enthielt die frühe Atmosphäre keinen Sauerstoff. Leben entstand unter anoxischen Bedingungen. Der in der Folge durch Fotosynthese produzierte Sauerstoff veränderte die Zusammensetzung der Atmosphäre radikal und war gleichzeitig notwendige Voraussetzung für die weitere Evolution Sauerstoff atmender Organismen (s. Abb. 3 und Modul „Chemie und Physik der Atmosphäre“).

Pflanzen binden in ihrer Biomasse einen Teil des in den abiotischen Sphären vorkommenden Kohlenstoffs, was wiederum Auswirkungen auf den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre und damit auf die Entwicklung des Klimas hat. Die pflanzliche Bedeckung der Erdoberfläche verändert Verdunstung und Feuchtigkeit von Boden und Luft (s. Module „Klimasystem und Klimageschichte“ und „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“). Zwischen Biosphäre einerseits und Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre andererseits hat es also von Anfang an Wechselbeziehungen gegeben.

2.2 Vertiefende Darstellung

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Theorien zur Entstehung des Lebens umfassender dargestellt. Weiterhin werden Fauna und Flora des Karbons, der geologischen Periode der Entstehung von Steinkohle exemplarisch beschrieben (s. Abb. 16).



Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung der Landpflanzen als Produzenten der späteren Kohle (s. Abb. 13).

Sie beginnt mit der Eroberung des Festlandes durch die Pflanzen schon vor dem Karbon. Ein deskriptiver Gesamtüberblick über die Faunen und Floren der verschiedenen Erdzeitalter ist im Baustein 4 „Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre“ (Baustein 8, Modul 4, Material 2) enthalten (s. auch Abb. 2).

Weiterführende Informationen zur Entstehung von Steinkohle (s. Abb. 18) und zu Wechselbeziehungen zwischen den Sphären im Karbon ergänzen die Darstellung.

2.2.1 Theorien zur Entstehung des Lebens

Die meisten heutigen Forscher/innen sind darin einig, dass sich die Entstehung des Lebens in vielen aufeinander folgenden Stufen ereignet hat. Wie das allerdings geschehen ist und in welcher Reihenfolge, darüber gehen die Ansichten auseinander.

Weitgehende Einigkeit besteht darin, dass sich unter Energieeinwirkung und mit Hilfe von Katalysatoren komplexere organische Moleküle gebildet haben, die miteinander in Wechselwirkung getreten sind. Kooperation oder Symbiose hat es mit großer Wahrscheinlichkeit schon bei den präbiotischen Molekülen gegeben. Irgendwann liefen in diesen Gebilden stoffwechselähnliche Prozesse ab, und sie konnten sich vermehren. Sie zeigten also Kennzeichen des Lebendigen. Wahrscheinlich hat sich schon vorher eine Membran um diese bereits hochkomplexen Protolebewesen gebildet.

Unterschiedliche Vorstellungen existieren über die Herkunft der Energie für das Wachstum der Protolebewesen. Bei heterotropher Lebensweise hätten sie Energie durch die Aufnahme energiereicher organischer Moleküle aus ihrer Umwelt gewonnen (Literatur bei DE DUVE 1994). Autotrophe Organismen beziehen ihre Energie entweder aus dem Licht durch fotosynthetische Vorgänge oder aus Redoxvorgängen während einer Chemosynthese. Falls die ersten Lebewesen autotroph waren, dann konnte es nur eine Art von Chemosynthese gewesen sein (WÄCHTERSCHÄUSER 1988). Für eine Fotosynthese fehlten den Protolebewesen die notwendigen Pigmente bzw. hoch komplexen Moleküle zur Absorption von Licht.

Mehrere Auffassungen bestehen über die Reihenfolge der Entstehung von biotischen Molekülen, z. B. von Proteinen und RNA. Ebenso gibt es verschiedene Hypothesen über die Art und Weise der katalytischen Vorgänge und darüber, ob und in welcher Weise es Hyperzyklen bei der Vervielfältigung von RNA gegeben hat (EIGEN 1987) (s. Kap. „Weiterentwicklung biotischer Moleküle“). Verschiedene Aussagen bestehen weiterhin darüber, wieweit der Zufall bei all den Prozessen eine Rolle gespielt hat, oder ob dem langwierigen Prozess der Entstehung des Lebens und der weiteren Entfaltung (Evolution) ein Determinismus oder eine Zielgerichtetheit (Teleonomie) innewohnt (JUNKER & SCHERER 2001).

Bis vor kurzem dominierte die Auffassung, dass alle Lebewesen von einem einzigen Vorgang der Entstehung von Leben abstammen (monophyletische Entstehung der Lebewesen). Diese Aussage schließt natürlich nicht aus, dass es auf der Urerde mehrmals unabhängig voneinander „chemische Evolutionen“ gegeben haben könnte, die zu Protolebewesen geführt haben. Nach der monophyletischen Hypothese hat sich jedoch nur ein Prozess durchgesetzt, ist also bei einer eventuellen Selektion erfolgreicher (besser angepasst) gewesen. Untersuchungen der Chiralität und DNA-Analysen bei Archaea und Bakterien deuten allerdings darauf hin, dass die heutigen Lebewesen unterschiedliche Stammformen haben. Danach ist Leben nicht nur mehrfach unabhängig voneinander entstanden, sondern mehrere Zweige haben sich nebeneinander entwickelt (polyphyletische Entstehung der Lebewesen) (KUGA, KYURAGI, NISHIHARA & SONE 1998).



Zu Beginn der Diskussion über die Lebensentstehung wurde der Ort des Geschehens in der Uratmosphäre und anschließend im Wasser angenommen („Leben in der Ursuppe“). In jüngster Zeit werden Argumente für die Entstehung von präbiotischen Molekülen an Gesteinsoberflächen genannt. Andere Forscher verlegen die Entstehung präbiotischer Moleküle in das Weltall. Anschließend seien diese Moleküle z. B. mit Kometen oder Meteoriten auf die Erdoberfläche gelangt und hätten sich hier weiter entwickelt. In neuester Zeit wird die Hypothese vertreten, Leben sei in kleinen Hohlräumen von Eis entstanden und habe sich dort auch weiter entwickelt. Ob nun im Weltall oder auf der Erdoberfläche entstanden, allen Hypothesen liegt ein materialistischer mit naturwissenschaftlichen Methoden nachvollziehbarer Prozess zugrunde. Eine übersichtliche Darstellung aller Hypothesen bis 1994, findet sich bei DE DUVE (1994). Dort sind die aktuellsten Hypothesen zur Entstehung präbiotischer Moleküle im Weltall und im Eis allerdings noch nicht vertreten.

Leben aus der „Ursuppe“

Die ältesten uns bekannten Lebewesen haben im Wasser gelebt. Es liegt also nahe, den Ursprung des Lebens im Wasser zu suchen. OPARIN äußerte 1924 als einer der ersten den Gedanken, dass schon sehr früh Vorläufer von Biomolekülen auf der Erde entstanden seien. Aus diesen Molekülen sollen sich dann die Vorformen der Lebewesen entwickelt haben. Da freier Sauerstoff in der Atmosphäre fehlte oder nur in Spuren vorhanden war, gab es auch keine Ozonschicht (s. Abb. 3). So konnten die energiereichen kurzwelligen UV-Strahlen der Sonne nahezu ungehindert durch die Atmosphäre auf die Erdoberfläche bis auf die Lithosphäre und die Hydrosphäre vordringen. Als weitere Energiequellen spielten die Wärme vulkanischer Prozesse, ionisierende Strahlen radioaktiver Elemente und elektrische Entladungen von Blitzen eine Rolle. Im reduzierenden Milieu der Uratmosphäre u. a. mit den Gasen Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) sollen unter UV-Wirkung Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Cyanwasserstoff und schließlich auch Aminosäuren entstanden sein (s. Abb. 4).

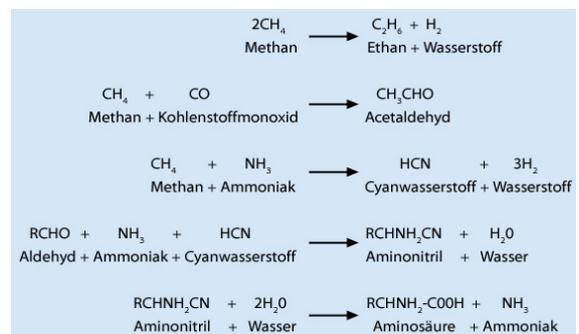


Abbildung 4: In der „Ursuppe“ vermutete chemische Reaktionen, die letztendlich zur Entstehung präbiotischer Moleküle geführt haben sollen.

Von besonderer Bedeutung dürfte die Bildung des Cyanwasserstoffs gewesen sein. So könnten Aminosäuren aus Cyanwasserstoff, Aldehyden, Ammoniak und Wasser entstanden sein.

Die in der Uratmosphäre entstandenen Reaktionsprodukte sollen durch Regen in die Bäche und Flüsse gelangt und schließlich in den Ozean gespült worden sein. Da Wasser UV-Licht absorbiert, wurden die neu entstandenen präbiotischen Moleküle in gewisser Wassertiefe nicht sofort zerstört und reicherten sich in einer „Ursuppe“ bzw. einer „Schmiere“ an. Das soll besonders in flachen Buchten geschehen sein, wo viel Wasser verdunstete. Trockneten kleinere Meeresbuchten oder Gezeitentümpel aus, so entstanden Lager organischer Stoffe. Wahrscheinlich waren diese Stoffe mit aus Gestein gelösten Salzen gemischt. Gerieten solche Lager in Bereiche vulkanischer Wärme, waren Kondensationsreaktionen unter Wasserentzug möglich. Metalle oder Verbindungen mit Metallionen, wie auch heute noch in Enzymen vorhanden, könnten die weiteren Synthesen katalysiert haben. Durch Adsorption an Mineraloberflächen waren katalytische Wirkungen zu erwarten, wie für Tone experimentell nachgewiesen wurde.

Stanley L. MILLER (1953) wurde in seiner Doktorarbeit beim Nobelpreisträger UREY dadurch berühmt, dass er die spekulative Erforschung des Lebensursprungs in eine experimentelle Wissenschaft verwandelte. Er hatte in einer Glasapparatur die Ozeane und Atmosphäre der Uerde nachgeahmt. MILLER hat die von UREY an-



genommene Uratmosphäre aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Wasserdampf elektrischen Entladungen ausgesetzt. Elektrische Funken imitierten die Blitze der Gewitter. In seinen Experimenten entstanden verschiedene Aminosäuren, besonders Glycin und Alanin (s. Abb. 5).

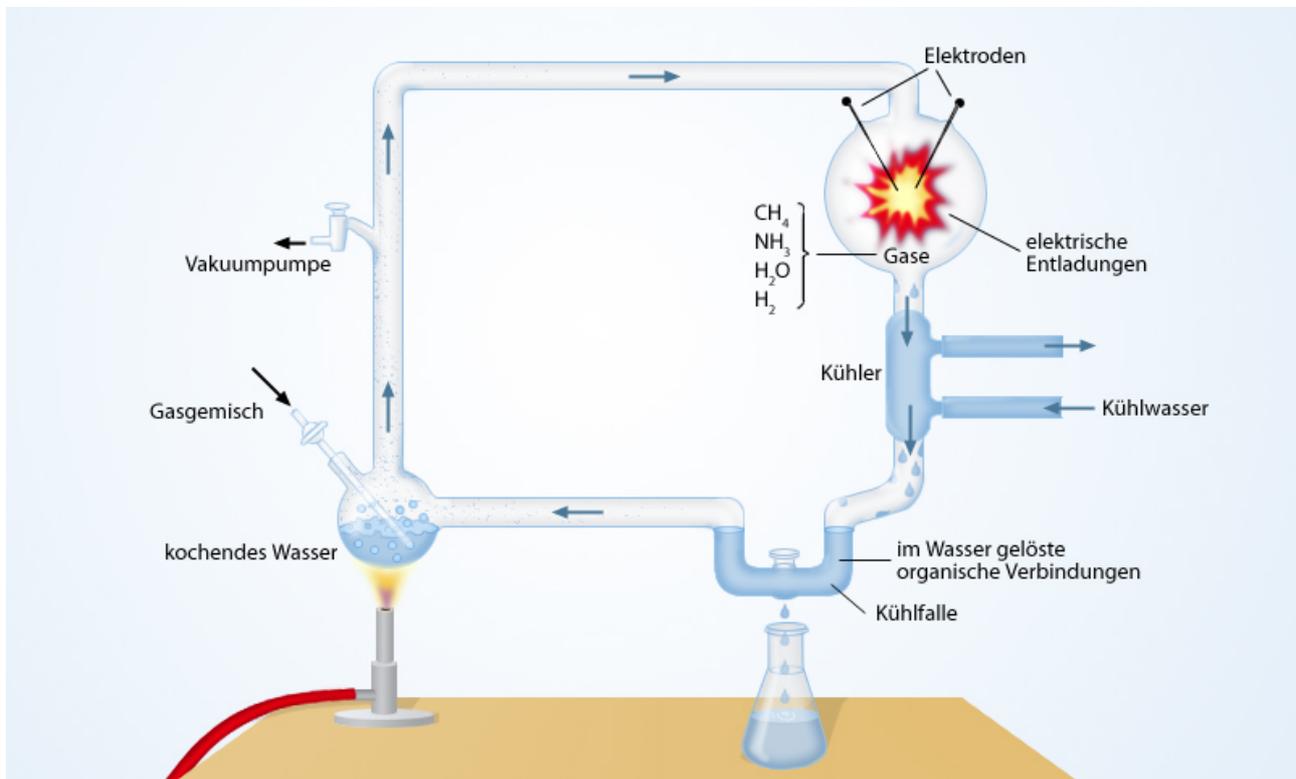


Abbildung 5: Simulationsexperiment von MILLER (1953) zur abiogenen Herstellung organischer Moleküle unter den vermuteten Bedingungen der Uratmosphäre.

MILLER und andere Forscher variierten die Versuchsbedingungen und erhielten neben Aminosäuren auch die für die Synthese von biotischen Molekülen wichtigen Ausgangsstoffe wie Purin- und Pyrimidinbasen, Zucker (darunter auch Ribose und Desoxyribose), Zuckerphosphate, Nucleoside, Nucleotide, Nucleosidtriphosphate, AMP, ADP, ATP, Porphyrine und Fettsäuren. Wenn CO_2 statt CH_4 , N_2 statt NH_3 , und kein H_2 verwendet wurden, entstanden keine Vorstufen von Biomolekülen.

Was geschah nun vermutlich mit dieser Ansammlung kohlenstoffhaltiger Moleküle?

Aus den auf der Urerde abiogen gebildeten Aminosäuren und Nucleotiden müssen sich in der weiteren chemischen Evolution deren Polymere gebildet haben. In Simulationsexperimenten entstanden aus trockenen Aminosäuregemischen unter Zugabe von Polyphosphorsäure bei 70 °C eiweißähnliche Stoffe. Diese aus 10 bis 25 Aminosäuren entstandenen „Proteinoide“ enthalten Peptidbindungen, ähnlich wie in Proteinen. Weitere Experimente brachten folgende Ergebnisse:

- Zugabe von Lava fördert die chemischen Prozesse.
- Aus Aminosäuren mit angekoppelter AMP können Polypeptide aufgebaut werden, wenn sich Tonteilchen im Reaktionsgemisch befinden.
- Die Bildung von Oligonucleotiden gelingt, wenn trockene Nucleotide mit Polyphosphaten bei 65 °C erwärmt werden.

Die Hypothese zur Entstehung des Lebens in der „Ursuppe“ lässt manche Fragen unbeantwortet:



- Wie konnte verhindert werden, dass die Ansammlungen von Vorläufern der Biomoleküle in der „Ursuppe“ nicht vom energiereichen UV-Licht der Sonne sofort nach ihrer Entstehung wieder zerstört wurden? In der damals ozonfreien Atmosphäre konnten die UV-Strahlen ungehindert die oberste Schicht der Hydrosphäre und der Lithosphäre erreichen.
- Wie konnten sich Konzentrationsgradienten im Wasser bilden? Konzentrationsunterschiede zwischen den Molekülen werden als notwendige Bedingung zur Entstehung von Leben angesehen.

Leben aus der Gesteinswelt

In neuerer Zeit werden alternative Hypothesen und Versuchsergebnisse zur Entstehung von Leben vorgestellt. Danach sollen Minerale in Gesteinsoberflächen bei der Bildung von großen organischen Molekülen aus kleineren Vorläufermolekülen eine entscheidende Rolle gespielt haben.

Kohlenstoffhaltige Moleküle bilden nur unter bestimmten Bedingungen immer komplexere Strukturen aus. Nach HAZEN (2001) können Minerale folgende Funktionen übernehmen:

- Winzige Kammern im Mineralgefüge bieten Molekülen Struktur und Unterschlupf, so z. B. beim Feldspat, der ein wesentlicher Bestandteil des Granit ist (s. Abb. 6). Die Moleküle sind dort vor energiereichem UV-Licht geschützt, das sie zerstören könnte.
- Eine elektrisch geladene Mineraloberfläche, wie z. B. beim Ton, kann ein Gerüst liefern, auf dem sich Moleküle anlagern, zusammenfügen und wachsen können.
- Kristallflächen bestimmter Minerale lagern bevorzugt spezielle Moleküle an, sie wirken als Schablonen. So lagern sich beim Calcit die L-Aminosäuren an einer anderen Kristallfläche an als die D-Aminosäuren (s. Abb. 6).
- Metall-Ionen bestimmter Minerale können chemische Reaktionen auslösen oder beschleunigen, sie wirken als Katalysatoren (s. Abb. 6).
- Elemente gelöster Minerale können in biologische Moleküle eingebaut werden. So enthält der rote Blutfarbstoff Hämoglobin als Zentralatom Eisen (Fe) und der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll als Zentralatom Magnesium (Mg) (s. Abb. 6). In bestimmten Enzymen sind ebenfalls Metallionen als prosthetische Gruppe gebunden.
- Tonoberflächen sind oft elektrisch geladen. Sie können dadurch organische Moleküle, die Ladungen tragen, anziehen und festhalten. Man ließ im Experiment eine wässrige Lösung, die Aminosäuren enthielt, in einem tonhaltigen Gefäß verdunsten und simulierte damit das Austrocknen eines flachen Teichs oder Gezeitentümpels. Die übriggebliebenen Aminosäuren hatten kurze Ketten gebildet. In anderen Experimenten fand man, dass sich Tone als Gerüst für die Bausteine der RNA eignen.

Ende des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Ökosysteme an den heißen Quellen unterseeischer Vulkanschote entdeckt. Die Lebensgrundlage dieser im Dunklen lebenden Krebse, Muscheln, Würmer und Quallen sind Archaea (bakterienähnliche Prokaryoten). Diese beziehen Energie und Nährstoffe aus Schwefelwasserstoff und Mineralien, die das aus dem heißen Basaltkamin heraufströmende Wasser enthält. Das brachte Forscher zu der Annahme, dass Leben unter großer Hitze und enormem Druck an diesen hydrothermalen Schloten entstanden sein könnte (STETTER 1993).

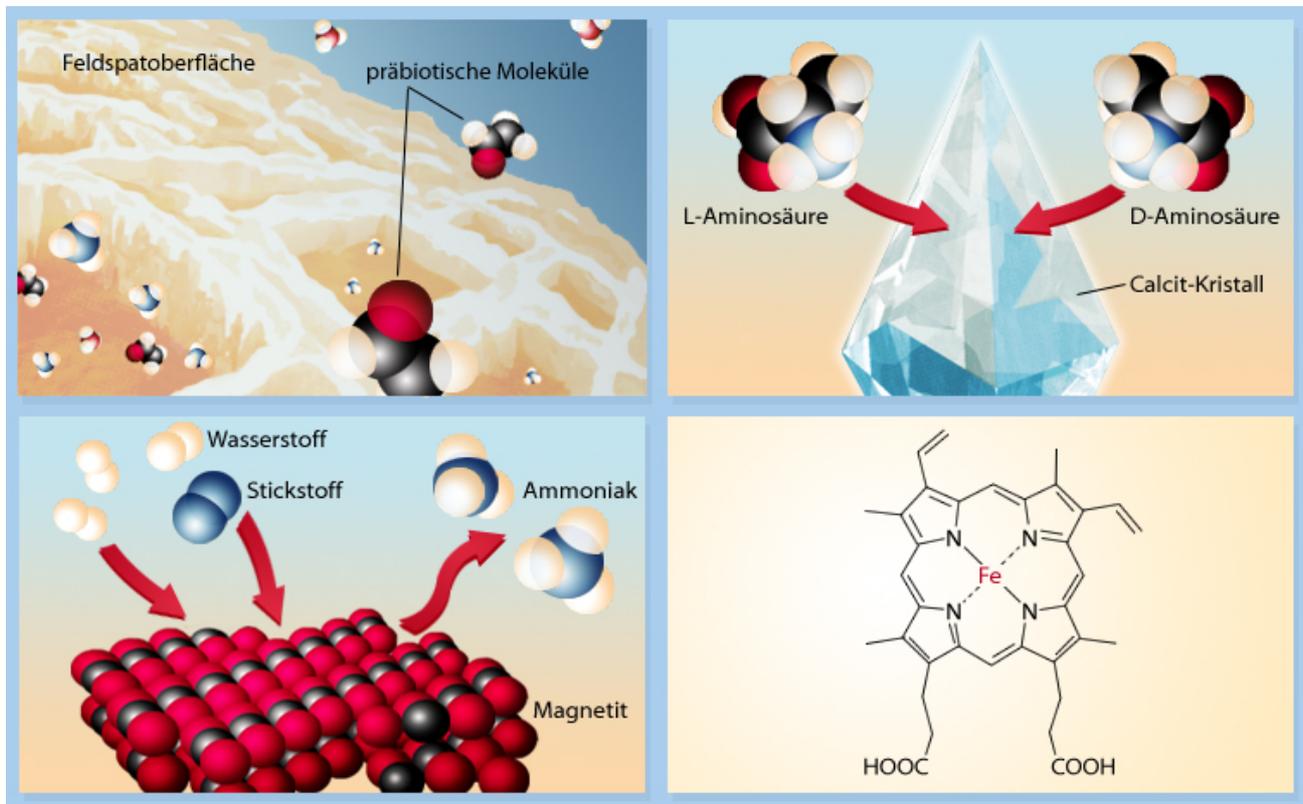


Abbildung 6: Hypothetische Entstehung des Lebens in der Gesteinwelt (nach HAZEN 2001). Links oben: Oberflächen von Mineralen enthalten winzige Vertiefungen, in denen präbiotische Moleküle Schutz vor energiereicher Strahlung finden konnten. Rechts oben: Unterschiedliche Kristallflächen lagern bevorzugt L- oder D-Aminosäuren an. Links unten: Minerale können als Katalysatoren bei chemischen Reaktionen wirken. Rechts unten: Das zentrale Eisenatom im roten Blutfarbstoff Hämoglobin, ein Beispiel für den Einbau eines Metallatoms in biologische Moleküle.

Andere Forscher wandten jedoch ein, dass Aminosäuren bei Erwärmung rasch umgebaut werden. Daraufhin fügte man im Experiment ein Eisensulfid-Mineral, das häufig in der Nähe von hydrothermalen Schloten auftritt, zu wässrigen Lösungen von Aminosäuren. Setzte man dieses Gemisch hohem Druck und hohen Temperaturen aus, so blieben die Aminosäuren tagelang intakt. Damit bietet sich genügend Zeit für Reaktionen mit anderen für Lebewesen bedeutsamen Molekülen.

WÄCHTERSCHÄUSER (1988) formulierte folgende Hypothesen: Leben in frühem Stadium ist autotroph, es enthält autokatalytischen Metabolismus, es ist auf eine zweidimensionale monomolekulare organische Schicht beschränkt. Diese „Oberflächenorganismen“ sind anionisch gebunden an eine positiv geladene Oberfläche wie z. B. Pyrit an der Grenzfläche zu heißem Wasser. Diese Bedingungen sind z. B. an unterseeischen Tiefseequellen gegeben. Die Energie für die Kohlenstofffixierung (z. B. aus CO_2) wird aus Redox-Prozessen bei der Umwandlung von Eisen (II)-Ionen und Hydrogensulfid in Pyrit (FeS_2) geliefert ($\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$). Pyrit ist hierbei nicht nur ein Abfallprodukt, sondern liefert auch die überaus wichtige Bindungsfläche für die organischen präbiotischen Moleküle.

Die von WÄCHTERSCHÄUSER angenommenen Protolebewesen wachsen, indem sie sich auf Gesteinsoberflächen ausbreiten und reproduzieren sich durch die Herstellung autokatalytischer Coenzyme. Nukleinsäuren und Proteine sollen nach diesen Überlegungen erst später dazugekommen sein.

In Anlehnung an die Experimente von MILLER und die Hypothesen von WÄCHTERSCHÄUSER wurden Mischungen aus Wasser, Kohlenstoffdioxid und Mineralen mit Gold ummantelt und anschließend hohem Druck und



hoher Temperatur ausgesetzt. Als Reaktionsprodukte fand man Moleküle mit mehreren Kohlenstoffatomen (HAZEN 2001). In anderen Experimenten wählte man ein Thiol (ein Kohlenwasserstoff mit einer SH-Gruppe statt der OH-Gruppe wie bei Alkoholen), Kohlenstoffmonooxid und Wasser - alles Stoffe, die in der Nähe sulfidreicher hydrothermalen Schloten reichlich vorhanden sind - und erhielt längerkettige kohlenstoffhaltige Moleküle.

Nach MARTIN & RUSSEL (2003) konnten sich aus anorganischen Molekülen mit Hilfe von Katalysatoren nach und nach auch organische Moleküle entwickeln. Diese Prozesse haben in winzig kleinen Kammern aus Eisensulfid (FeS) auf dem Grunde des Ozeans stattgefunden. Die Wände dieser Kammern sollen als Vorläufer von Membranen und Zellwänden gedient haben. Eisensulfid und in gewissen Maße auch Nickelsulfid könnten zusätzlich katalytische Funktionen übernommen haben.

Leben aus dem Weltall

Nach ARRHENIUS (1908) ist es vorstellbar, dass Sporen von Mikroorganismen im Schutz von interplanetarischen Gefährten, wie z. B. Meteoriten, aus dem Weltall auf die Erde gelangt sind. Kritiker weisen jedoch darauf hin, dass diese vermeintlichen Sporen innerhalb kürzester Zeit von der energiereichen UV-Strahlung oder durch die Hitzewirkung beim Durchtreten der Erdatmosphäre zerstört würden.

Zur Hypothese von Lebensspuren aus dem Weltall wurden in neuester Zeit weitere Experimente und Beobachtungen gemacht:

- Vorstufen von Biomolekülen finden sich in Meteoriten, in Kometen und in kosmischem Staub, der stetig auf die Erde nieder rieselt. Der Nachweis gelingt mit Hilfe von Teleskopen, die infrarote und kurzwellige Strahlen aus dem Weltraum auffangen und spektroskopisch analysieren. Darunter befinden sich auch Aminosäuren (DE DUVE 1994).
- Analyse des Kometen P1/ Halley beim Vorbeiflug an der Erde: 1986 wurden die Staubteilchen des Kometen mit Hilfe von Massenspektrometern an Bord von Raumsonden untersucht. Dabei wurden Vorläufermoleküle sämtlicher Stoffklassen gefunden, die für die Biochemie von Lebewesen bedeutsam sind. So fand man neben Cyanwasserstoff Blausäure (HCN) auch Acetylen (C_2H_2) und Formaldehyd (CH_2O). Es gibt Hinweise darauf, dass auch Polymerere von Blausäure wie z. B. Adenin (ein Baustein der DNA) in den Staubteilchen vorkommen.
- In dem 1969 in Australien niedergegangenen Murchison-Meteorit hat man 74 verschiedene Aminosäuren, mehr als 100 Kohlenwasserstoffe und die vier Basen der DNA (Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin) nachgewiesen. Die Aminosäuren des „Murchison“ sind weitgehend die gleichen, welche auch MILLER in seinen Simulationsexperimenten erzeugt hat, und kommen auch etwa im gleichen Mengenverhältnis vor.
- Sporen von *Bacillus subtilis* wurden im Vakuum einer UV-Strahlung ausgesetzt. Ungeschützte Sporen waren nach 10 Sekunden zu 95 % inaktiv. In glucosehaltigem Medium abgeschirmt überlebten 80 % der Bakteriensporen eine über fünfjährige Behandlung dieser Art, die einer Weltraumexposition entspricht. Berücksichtigen sollte man bei Übertragung dieser Ergebnisse auf den Transport von Leben aus dem Weltraum auf die Erde jedoch, dass für einen Meteoritentransport z. B. vom Mars zur relativ nahe gelegenen Erde allein 100.000 Jahre angesetzt werden.
- Organische Stoffe könnten ebenso im Eis von Kometen auf die frühe Erde gelangt sein. Bei Temperaturen des Weltraums von wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15\text{ °C}$) brechen die normalerweise starren Eiskristalle auf. Die Wasserstoffbrücken sind in diesem „amorphen Eis“ ähnlich wie in



flüssigem Wasser nicht mehr absolut starr fixiert. Es herrscht eine gewisse (viskoseähnliche) Beweglichkeit zwischen den Wassermolekülen. Im Gegensatz zu rein kristallinem Eis finden in diesem amorphen Eis einfache Moleküle Platz wie z. B. Methylalkohol oder Ammoniak. Durch energiereiche Strahlung im Weltraum können die eingeschlossenen aber beweglichen Fremdmoleküle aktiviert werden und mit anderen Molekülen reagieren (BLAKE und JENNISKENS 2001). Vor ca. 5 Milliarden Jahren, als sich aus einer interstellaren Molekülwolke das Sonnensystem bildete (s. Modul „System Erde - Die Grundlagen“), soll ein Teil des Eises, das mit organischen Molekülen beladen war, in Kometen gelangt sein. Viele dieser Kometen könnten später auf die junge Erde gestürzt sein. Im Wasser der Erde könnten sich dann die organischen Moleküle aus dem All zu späteren Lebewesen weiter entwickelt haben.

- Nach KISSEL und KRUEGER (2000) befinden sich die Bausteine aller lebenswichtigen Moleküle direkt oder in Vorläuferform in den Staubteilchen der Kometen. Auf die Erde gelangt, sollen sie dann mit dem Wasser weiter reagiert haben.

Vertiefende Informationen zum Thema „Leben aus dem Weltall“ mit entsprechenden Literaturangaben finden sich bei KÖNIG (1999) und bei GREBER und GREBER (1996).

Leben aus dem Eis

In neuester Zeit wird eine weitere Hypothese über die Herkunft des Lebens und seiner frühesten Formen geäußert. In polarem Eis existieren durch wiederholte Tau- und Frierprozesse sowie Bewegungen unzählige größere und kleinere mit Wasser gefüllte Hohlräume. In diesen Hohlräumen des polaren Eises wurde eine Vielfalt von meist mikroskopisch kleinen Lebewesen entdeckt, die eine Lebensgemeinschaft mit vielfältigen Wechselbeziehungen bilden. Die Hohlräume im Eis sind stark strukturiert. Sie bilden viele „Kämmerchen“, so dass das Eis im Inneren eine große Oberfläche besitzt. In den Hohlräumen besteht Schutz vor UV-Strahlung, die in der Uratmosphäre aufgrund der fehlenden Ozonschicht sehr hoch war. UV-Strahlung kann organische Moleküle verändern oder zerstören. In solcher für die meisten heutigen Lebewesen unwirtlichen Umwelt soll das Leben entstanden sein und sich weiter entwickelt haben (BLAKE und JENNISKENS 2001).

Meereis kann Substanzen durch Ausfrieren des Wassers beträchtlich konzentrieren. Die entstehenden flüssigkeitsgefüllten Räume fördern durch hohe Ionenkonzentration der Salzlösung, hohe Drücke sowie tiefe Temperaturen besonders stabile Wasserstoffbrückenbindungen. Diese sind essentiell für Reaktionen von RNA-Molekülen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch eine Schlüsselfunktion bei der Entstehung erster präbiotischer Lebewesen einnahmen. Polares Meereis scheint darüber hinaus für einige chemische Reaktionen in biologischen Systemen katalytische Wirkung zu haben (TRINKS, SCHRÖDER und BIEBRICHER 2003).

2.2.2 Weiterentwicklung biotischer Moleküle

Über die weitere chemische Evolution der ersten Biomoleküle gibt es verschiedene in sich schlüssige Vorstellungen und Modellexperimente. Daran können einzelne Schritte der Weiterentwicklung von organischen Molekülen bis zu ersten lebenden Zellen nachvollzogen werden, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden (in Anlehnung an Linder Biologie, BAYRHUBER und KULL 2005, S. 471).

Am Beginn dieser Entwicklung stand das Auftreten der **RNA** (Ribonukleinsäure). Kurze RNA-Stränge entstanden vermutlich immer wieder spontan durch die Verknüpfung von einzelnen Nucleotiden. Durch die spezifische Basenabfolge der vier RNA-Bausteine Guanin, Cytosin, Adenin und Uracil können Informationen für die Proteinsynthese gespeichert werden. Einige dieser RNA-Moleküle waren sehr wahrscheinlich zusätzlich in der Lage, ihre eigene Verdoppelung (Replikation) zu katalysieren: Komplementäre Nucleotide lagern sich an einen einzelnen Strang an und werden durch die Katalyse zu einem komplementären Strang verknüpft.



Die Fähigkeit zur Katalyse ist durch heutige RNA-Moleküle (Ribozyme) belegt. Die Biosynthese von RNA und Proteinen konnte also in der Anfangsphase des Lebens allein mit Hilfe der verschiedenen RNAs erfolgen. Diese Stufe der Entwicklung des Lebens wird als RNA-Welt bezeichnet. Spuren davon sind noch in heutigen Zellen zu finden: Viele Coenzyme sind Nukleotide (z. B. NAD, Coenzym A), und die Verknüpfung der Aminosäuren während der Proteinbiosynthese geschieht an der ribosomalen DNA. Die gebildeten Proteine erwiesen sich im Lauf der Zeit als leistungsfähigere Katalysatoren, so dass es wahrscheinlich zu einer Arbeitsteilung zwischen RNA-Molekülen als Informationsträgern und Proteinen als Katalysatoren kam (RNA-Protein-Welt) (Näheres s. Linder Biologie BAYRHUBER und KULL 2005; Ribozym, S. 358, RNA-Welt Abb. 471.2).

Nun konnte ein rückgekoppelter Reaktionszyklus entstehen, in dem RNA-Moleküle die Bildung von Proteinen katalysierten und unter den Proteinen auch solche waren, welche die Replikation von RNA-Molekülen katalysierten. Manfred EIGEN (1987) hat in seiner Hypothese zum „Hyperzyklus“ dargestellt, wie sich ein „Urgen“ über einen Reaktionszyklus vermehren konnte. Danach haben sich die unter den Bedingungen der Urerde gebildeten vier RNA-Bausteine autokatalytisch zu einer langen Kette zusammen gelagert. Dieser Nukleotidstrang enthielt die Informationen für die Ausbildung von Proteinen. Darunter katalysierten einige die Replikation von RNA. Die entstehenden Elemente reproduzieren sich selbst, indem sie über wenige Schritte wieder die Herstellung der Ursprungs-RNA katalysieren (s. Abb. 7). Darüber hinaus werden die Moleküle, die durch Einbindung in den Zyklus an ihrer eigenen Reproduktion beteiligt sind, bevorzugt gebildet.

Wenn im Verlauf der chemischen Evolution einfache Proteine und Nukleotidstränge mit katalytischen Eigenschaften entstanden, war die Ausbildung eines Hyperzyklus eine zwangsläufige Folge (Theorie von der Selbstorganisation der Materie). Bereits auf dieser molekularen Ebene gab es verschiedene Varianten, die einer Selektion unterlagen. Wurde die Reaktionsabfolge aufgrund einer Mutation in einem Nukleotidstrang beschleunigt, entstanden bevorzugt die Produkte des veränderten Zyklus.

Wurde ein Hyperzyklus zusätzlich von einer Membran umschlossen, kam eine vorteilhafte Mutation nur noch der Protozelle zugute, in der sie auftrat. Dadurch konnte sich diese Protozelle einschließlich ihres verbesserten Genoms schneller als andere Protozellen vermehren. Die ständig wachsende Menge ihrer Nachkommen verdrängte allmählich die Nachkommen ihrer Konkurrenten. Mit der Entstehung membranumgrenzter Räume lag gleichzeitig eine erste einfache Lebensform mit eigenem Genom vor. Die Membranen mussten allerdings für bestimmte Stoffe durchlässig sein. Nur so konnten die einfachen Lebensformen die für die Energieversorgung notwendigen Stoffe aufnehmen und Stoffwechselendprodukte abgeben.

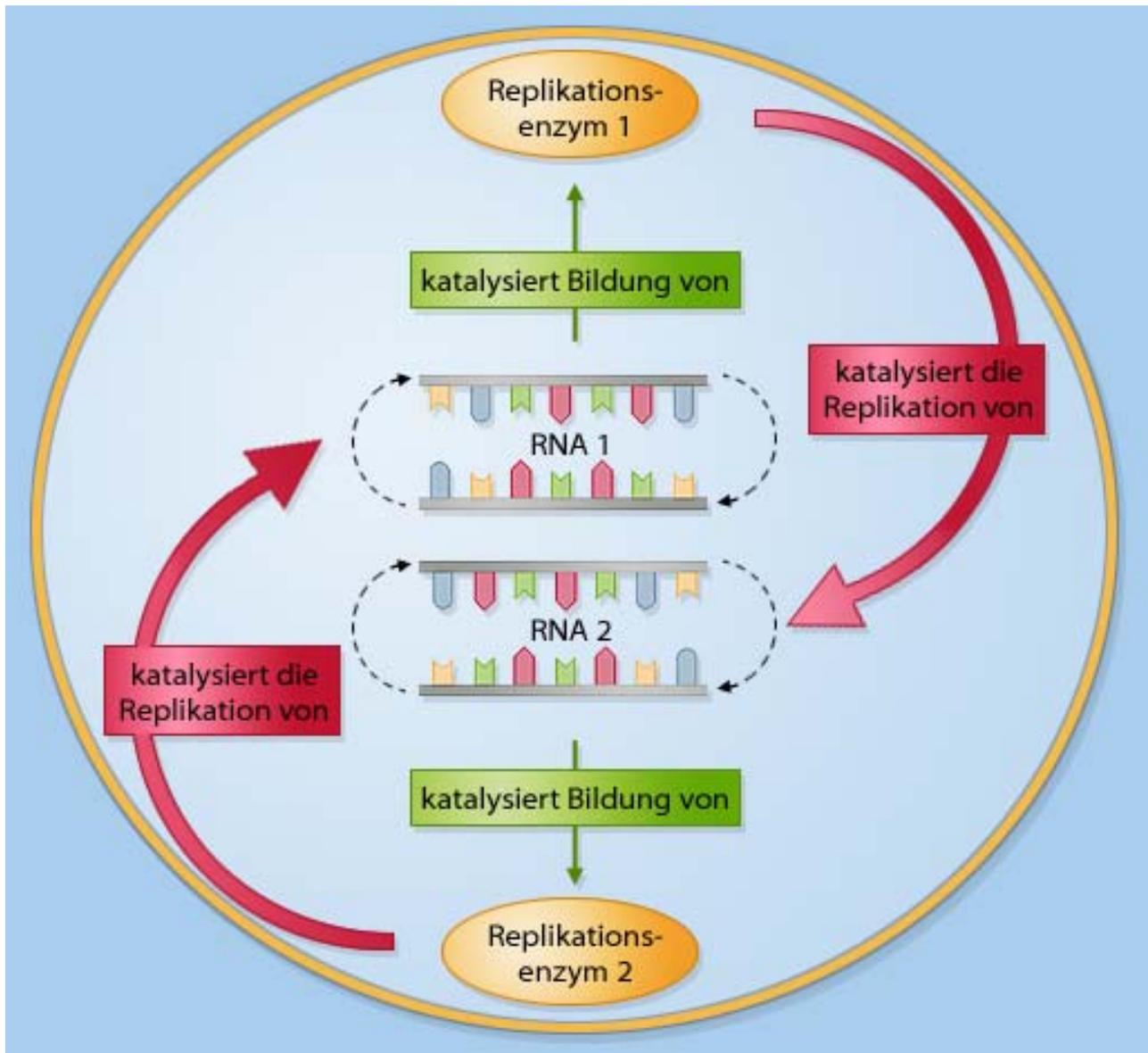


Abbildung 7: Modell eines membranumhüllten Hyperzyklus nach EIGEN. Die Elemente des Hyperzyklus reproduzieren sich selbst. Sie sind sowohl Katalysator als auch Informationsträger. Im Hyperzyklus kann bereits die elementarste Form von Stoffwechsel und Vererbung gesehen werden. Mutationen können den Zyklus verändern oder erweitern.

Anschließend entwickelten sich diese Vorläufer der ersten Zellen vermutlich dadurch weiter, dass zusätzliche Nucleotidstränge aufgenommen wurden, die neue Stoffwechselreaktionen ermöglichten. Mit zunehmender Entwicklung musste es eine Arbeitsteilung zwischen Vermehrung der Nucleotidstränge (Replikation) und Biosynthese der Proteine (Translation) geben. Die DNA entstand als der RNA stark ähnelndes, aber aufgrund ihrer Doppelhelix-Struktur chemisch stabileres Molekül. Damit hatte die DNA als Speicherform für genetische Informationen einen Selektionsvorteil gegenüber der RNA, sie übernahm die Replikation. Die RNA wurde für die Translation zuständig, also für die Übertragung der Information, den Transport der Aminosäuren und die Synthese der Proteine. In der weiteren Evolution überdauerten jene Zellen, in denen es eine eindeutige Informationskette von der DNA über die RNA zum Protein gab.



Leben ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass ständig Energie aufgenommen werden muss, um zu wachsen, um sich zu vermehren und Stoffwechselforgänge anzutreiben. Die ersten Lebewesen ernährten sich vermutlich chemoautotroph oder heterotroph. Schon relativ früh schafften es Vorläufer von Bakterien, die Energie vom Sonnenlicht in chemische Energie umzuwandeln. Sie wurden fotosynthetisch aktiv.

Am Ende dieser Entwicklungen standen erste echte Lebewesen in Form von einzelligen Prokaryoten. Die genannten Entwicklungsschritte sind in sich schlüssig und konnten teilweise durch Modellexperimente überprüft werden. Der Gesamttablauf ist jedoch nicht endgültig entschlüsselbar, da der Faktor Zeit im Laborexperiment nicht reproduziert werden kann. Es gibt zudem keine Fossilien, an denen der Prozess der Entstehung von Leben nachvollzogen werden könnte.

Die benötigte **Energie** für die immer differenzierteren Stoffwechselforgänge stammte zunächst wahrscheinlich direkt aus der Umgebung der Zellen. Unter den Bedingungen der Urerde entstanden spontan immer wieder organische Verbindungen (s. Kap. „Theorien zur Entstehung des Lebens“), darunter wahrscheinlich auch ATP (Adenosintriphosphat), das heute in allen rezenten Organismen eine wichtige Rolle als Energieüberträger spielt. Die Protozellen konnten also zunächst das frei verfügbare ATP zur Energiegewinnung nutzen. Sie waren chemoheterotroph. Da mit zunehmender Anzahl von Protozellen mehr ATP verbraucht wurde als unter abiotischen Bedingungen neu gebildet werden konnte, herrschte irgendwann Mangel an ATP. Nun hatten jene Zellen einen Selektionsvorteil, deren Enzyme ATP mit Hilfe von chemischer Energie aus anderen organischen Verbindungen selbst herstellen konnten. Der chemoautotrophe Stoffwechsel war entwickelt.

Zur Herkunft dieser Energie gibt es zwei Hypothesen: Nach DE DUVE (1994) stammte die benötigte Energie für den Stoffwechsel aus angeregten (energiereichen) Elektronen zweiwertiger Eisenionen (Fe^{2+}). Diese Fe^{2+} -Ionen wurden nach Einwirkung von energiereichen UV-Strahlen zu dreiwertigen Eisenionen (Fe^{3+}) oxidiert (s. Abb. 8).

Nach WÄCHTERSCHÄUSER (1988) stammten die energiereichen Elektronen dagegen aus Schwefelwasserstoff (H_2S). Zwei Hydrogensulfid-Ionen wurden in Gegenwart von zweiwertigen Eisenionen unter Freisetzung von Wasserstoff zu einem Disulfid-Ion umgesetzt. Dieses Modell wurde experimentell bestätigt (s. Abb. 9).

Die beiden Reaktionen könnten nebeneinander oder in verschiedenen Umgebungen abgelaufen sein. Die UV-abhängige von DE DUVE beschriebene Reaktion unter Beteiligung von Eisenionen konnte nur in den obersten Wasserschichten stattfinden. Die andere Reaktion dagegen konnte auch in den dunklen Tiefen der Ozeane - etwa an unterseeischen Vulkanen - oder in der Lithosphäre abgelaufen sein. Die junge Erde war reich ausgestattet mit zweiwertigem Eisen. Die Atmosphäre enthielt Schwefelwasserstoff. Sie war von star-

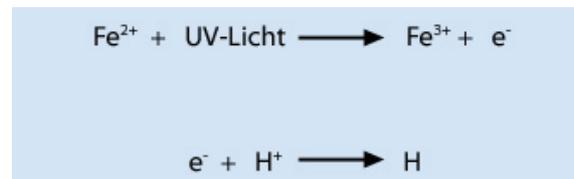


Abbildung 8: Nach DE DUVE könnte die benötigte Energie der ersten präbiotischen Moleküle aus angereicherten Elektronen von durch UV-Strahlung zu dreiwertigen Eisenionen oxidierten zweiwertigen Eisenionen stammen. Die dabei freiwerdenden Elektronen verbanden sich mit den im Wasser vorhandenen Protonen (H^+).

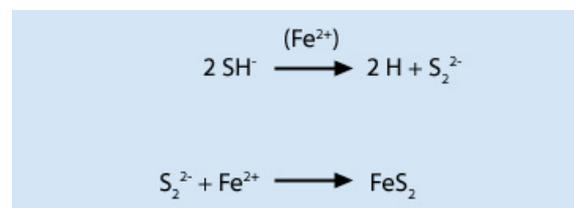


Abbildung 9: Nach WÄCHTERSCHÄUSER könnte die benötigte Energie der ersten präbiotischen Moleküle aus Elektronen von Schwefelwasserstoff stammen. Zwei Hydrogensulfid-Ionen wurden in Gegenwart von zweiwertigen Eisenionen unter Freisetzung von Wasserstoff zu einem Disulfid-Ion umgesetzt. Eisen gibt in dieser Reaktion kein Elektron ab, sondern treibt die Reaktion voran. Es verbindet sich mit dem entstehenden Disulfid zu dem unlöslichen Pyrit. So verschwindet das Reaktionsprodukt Pyrit aus der Lösung, und kann ständig nachgebildet werden.



kem UV-Licht bestrahlt. So herrschten zunächst ideale Bedingungen für die Evolution der chemoautotrophen Energiegewinnung.

Eine neue Energiequelle erschloss sich durch das Auftreten lichtabsorbierender Farbstoffe. Der dabei entstehende Protonengradient konnte über eine Elektronentransportkette für die Bildung von ATP als Energieträger genutzt werden. Damit entstand eine erste Form von Fotosynthese. Die fotosynthetisch aktiven Zellen waren nicht mehr auf den Abbau organischer Substanzen angewiesen. Sie nutzen direkt die Energie des Sonnenlichtes. Diese Form der Ernährung wird als fotoautotroph bezeichnet.

Die Spaltung von Wasser während der Fotosynthese lieferte als Nebeneffekt zusätzlich Sauerstoff. Dieser reicherte sich über mehr als eine Milliarde Jahre in der Hydrosphäre und Atmosphäre an und ermöglichte so die weitere Evolution bis zu den heute bekannten Lebewesen (s. Abb. 3).

Eine verkürzte und didaktisch aufbereitete Darstellung über die Vorstufen des Lebens befindet sich in LIPKOW und SIEMER (2004).

2.2.2 Altersbestimmung von Gesteinsserien

Im 17. Jahrhundert versuchte Nicolaus STENO nachzuweisen, dass einige Steine älter sind als andere. Er fand heraus, dass bei ungestörter Lagerung die tieferliegenden Gesteinsschichten älter sind als die höherliegenden. STENO's relative Altersbestimmung gelingt allerdings nur dann, wenn die Gesteinsschichten in unmittelbarem Kontakt zueinander stehen (s. Abb. 10).



Abbildung 10: Links: Roter Sandstein auf der Insel Helgoland (Schleswig-Holstein, geologische Periode Trias). Rechts: Kalkstein in Müncheberg (Niedersachsen, geologische Periode Kreide). Treten Sedimentschichten in solchen Formationen an die Oberfläche, werden sie als Aufschluss bezeichnet. Sehr gut lässt sich die Abfolge der einzelnen Schichten erkennen, die nach oben hin immer jünger sind. (Fotos: S. HLAWATSCH, IPN)

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts entdeckte SMITH, dass Fossilien dazu verwendet werden können, um das relative Alter auch von räumlich voneinander getrennten Schichten anzugeben. Findet man die gleiche, für einen bestimmten geologischen Zeitraum charakteristische fossilisierte Art (Leitfossil) in Sedimentgestein an unterschiedlichen Orten der Erde, sind die Gesteinsschichten annähernd gleich alt. Dadurch kann weltweit eine Altersbeziehung von Gesteinsschichten festgelegt werden (s. Abb. 11). So ist jedoch nur das relative Alter zu den übrigen Schichten feststellbar, eine absolute Datierung ist nicht möglich, weshalb auch diese Methode als relative Altersbestimmung bezeichnet wird.

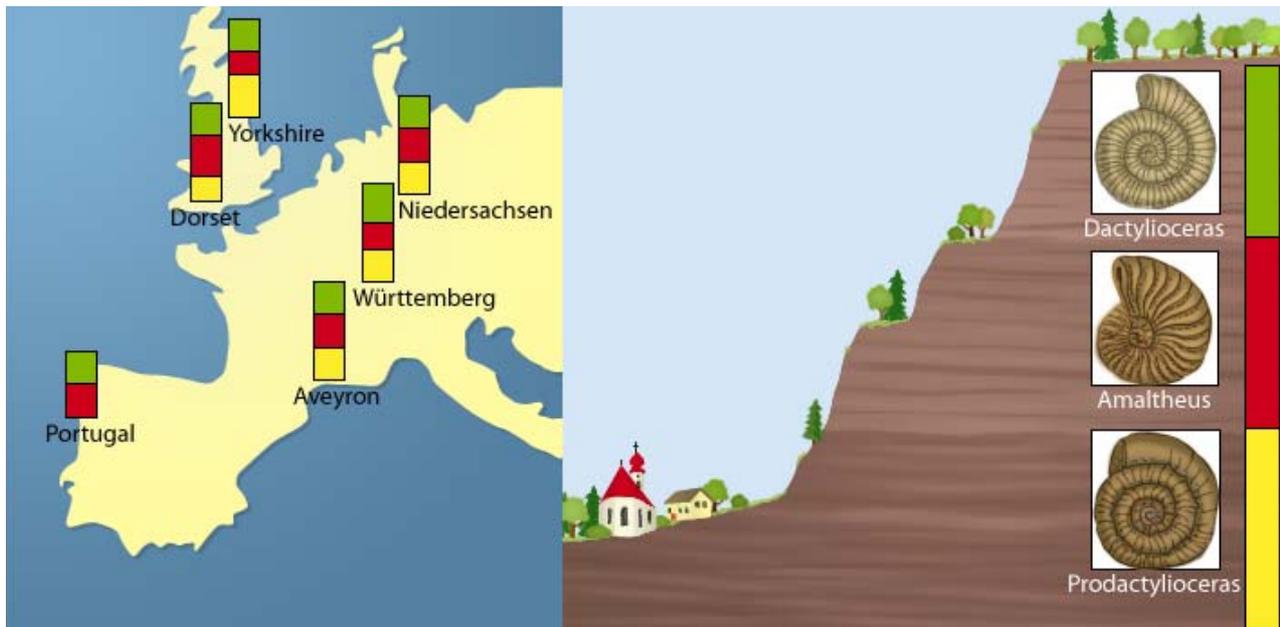


Abbildung 11: Das Prinzip der relativen Altersbestimmung (Biostratigraphie) nach SMITH am Beispiel von Ammoniten aus dem Jura in Westeuropa (nach ZIEGLER 1972). Die Feststellung, dass die drei gezeigten Ammoniten-Arten an verschiedensten Orten immer in der selben Abfolge im Sediment auftreten, lässt den Schluss zu, dass sie typische Vertreter für verschiedene Zeitabschnitte sind (Leitfossilien). Sie ermöglicht eine Aussage über das Alter der betreffenden Sedimentschichten in Relation zueinander, auch wenn diese nicht direkt nebeneinander liegen.

Als Leitfossilien werden solche Fossilien bezeichnet, die nur in der betreffenden Gesteinsschicht vorkommen. Leitfossilien sollen sich von anderen Arten leicht unterscheiden lassen, sollen geographisch weit verbreitet sein und möglichst nur in der zu untersuchenden Schicht vorkommen. Weiterhin sollen die Arten nur über eine relativ kurze Zeit existiert haben, um eine exakte Datierung zu ermöglichen. Im 19. Jahrhundert sind schon weitgehend die noch heute gebräuchlichen Namen der einzelnen Erdzeitalter und Perioden mit den darin enthaltenen Leitfossilien festgelegt worden, wie Kambrium (mit Trilobitenarten als Leitfossilien) oder Kreide (mit Belemniten als Leitfossilien, s. Abb. 1).

Ebenfalls zu Beginn des 19. Jahrhunderts sammelte Georges de CUVIER Fossilien in Steinbrüchen des Pariser Beckens. Dabei stieß er auf heute unbekanntes Säugetierarten. CUVIER erkannte eine Abfolge von sieben eigenständigen fossilen Faunen, die jeweils in der folgenden Schicht verschwanden und von einer anderen fossilen Fauna abgelöst wurden. Zwischen jeder dieser Schichten mit landlebenden Tieren lagen Schichten mit marinen Mollusken (Weichtiere wie Muscheln, Schnecken, Tintenfische). CUVIER folgerte daraus, dass die Lebewesen jeweils durch katastrophartige Umweltveränderungen ausgestorben seien. Er nahm an, dass das Meer sintflutartig in dieses Gebiet eingedrungen sei und sich gewisse Zeit später wieder zurückgezogen habe. Als Folge der Überschwemmung seien die Landtiere ausgelöscht worden, und Meerestiere konnten sich entfalten. Dieser Vorgang habe sich mehrmals wiederholt (Katastrophentheorie). Beim Rückzug des Meeres erschienen erneut Landtiere. CUVIER vermutete, dass diese Landtiere aus den benachbarten Landgebieten eingewandert seien. Das entspricht auch heutiger Auffassung. Er ging jedoch davon aus, dass alle Arten von Lebewesen gemäß dem Schöpfungsbericht der Bibel seit Erschaffung der Welt auf der Erde leben (Artkonstanz). CUVIER konnte sich nicht vorstellen, dass neue Arten aus vorhandenen Arten durch Evolution entstanden seien, die dann später eingewandert sind. Erst 1859, einige Jahrzehnte später, erschien das revolutionäre Buch von Charles DARWIN „Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl“. Die Prinzipien des „Aktualismus“ und „Uniformismus“ waren DARWIN bekannt. Anhand von Fossilien kamen ihm erste Zweifel an der Lehre von der Konstanz der Arten (s. Abb. 12). Gestützt auf paläonto-

logische und geologische Beobachtungen begründete DARWIN seine Evolutionstheorie, nach der sich alle rezenten Lebewesen aus älteren Arten entwickelt haben.



Abbildung 12: Fossil eines Urpferdchens (*Propalaeotherium parvulum*) aus dem Eozän (ca. 50 Mio. Jahre). Diese nur fuchs-großen Tiere sind aufgrund vieler übereinstimmender Merkmale in die Verwandtschaft mit heutigen Pferden einzuordnen (Foto: E. HAUPT / B. SIMON, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung).

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts kann das absolute Alter von Gesteinsschichten mit Hilfe von radiometrischen Methoden der Altersbestimmung festgestellt werden. Diese Methoden werden ständig verfeinert. So kommt es, dass der Beginn eines geologischen Zeitalters, z. B. des Kambriums, alle paar Jahre anders angesetzt worden ist. Es ist wichtig, das absolute Alter der erdgeschichtlichen Epochen zu kennen. Mit dieser Kenntnis lässt sich die Geschwindigkeit und damit auch die Dynamik der ablaufenden evolutiven Prozesse ermitteln, wie z. B. die Entstehung neuer Arten.

2.2.3 Fauna und Flora im Karbon

Es würde den Rahmen dieser Information sprengen, die Entwicklung der Biosphäre über alle Erdzeitalter detailliert zu beschreiben. Eine Übersicht findet sich im Material „Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre“ (Modul 8, Baustein 4, Material 2) oder in Linder Biologie (BAYRHUBER und KULL 2005, S. 474ff). Exemplarisch wird hier die Entwicklung der Fauna und Flora im Karbon näher beschrieben, da in dieser Periode eine sprunghafte Entwicklung von Fauna und Flora einsetzte, die auch in der Atmosphäre große und bleibende Veränderungen hervorrief (s. Abb. 13 und 15). Zudem entstand in dieser Periode mit den Steinkohlewäldern eine wichtige Grundlage für die Energierohstoffe heutiger industrialisierter Gesellschaften (s. Modul „Roh-

stoffe und Recycling“). Damit kann ein systemisches Verständnis unseres Planeten um eine zeitliche Komponente erweitert werden.

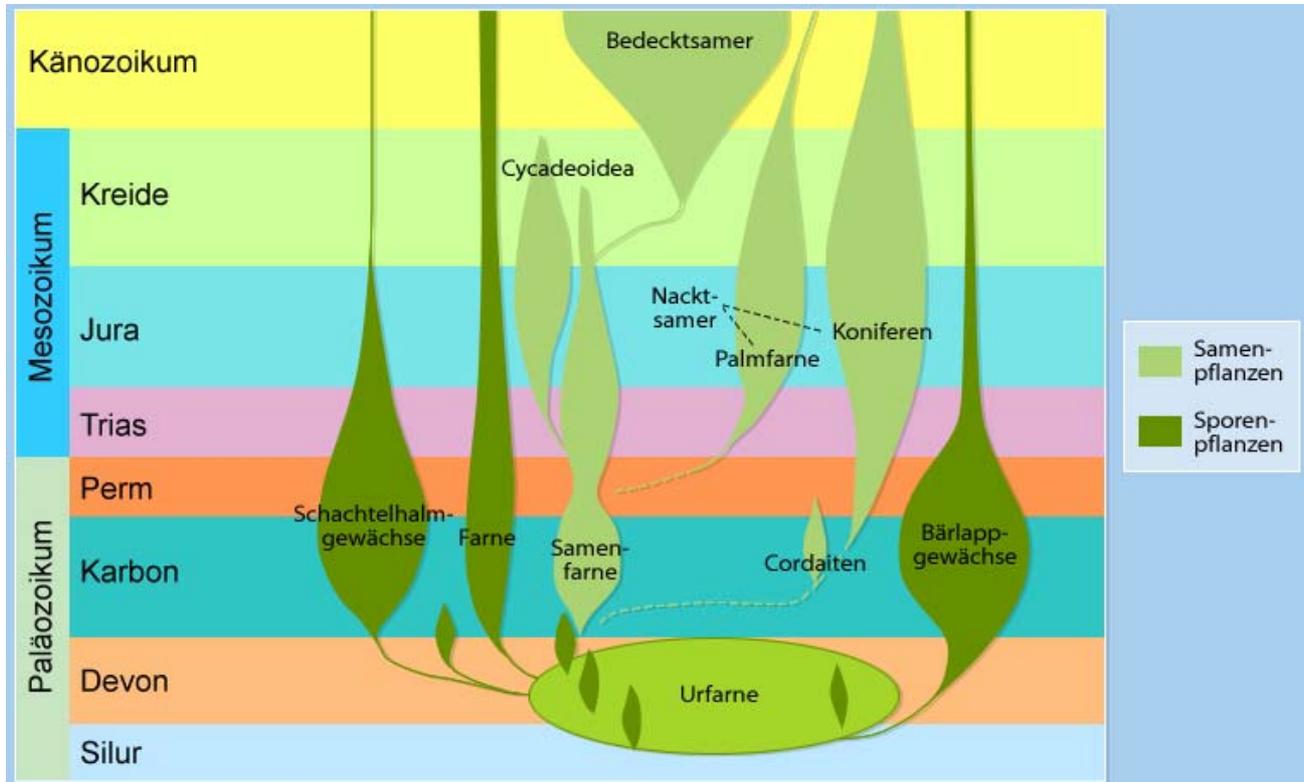


Abbildung 13: Stammesgeschichte und Diversität der wichtigsten Gruppen der Gefäßpflanzen (nach STANLEY 2001). Die Urfarne sind eine künstlich zusammengefasste Gruppe (ein Paraphylum). Cordaiten waren eine ausgestorbene Gruppe baumförmiger Nacktsamer, Cycadeoidea eine ausgestorbene Gruppe von Palmfarne.

Das Erdzeitalter Karbon (carbo lat. Kohle) wurde schon 1822, offiziell also sehr früh in der Geschichte der modernen Geologie, als erdgeschichtliche Periode in England eingeführt. Sein Name wurde gewählt, um den ausgedehnten Kohleablagerungen dieses Zeitabschnittes gerecht zu werden.

Aquatische Lebewesen

Während des großen Massenaussterbens am Ende des Devons verschwanden viele marine Tiergruppen, so auch bestimmte Korallen und die trägen Panzerfische. Räuberische Formen wie Haie und Ammoniten breiteten sich im Karbon aus. Aus den Skelettbruchstücken der häufig vorkommenden Bryozoen (Moostierchen), Crinoiden (Seelilien) und Foraminiferen (einzellige Kammerlinge) bildeten sich dicke Sedimentschichten aus Kalziumkarbonat. Der daraus entstandene Kalkstein wird heute als Baumaterial und als Ausgangsstoff für die Zementherstellung verwendet. Im Süßwasser diversifizierten unter den Knochenfischen weiterhin die Strahlenflosser, die Vorfahren der meisten unserer heutigen Fische. Von den Knorpelfischen gab es Süßwasserhaie, die heute keine nahen Verwandten mehr besitzen. Muscheln wurden im Süßwasser zahlreicher. Deren Schalen findet man dementsprechend häufig in Kohleablagerungen.

Landtiere

Von den landlebenden Gliederfüßern (Arthropoden) sind Skorpione und flügellose Insekten aus dem Unterdevon bekannt. Aus dem Oberkarbon kennt man geflügelte Insekten, die zu den Gruppen der Eintagsfliegen



und Libellen gehören. Die Insekten im Karbon waren meist etwa so groß wie ihre heute lebenden Nachfahren. Aus dem Karbon ist allerdings eine Riesenlibelle mit einer Flügelspannweite von über einem halben Meter bekannt (Fundort in Frankreich).

Am Ende des Oberkarbons lässt sich eine adaptive Radiation der Insekten nachweisen. Insektenarten begannen verschiedenste ökologische Nischen einzunehmen und sich dementsprechend anzupassen. Einige Insekten entwickelten Mundpartien, mit denen sie Saft aus Pflanzen saugen konnten. Die Beine weiterer Arten wurden zum Ergreifen der Beute, zum Springen oder zum Rennen umgewandelt.

Bereits im Devon begannen von den Wirbeltieren die Amphibien ihren Aktionsradius auf dem Festland auszuweiten, v. a. zur Nahrungsaufnahme. Dies setzte sich im Karbon fort. Die heutigen Amphibien wie Frösche und Schwanzlurche sind im Vergleich zu ihren ausgestorbenen Verwandten im Karbon relativ klein. Damals gab es Amphibien mit einem deutlich größeren Spektrum an Formen, Größen und Lebensweisen als heute. Einige waren klein, sahen schlangenähnlich aus und lebten räuberisch. Ein mehrere Meter langes schwerfälliges pflanzenfressendes Amphib ähnelt im Aussehen einem dicken Alligator. Die Amphibien hatten an Land kaum Konkurrenz durch andere Wirbeltiere. Aus dem Karbon sind weiterhin die ersten Reptilien bekannt.

Pflanzenleben auf dem Festland

Die Entwicklung der Landpflanzen setzte bereits vor dem Karbon ein. Zum Ende des Silurs, vor etwa 416 Millionen Jahren, begannen die ersten Pflanzen das Festland zu besiedeln. Die Entwicklung von zunächst winzig kleinen Landpflanzen bis zu Arten mit baumförmigem Wuchs erfolgte in etwa 50 Millionen Jahren während des Devons. Im Oberkarbon setzte sich die starke Evolution der Landpflanzen fort und erreichte dort einen Höhepunkt.

Die auf dem Land wachsenden Pflanzen unterscheiden sich in vielen Merkmalen von Wasserpflanzen. Für Blütenpflanzen gilt in diesem Zusammenhang Folgendes:

- Ausbildung von Wurzeln zum Verankern im Boden und zur Aufnahme von Wasser und Nährsalzen.
- Ausbildung einer Kutikula, als wasserundurchlässige Schicht auf der Epidermis. Dadurch wird die Gefahr der Austrocknung verringert.
- Ausbildung von Leitbündeln zum Transport von Wasser und Nährstoffen sowie zur Festigung des Pflanzenkörpers.
- Bildung von Spaltöffnungen für den Gasaustausch.
- Verbreitung der männlichen Fortpflanzungszellen im Pollen durch die Luft oder durch bestäubende Tiere.
- Bildung von Blättern zur Vergrößerung der Oberfläche für die fotosynthetisch wirksamen Elemente.

Die ersten Landpflanzenarten waren die Nacktfarne. Sie waren noch blattlos und nur wenige Zentimeter groß. Sie hatten einen runden glatten Spross mit Spaltöffnungen und einem zentralen Leitstrang. Diese kleinen Landpflanzen trugen endständige Sporangien, in denen die Sporen gebildet wurden. Echte Wurzeln fehlten. Wasser und Nährsalze wurden durch Ausstülpungen von Zellen (Rhizoide) aufgenommen, die sich dort entwickelten, wo die Sprosse dem feuchten Boden auflagen (s. Abb. 14).

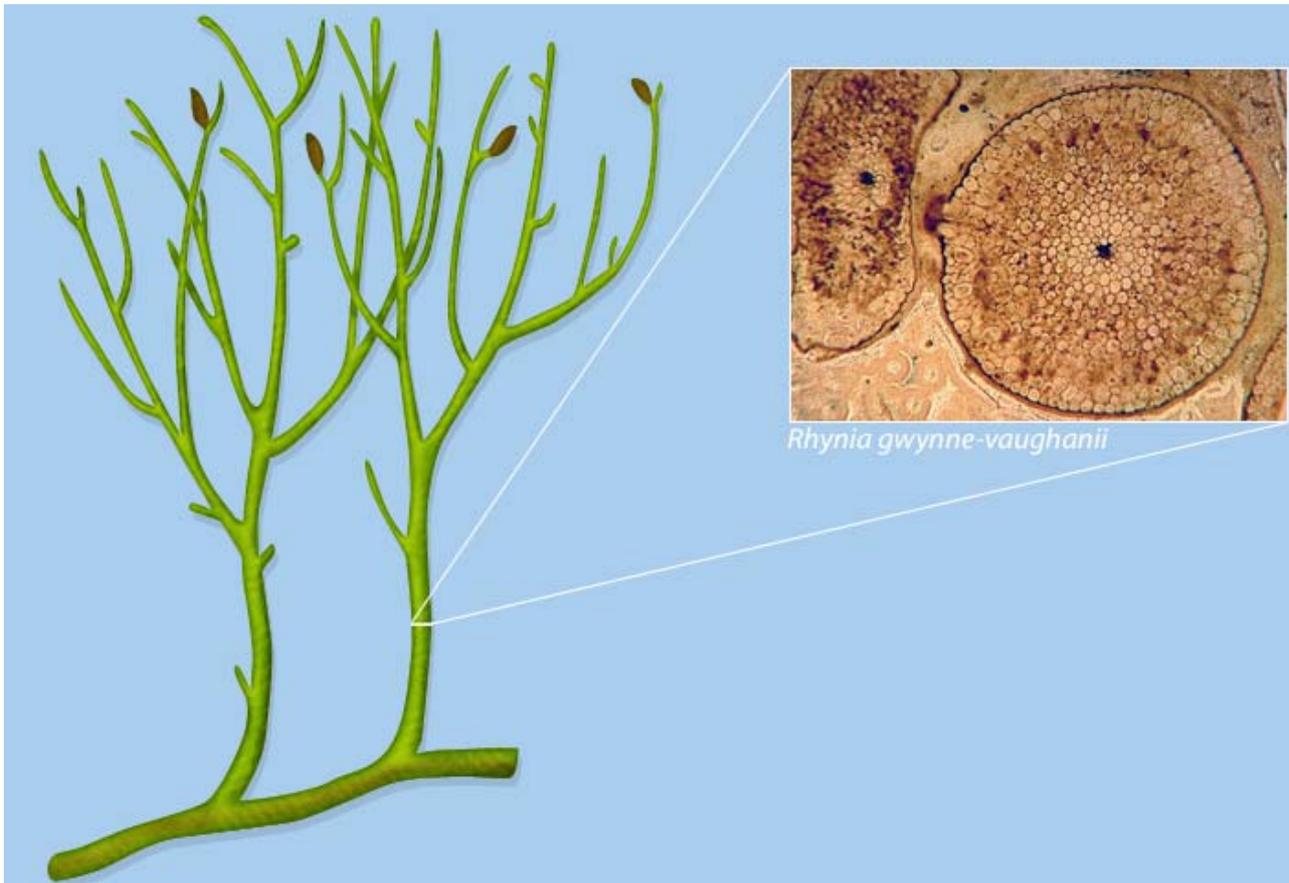


Abbildung 14: *Rhynea*, ein Nacktfarn. Eine der ersten Landpflanzen aus dem Devon. Links der aus Fossilfunden rekonstruierte Habitus. An den Enden der blattlosen Sprosse standen Sporangien. Rechts ein Querschnitt durch einen fossilen Spross. (Foto: PALAEOBOTANICAL RESEARCH GROUP, UNIVERSITY MÜNSTER, www.uni-muenster.de/GeoPalaeontologie/Palaeo/Palbot/rhyneu3.htm)

Ab dem Devon lösten baumförmige Schachtelhalmgewächse, Bärlappgewächse und Farne die Nacktfarne ab (s. Abb. 13). Die neu entstandenen Formen besaßen bereits echte Wurzeln und komplexere Leitbündelsysteme für den Wasser- und Nährstofftransport. Außerdem bildeten sie Holz (Sekundärxylem), das als Stützgewebe eine Voraussetzung für baumförmiges Wachstum ist. Im Oberdevon traten die ersten baumartigen Pflanzen auf. Aus der Gruppe der Bärlappgewächse sind bis zu 10 m lange versteinerte Stämme mit einem Durchmesser von 1,5 m aus Nordamerika erhalten. Diese Bäume hatten eine wedelartige Belaubung mit fächerförmigen Blättchen. Sie vermehrten sich mit Mikro- und Makrosporen. Das war der erste evolutive Schritt hin zur Entwicklung von Samen. Schon im Oberdevon erschienen die ältesten Samenpflanzen mit farnartigen Blättern. Sie werden in die ausgestorbene Gruppe der Samenfarne gestellt (s. Abb. 13). Es waren die Vorläufer der heutigen Nacktsamer (Gymnospermen). Sie waren nicht mehr auf Wasser bei der Befruchtung angewiesen. Durch die Photosynthese der sich ausbreitenden Vegetation begann der CO₂-Gehalt der Atmosphäre gegen Ende des Devons abzunehmen (s. Abb. 15). Daher musste die CO₂ aufnehmende Oberfläche der Pflanzen sich vergrößern: Flächige Blätter entstanden. Im späten Devon kam es weiterhin zu einer durch Klima und geographische Position der Landmassen hervorgerufenen Differenzierung in verschiedene Florenprovinzen.

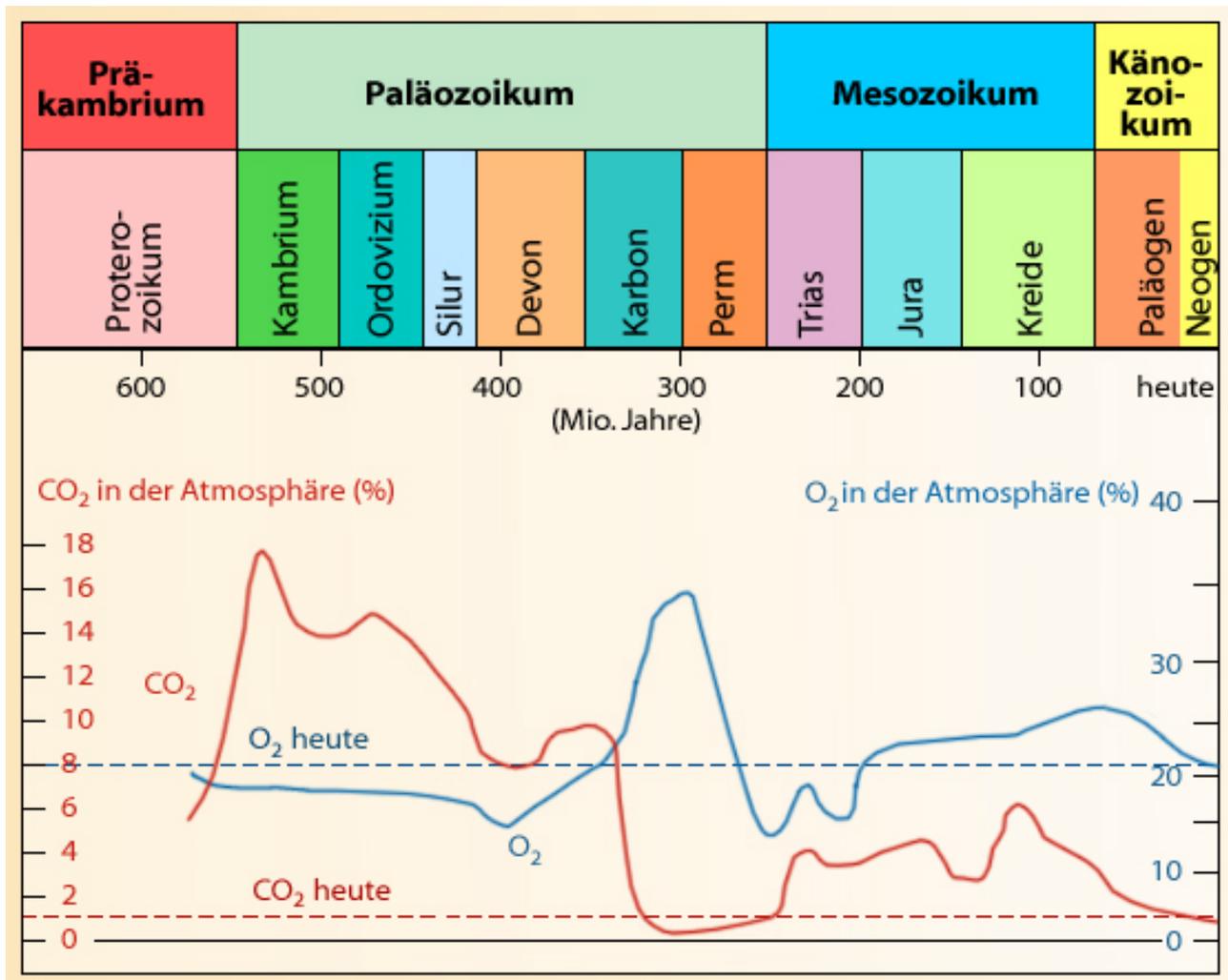


Abbildung 15: Der aus verschiedenen Quellen errechnete Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt der Erdatmosphäre im Verlauf der Erdgeschichte. Zum Vergleich sind die heutigen Werte durchgängig angegeben (rote und blaue gestrichelte Linien) (nach VAN ANDEL 1994).

Im Karbon kam es zu einer weiteren Diversifikation von Arten innerhalb der bereits existierenden Pflanzengruppen (s. Abb. 13). Die Landschaften im Karbon waren v. a. geprägt durch baumartige Sporenpflanzen aus den Gruppen der Farne, Schachtelhalme, Bärlappgewächse und Samenfarne. Die häufigsten Bäume in den Sümpfen gehören zu den Bärlappgewächsen. Es waren Lepidodendron (Schuppenbaum) mit einer Wuchshöhe bis zu 30 m und Sigillaria (Siegelbaum) mit einer Wuchshöhe bis zu 40 m. Die bis zu 20 m hohen baumartigen Calamiten gehörten zu den Schachtelhalmgewächsen, Cordaiten zu den Nacktsamern (Gymnospermen) (s. Abb. 16).

Diese weitere Ausbreitung der Vegetation und vor allem die langfristige Fixierung von Kohlenstoff in Steinkohle führten zu einem dramatischen Abfall des CO₂-Gehaltes auf ähnliche Werte wie heute.

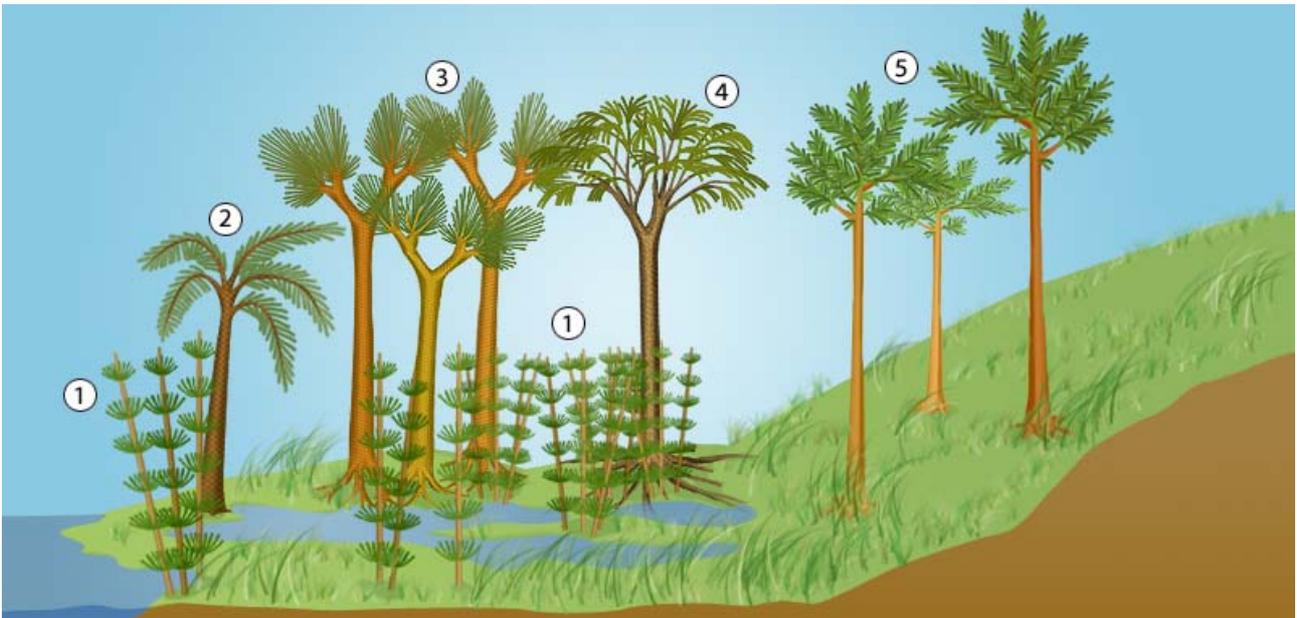


Abbildung 16: Rekonstruktion einer karbonischen Landschaft mit typischer Flora. 1 Calamiten (Schachtelhalme), 2 Baumfarne, 3 Siegelbäume, 4 Schuppenbaum, 5: Cordaiten (Nacktsamer).



Abbildung 17: Fossiles Blatt einer Seerose aus dem Eozän. Die Adern sind deutlich zu erkennen und lassen Rückschlüsse auf die Form der Blattspreite zu. (Foto: E. HAUPT / B. SIMON, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung)

Es ist oft schwierig, fossilisierte Pflanzenteile einer bestimmten Pflanzenart zuzuordnen. Oft liegen nur unvollständig erhaltene Bäume vor. Man findet abgeworfene Blätter, Stamm-, Zweig- oder Wurzelstücke, die den Transport zum Sedimentationsort überstanden haben. Am häufigsten sind Abdrücke von einzelnen



Pflanzenteilen erhalten. Versteinerte Pflanzen treten häufig in vulkanisch aktiven Gebieten auf. Ist genügend organisches Material erhalten geblieben, dann lassen sich sogar Details wie die Form der Blattspreite oder die Zellmuster der Epidermis studieren (s. Abb. 17).

2.2.4 Entstehung von Kohle im Karbon

Die heutigen Teile Mitteleuropas und Nordamerikas mit ihren mächtigen Steinkohleschichten (Flözen) lagen aufgrund der Plattentektonik zur Zeit des Karbons in der Nähe des Äquators und auch in Meeresnähe. In ausgedehnten feuchtwarmen Sumpfniederungen gedieh im Oberkarbon eine üppige Vegetation (s. Abb. 13 und 16). Der Zuwachs an Biomasse war im damals herrschenden feuchtwarmen tropischen Klima sehr groß. Es wird vermutet, dass es zu jener Zeit keine oder nur wenige Pilze gab, welche die abgestorbenen Pflanzen zersetzen konnten. So entstanden aus den Pflanzenresten zunächst Torf und Braunkohle sowie einige Millionen Jahre danach auch Steinkohle (s. Abb. 18).



Abbildung 18: Steinkohle aus dem Karbon. (Foto: S. HLAWSCH, IPN)

Es gab im Karbon mehrere Vorstöße des Meeres (Transgression). Jedes Mal setzten sich Sedimente ab, ehe sich nach Rückzug des Meeres (Regression) erneut Sumpfwälder ausdehnten. So lässt sich erklären, dass sich zwischen jeder Kohleschicht eine Schicht aus klastischen Ablagerungsgesteinen befindet.

Unter Luftabschluss und später unter dem Druck der auflagernden Sedimente setzte bei den abgestorbenen Pflanzen ein als „Inkohlung“ bezeichneter Prozess chemischer Umwandlung ein. Dabei entstehende flüssige und gasförmige Stoffe wurden herausgedrückt. Fester Kohlenstoff blieb zurück. Aus heterogenem, verschiedenfarbigem Pflanzenmaterial entstand so die homogen aussehende schwarze Steinkohle. Stark mit Sediment verunreinigte Kohle enthält noch deutlich erkennbare Stämme, Äste und Blätter. Im Oberkarbon müssen riesige Mengen an pflanzlicher Biomasse erzeugt worden sein, so dass die großen Massen an Steinkohle entstehen konnten: Für die Entstehung von einem Kubikmeter Kohle sind mehrere Kubikmeter Holz notwendig.



Im Verlauf des Karbons drifteten die größeren Kontinente immer näher zusammen, bis sie zu Beginn des Mesozoikums zum Großkontinent Pangaea verschmolzen waren. Der Meeresspiegel, der Ende des Devons abgesunken war, stieg während des Unterkarbons erneut an. In den niedrigen Breiten dehnten sich warme Meere weiträumig über die Festländer aus. Hier lagerten sich Kalksteine in Form von Rifften ab.

Im Übergang vom Unter- zum Oberkarbon kam es zu einer globalen Absenkung des Meeresspiegels. Belegt wird diese Regression durch ein Fehlen von Meeressedimenten zwischen den Kohleschichten. Vermutlich wurde dieser Rückgang des Meeres durch die Ausdehnung von Gletschern im Gondwanaland ausgelöst, die dabei enorme Wassermengen auf dem Festland banden. Ein möglicher Auslöser der Gondwanavereisung wird in dem Rückgang des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre gesehen (s. Abb. 15) Das Aussterben von Meerestieren, wie vieler Gattungen der Seelilien (Crinoiden) und Ammoniten, ist wahrscheinlich die Folge einer Abkühlung der Meere.

Gegen Ende des Karbons stießen zwei Kontinentalplatten gegeneinander. Durch diese Kollision der damaligen Kontinente Gondwana und Euamerika wurde das Variskische Gebirge aufgefaltet (Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Thüringer Wald). Als Folge dieser Auffaltung liegen die meisten Kohleflöze im Ruhrgebiet nicht mehr horizontal, sondern sind schräg gestellt und gegeneinander versetzt.

Aus der Veränderung der Zusammensetzung der Pflanzenarten in der westeuropäischen und nordamerikanischen Kohle am Ende des Karbons kann abgeleitet werden, dass sich das Klima damals verändert hat. Zu Beginn des Perm schoben sich Gondwana und Euamerika zur ausgedehnten Festlandsmasse Pangäa zusammen. Große Gebiete lagen nun weit entfernt von den Ozeanen und erhielten keine oder nur noch wenig Niederschläge. Dem vorwiegend humiden Klima im Oberkarbon folgte nun ein arides Klima. Als Folge des Zusammenschiebens der einzelnen Kontinente trockneten die jetzt im Inneren des Festlandes liegenden Kohlesümpfe aus. Nun konnten sich an Trockenheit angepasste Lebewesen entfalten. Kohle konnte unter diesen Bedingungen nicht mehr entstehen.

Entstehung von Kohle in anderen Regionen und zu anderer Zeit

Im Oberkarbon lag der große Kontinent Gondwana auf der Südhalbkugel und dort vorwiegend in den höheren Breiten mit einem kühlen Klima. In den wärmeren Gebieten von Gondwana entstand im Oberkarbon auch Steinkohle. Die Steinkohlewälder von Gondwana bestanden allerdings nicht aus Bäumen der Bärlappgewächse wie im damaligen Nordamerika und Europa, sondern aus Glossopteris, einem baumartigen Samenfarne. Aus den Querschnitten der fossilisierten Baumstämme lassen sich Aussagen über das damals herrschende Klima machen. Glossopteris aus einer Region mit Sommer- und Winterklima hat Jahresringe im Holz. Bei Glossopteris ist der Wechsel von Früh- und Spätholz wie bei Bäumen in unserem relativ kühlen mitteleuropäischen Klima zu erkennen. Lepidodendron und Sigillaria, als Bäume im tropischen gleichmäßig feuchtwarmen Klima von Euamerika besitzen dagegen keine Jahresringe.

Die südlich von Hannover und in der Nähe von Osnabrück vorkommenden relativ dünnen Steinkohleflöze haben sich während der Kreidezeit gebildet. Das Gebiet des heutigen Mitteleuropa lag damals, vor etwa 100 Millionen Jahren, näher am Äquator als heute (s. Abb. 19). Die Pole waren nicht vereist. Es herrschte ein Treibhausklima, das die Entfaltung von Steinkohlewäldern begünstigte.



Lage der Kontinente vor 100 Millionen Jahren

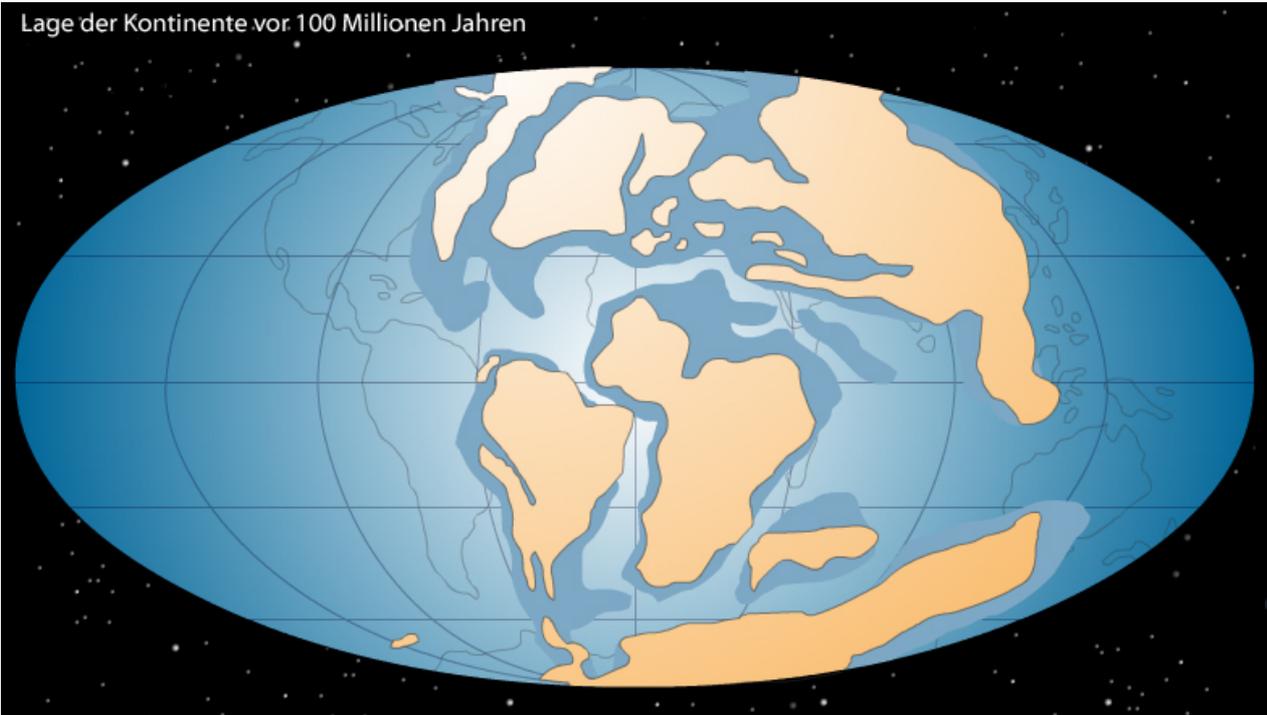


Abbildung 19: Lage der Kontinente vor 100 Millionen Jahren.

Im frühen Paläogen herrschte in Mitteleuropa eine Warmzeit. Die Atmosphäre enthielt zu jener Zeit im Vergleich zu heute relativ viel Kohlenstoffdioxid (s. Abb. 15). Im Bereich von Köln und in der Lausitz bildete sich Braunkohle. Die Zeit und der Druck der aufliegenden Sedimente reichten jedoch nicht aus, um bis heute aus dieser Braunkohle eine Steinkohle entstehen zu lassen.

2.2.5 Wechselwirkungen zwischen den Sphären

Die Erde besitzt nach dem heutigem Kenntnisstand als einziger Planet aufgrund ihrer besonderen Lage im Sonnensystem eine Biosphäre. Die Oberfläche der Erde hatte und hat entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Biosphäre. Dieser Einfluss stand bisher im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Inzwischen wird jedoch auch die umgekehrte Wirkung stärker erforscht, der Einfluss der Organismen auf die abiotischen Sphären unseres Planeten. Denn die Biosphäre hat auch die Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre wesentlich mit gestaltet. Lebewesen entnehmen aus ihrer Umgebung Stoffe und geben Stoffe ab. Es entstehen Stoffkreisläufe. Die Wechselwirkungen zwischen den Sphären begannen schwach ausgeprägt schon bei der Entstehung der ersten Lebewesen. Sie wurden immer stärker, je mehr Biomasse entstand und setzen sich bis heute fort.

Die Betrachtungsweise der Erde als dynamisches System führt zu einem prozessorientierten Verständnis und bildet so die Voraussetzung für ein nachhaltiges Erdsystem-Management. MOSBRUGGER (2002) erläutert die prägende Kraft der Biosphäre an den Beispielen Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid sowie Strahlungs- und Wasserhaushalt.

Sauerstoff

Vor etwa 3,8 Milliarden Jahren, zur Zeit der Entstehung des Lebens, gab es fast keinen Sauerstoff in der Atmosphäre. In der damaligen reduzierenden Atmosphäre konnten die häufig vorhandenen Minerale Pyrit



und Uranit nicht oxidieren. Diese Minerale sind in Sedimenten des Archaikums (bis vor 2,5 Milliarden Jahren) zu finden. Heute besteht die Atmosphäre zu etwa 21 Prozent aus Sauerstoff. Pyrit und Uranit werden in sauerstofffreien Milieus auch heute noch gebildet, aber sobald sie an die Oberfläche gelangen sofort oxidiert.

Sauerstoff ist eine notwendige Voraussetzung für die Atmung. Erst als es Sauerstoff in genügender Konzentration im Meer gab, konnten sich dort höhere eukaryotische Lebewesen entwickeln. Der heute vorhandene Sauerstoff in der Hydrosphäre und Atmosphäre stammt aus der Fotosynthese. Schon früh in der Entwicklung der Lebewesen dürften Cyanobakterien Fotosynthese betrieben haben. Die Biosphäre veränderte dadurch also die Zusammensetzung der Hydrosphäre und Atmosphäre in entscheidendem Maße, was wiederum Rückwirkungen auf die weitere Entwicklung der Biosphäre hatte.

Die Hinweise auf Fotosynthese treibende Organismen bereits vor etwa 3.5 Milliarden Jahren widersprechen jedoch den Funden von noch etwa 1 Milliarde Jahre jüngeren sedimentären Uraniten und Pyriten. Es besteht ein erheblicher Disput in der Wissenschaft, ob es sich bei den archaischen Mikrofossilien und Stromatolithen wirklich um Überreste Fotosynthese treibender Cyanobakterien handelt, und wenn dem so ist, warum es eine Milliarde Jahre gedauert hat, bis sich eine nennenswerte Sauerstoffkonzentration in der Hydrosphäre und Atmosphäre angesammelt hatte (s. Abb. 3).

Zunächst im Meer entstanden, diffundierte der Sauerstoff in die Luft, so dass eine oxidierende Atmosphäre entstand. Eisenhaltige Minerale auf der Erdoberfläche oxidieren in Gegenwart von Luftsauerstoff zu Eisenoxiden und lagern sich als rötliche Sedimente ab. Diese Minerale sind in Schichten ab ca. 2,5 Milliarden Jahren zu finden und bilden den Beweis für die Ansammlung von Sauerstoff in der Atmosphäre ab dieser Zeit.

Kohlenstoffdioxid

Die Biosphäre beeinflusst nicht nur den Sauerstoffgehalt des Meeres und der Atmosphäre, sondern auch die Konzentration von Kohlenstoffdioxid. Nimmt die Fotosyntheserate und damit die Biomasse zu, wird der Atmosphäre CO_2 entzogen. Geringer CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre bewirkt einen geringen natürlichen Treibhauseffekt und damit sinkende globale Temperaturen. Hoher CO_2 -Gehalt der Atmosphäre dagegen führt zu einem „Treibhausklima“ (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Eine mehrfach höhere CO_2 -Konzentration als heute und damit ein wärmeres Klima gab es im frühen Paläozoikum vor etwa 570 bis 420 Millionen Jahren (s. Abb. 15). Die Erde hatte damals keine polaren Eiskappen.

Nach der pflanzlichen Besiedlung des Festlandes und der damit zunehmenden Fotosynthese nahm der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre ab. Die Ausdehnung der terrestrischen Vegetation erreichte im Karbon einen Höhepunkt. Als Folge davon sank die CO_2 -Konzentration deutlich und erreichte etwa heutige Werte (s. Abb. 15). Das vorher herrschende Treibhausklima ging in ein „Eishausklima“ über. Eiskappen bildeten sich an den Polen (s. Abb. 20).

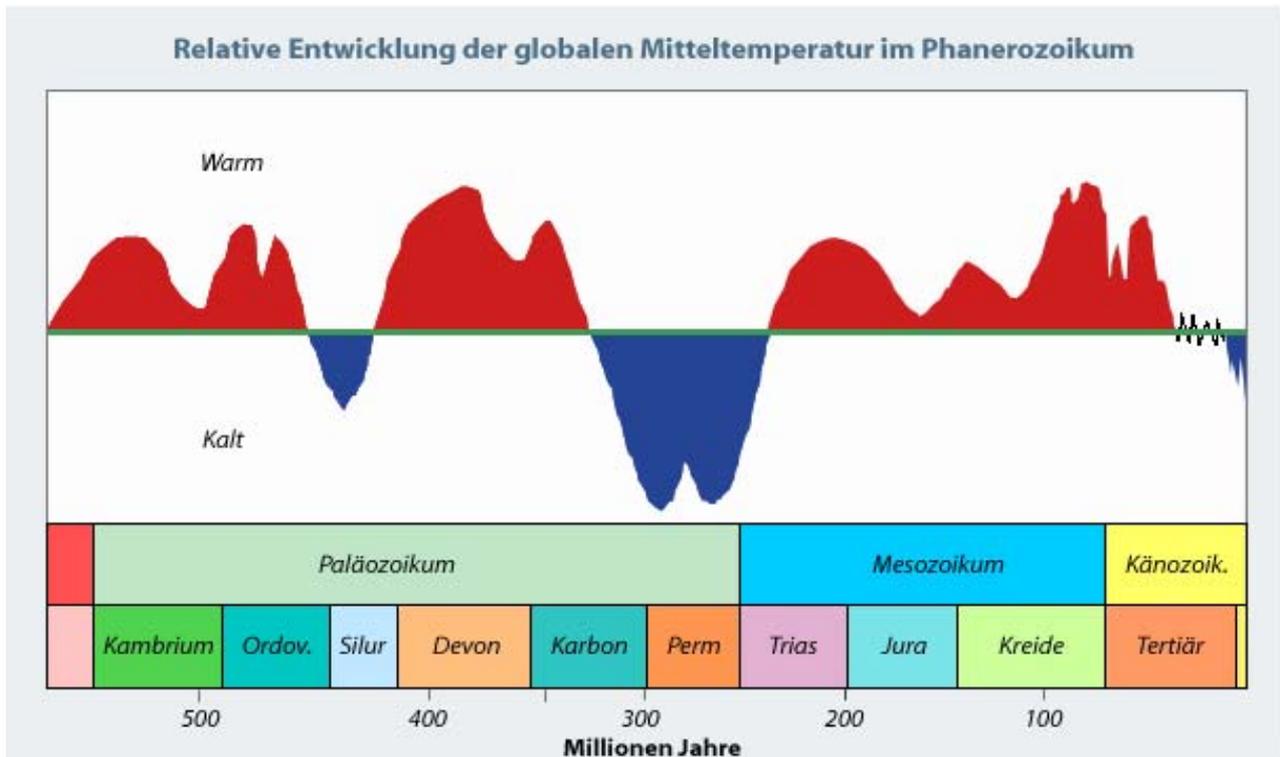


Abbildung 20: Relative Entwicklung der globalen Mitteltemperatur im Phanerozoikum (Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum) (nach OSCHMANN et al. 2000).

Die Schwankungen des Kohlenstoffdioxidgehalts in späteren Erdperioden wurden wahrscheinlich stärker durch abiotische Vorgänge beeinflusst als durch die Biosphäre. Starke plattentektonische Bewegungen und intensiver Vulkanismus setzten große Mengen CO_2 frei und bedingten ein erneutes Treibhausklima. Unser heutiges „Eishausklima“ mit einer – erdgeschichtlich betrachtet – relativen geringen atmosphärischen CO_2 -Konzentration, ist erst in den letzten 30 Millionen Jahren entstanden (s. Abb. 15). Die heute wieder zu beobachtende allgemeine Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde führt in der Nähe der Wendekreise zu einer Ausdehnung der Wüsten, aber auch zu einem Anstieg des Meeresspiegels durch das Schmelzen der riesigen Gletscher in Polnähe. Der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre wird seit Jahrzehnten kontinuierlich gemessen. Anhand der Messungen kann man den stetigen Anstieg dieses Treibhausgases in den letzten 50 Jahren feststellen. Dieser Effekt ist heute im wesentlichen anthropogenen Ursprungs (s. Abb. 21 und Module „Kohlenstoffkreislauf“ und „Klimasystem und Klimageschichte“). Vertiefende Informationen zur Messung des CO_2 -Gehaltes in der Erdgeschichte finden sich im Modul „Klimasystem und Klimageschichte“.

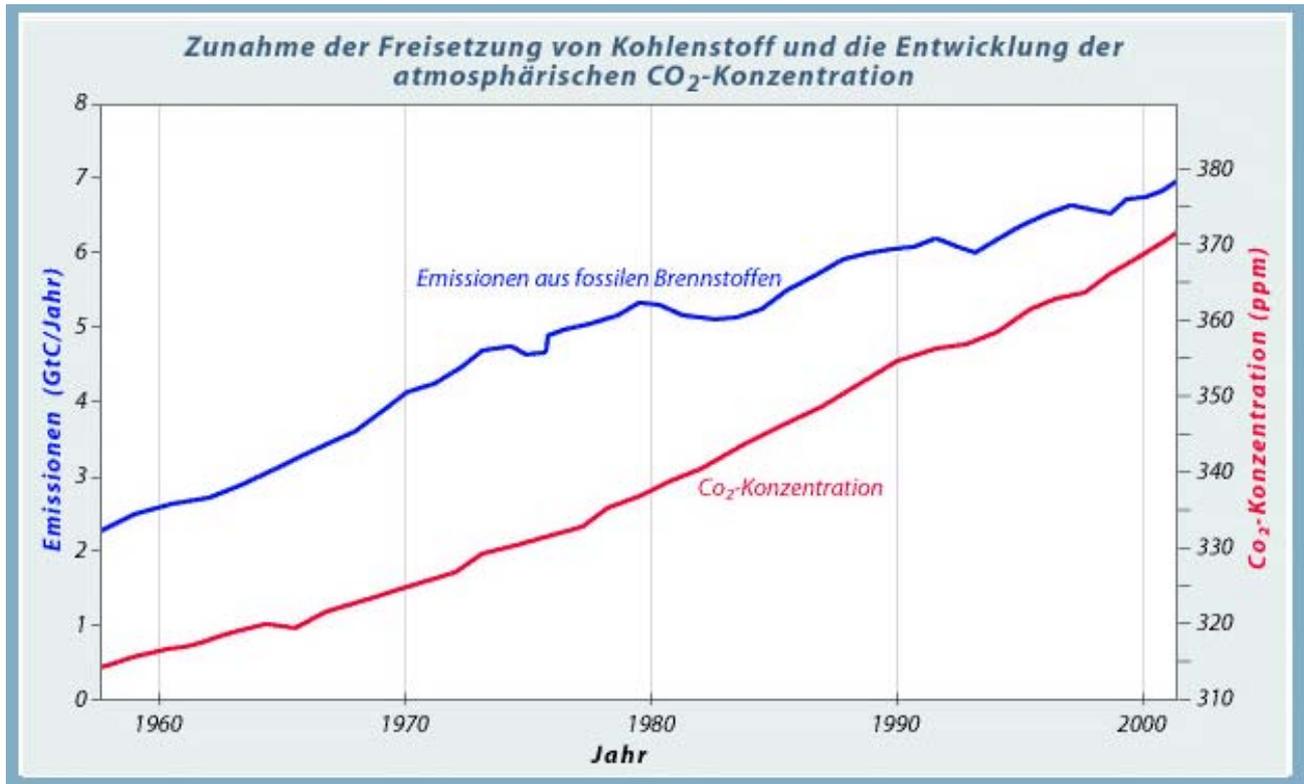


Abbildung 21: Der in den fossilen Brennstoffen enthaltene, vor Jahrmillionen aus Atmosphäre und Biosphäre entzogene Kohlenstoff wird nun in kurzer Zeit in großer Menge in die Atmosphäre freigesetzt. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre stieg daher in den letzten Jahrzehnten ständig an. (Datequelle: IPCC 2001)

Marine Lebewesen mit Kalkskelett entziehen langfristig dem Wasser die Grundbausteine zum Aufbau des Skeletts und damit ebenfalls CO₂. Aus den festsitzenden und Kalk abscheidenden Korallen entstehen Korallenriffe und Atolle im Laufe der Jahrtausende und Jahrmillionen. Schalen abgestorbener Muscheln, Schnecken, Armfüßer (Brachiopoden) und Foraminiferen lagern sich am Meeresgrund ab. Aus diesen Schalen entstehen kalkhaltige Sedimente, welche die Gestalt der Lithosphäre verändern. In diesen Sedimenten sind große Mengen von atmosphärischem CO₂ gebunden.

Methoden zur Messung des schwankenden CO₂-Gehalts im Laufe der Erdgeschichte.

Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wird seit Jahrzehnten kontinuierlich gemessen. Anhand der Messungen kann man den stetigen Anstieg dieses Treibhausgases in den letzten 50 Jahren von etwa 310 auf 370 ppm feststellen (s. Abb. 21). Dieser Effekt ist vor allem auf die Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe zurückzuführen.

Die CO₂-Gehalte der jüngeren Erdgeschichte lassen sich in Luftblasen von Eiskernen aus der Antarktis bestimmen. Diese Messungen gehen bis auf etwa 400.000 Jahre vor heute zurück und zeigen ebenfalls zyklische Schwankungen, die etwa zwischen 180 und 280 ppm liegen (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Hier wird der Einfluss des CO₂ auf das Klima des Quartärs deutlich. Phasen mit höheren CO₂-Gehalten finden wir in den so genannten Interglazialen, also immer dann, wenn sich die Eismassen auf der Nordhemisphäre zurückgezogen haben, während Phasen mit niedrigem CO₂-Gehalt mit Glazialen einhergehen.



Um die CO₂-Gehalte der Atmosphäre in der Erdgeschichte zu rekonstruieren, müssen sich Wissenschaftler/innen auf so genannte Proxydaten verlassen. Das sind Daten, die z. B. aus der geochemischen Zusammensetzung von Gesteinen oder Fossilien erlangt werden und indirekte Hinweise auf den jeweiligen CO₂-Gehalt der Atmosphäre geben. Die am häufigsten verwendeten Proxydaten sind Kohlenstoffisotopenverhältnisse. Kohlenstoff kommt mit 3 verschiedenen Isotopen vor, ¹²C, ¹³C und ¹⁴C. Das letzte Isotop ist radioaktiv, das heißt es zerfällt und zwar mit einer Halbwertszeit von 5.730 Jahren. Diesen Effekt nutzt man, um Fossilien zu datieren. Hiermit kann man aber keine Aussagen über den CO₂-Gehalt treffen. Die beiden anderen Isotope sind stabil, das heißt sie werden z. B. in die Kalkschalen von Organismen wie Foraminiferen oder Brachiopoden eingebaut. Man misst also das Verhältnis der beiden Isotope im Karbonat (CaCO₃) einer Schale oder Gestein. Bei der Fotosynthese wird bevorzugt das leichtere ¹²C in die organische Substanz eingebaut. Dies hat zur Folge, dass dem gesamten verfügbaren Kohlenstoff immer mehr leichtes ¹²C entzogen wird, je höher die Fotosyntheseaktivität auf der Erde ist. Im verbleibenden Kohlenstoff, der für die Bildung der Kalkschalen übrig bleibt, ist dementsprechend der Anteil an ¹³C höher, und das Verhältnis von ¹³C zu ¹²C in Kalkschalen nimmt zu. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass weniger die Fotosyntheseaktivität selber eine wichtige Rolle spielt, sondern die Menge von organischem Kohlenstoff, der in Sedimenten begraben wird (z. B. als Kohle). Dieser Kohlenstoff wird somit der Atmosphäre entzogen.

Mit diesen Daten werden Computermodelle zur Berechnung der CO₂-Gehalte in der Erdgeschichte betrieben.

Strahlungs- und Wasserhaushalt

Die Biosphäre beeinflusst nicht nur die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und die Intensität der Verwitterung, sondern auch die Menge der von der Erde absorbierten Sonnenenergie. Etwa 69 % der eingestrahnten Sonnenenergie werden absorbiert, 31 % strahlen als so genannte Albedo von der Erdoberfläche zurück (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Die Höhe der Rückstrahlung ist abhängig von der Beschaffenheit der Erdoberfläche. Eis und Schnee haben eine Albedo von 60 bis 90 %, Sand von etwa 35 % und Vegetation von nur 15 bis 25 %. Eine mit Pflanzen bedeckte Erdoberfläche strahlt somit deutlich weniger Sonnenenergie zurück als eine „nackte“ Oberfläche. Entfernung von Vegetation führt zu einer höheren Albedo und damit zu Abkühlung. Umgekehrt hat Ausbreitung von Vegetation in großem Maßstab eine Erwärmung der Erdoberfläche zur Folge.

Der Wasserhaushalt wird ebenfalls von der Vegetationsmenge beeinflusst. Es gilt die Faustregel: Je mehr Pflanzen, desto mehr Verdunstung. Als Folge der Verdunstung steigt die Luftfeuchtigkeit, und es gibt mehr lokale Niederschläge. Diese Zusammenhänge werden im tropischen Regenwald deutlich, wo es fast täglich regnet. Geht dagegen die Vegetation zurück, wird es zunehmend trockener, und die Niederschläge werden geringer, wie z. B. in der Sahelzone am Rand der südlichen Sahara zu beobachten ist (s. Abb. 22 und Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

Durch Verdunstung wird darüber hinaus Energie gebunden und transportiert, bei der Kondensation wird Energie freigesetzt. So haben jegliche Änderungen der Vegetation zur Folge, dass sich die Energiebilanz und der Energietransport auf der Erde ändern. Diese sich bis heute fortsetzenden Wechselwirkungen zwischen den Sphären bestehen seit Entstehung der Biosphäre.

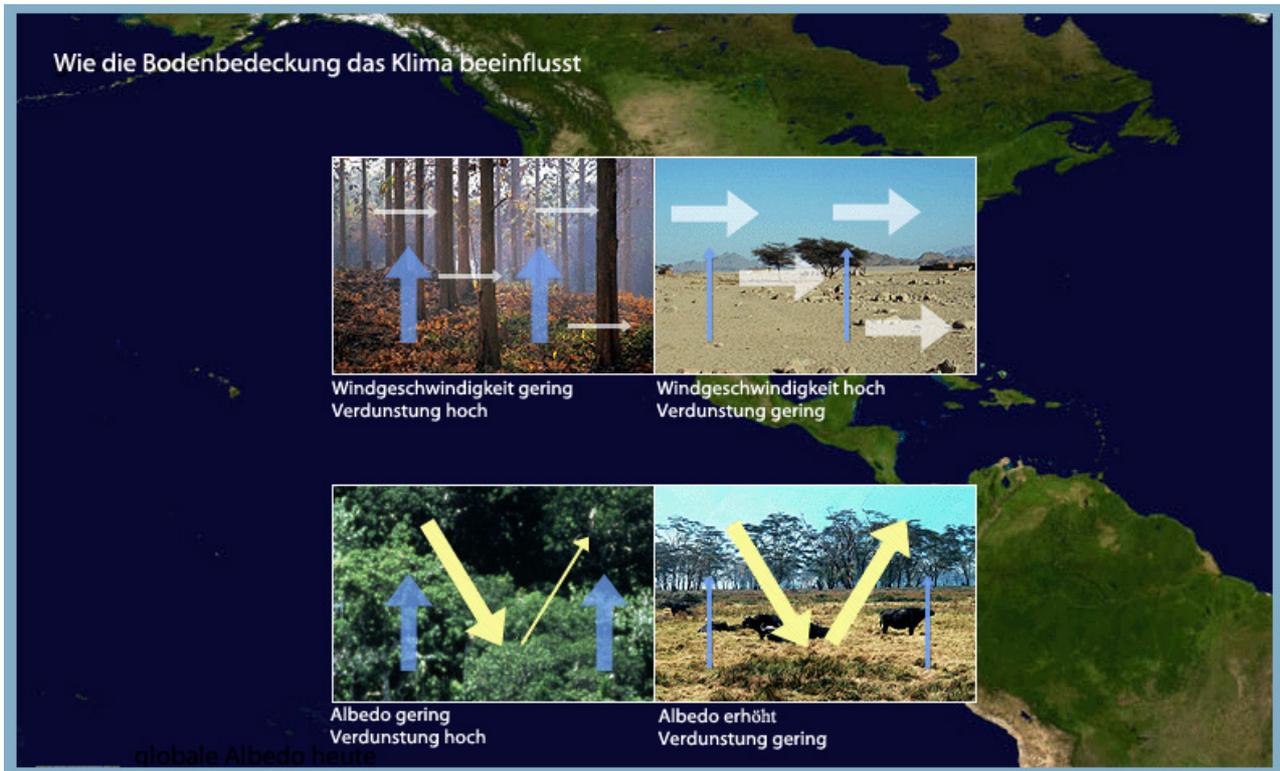


Abbildung 22: Die Art der Bodenbedeckung ist mitverantwortlich für den Anteil der reflektierten Sonneneinstrahlung - die Albedo, für die Windverhältnisse und den Wasseraustausch mit der Atmosphäre.

Weitere Wechselwirkungen

Mit der Besiedlung des Festlandes durch Pflanzen traten weitere Wechselwirkungen zwischen der Biosphäre und den anderen Sphären auf. Abgestorbenes Pflanzenmaterial kann entweder unter Luftabschluss verkohlen oder es wird von Mikroorganismen zersetzt. Bei der Zersetzung entstehen Humus und Böden. Landpflanzen stehen in Wechselwirkung mit dem darunter liegenden Gestein: Eine dichte Pflanzendecke schützt einerseits die Erdoberfläche vor direkter Sonneneinstrahlung, damit vor starker Erhitzung und verringert somit die physikalische Verwitterung der Gesteine. Andererseits tragen Wurzeln und die von ihnen ausgeschiedenen Substanzen zur chemischen Verwitterung der Gesteine bei. Als Folge der Verwitterung kommt es zur Erosion. Sie ist besonders stark, wenn die Hangneigung groß ist, die Niederschläge heftig fallen und die Bodenbedeckung durch Pflanzen gering ist. Mit zunehmender Erosion wird mehr Boden weggeschwemmt als sich neu bilden kann. Wird viel Boden mit den darin enthaltenen Nährsalzen fortgeschwemmt, wird wiederum das Pflanzenwachstum eingeschränkt (s. Modul „Gesteinskreislauf - Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“). Auf der anderen Seite geben die Wurzeln durch ihre verzweigte Struktur dem Boden Halt und wirken so der Erosion entgegen.

3 Didaktische Information

Die Vielfalt von Hypothesen erlaubt nicht, den Schüler/innen im naturwissenschaftlichen Kontext ein einheitliches Bild von der Entstehung des Lebens zu vermitteln. Darin liegt eine grundsätzliche Schwierigkeit für die didaktische Aufbereitung des Themas. Einerseits sollen die Schüler/innen erkennen, dass Leben aus einfachen Molekülen über die Synthese zu immer komplexer aufgebauten Molekülen entstanden ist. Andererseits



soll den Schüler/innen auch bewusst werden, dass die vorliegenden Aussagen nur hypothetischen Charakter haben.

Die Entwicklung der Biosphäre fand in bestimmten Teilen der Erde und in einem genauen Zeitrahmen statt. Dieses Beziehungsgefüge von Raum und Zeit bei der Evolution sollte den Schüler/innen möglichst anschaulich vermittelt werden. Neben Texten und Abbildungen sollten nach Möglichkeit auch echte Fossilien zur Verfügung stehen. Sie können als Reste von Lebewesen aus vergangenen Zeiten und „begreifbare“ Indizien für die Evolution die Inhalte veranschaulichen.

Eine erfolgsversprechende und stark motivierende Unterrichtsform ist die Exkursion. DODICK und ORION (2003) betonen, dass Feldarbeit ein Schlüssel zum Verständnis von Evolutionsvorgängen im Rahmen von Zeit und Raum sein kann. Die Schüler/innen sollten aktiv an der Vorbereitung beteiligt werden. Im Anschluss erfolgt die Aufarbeitung der Arbeitsaufträge in der Schule. Für Exkursionen bieten sich Orte mit erkennbaren unterschiedlichen Sedimentschichten an. In den Schichten sollten sich möglichst auch Fossilien und/oder auch deren Abdrücke befinden. Weitere Vorschläge speziell zur außerschulischen Arbeit in der „Grube Messel“ finden sich bei RABENSTEIN (2005) (Baustein 6, Material 3).

Die Schüler/innen sollen erkennen, dass Abläufe vor sehr langer Zeit häufig nur hypothetisch erfasst werden können. Dafür sind hier einige Gründe aufgeführt:

- Von den ersten Lebewesen liegen uns keine Reste in Form von Fossilien vor.
- Einige frühe Fossilien können nicht sicher einer Gruppe von Lebewesen zugeordnet werden, da es von diesen Lebewesen heute keine Vertreter mehr gibt.
- Die absolute Altersbestimmung ist oft mit Ungenauigkeiten behaftet.
- Bei sehr alten Ablagerungen von Kohlenstoff ist nicht immer eindeutig zu ermitteln, ob dieser Kohlenstoff biogenen oder abiogenen Ursprungs ist.

Außerhalb der naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise liegen die Anschauungen von "kreationistischer" Seite, die von einem oder mehreren Schöpfungsakten bei der Entstehung des Lebens ausgehen. Falls Schüler/innen sich dahingehend äußern, sollte darauf hingewiesen werden, dass ein Schöpfer mit naturwissenschaftlichen Methoden nicht verifiziert oder falsifiziert werden kann. Naturwissenschaft und Theologie arbeiten mit grundverschiedenen Erklärungssystemen. Es sollte auch darauf hingewiesen werden, dass aus theologischer Sicht die Aussagen der Evolutionstheorie und die verschiedenen Aussagen des Alten Testaments zur Schöpfung nicht im Widerspruch stehen; denn die Bibel macht anhand verschiedener Schöpfungsgeschichten Aussagen über das Wesen des Menschen und Gottes. Sie verfolgt nicht das Ziel, die Entwicklung der Welt naturwissenschaftlich zu erklären (BANGE 1989) Es bietet sich an, in fachübergreifendem oder fächerverbindendem Unterricht, z. B. mit den Fächern Religion oder Philosophie, das Thema „Schöpfung und Evolution“ zu behandeln. Als Literatur dazu seien JESSBERGER (1990), BANGE (1989) und Linder Biologie (BAYRHUBER & KULL 2005, S. 493 und 519) empfohlen.

3.1 Lernziele

Entstehung des Lebens Entwicklung des Lebens

Aktuelle Hypothesen zur Entstehung des Lebens sowie ein Überblick über die weitere Entwicklung der Biosphäre sollen erarbeitet werden. Die Schüler/innen sollen dabei ein Verständnis für die Methoden und Grenzen moderner Naturwissenschaft erfahren und einen Überblick über den Verlauf der Evolution von den An-



fängen bis heute erwerben, den sie in weiteren Unterrichtszusammenhängen anwenden und vertiefen können.

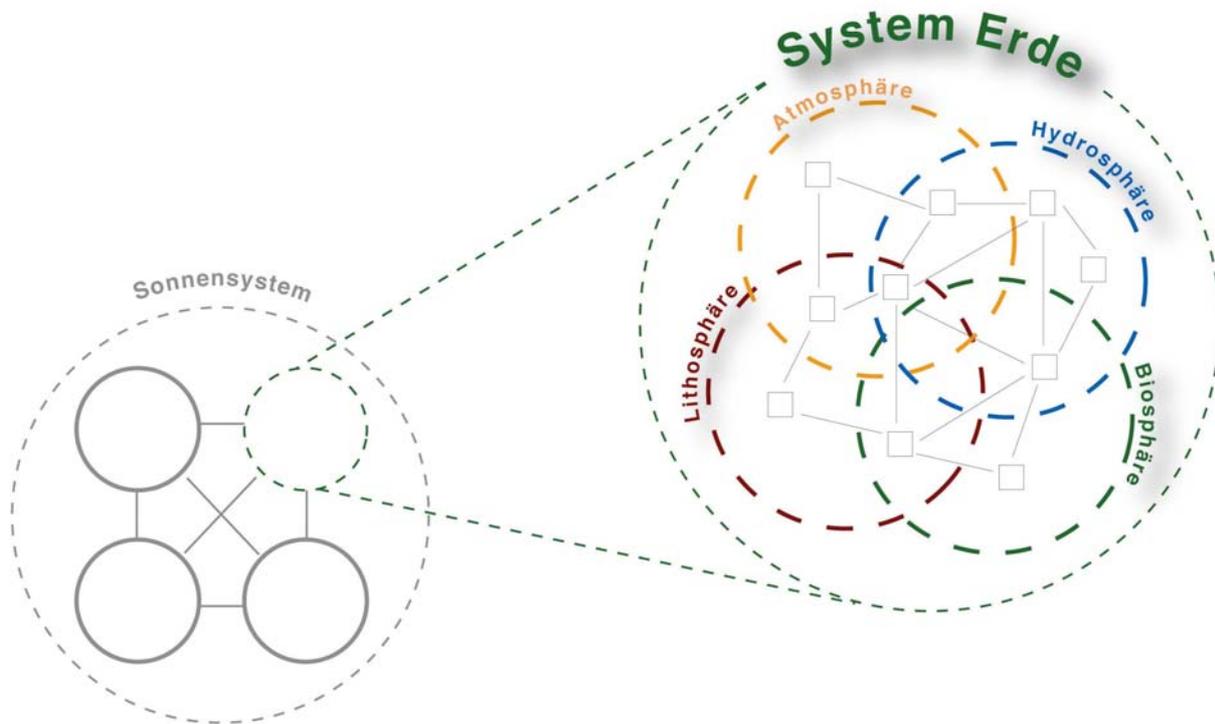


Abbildung 18: Das Modul Entstehung und Entwicklung des Lebens im Kontext System Erde. Die Biosphäre wird in diesem Modul schwerpunktmäßig behandelt.

Die Lernenden sollen erkennen, dass

- die Genese des Wissens über die Anwendung naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsmethoden erfolgt;
- sich aus Atomen und kleinen kohlenstoff-, stickstoff-, wasserstoff- und sauerstoffhaltigen Molekülen nach dem Erkalten der Erdoberfläche (Lithosphäre), nach der Bildung von Meeren (Hydrosphäre) und nach der Ausbildung einer Atmosphäre die Vorläufer von Biomolekülen gebildet haben;
- Energiezufuhr z. B. durch UV-Licht der Sonnenstrahlung, Blitze, Erdwärme (Vulkane), und Energie aus chemischen Reaktionen für die Synthese dieser Biomoleküle notwendig war;
- später auch Proteine und Nucleinsäuren entstanden sind;
- die entstandenen Proteine und Nucleinsäuren miteinander in Wechselwirkung traten und irgendwann zur Vervielfältigung (Replikation) fähig waren;
- die entstandenen präbiotischen Moleküle bereits der Selektion unterlagen;
- sich im Laufe der Zeit Zellmembranen bildeten, und so die urtümlichen Lebewesen vor äußeren Einwirkungen besser geschützt waren;
- die Entstehung des Lebens noch nicht endgültig erforscht ist und daher verschiedene Hypothesen nebeneinander stehen;



- die heute vorliegende Deutung über die „Entwicklung der Biosphäre“ ein Ergebnis der engen Zusammenarbeit zwischen Geo- und Biowissenschaftler/innen ist;
- nach Entstehung des Lebens vor ca. 3,8 Milliarden Jahren mehrere Hundert Millionen Jahre ausschließlich prokaryotische Lebewesen (Archaea, Bakterien) auf der Erde existiert haben;
- ursprüngliche Lebewesen einen Evolutionsprozess durchgemacht haben und sich über einen sehr langen Zeitraum zu den Lebensformen entwickelt haben, die wir heute vorfinden;
- Veränderungen der Erdoberfläche und daraus resultierende Klimaveränderungen Einfluss auf die Evolution der Lebewesen hatten;
- die Entwicklung der Biosphäre zunächst nur im (Meer-) Wasser stattgefunden hat;
- die Evolution der Lebewesen zuerst verhältnismäßig langsam verlief;
- nach der Endosymbiontentheorie aus kernlosen Prokaryoten die kernhaltigen Eukaryoten mit Mitochondrien (Tierzelle, Pilzzelle) bzw. mit Mitochondrien und Chloroplasten (Pflanzenzelle) entstanden sind;
- erst nach Anreicherung von Sauerstoff, als Folge der Fotosynthese, die Eukaryoten entstanden sind;
- gegen Ende des Proterozoikums sich Lebewesen mit Hartteilen (Skelett) entwickelt haben, deren Reste heute als Fossilien gefunden werden;
- Fossilien Reste von Lebewesen aus vergangenen Zeiten sind und vorwiegend Hartteile der Fossilisation unterliegen;
- Fossilien in tieferen Schichten älter sind als solche in darüber liegenden Schichten;
- nach den von STENO und nachfolgenden Geowissenschaftler/innen beschriebenen Prinzipien des „Aktualismus“ und „Uniformismus“ sich die unterschiedlichen Erdschichten als zeitlich kontinuierliche Ablagerung von Sedimenten deuten lassen;
- anhand der Verteilung von Fossilien sich Rückschlüsse auf das Klima in vergangenen geologischen Epochen ziehen lassen;
- vor etwa 400 Millionen Jahren Pflanzen und etwa 50 Millionen Jahre später auch Tiere das Festland vom Wasser aus besiedelt und sich dort entfaltet haben;
- bestimmte morphologische und physiologische Anpassungen bei Pflanzen und Tieren vorliegen müssen, damit sie vom Wasser zum Landleben wechseln können;
- es am Ende fast jeden Erdzeitalters einschneidende Veränderungen von abiotischen Faktoren gegeben hat, die zu Aussterbeereignissen geführt haben;
- nach großen Aussterbeereignissen am Ende geologischer Perioden jeweils adaptive Radiationen stattgefunden haben, in der die neue Gruppen von Pflanzen und Tieren entstanden sind;
- die Erdgeschichte in verschiedene Epochen eingeteilt wird, die jeweils bestimmte Lebewesen enthielten, und dass eine erdgeschichtliche Epoche häufig nach einem Massenaussterben oder auch einer Klimaveränderung beginnt;
- Geowissenschaftler/innen sich bei der Einteilung der Erdgeschichte in Epochen nach Leitfossilien in den Sedimenten richten;



- es von Anfang an Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre einerseits und Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre andererseits gegeben hat und auch heute noch gibt;
- ein feuchtwarmes Klima und ein relativ hoher Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre Voraussetzungen für die Entstehung von Kohle sind;
- es von bestimmten Tiergruppen in der Grube Messel Fossilien gibt;
- aus vorgegebenen Daten eine geologische Zeittafel erstellt werden kann.

3.2 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen

Geowissenschaftliche Kenntnisse werden nicht vorausgesetzt.

Chemische Grundkenntnisse sind von Vorteil. Falls die Schüler/innen kein solches Vorwissen haben, können bei Bedarf z. B. die Formeln der Gase der Uratmosphäre und deren Reaktionen mitgeteilt werden.

Biologische Grundkenntnisse über Struktur und Funktionen der Grundbausteine des Lebens (v. a. Aminosäuren, Proteine und Nukleinsäuren) sind für die Bearbeitung der Entstehung des Lebens (Bausteine 2 und 3) notwendig. Sie sollten gegebenenfalls aufgefrischt werden.

Die Schüler/innen sollten in der Lage sein, selbstständig Literaturrecherchen und Textexzerptionen (Markierung von Schlüsselwörtern, Gliederungen erstellen, etc.) zumindest unter Einhilfen durchzuführen.

Es wird empfohlen, dieses Modul erst nach Erarbeitung der Einführungseinheit einzusetzen. Die Grundlagen für das Verständnis von Kreisläufen und deren Darstellung werden dort gelegt und können in der Arbeit mit diesem Modul gefestigt und vertieft werden. Günstig ist es weiterhin, wenn die Schüler/innen mit der Arbeitsmethode des „Gruppenpuzzles“ vertraut sind.

3.3 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen

Es erscheint im Sinne eines chronologisch und inhaltlich aufbauenden Unterrichtsganges günstig, sich zunächst mit der „Entstehung des Lebens“ und anschließend mit der „Entwicklung der Biosphäre“ zu befassen.

Bei der Erarbeitung der Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre empfiehlt es sich, das Modul „Kohlenstoffkreislauf“ vergleichend heranzuziehen und eventuell einige Teile daraus in den Unterricht einfließen zu lassen. Der Kohlenstoffkreislauf wird durch dieses Modul um eine zeitliche Komponente ergänzt.

Das vorliegende Modul bietet zudem eine gute Grundlage, um das aktuelle Klimageschehen (Modul „Klimasystem und Klimageschichte“) in den Kontext seiner Entstehungsgeschichte einzuordnen. Direkte Anknüpfungspunkte ergeben sich auch an die Module „Plattentektonik und Vulkanismus“ und „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“.

Eine im Zusammenhang mit diesem Modul erstellte Erdzeitaltertafel (s. Abb. 2) kann im weiteren Unterricht zum Thema Evolution als Übersicht der Zeitabläufe verwendet werden.

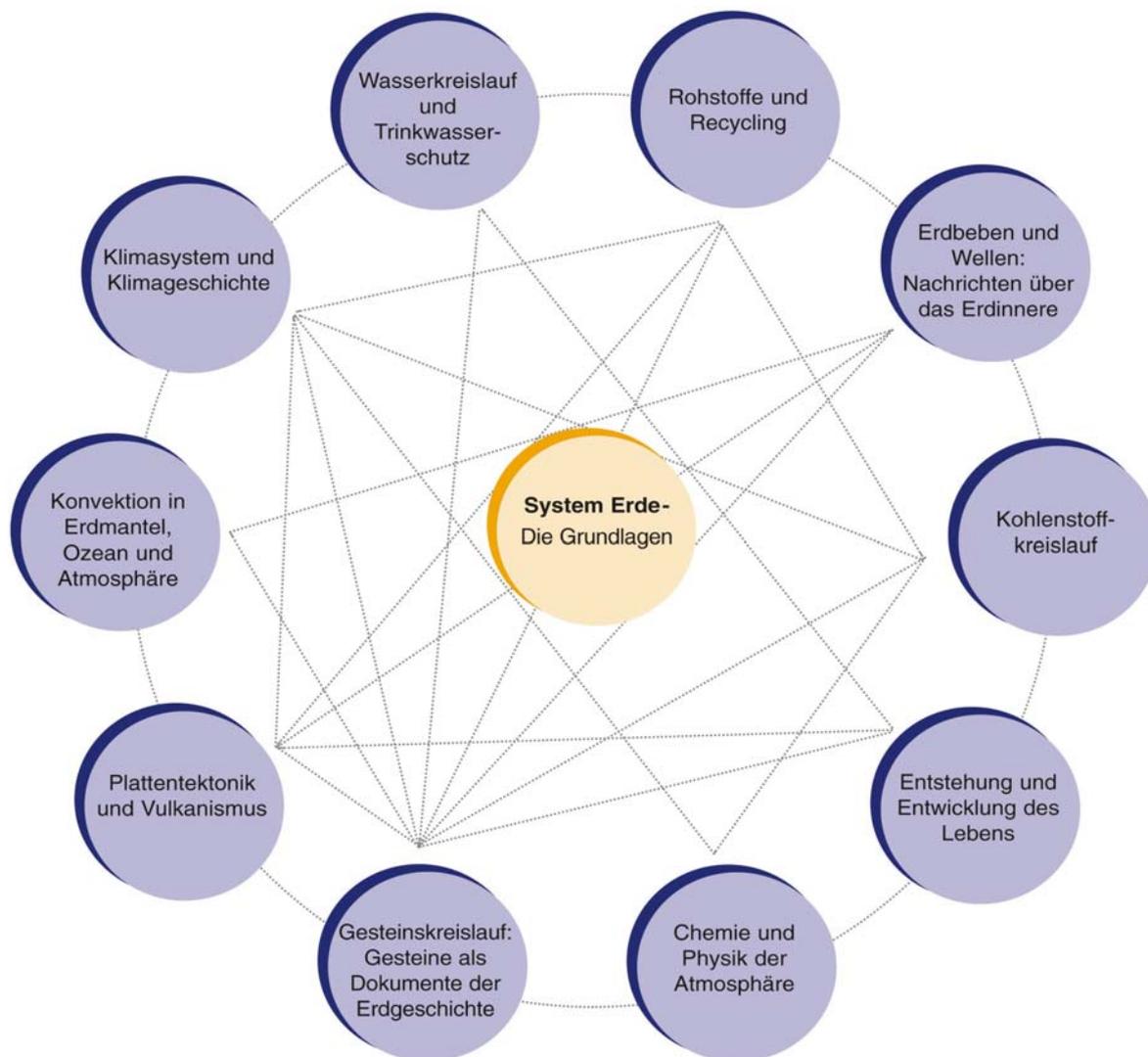


Abbildung 21: Modulübersicht des Projektes "Forschungsdialog System Erde". Die Verbindungslinien weisen auf inhaltliche Verknüpfungen von Modulen hin. Die Sachanalysen der Module sind auf der CD-ROM "System Erde" in Form von Hypertexten miteinander vernetzt, um die Beziehungen der Fachinhalte für den Biologie-, Chemie-, Geographie- und Physikunterricht im geowissenschaftlichen Kontext zu verdeutlichen.

3.4 Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien

Die Materialien sind sieben Bausteinen zugeordnet, die im Folgenden kurz erläutert werden. Weiterführende Informationen für Lehrkräfte liefert jeweils das Material 1 der Bausteine.

Baustein 1 ist geeignet, grundlegende naturwissenschaftliche Arbeitsweisen (Beobachtung/ Fragestellung, Hypothesenbildung, Experiment, Überprüfung der Hypothese, Ableitung einer Theorie) zu verdeutlichen. Inhaltlich leitet die Feststellung, dass PASTEUR die Urzeugung widerlegte, mit der Frage, wie denn dann Leben entstanden sein könnte, zum 2. Baustein über.



Baustein 2 enthält das Simulationsexperiment nach MILLER, in dem die Bedingungen der geologisch frühen Erde simuliert wurden, unter denen die Entstehung von Leben in der „Ursuppe“ möglich war. Anhand eines Arbeitsbogens kann MILLERS berühmtes „Simulationsexperiment zur Entstehung präbiotischer Moleküle unter den Bedingungen der frühen Erde“ theoretisch erarbeitet werden. Ein für schulisches Arbeiten weiterentwickelter Versuch in Anlehnung an das Experiment von MILLER bietet die Möglichkeit praktischen experimentellen Arbeitens (Schüler- oder Lehrerdemonstrationsexperiment).

Baustein 3 enthält Texte zu verschiedenen aktuellen Hypothesen zur Entwicklung des Lebens auf der frühen Erde. Methodisch ist hier die Möglichkeit zu arbeitsgleicher oder arbeitsteiliger Gruppenarbeit gegeben. Alternativ kann das Material auch als Gruppenpuzzle eingesetzt werden. Teilweise Redundanz besteht in Hypothese 1, welche die Theorie zur Entstehung des Lebens in der „Ursuppe“ in erweiterter Form behandelt. Dies ist im Sinn eines aufbauenden und vertiefenden Curriculums erwünscht und bietet die Möglichkeit zur Binnendifferenzierung, indem leistungsschwächere Schüler/innen diese Hypothese erneut bearbeiten können. Inhaltlich wird durch das Material die Hypothese der Lebensentstehung in der „Ursuppe“ durch alternative/ ergänzende Hypothesen erweitert. Gleichzeitig kann anhand des Materials verdeutlicht werden, dass Naturwissenschaft auf diesem Gebiet aufgrund nicht reproduzierbarer Bedingungen auf der frühen Erde durchaus an ihre Grenzen stößt und auf Hypothesenbildung beschränkt bleibt.

Baustein 4 stellt den Ablauf der Entwicklung der Biosphäre vom Archaikum bis heute dar. Die Texte sind so aufbereitet, dass mit ihnen methodische Kompetenzen anhand der Arbeitsform des Gruppenpuzzles (s. FREY-EILING und FREY) eingeübt und vertieft werden können. Alternativ ist arbeitsteilige Gruppenarbeit denkbar. Weiterhin können durch die vertiefenden Aufgaben methodische Kompetenzen im Bereich eigenständiger Recherche und über die Erstellung eines Posters/ einer Präsentation zu den Erdzeitaltern Informationsbeschaffungs- und Darstellungstechniken eingeübt werden. Durch Aufgaben zu Wechselbeziehungen zwischen den Sphären (concept maps) besteht zudem die Möglichkeit zur Manifestierung des in der Einführungseinheit gewonnenen Wissens zum Systemkonzept.

Baustein 5 vertieft anhand zweier Arbeitsbögen exemplarisch die erdgeschichtliche Periode des Karbons. Inhaltliche Schwerpunkte sind die Entstehung von Steinkohle und die Wechselbeziehungen zwischen den Sphären im Karbon. Im Material ist eine Übung zur grafischen Darstellung von Systemen mittels Wirkungsdiagramm angelegt. Die Arbeitsbögen enthalten inhaltliche Überschneidungen. Sie können je nach inhaltlicher Präferenz alternativ verwendet werden.

Baustein 6 behandelt die Entstehung der Grube Messel und die wissenschaftliche Bedeutung von Fossilien anhand des Beispiels der Grube Messel.

Die Bausteine 5 und 6 können zur weiteren Vertiefung eingesetzt werden. Denkbar ist auch eine Binnendifferenzierung, indem schnellere Arbeitsgruppen Zusatzmaterial erhalten können.

Am Ende des Unterrichts können noch offene Fragen gesammelt und zu Leitfäden für ein Experteninterview zusammengestellt werden (s. Modul 3, Baustein 7, Material 1).

Eine Übersicht der Arbeitsformen in den Bausteinen des Moduls „Entstehung und Entwicklung des Lebens“ gibt Tabelle 1 wieder.


Tabelle 1: Arbeitsformen des Moduls Entstehung und Entwicklung des Lebens.

Arbeitsformen	Baustein					
	1	2	3	4	5	6
Mind Mapping						
Concept Mapping						
Systemanalyse durchführen						
Stoffflussdiagramm entwickeln						
Wirkungsdiagramm entwickeln					•	
beschreibendes Beobachten	•	•				
kriterienbezogenes Vergleichen			•			
Demonstrationsexperiment		•				
Schülerexperiment		•				
Recherche/ Informationsbeschaffung				•		
Texte erfassen und bearbeiten	•	•	•	•	•	•
Interviews mit Expert/innen						
an Exkursionen teilnehmen						•
Gruppenarbeit	•	•	•	•	•	•
Stationsarbeit						
Gruppenpuzzle (Expertensystem)			•	•		
Projektarbeit						
Filme/ Animationen ansehen						
Computerinteraktionen bearbeiten						
Modellsimulationen bearbeiten						
Internet nutzen				•		
Texte verfassen				•		
Referate halten				•		
Poster erstellen				•		
Tabelle, Diagramm, Grafik etc. aus Daten erstellen bzw. interpretieren	•					
bewerten		•	•			

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

In Abhängigkeit von der Struktur des geplanten Unterrichtsganges sind sowohl die Bearbeitung einzelner Bausteine als auch eine ausführliche Unterrichtseinheit über "Entstehung und Entwicklung des Lebens" möglich. Der folgende Vorschlag bezieht sich auf eine vollständige Bearbeitung.

Entstehung des Lebens

- Baustein 1 als Einstieg in die Thematik (ca. 45 Minuten).
- Baustein 2 zur theoretischen und experimentellen Veranschaulichung der Entstehung präbiotischer Moleküle sowie zur Verdeutlichung der Funktion von Modellexperimenten (ca. 3 Unterrichtsstunden).

⇒ Alternativ nur theoretische Erarbeitung des Experiments (ca. 45 Minuten).



- Baustein 3 als Erweiterung zu Baustein 2 und zur Verdeutlichung des hypothetischen Charakters von Modellexperimenten / Theorien zur Entstehung des Lebens (ca. 90 Minuten).

Entwicklung des Lebens

Folgende Einstiege in das Submodul sind denkbar:

- a) Kurze Darstellung der Beobachtungen von CUVIER im Steinbruch im Pariser Becken. Impuls: „In den übereinander liegenden Steinschichten fand CUVIER Fossilien unterschiedlicher Tiere. Schichten mit Landtieren wechselten ab mit Schichten, die Fossilien von Meerestieren enthielten. – Deutung?“
 - b) Exkursion in ein Gelände mit Fossilien.
- Baustein 4 zur Erarbeitung der Geschichte der Biosphäre sowie zur Erweiterung der methodischen Kompetenzen (Gruppenpuzzle) (ca. 6 -10 Unterrichtsstunden).
 - Baustein 5 zur Festigung und Vertiefung des Gelernten anhand der Steinkohleentwicklung und von Kreislaufbeziehungen zwischen den Sphären sowie zur Erweiterung methodischer Kompetenzen (Darstellung von Systemen) (ca. 1 - 2 Unterrichtsstunden).
 - Baustein 6 verdeutlicht exemplarisch die Bedeutung von Fossilien für die Naturwissenschaften (ca. 1 Unterrichtsstunde). Er kann auch als Exkursionsvorbereitung genutzt werden.

5 Literatur

ARRHENIUS, S. (1908): Das Werden der Welten. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig

BANGE, W. (1989): Schöpfung oder Evolution: Ein unzeitgemäßer Konflikt. PdN-Biologie, 8/38, S. 37-43

BAYRHUBER, H. und KULL, U. (Hrsg.) (2005): LINDER Biologie. Schroedel, Hannover

BLAKE, F. und JENNISKENS, P. (2001): Kosmisches Eis - Wiege des Lebens? In: Spektrum der Wissenschaft, Okt. 2001, S. 28-34

BROCK, T. D. (1999): Milestones in Microbiology, 1546 – 1940. ASM Press, Washington

DE DUVE, C. (1994): Ursprung des Lebens. Präbiotische Evolution und die Entstehung der Zelle. Spektrum, Heidelberg

DODICK, J. T. und ORION, N. (2003): Intruding evolution to non-biology majors via the fossil record. A case study from the Israel High school system. The American Biology Teacher, Vol. 65, No. 3 (March 2003), 185 -190

EIGEN, M. (1987): Stufen zum Leben - Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie. Piper, München

FREY, K. und FREY-EILING, A. (2005): Das Gruppenpuzzle, In: BAYRHUBER, H. und HLAWATSCH, S. (Hrsg.): System Erde, CD-ROM für die Sekundarstufe II, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), Kiel.

GREBER, E. und GREBER, W. (1996): Phänomen Leben. In: Unterricht Biologie Heft 211, S. 4-13

HARMS, F. J. (2002): Steine erzählen Geschichte. Ursache für die Entstehung des Messel-Sees. Natur u. Museum, 132 (1), 1-4

HAZEN, R. M. (2001): Lebensursprung - Der steinige Weg zum Leben. In: Spektrum der Wissenschaft, Juni 2001, S. 34-41



- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change (HOUGHTON, J. T. et al., eds), Cambridge and New York 2001
- JESSBERGER, R. (1990): Kreationismus - Kritik des modernen Antievolutionismus. Parey, Berlin
- JUNKER, R. und SCHERER, S.(2001): Evolution. Ein kritisches Lehrbuch. Weyel, Gießen
- KAPLAN, R. (1972): Der Ursprung des Lebens. Thieme, Stuttgart
- KEHSE, U. (2004): Als das Leben die Vielfalt erfand. Bild der Wissenschaft 9, 2004, S. 41 – 48
- KISSEL, J. und KRUEGER, F. R. (2000): Urzeugung aus Kometenstaub? In: Spektrum der Wissenschaft, Mai 2000, S. 64-71
- KÖNIG, U. (1999): Biologie im Weltraum. In: Unterricht Biologie, Heft 241, S. 4-13
- KUGA, Y., KYURAGI, R., NISHIHARA, M. und SONE, N. (1998): Did archeal and bacterial cells arise independently from noncellular precursors? A hypothesis stating that the advent of membrane phospholipid with enantiomeric glycerophosphate backbones caused the separation of the two lines of decent. J. Mol. Evol. 46, S. 54-63
- LIPKOW, E. und SIEMER, F. (2004): Vorstufen des Lebens – Theorien zur Entstehung der Biosphäre. Die Bedeutung der Gesteine und Mineralien, in: PdN 3/53, S. 33 – 35.
- MADIGAN, M. J., MARTINKO, M. und PARKER, J. (2001): Brock Mikrobiologie. Spektrum, Heidelberg
- MARTIN, W. und RUSSEL, M.J. (2003): On the origin of cells as hypothesis for the evolutionary transition from abiotic geochemistry to the chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. Phil. Trans. R.Soc. Lond. B 358, S. 59-85
- MILLER, S. L. (1953): A production of amino acids under possible primitive earth conditions. In: Science 117, S. 528-529
- MOSBRUGGER, V. (2002): Die Biosphäre als prägende Kraft. attempto, Forum der Universität Tübingen, Oktober 2002, 5-7
- OPARIN, A. I. (1963): Das Leben, seine Natur, Herkunft und Entwicklung. VEB Fischer, Jena
- OSCHMANN, W., DULLO, C., MOSBRUGGER, V. und STEININGER, F. (2000): Evolution des Systems Erde. Geobiologische und paläobiologische Prozesse als Antrieb. Kleine Senckenberg-Reihe, Nr. 35, Frankfurt, S. 1-57
- RABENSTEIN, R. (2005): Fossilien aus dem „Weltnaturerbe Grube Messel“ im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: BAYRHUBER, H. und HLAWATSCH, S. (Hrsg.): CD-Rom für die Sekundarstufe II des Projektes „Forschungsdiallog System Erde“, Leibniz Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), Kiel
- SCHAAL, S. und ZIEGLER, W. (1988): Messel – Ein Schaufenster in die Geschichte der Erde und des Lebens. Kramer, Frankfurt
- SIMPSON, S. (2004): Wie alt sind die ersten Lebensspuren?. Spektrum Wissenschaft, Apr. 2004, S.70 – 77
- STANLEY, S. M. (2001): Historische Geologie. Spektrum, Heidelberg
- STANLEY, S. M. (1998): Wendemarken des Lebens – Eine Zeitreise durch die Krisen der Evolution. Spektrum, Heidelberg



STETTER, K. O. (1993): Manche mögen's heiß. Mikrobielles Leben an der obersten Temperaturgrenze. Blick in die Wissenschaft. Forschungsmagazin der Universität Regensburg, Nr. 3, S. 14 - 27

STORCH, G. (2004): Die Grube Messel. *BiuZ.* 34, (2004) S. 38 - 45

TRINKS, H., SCHRÖDER, W. und BIERBRICHER, C. K. (2003): Eis und die Entstehung des Lebens (ice and the origin of life). Shaker Verlag, Aachen,

online-Publikation: http://www.et1.tu-harburg.de/de_DE/de_pht_publicationen.php (ISBN 3832214933) (letzter Abruf 15.07.2005)

VAN ANDEL, H. (1994): *New Views on an Old Planet.* University Press, Cambridge

WÄCHTERSCHÄUSER, G. (1988): Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism. In: *Microbiological Reviews*, S. 452- 484

WINDLEY, B. F. (1995): *The Evolving Continents.* Wiley, Chichester

ZIEGLER, B (1972): *Einführung in die Paläobiologie.* Schweizerbart, Stuttgart



6 Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR



Material 1: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR (Information)



Material 2: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR (Folie)



Material 3: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR (Arbeitsbogen)

Baustein 2: Simulationsexperimente zur Entstehung präbiotischer Moleküle



Material 1: Simulationsexperimente zur Entstehung präbiotischer Moleküle (Information)



Material 2: Simulationsexperiment von MILLER zur Entstehung präbiotischer Moleküle (Folie)



Material 3: MILLERS Simulationsexperiment zur Entstehung präbiotischer Moleküle unter den Bedingungen der frühen Erde (Arbeitsbogen)



Material 4: Simulationsexperiment zur Herstellung von präbiotischen Molekülen (Arbeitsbogen)

Baustein 3: Hypothesen zur Entstehung von Leben



Material 1: Hypothesen zur Entstehung von Leben (Information)



Material 2: „Leben aus der ‚Ursuppe‘, aus der Gesteinswelt, aus dem Weltall, aus dem Eis?“ (Arbeitsbogen)



Material 3: Von organischen Molekülen zu ersten lebenden Zellen (Arbeitsbogen)

Baustein 4: Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre



Material 1: Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre (Information)



Material 2: Übersicht über die Erdzeitalter (Folie)



Material 3: Gruppenpuzzle: Entwicklung der Biosphäre (Arbeitsbogen)



Baustein 5: Kohlebildung und das Klima im Karbon



Material 1: Kohlebildung und das Klima im Karbon (Information)



Material 2: Entstehung von Steinkohle (Arbeitsbogen)



Material 3: Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre im Karbon (Arbeitsbogen)

Baustein 6: Die Grube Messel - eine Goldgrube für Paläontologen



Material 1: Die Grube Messel – eine Goldgrube für Paläontologen (Information)



Material 2: Die Grube Messel – eine Goldgrube für Paläontolog(inn)en (Arbeitsbogen)



Material 3: RENATE RABENSTEIN: Fossilien aus dem "Weltnaturerbe Grube Messel" im naturwissenschaftlichen Unterricht



Baustein 1: Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers: Louis PASTEUR

❶ Die Beobachtung Louis PASTEUR ´s

Das Problem der „Urzeugung“

Bis weit in die Neuzeit hinein nahmen Menschen an, dass z.B. Mäuse und Fliegenmaden spontan und immer wieder neu aus faulenden, verwesenden bzw. sich zersetzenden Stoffen, also aus unbelebter Materie, entstehen. Nach der Entdeckung der Bakterien wurde für diese Lebewesen die gleiche Vermutung angestellt. Für Mäuse und Fliegenmaden ist im 18. und 19. Jahrhundert durch entsprechende Isolationsversuche relativ einfach geklärt worden, dass Mäuse nur durch Geburt aus Mäusen entstehen, und dass sich Fliegenmaden im Fleisch nur aus vorher von Fliegen gelegten Eiern entwickeln.

Schwieriger war die Herkunft der mikroskopisch kleinen Bakterien und anderer Einzeller zu erklären. Die spontane Entstehung („**Urzeugung**“) von Bakterien auf organischem Substrat wie z.B. Fleisch zu widerlegen, gelang bis Mitte des 19. Jahrhunderts nicht. Die wenigen Zweifler an der Urzeugungstheorie erhielten keine eindeutigen Versuchsergebnisse, mit denen sie die Vertreter der herrschenden Meinung überzeugen konnten. Auch der französische Naturforscher Louis PASTEUR suchte 1861 nach experimentellen Beweisen, um die Idee der Urzeugung endgültig zu widerlegen.

PASTEUR ´s Beobachtung:

Verwesendes Fleisch enthält Bakterien, die auf frischem Fleisch nicht zu finden sind.

Frage:

Woher kommen die Bakterien?

Aufgaben:

- 1) Stellen Sie Hypothesen auf, woher die Bakterien kommen.
- 2) Entwickeln Sie Lösungsvorschläge (Experimente), mit denen die von Ihnen aufgestellten Hypothesen überprüft werden könnten.



2 Die Arbeitsweise von Louis PASTEUR

Nachdem die Streitfrage um eine „Urzeugung“ bis ins 19. Jahrhundert wissenschaftlich nicht gelöst werden konnte, schrieb die Französische Akademie der Wissenschaften einen Preis zur Lösung der Frage aus. Louis PASTEUR veröffentlichte 1861 seine Versuchsergebnisse zu diesem Problem. Er bewies, dass es keine Urzeugung geben kann und erhielt den Preis für seine brillante experimentelle Beweisführung.

Er vermutete, dass die Bakterien aus der Luft stammen und sich anschließend auf dem Fleisch oder in einer Nährlösung z.B. aus Fleischbrühe vermehren. Zunächst leitete er Luft durch ein Gewebe aus Baumwolle. Die feinen Poren im Baumwollgewebe lassen die gasförmige Luft hindurch, halten jedoch die kleinen festen Teilchen zurück, welche sich in der Luft befinden. PASTEUR legte anschließend die Baumwolle in eine Mischung aus Alkohol und Ether. Die Flüssigkeit dampfte er ein. Den übrig gebliebenen festen Rückstand untersuchte er unter einem Mikroskop. PASTEUR fand seine Vermutung bestätigt: Der Rückstand enthielt viele Bakterien. Sie glichen denen auf faulem Fleisch. Durch diese Untersuchung zeigte er, dass Luft Mikroben enthält, die identisch mit denen auf verwesendem Material sind.

Aus seinen Beobachtungen schloss PASTEUR, dass auch die Bakterien auf verwesendem Fleisch oder in verwesender Nährlösung von Bakterien aus der Luft herkommen. Er vermutete ferner, dass diese Bakterien sich auf allen Objekten befinden. Wenn diese Annahme zutrifft, dann lässt sich, so PASTEUR, eine allgemeine, weitergehende Aussage machen: Werden in einer Nährlösung alle Bakterien abgetötet, und werden danach Bakterien von dieser sterilisierten Nährlösung ferngehalten, dann sollte diese Nährlösung nicht verwesen.

Zum Abtöten von Bakterien muss eine Nährlösung einige Zeit bis zum Sieden erhitzt werden. Das taten auch schon Vorgänger PASTEURS. Die Befürworter der Urzeugung kritisierten jedoch das Erhitzen. Sie behaupteten, dass für eine Urzeugung frische Luft notwendig sei. Beim Erhitzen der Nährlösung, z.B. in einem geschlossenen Glaskolben, wird auch die über der Nährlösung befindliche Luft erhitzt. Dadurch werde die Luft so sehr beeinträchtigt, dass sie die Urzeugung nicht mehr unterstützen könne.

PASTEUR entging diesem Einwand durch ein einfaches aber elegantes Experiment. Er setzte auf einen Glaskolben ein Glasrohr auf, das wie ein Schwanenhals gekrümmt ist (vgl. Abb. 1b). Die Nährlösung im Glaskolben wird mehrere Minuten bis zum Sieden erhitzt. Dabei können Wasserdampf und die sich ausdehnende erwärmte Luft entweichen. Während des Abkühlens kann Luft wieder einströmen. Trotzdem verwest die Nährlösung anschließend nicht, auch nicht nach vielen Tagen. PASTEUR wiederholte den Versuch mehrmals unter gleichen Bedingungen und erhielt immer dasselbe Ergebnis. Wie ist das zu erklären?

PASTEUR vermutete, dass die in der Luft schwebenden festen Teilchen, an denen Bakterien oder andere Mikroben anhaften, sich an der Biegung des Glashalses abgesetzt haben. Bakterien können also nicht mit der Luft in den Kolben zur Nährlösung gelangen. Wenn Bakterien fehlen, kann der vorher sterilisierte Inhalt des Glaskolbens auch nicht verwesen.

PASTEUR führte einen zusätzlichen Versuch durch. Nach dem Abkühlen der Lösung wird der Glaskolben so weit gekippt, dass etwas Nährlösung in den gebogenen Glashals fließen kann. Der Kolben wird danach wieder aufgerichtet. Einige Zeit später wimmelt es in der Lösung von Bakterien.

PASTEUR führte diese Versuche in verschiedenen Teilen Frankreichs durch. Im Tiefland, im Mittelgebirge und im Hochgebirge, überall erhielt er entsprechende Ergebnisse: gelangt vorher sterilisierte und daher mikro-

benfreie Nährlösung in den gebogenen Glashals, verwirrt die Nährlösung. Im Hochgebirge dauert der Beginn der Verwesung allerdings etwas länger.

In einer anderen Versuchsreihe verwendete PASTEUR einen offenen Glaskolben ohne Schwanenhals. Nach dem Erhitzen und anschließenden Abkühlen der Nährlösung dauert es nicht lange, bis die Nährlösung verwirrt, also von Bakterien befallen ist.

Mit diesen einfachen aber genialen Experimenten hat PASTEUR die Wissenschaft bereichert:

- Verbesserung der Methode der Sterilisation.
- Beenden der Kontroverse über eine spontane Entstehung von Lebewesen („Urzeugung“).
- Durch seine Forschungen konnte die Theorie bestätigt werden, dass Lebewesen nur wieder aus Lebewesen entstehen können („omne vivum ex vivo“). Bis heute hat niemand diese Theorie widerlegen können. Sie hat den Status eines Naturgesetzes.

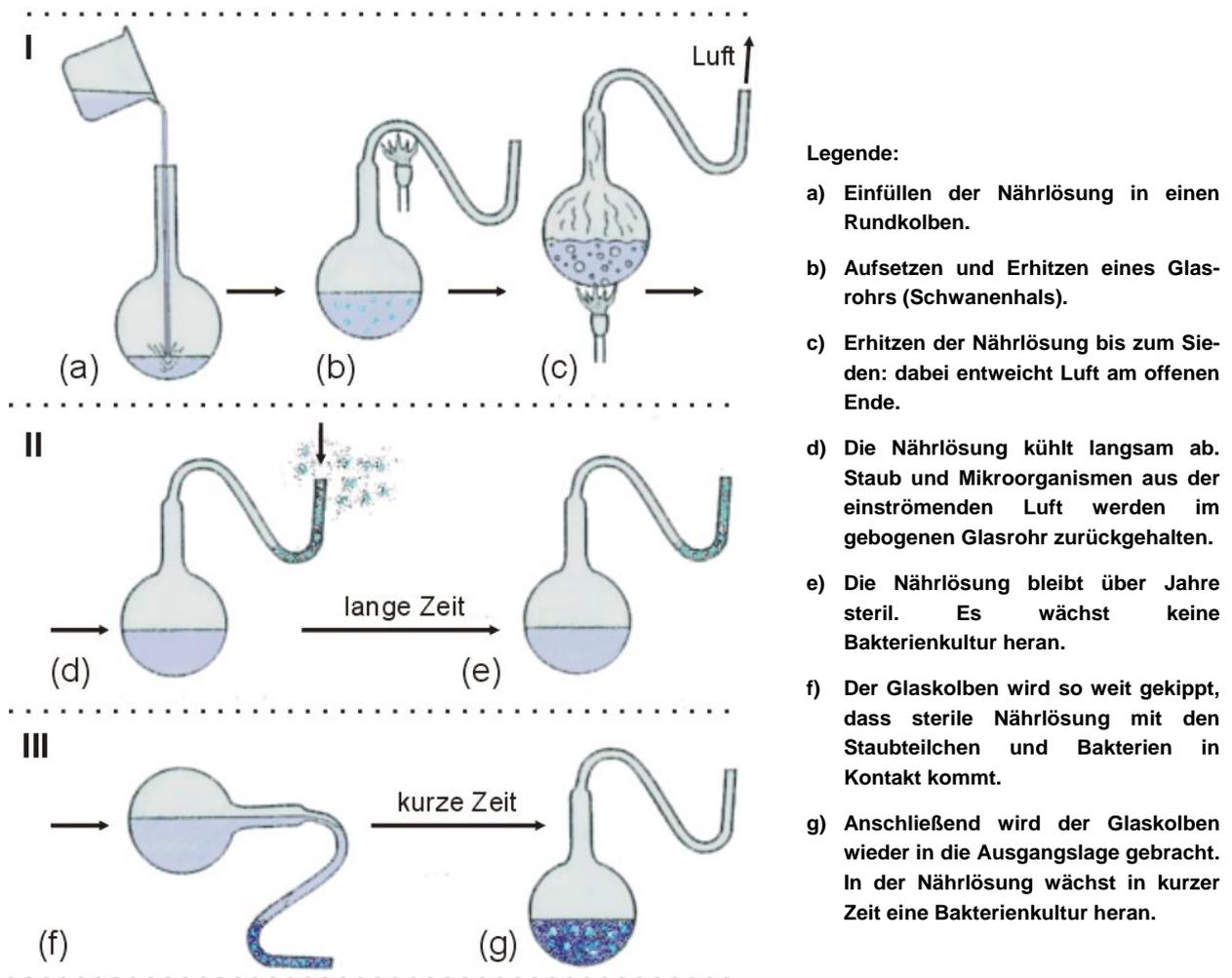


Abbildung 1: Versuche von PASTEUR: (nach MADIGAN 2001).



Aufgaben:

- 3) Beschreiben Sie anhand des Textes und der Abbildung 1 die von PASTEUR durchgeführten Versuchsschritte.
- 4) Erklären Sie, weshalb PASTEUR das gebogene Glasrohr (Schwanenhals) nach dem Einfüllen der Nährlösung in den Glaskolben erhitzt hat (Abb. 1b).
- 5) Deuten und vergleichen Sie die Versuchsergebnisse von II und III (s. Abb. 1).
- 6) Erklären Sie die Beobachtung von PASTEUR, dass es im Hochgebirge länger dauert, bis eine Nährlösung verwest.
- 7) Welche Kontrollexperimente hat Pasteur durchgeführt?



③ Arbeitsweise eines Naturwissenschaftlers

Am Anfang naturwissenschaftlicher Forschung steht eine Beobachtung, eine Frage, ein Problem oder auch eine Aussage anderer, die man bezweifelt.

Es werden eine oder mehrere Hypothese/n (Vermutung/en) aufgestellt. Dann überlegt man sich, wie die aufgestellte Hypothese überprüft werden könnte. Durch alleiniges Nachdenken ist das in der Regel nicht möglich. Naturwissenschaftler arbeiten mit Fakten und Daten wie z.B. Versuchsergebnissen oder auch Beobachtungsergebnissen.

Ein oder mehrere Experimente werden geplant. Hierbei gilt: je gründlicher die Planung, desto weniger Zeit und Aufwand benötigt die Durchführung. Neben den Experimenten müssen auch Kontrollexperimente durchgeführt werden. Beispiele für Kontrollexperimente: Man hat entdeckt, dass Stoff A mit Stoff B zusammen beim Erhitzen eine bestimmte Farbreaktion hervorrufen. In Kontrollexperimenten müssen Stoff A und Stoff B jeweils getrennt erhitzt werden. So wird überprüft, ob diese Farbreaktion nicht schon allein beim Erhitzen eines der beiden Stoffe auftritt.

Die Versuchsergebnisse dienen nun der Überprüfung der aufgestellten Hypothese. Es gibt zwei Möglichkeiten:

- a) Die Versuchsergebnisse entsprechen der Hypothese: die Hypothese ist *gestützt*.
- b) Die Versuchsergebnisse widersprechen der Hypothese: die Hypothese ist *falsifiziert*.

Falls b), werden weitere Experimente geplant oder die Hypothese wird verworfen und eine andere Hypothese aufgestellt.

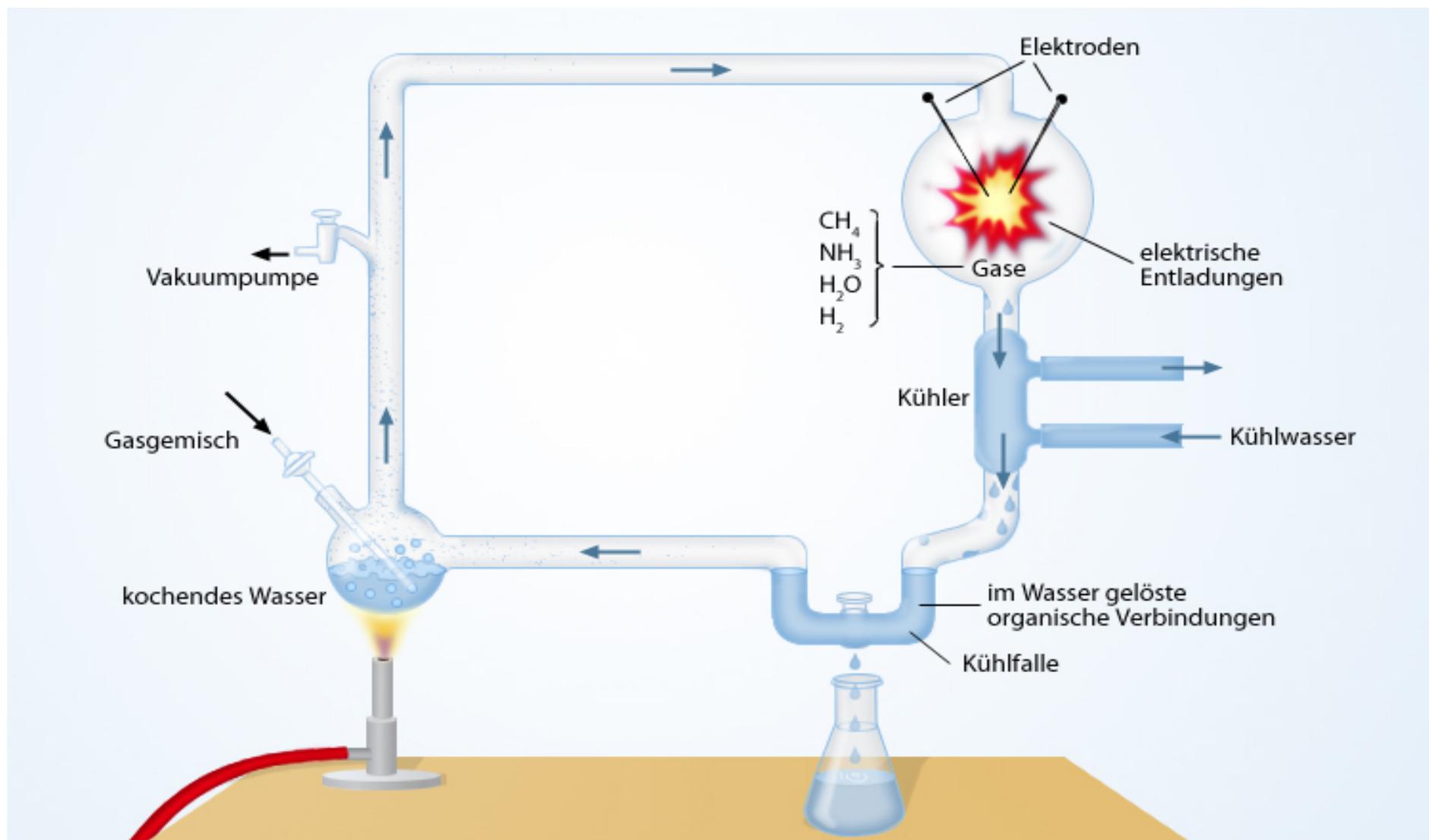
Falls a), ergeben sich häufig weitere Fragen. Erweiterte Hypothesen werden aufgestellt und ergänzende Experimente durchgeführt.

Bei genügend Versuchsergebnissen können die gestützten Hypothesen zu einer umfassenden Theorie verallgemeinert werden. Ein prominentes Beispiel für eine wissenschaftliche Theorie ist die „Evolutionstheorie“. Eine naturwissenschaftliche Theorie muss jederzeit von anderen Forschern überprüfbar sein. Die Experimente sollten daher so genau beschrieben sein, dass sie nachvollzogen werden können. Werden Fehler in der Theorie entdeckt, z. B. nach Durchführung neuer Versuche mit verfeinerten Messmethoden, muss die Theorie in der bisherigen Form verworfen werden. Sie kann bestenfalls durch eine genauere Theorie ersetzt werden.

Aufgaben:

- 8) Unterstreichen Sie im Text ③ die Schritte naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung.
- 9) Zeigen Sie an der Arbeitsweise von PASTEUR (Text ②), dass er mit typischen naturwissenschaftlichen Methoden gearbeitet hat.

Simulationsexperiment von MILLER (1953)



Baustein 2: Simulationsexperimente zur Entstehung präbiotischer Moleküle

MILLERS Simulationsexperiment zur Entstehung präbiotischer Moleküle unter den Bedingungen der frühen Erde ❶ Der weltberühmte Versuch von Stanley L. MILLER

Stanley L. MILLER

Wie viele andere Forscher ging auch der amerikanische Biochemiker Stanley L. MILLER davon aus, dass Leben im Wasser entstanden sei. Auf kohlenstoff-, wasserstoff-, stickstoff- und sauerstoffhaltige Moleküle in der Uratmosphäre sollen Blitze und energiereiche UV-Strahlung eingewirkt haben. Dabei sollen Vorläufer von Biomolekülen entstanden sein, die sich im Wasser der Urmeere gelöst haben. In Meeresbuchten sei besonders viel Wasser verdunstet. Als Folge davon sammelten sich die präbiotischen Moleküle im Meerwasser der Buchten als „Ursuppe“. Dort im Wasser sollen weitere Reaktionen erfolgt sein. Kleine Moleküle haben sich zu größeren Molekülen vereinigt. Aus diesen seien dann vermehrungsfähige Vorstufen von Lebewesen mit einer Membran als Hülle entstanden. Schließlich haben sich erste echte Lebewesen wie Bakterien entwickelt.

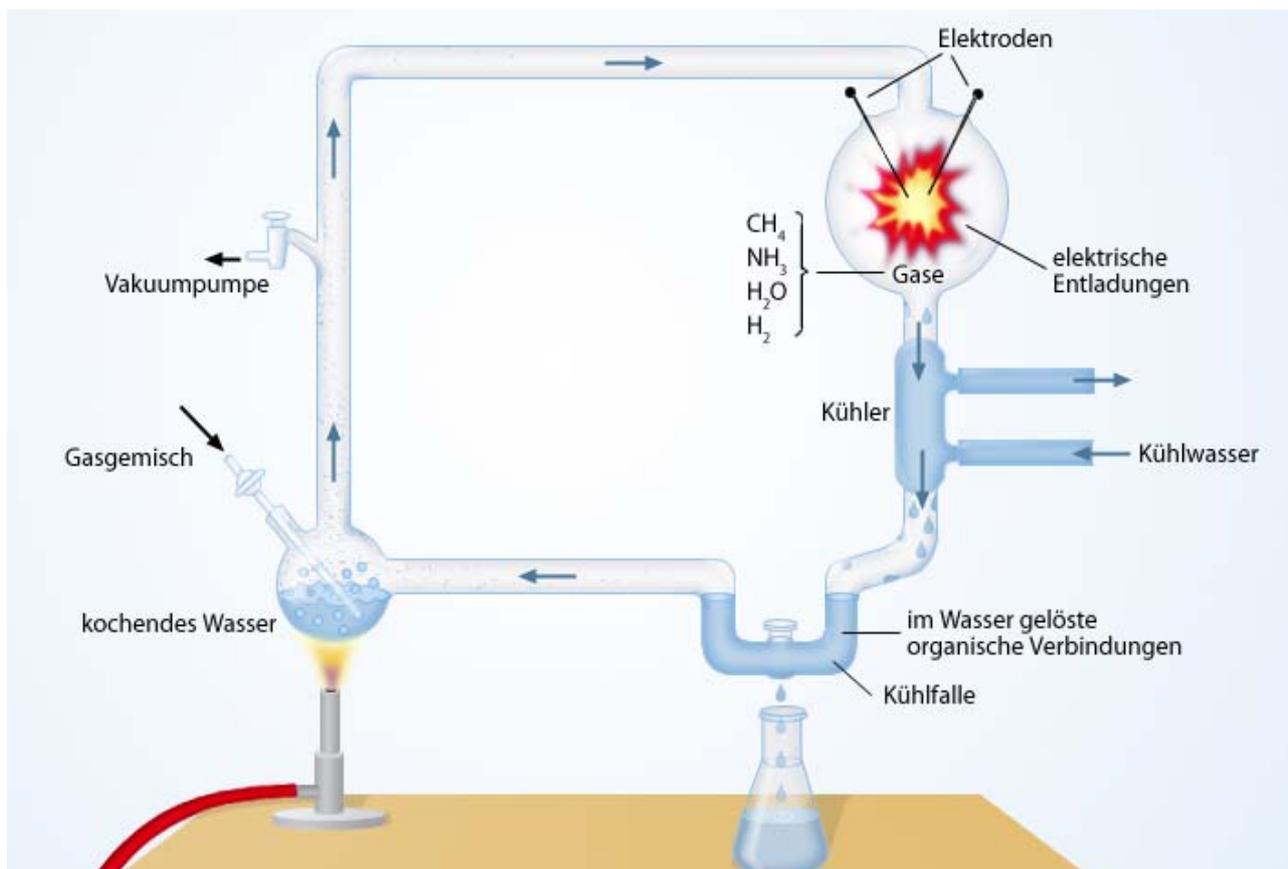


Abbildung 1: Versuchsaufbau des Experimentes von MILLER (1953)

MILLER versuchte in einem später weltberühmt gewordenen Versuch die Bedingungen in der „Ursuppe“ auf der frühen Erde nachzuahmen (s. Abb. 1). Er ließ seine Apparatur mehrere Tage lang laufen, bevor er Proben entnahm. Zum allgemeinen Erstaunen fand er in der Lösung organische Stoffe. Damit wies er nach, dass unter den Bedingungen der Uratmosphäre spontan organische Stoffe entstanden sein konnten. Noch



größeres Erstaunen rief die Tatsache hervor, dass unter diesen organischen Stoffen auch solche waren, die noch heute Bestandteile von Lebewesen sind: Lipide, Harnstoff, Kohlenwasserstoffe, Zucker, sowie die in DNA und RNA vorkommenden Stoffe Ribose, Desoxyribose, Purin- und Pyrimidinbasen. MILLERS Versuch wurde von vielen Wissenschaftler/innen wiederholt und abgewandelt. Die Ergebnisse blieben weitgehend gleich.

② Aufgaben:

- 1) MILLER ging davon aus, dass es in der Uratmosphäre bestimmte Gase gegeben hat. In seinem Simulationsexperiment ließ er auf derartige Gase elektrische Entladungen wirken. Nennen Sie die Namen und die Formeln dieser Gase.
- 2) Beschreiben Sie, durch welchen Prozess Wasser in den kugelförmigen Reaktionskolben (mit den Elektroden) gelangt. Welche Rolle spielt dabei die Vakuumpumpe?
- 3) Geben Sie an, in welchem Teil der Apparatur sich die entstehenden Aminosäuren sammeln.
- 4) Beschreiben Sie in kurzen Sätzen anhand der Abbildung den Versuchsablauf.
- 5) Erläutern Sie, inwieweit dieses Simulationsexperiment der Realität bei der Entstehung von präbiotischen Molekülen vor ca. 3,8 Milliarden Jahren nicht entspricht.
- 6) Definieren und erklären Sie in diesem Zusammenhang den Begriff „Simulationsexperiment“.
- 7) Welche Aussage erlaubt das Ergebnis von MILLERS Experiment über die Entstehung des Lebens auf der Erde?
- 8) Unter den Bedingungen der Uratmosphäre wäre Leben in der heutigen Form nicht möglich gewesen. Umgekehrt ist heute die abiotische Entstehung von Lebewesen auf der Erde nicht möglich. Begründen Sie diese Aussagen.



Baustein 2: Simulationsexperimente zur Entstehung präbiotischer Moleküle

Simulationsexperiment zur Herstellung von präbiotischen Molekülen

Ziel dieses Modellexperimentes ist es, selbst Moleküle herzustellen, die eine wesentliche Rolle bei der Entstehung des Lebens spielten.

❶ Materialien:

- Stativ mit Klammer und Muffe
- Weithals - Erlenmeyerkolben: z. B. 250 ml
- vierfach durchbohrter Gummistopfen
- Dichtungsmaterial: z. B. Parafilm
- 2 Elektroden: z. B. Stricknadeln aus Stahl
- 2 Elektrokabel
- 2 Krokodilklemmen
- 2 Glasrohre (gebogen)
- 2 Schlauchstücke (passend für die Glasrohre)
- Schlauchklemme
- Reagenzgläser
- Reagenzglashalter
- Reagenzglasständer
- Becherglas: z. B. 100 ml
- Pipette mit Pileusball
- Glycerin
- Hochspannungstransformator (ca. 25.000 Volt)
- wässrige Ammoniaklösung (Salmiakgeist): ca. 12 % (käufliche 25 %ige Salmiaklösung im Verhältnis 1 : 1 mit Wasser verdünnen)
- Kohlenstoffdioxid (aus der Gasflasche oder Siphon).
- Ninhydrin-Lösung (z. B. 0,25 g Ninhydrin in 100 ml Isopropanol (98 %) gelöst, im Kühlschrank begrenzt haltbar)
- Traubenzucker (Glucose)
- Fehlingsche Lösung
- Aminosäure (z. B. Glycin oder Alanin)
- Brenner



2 Vorbemerkungen:

- Vorsicht, in diesem Versuch wird mit Hochspannung gearbeitet! Keine elektrisch leitfähigen Teile wie Elektroden und Krokodilklemmen berühren, nachdem der Strom eingeschaltet worden ist!
- Führen Sie ein *Versuchsprotokoll*. Notieren Sie genau, was bei den von Ihnen durchgeführten Versuchen in den Reagenzgläsern geschieht. Sie brauchen Ihre Aufzeichnungen später für die Auswertung der Versuche.
- Ehe Sie den Hochspannungstrafo zum Versuchsbeginn anschalten, lassen Sie bitte die Lehrkraft die aufgebaute Apparatur überprüfen.
- Falls Sie Fragen oder Ideen zur Ergänzung der Versuche haben, teilen Sie diese Ihrer Lehrkraft mit. Bitte nicht auf eigene Faust experimentieren. Sie gefährden sonst sich und Ihre Mitschüler/innen.

3 Vorversuche:

- I. **Testen der Funktion der Elektroden und des Trafos:** Erfolgt in der Luft bei hoher Spannung ein Funkenflug zwischen den beiden Elektrodenspitzen? Diese sollen einen Abstand von mindestens 1 – 2 mm haben.

Beachten Sie: die Elektroden dürfen bei eingeschaltetem Trafo keinen Kontakt miteinander haben.

Nachweis von Aminosäuren: Einige Körnchen einer Aminosäure (z. B. Glycin oder Alanin) in ca. 1ml wässriger ammoniakalischer Lösung in einem Reagenzglas lösen. Eventuell den Lösungsvorgang durch Rühren beschleunigen. Zu der Lösung 2 Tropfen Ninhydrin-Lösung geben. Das Reagenzglas mit einem Reagenzglashalter fassen. Unter Schütteln des Reagenzglases die Lösung über schwacher Flamme einige Sekunden sieden lassen. **Achtung, Schutzbrille tragen!**

Bei zu geringem Schütteln kann die Flüssigkeit überkochen und herausspritzen. Daher die Öffnung des Reagenzglases vom eigenen Körper weg halten und auch nicht in Richtung anderer halten!

Welche Farbe tritt auf? Notieren Sie das Ergebnis im Protokoll.

- II. **Ammoniakalische Lösung und Ninhydrin:** Füllen Sie etwa 1ml ammoniakalische Lösung aus dem Erlenmeyerkolben in ein Reagenzglas. Geben Sie dazu 2 Tropfen Ninhydrin-Lösung. Unter Schütteln über schwacher Flamme mehrere Sekunden sieden lassen. **Achtung, Schutzbrille tragen!**

Notieren Sie die Farbveränderung.

Nachweis von Zucker: Einige Körnchen Traubenzucker (Glucose) in 1ml wässriger ammoniakalischer Lösung in einem Reagenzglas lösen. 1ml Fehlingsche Lösung dazu geben. Unter Schütteln bis zum Sieden erhitzen. **Achtung, Schutzbrille tragen!**

Notieren Sie die Farben vor und nach dem Erhitzen.

Ammoniakalische Lösung und Fehlingsche Lösung erhitzen: 1ml ammoniakalische Lösung und 1ml Fehlingsche Lösung zusammen in einem Reagenzglas unter Schütteln bis zum Sieden erhitzen.

Achtung, Schutzbrille tragen!

Notieren Sie Ihre Beobachtung.

4 Versuchsaufbau:

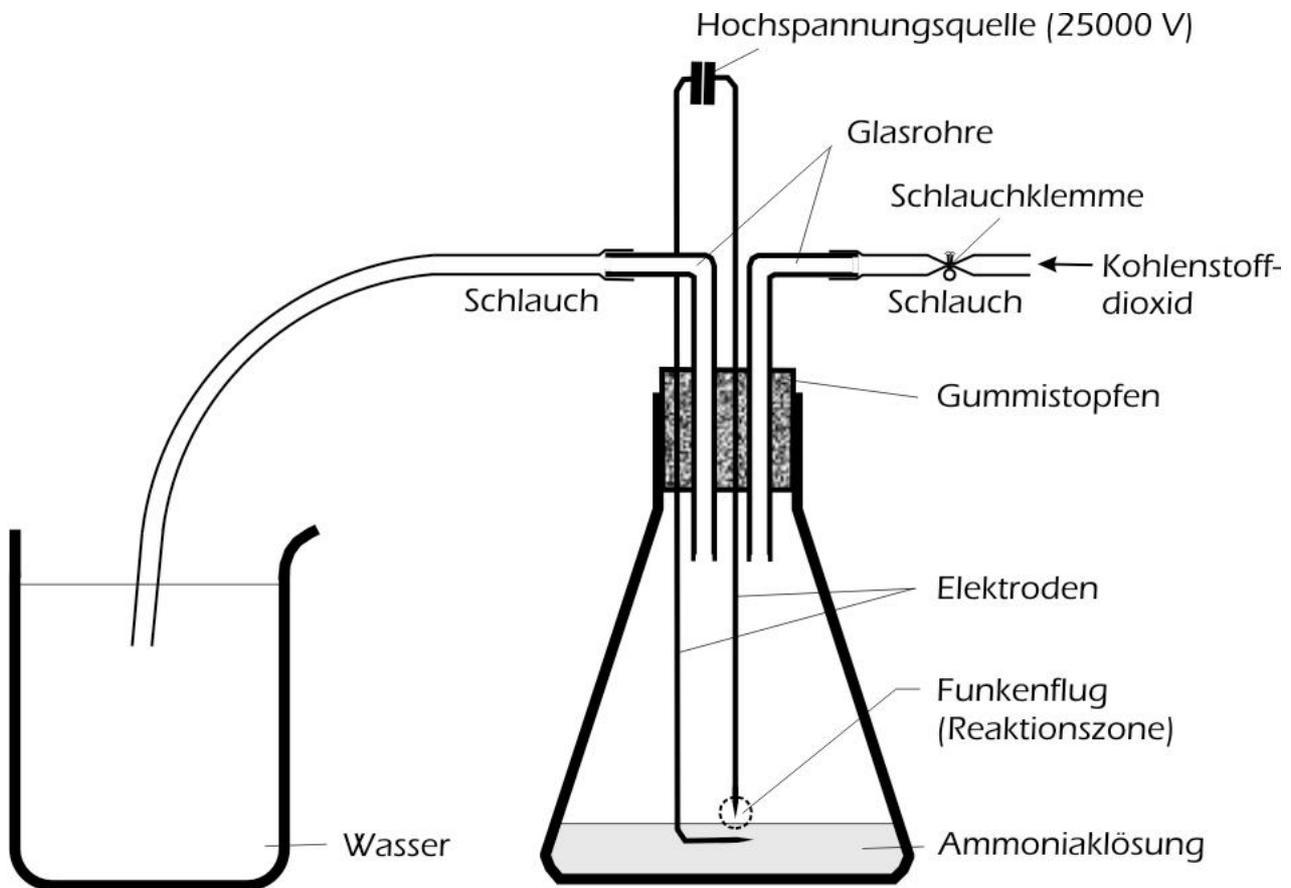


Abbildung 1: Apparatur zur Herstellung von Aminosäuren

Die Apparatur in Anlehnung an Abb. 1 zusammensetzen:

- In den Erlenmeyerkolben soviel Ammoniaklösung füllen, bis der Flüssigkeitsstand etwa 1 cm hoch ist.
- Die eine Elektrode (z. B. Stricknadel aus Stahl), die später in die Flüssigkeit eintaucht, biegen.
- Die beiden Elektroden mit einem Abstand voneinander von mindestens 1cm. durch den Gummistopfen bohren. Die Löcher anschließend abdichten (z. B. mit Paraffin).
- Die beiden gebogenen Glasrohre in die Löcher des Gummistopfens schieben. Vorher das Glasrohr an einem Ende mit etwas Glycerin bestreichen, um die Gleitfähigkeit zu erhöhen. Beim Hineinführen das Glasrohr mit einem Tuch anfassen, um bei eventuellem Zerbrechen des Glasrohrs Verletzungen zu vermeiden.
- Kolben mit dem Gummistopfen verschließen.
- Durch das eine Glasrohr so lange Kohlenstoffdioxid (CO_2) in den Kolben leiten, bis die Luft aus dem Kolben verdrängt ist. Da CO_2 eine größere Dichte als Luft hat, wird der Kolben in kurzer Zeit mit CO_2 gefüllt sein.
- Den Zuleitungsschlauch für CO_2 mit Hilfe einer Schlauchklemme verschließen.



- Den zweiten (längeren) Schlauch zum Druckausgleich während der Reaktion in ein mit Wasser gefülltes Becherglas stecken.
- Die gerade Elektrode so verschieben, dass sich die Spitze etwa 1 bis 2 mm über der Flüssigkeitsoberfläche befindet. Wenn der Versuch läuft, kann der Abstand der Elektrode von der Flüssigkeitsoberfläche vergrößert werden, solange noch Funkenflug erfolgt.

5 Durchführung:

Der Versuch muss mit elektrischem Strom mehrere Stunden laufen, damit Aminosäuren in der Flüssigkeit nachgewiesen werden können. Der Versuch kann ununterbrochen laufen, der Strom kann aber auch nach einer Unterrichtsstunde abgeschaltet und am nächsten Tag erneut angeschaltet werden.

- Einschalten des Stromkreises. Falls beim Einschalten kein Funkenflug zwischen Elektrodenspitze und Flüssigkeitsoberfläche erfolgt,
 - a) die Spannung erhöhen und/oder
 - b) die Elektrodenspitze näher an die Flüssigkeitsoberfläche führen.
- Abschalten des Stromes nach mehreren Stunden.
- Mit Hilfe einer Pipette mit Pileusball drei Proben von ca. 1ml aus der Flüssigkeit entnehmen und in drei Reagenzgläser füllen (Achtung, Schutzbrille tragen!). Anschließend folgende Versuche durchführen und die *Beobachtungen notieren*.
 - a) Die Flüssigkeit im ersten Reagenzglas unter Schütteln einige Sekunden sieden lassen.
 - b) Zur Flüssigkeit im zweiten Reagenzglas 1ml FEHLINGSche Lösung geben. Anschließend unter Schütteln bis zum Sieden erhitzen.
 - c) Zur Flüssigkeit im dritten Reagenzglas 2 bis 4 Tropfen Ninhydrin-Lösung geben. Einige Sekunden unter Schütteln sieden lassen.

Falls keine Aminosäuren nachzuweisen sind, dann den Versuch mit Funkenflug weiter laufen lassen.



⑥ Aufgaben und Beobachtungen:

- 1) Welche Farbe hat eine Aminosäure-Lösung nach dem Erhitzen mit Ninhydrin? (Vorversuch 2)
- 2) Deuten Sie die Erscheinung, dass farbloses Ninhydrin und eine farblose Aminosäure sich nach dem Erhitzen verfärben. (Vorversuch 2)
- 3) Welche Farbe hat ammoniakalische Lösung nach dem Erhitzen mit Ninhydrin? (Vorversuch 3)
- 4) Welche Farbe hat eine Traubenzucker-Lösung nach dem Erhitzen mit Fehlingscher Lösung? (Vorversuch 4)
- 5) Welche Farbe hat eine ammoniakalische Lösung nach dem Erhitzen mit Fehlingscher Lösung? (Vorversuch 5)
- 6) Erläutern Sie, welche Bedeutung die Vorversuche 3 und 5 haben.
- 7) Erläutern Sie, weshalb die in die Flüssigkeit tauchende Elektrode gebogen wird und nicht gerade in die Flüssigkeit taucht.
- 8) Mit Hilfe des Modellexperiments gelingt es, Vorläufer von Biomolekülen aus anorganischen Molekülen zu erzeugen. Die entstandenen kleinen Moleküle könnten bei der Entstehung des Lebens als präbiotische eine Rolle gespielt haben. Bearbeiten Sie dazu folgende Aufgaben:
 - a. Welche kleinen organischen Moleküle sind im Modellexperiment entstanden?
 - b. Wie nennt man den Stoff, der entsteht, wenn viele dieser kleinen Moleküle miteinander verknüpft sind?
 - c. Schreiben Sie die allgemeine Strukturformel für die im Experiment entstandenen Moleküle auf.
 - d. Verknüpfen Sie zwei der entstandenen Moleküle zu einem größeren Molekül (Strukturformel).
 - e. Erläutern Sie, weshalb es sich bei diesem Modellexperiment nicht um einen Vorgang handeln kann, wie er vielleicht vor 3,8 Mrd. Jahren auf der Urerde stattgefunden hat. Zeigen Sie die Grenzen dieses Modellexperiments auf.
- 9) Enthielte der Erlenmeyerkolben Sauerstoff statt Kohlenstoffdioxid, würden keine organischen Verbindungen gebildet. Erklären Sie dieses Phänomen.



Baustein 3: Hypothesen zur Entstehung von Leben

Leben aus der „Ursuppe“, aus der Gesteinswelt, aus dem Weltall, aus dem Eis?

A: Leben aus der „Ursuppe“

Die ältesten uns bekannten Lebewesen haben im Wasser gelebt. Es liegt also nahe, den Ursprung des Lebens im Wasser zu suchen. OPARIN äußerte 1924 als einer der ersten diesen Gedanken.

Da Sauerstoff in der Atmosphäre fehlte oder nur in Spuren vorhanden war, gab es auch keine Ozonschicht. So konnten die energiereichen kurzwelligeren UV-Strahlen der Sonne nahezu ungehindert durch die Atmosphäre auf die Erdoberfläche bis auf die Lithosphäre und die Hydrosphäre vordringen. Neben der damals extrem hohen UV-Strahlung könnten auch elektrischen Entladungen von Blitzen, Radioaktivität und die Erdwärme nahe gelegener Vulkane als Energiequellen bei der Entstehung erster Biomoleküle eine Rolle gespielt haben. Im sauerstofffreien Milieu der Uratmosphäre, die u.a. die Gase Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) enthielt, sollen unter Energieeinwirkung Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Cyanwasserstoff (Blausäure) und schließlich auch Aminosäuren entstanden sein.

Die in der Uratmosphäre entstandenen Reaktionsprodukte sollen durch Regen in die Bäche und Flüsse und schließlich in den Ozean gespült worden sein. Da Wasser UV-Licht absorbiert, wurden die entstandenen präbiotischen Moleküle in gewisser Wassertiefe nicht sofort zerstört und reicherten sich in einer "Ursuppe" bzw. einer „Schmiere“ an. In einigen Buchten oder Tümpeln könnte so viel Wasser verdunstet sein, dass aus der sich verdickenden Suppe eine schmierige Schicht aus Aminosäuren und anderen biologischen Grundbausteinen entstand. Trockneten kleinere Meeresbuchten oder Gezeitentümpel ganz aus, so entstanden Lager organischer Stoffe. Wahrscheinlich waren diese Stoffe mit aus Gesteinen gelösten Salzen gemischt. Gerieten solche Lager in Bereiche vulkanischer Wärme, waren Kondensationsreaktionen unter Wasserentzug möglich. Metalle oder Verbindungen mit Metallionen, wie auch heute noch in Enzymen vorhanden, könnten weitere Synthesen katalysiert haben. Durch Anlagerung an Mineraloberflächen konnten sich katalytische Wirkungen entfalten, wie für Tone experimentell nachgewiesen wurde.

Stanley L. MILLER wurde mit seiner Doktorarbeit dadurch berühmt, dass er die spekulative Erforschung des Lebensursprungs in eine experimentelle Wissenschaft verwandelte. Er hatte in einer Glasapparatur die Ozeane und Atmosphäre der Urerde nachgeahmt. MILLER hat die von UREY angenommene Uratmosphäre aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Wasserdampf elektrischen Entladungen ausgesetzt. Elektrische Funken imitierten die Blitze der Gewitter. In seinen Experimenten entstanden verschiedene Aminosäuren, besonders Glycin und Alanin. MILLER und andere Forscher variierten die Versuchsbedingungen und erhielten neben Aminosäuren noch weitere kohlenstoffhaltige Moleküle, wie z. B. Zucker und Basen, die als Bestandteile der Nukleinsäuren RNA und DNA ebenfalls wichtige Bausteine des Lebens sind.

Die Hypothese zur Entstehung des Lebens in der „Ursuppe“ lässt manche Fragen unbeantwortet:

- Wie konnte verhindert werden, dass die Ansammlungen von Vorläufern der Biomoleküle in der "Ursuppe" nicht vom energiereichen UV-Licht der Sonne sofort nach ihrer Entstehung wieder zerstört wurden? In der damals ozonfreien Atmosphäre konnten die UV-Strahlen ungehindert die oberste Schicht der Hydrosphäre und der Lithosphäre erreichen.
- Wie konnten sich Konzentrationsgradienten im Wasser bilden? Konzentrationsunterschiede zwischen den Molekülen werden als notwendige Bedingung zur Entstehung von Leben angesehen.



B: Leben aus der Gesteinswelt

In jüngerer Zeit wurden neue Hypothesen und Versuchsergebnisse zur Entstehung des Lebens vorgestellt. Danach sollen Minerale und Gesteinsoberflächen bei der Entstehung des Lebens aus einfachen organischen Molekülen eine entscheidende Rolle gespielt und folgende Funktionen übernommen haben:

1. Winzige Kammern und Vertiefungen im Mineralgefüge bieten spontan entstandenen biotischen Molekülen Unterschlupf, so z. B. beim Feldspat, der ein wesentlicher Bestandteil von Granit ist. Die Moleküle sind dort auch vor energiereichem UV-Licht geschützt, das sie zerstören könnte (s. Abb. 1).
2. Eine elektrisch geladene Mineraloberfläche, wie z. B. beim Ton, kann ein Gerüst liefern, auf dem sich Moleküle anlagern, zusammenfügen und wachsen können.
3. Tonoberflächen sind oft elektrisch geladen. Sie können dadurch organische Moleküle anziehen und binden. Im Experiment verdunstete eine wässrige Lösung, die Aminosäuren enthielt, in einem tonhaltigen Gefäß. Auf diese Weise wurde das Austrocknen eines flachen Teichs oder Gezeitentümpels simuliert. Die übriggebliebenen Aminosäuren hatten kurze, proteinähnliche Ketten gebildet. Elemente der Tonoberfläche hatten demnach katalytisch gewirkt.
4. Kristallflächen bestimmter Minerale lagern bevorzugt spezielle Moleküle an, sie wirken als Schablonen. So z. B. lagern sich beim Calcit die L-Aminosäuren an einer anderen Kristallfläche an als die D-Aminosäuren (s. Abb. 1).
5. Metall-Ionen bestimmter Minerale können Reaktionen auslösen oder beschleunigen, sie wirken als Katalysatoren (s. Abb. 1).
6. Elemente gelöster Minerale können in biologische Moleküle eingebaut werden. So enthält der rote Blutfarbstoff Hämoglobin als Zentralatom Eisen (Fe) (s. Abb. 1) und der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll als Zentralatom Magnesium (Mg). In viele Enzyme sind ebenfalls Metallatome eingebaut.

Ende des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Ökosysteme an den heißen Quellen unterseeischer Vulkanschlote entdeckt. Die Lebensgrundlage dieser im Dunklen lebenden Krebse, Muscheln, Würmer und Quallen sind *Archaea* (bakterienähnliche Prokaryoten). Diese beziehen Energie und Nährstoffe aus Schwefelwasserstoff und Mineralien, die das aus dem heißen Basaltkamin heraufströmende Wasser enthält. Das brachte Forscher zu der Annahme, dass Leben unter großer Hitze und enormem Druck an diesen hydrothermalen Schloten entstanden sein könnte.

Andere Forscher wenden jedoch ein, dass Aminosäuren bei Erwärmung rasch umgebaut werden. Daraufhin fügte man ein Eisensulfid-Mineral, das häufig in der Nähe von hydrothermalen Schloten auftritt, zu wässrigen Lösungen von Aminosäuren und setzte dieses Gemisch hohem Druck und hohen Temperaturen aus. Die Aminosäuren blieben tagelang intakt und zerfielen nicht. Damit bietet sich genügend Zeit für Reaktionen mit anderen für Lebewesen bedeutsamen Molekülen.

Demnach könnten sich erste organische Moleküle und später erste einfache Lebewesen auf den Gesteinsoberflächen von unterseeischen Vulkanschlotten entwickelt haben. Diese „Oberflächenorganismen“ könnten anionisch an eine positiv geladene Oberfläche wie z. B. Pyrit an der Grenzfläche zu heißem Wasser gebunden gewesen sein. Diese Bedingungen sind an unterseeischen Tiefseequellen gegeben.

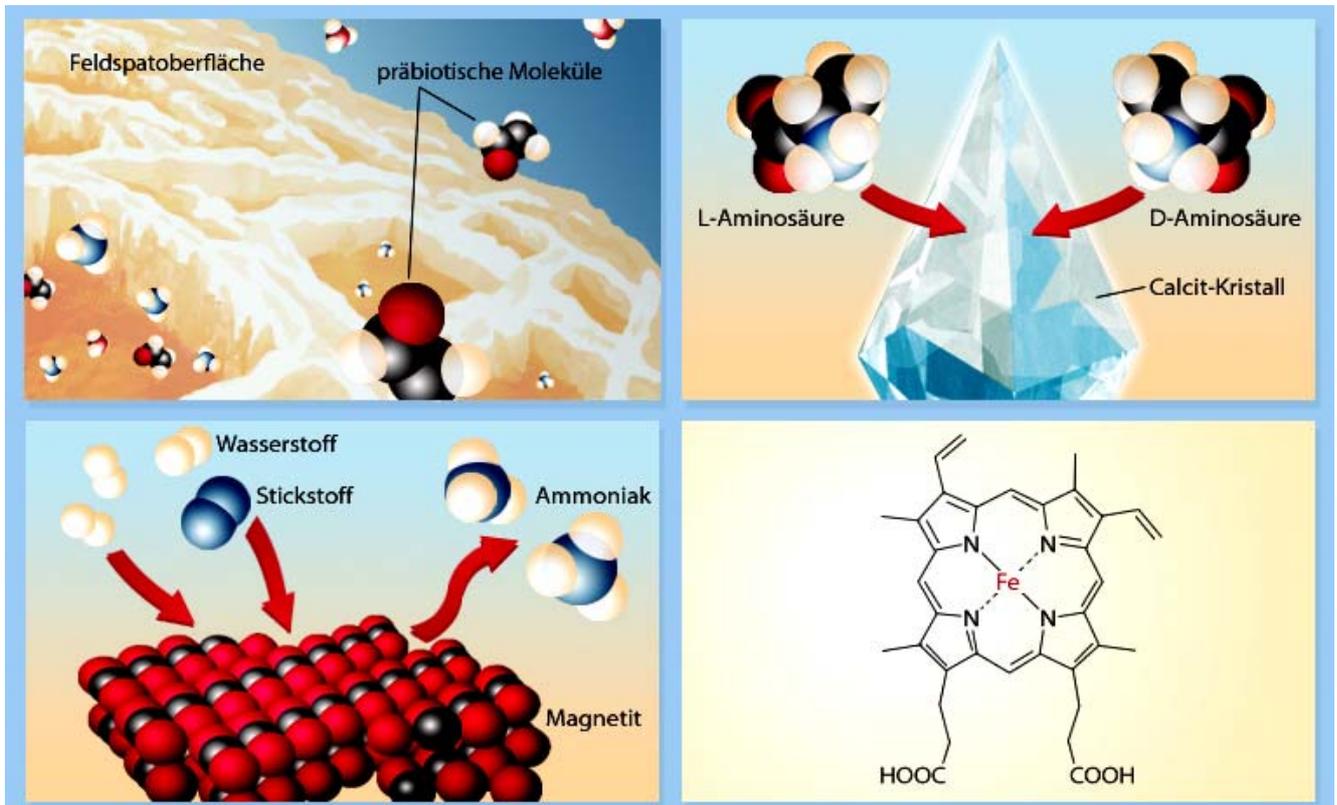


Abbildung 1: Hypothetische Entstehung des Lebens in der Gesteinswelt (nach HAZEN 2001). Links oben: Oberflächen von Mineralen enthalten winzige Vertiefungen, in denen präbiotische Moleküle Schutz vor energiereicher Strahlung finden konnten. Rechts oben: Unterschiedliche Kristallflächen lagern bevorzugt L- oder D-Aminosäuren an. Links unten: Minerale können als Katalysatoren bei chemischen Reaktionen wirken. Rechts unten: Das zentrale Eisenatom im roten Blutfarbstoff Hämoglobin, ein Beispiel für den Einbau eines Metallatoms in biologische Moleküle.



C: Leben aus dem Weltall

Bereits 1908 vermutete ARRHENIUS, dass Sporen von Mikroorganismen im Schutz von interplanetarischen Gefährten wie z. B. Meteoriten aus dem Weltall auf die Erde gelangt sein konnten. Kritiker weisen darauf hin, dass diese vermeintlichen Sporen innerhalb kürzester Zeit von der energiereichen UV-Strahlung oder durch die extreme Hitzeeinwirkung beim Durchtreten der Erdatmosphäre zerstört worden wären.

Doch in jüngerer Zeit haben Forscher die Idee von Lebensspuren aus dem Weltall wieder aufgegriffen und Experimente dazu durchgeführt. Sporen von *Bacillus subtilis* – einer häufig im Boden vorkommenden Bakterienart - wurden einer UV-Strahlung ausgesetzt. Ungeschützte Sporen waren nach 10 Sekunden zu 95 % inaktiv. Sporen, die in einem Traubenzucker enthaltenden Medium abgeschirmt wurden, überlebten zu 80 % eine fünfjährige Behandlung dieser Art, die einem Aufenthalt im Weltraum entspricht. Bei der Übertragung dieser Versuchsergebnisse auf die These vom Leben aus dem Weltraum muss jedoch der Faktor Zeit berücksichtigt werden. Ein eventueller Transport von Sporen von Mikroorganismen auf die Erde mit Hilfe von Meteoriten würde sehr lange dauern. So werden für einen Meteoritentransport vom Mars auf die relativ nahe gelegene Erde etwa 100.000 Jahre angesetzt.

Vorstufen von Biomolekülen finden sich in Meteoriten, in Kometen und in kosmischem Staub, der stetig auf die Erde nieder rieselt. Der Nachweis gelingt mit Hilfe von Teleskopen, die infrarote und kurzwellige Strahlen aus dem Weltraum auffangen und spektroskopisch analysieren. Darunter befinden sich auch Aminosäuren.

Der 1969 in Australien eingeschlagene „Murchison-Meteorit“ enthielt 74 verschiedene Aminosäuren und mehr als 100 verschiedene Kohlenwasserstoffe. Zu den nachgewiesenen Stoffen gehören auch die vier Basen der DNA (Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin). Die Aminosäuren des „Murchison“ sind weitgehend identisch mit denen, die auch MILLER in seinem Simulationsexperiment erzeugte. Sie kommen auch etwa im gleichen Mengenverhältnis vor.

1986 wurden die Staubteilchen des Kometen P1/ Halley beim Vorbeiflug an der Erde mit Hilfe von Massenspektrometern an Bord von Raumsonden untersucht. Dabei wurden Vorläufermoleküle sämtlicher Stoffklassen gefunden, die für die Biochemie von Lebewesen bedeutsam sind. So fand man neben Cyanwasserstoff (Blausäure; HCN) auch Acetylen (C_2H_2) und Formaldehyd (CH_2O). Es gibt Hinweise darauf, dass auch Polymerere von Blausäure wie z. B. Adenin, ein Baustein der DNA, in den Staubteilchen vorkommen.

Organische Stoffe könnten ebenso im Eis von Kometen auf die frühe Erde gelangt sein. Im Weltall herrschen Temperaturen von nur wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15^\circ C$). Unter diesen Bedingungen brechen die starren Eiskristalle auf. Zwischen den Wassermolekülen in diesem „amorphen Eis“ können ähnlich wie in flüssigem Wasser kleine biogene Moleküle Platz finden. Solche Moleküle sind z. B. Methylalkohol und Ammoniak. Durch energiereiche Strahlung im Weltraum angeregt, können diese im Eis geschützten Moleküle mit anderen Molekülen reagieren. Auf diese Weise können präbiotische Moleküle wie Aminosäuren entstehen.

Vor ca. 5 Mrd. Jahren, als sich aus einer interstellaren Molekülwolke das Sonnensystem bildete, soll ein Teil des Eises, das mit biogenen Molekülen beladen war, in Kometen gelangt sein. Viele dieser Kometen stürzten seinerzeit auf die junge Erde. Dabei könnten biogene Moleküle zusammen mit Kometenstaub oder interstellarem Eis auf die Erde gelangt sein. Im Wasser der Erde könnten sich dann die organischen Moleküle aus dem All zu späteren Lebewesen weiter entwickelt haben.



D: Leben aus dem Eis

In neuester Zeit wird eine weitere Hypothese über die Herkunft des Lebens und seine frühesten Formen geäußert. In polarem Eis entstehen durch wiederholte Tau- und Frierprozesse sowie Bewegungen unzählige größere und kleinere mit Wasser gefüllte Hohlräume. In diesen Hohlräumen des polaren Eises wurde eine Vielfalt von meist mikroskopisch kleinen Lebewesen entdeckt, die eine Lebensgemeinschaft mit vielfältigen wechselseitigen Beziehungen bilden. Die Hohlräume im Eis sind stark strukturiert. Sie bilden viele „Kammerchen“, so dass das Eis im Inneren eine große Oberfläche besitzt. In den Hohlräumen besteht Schutz vor UV-Strahlung, die in der Uratmosphäre aufgrund der fehlenden Ozonschicht sehr hoch war. UV-Strahlung kann organische Moleküle verändern und zerstören.

Meereis kann Substanzen durch wiederholtes Ausfrieren des Wassers beträchtlich konzentrieren. Die entstehenden flüssigkeitsgefüllten Räume fördern durch hohe Ionenkonzentration der Salzlösung, hohe Drücke sowie tiefe Temperaturen besonders stabile Wasserstoffbrückenbindungen. Diese sind essentiell für Reaktionen von RNA-Molekülen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch eine Schlüsselfunktion bei der Entstehung erster präbiotischer Lebewesen einnahmen. Polares Meereis scheint darüber hinaus für einige chemische Reaktionen in biologischen Systemen katalytische Wirkung zu haben.

Ausgehend von diesen Entdeckungen wird die Hypothese aufgestellt, dass Leben in früher Zeit in dieser für die meisten heutigen Lebewesen unwirtlichen Umwelt im Eis entstanden sein könnte und sich zunächst auch dort weiter entwickelte. Aus den ersten organischen Molekülen sollen anschließend komplexer aufgebaute Moleküle entstanden sein. Später haben sich erste Protobewesen entwickelt, die Stoffwechsel zeigten und sich vermehren konnten. Diese Hypothese ist so neu, dass sie bisher noch nicht experimentell überprüft werden konnte.



❶ Aufgaben:

- 1) Stellen Sie die wesentlichen Aussagen der vier Hypothesen zur Entstehung des Lebens einander gegenüber.
- 2) Nennen Sie Gemeinsamkeiten der Hypothesen A, B, C und D.
- 3) Versuchen Sie die Hypothesen zu verknüpfen. Ist eine Kombination mehrerer Hypothesen denkbar?
- 4) Diskutieren Sie die Rolle der energiereichen UV-Strahlung bei der Entstehung präbiotischer Moleküle.
- 5) Nennen Sie Argumente, die gegen die verschiedenen Hypothesen sprechen.
- 6) Begründen Sie, warum es für keine der vorliegenden Hypothesen zur Entstehung von Lebewesen klare und eindeutige Beweise gibt.

Baustein 3: Hypothesen zur Entstehung von Leben

Von organischen Molekülen zu ersten lebenden Zellen

1 Einführung

Alle Lebewesen enthalten Proteine und Nukleinsäuren. Die Nukleinsäuren RNA und DNA sind in heutigen Zellen eine Voraussetzung zur Herstellung von Proteinen. Am Beginn der Entwicklung zum Leben stand vermutlich das Auftreten der RNA. Kurze RNA-Stränge entstanden immer wieder spontan durch die Verknüpfung von einzelnen Nukleotiden. Durch die spezifische Abfolge der vier RNA-Bausteine Guanin, Cytosin, Adenin und Uracil können Informationen für die Proteinsynthese gespeichert werden. Einige dieser RNA-Moleküle waren wahrscheinlich zusätzlich in der Lage, ihre eigene Verdoppelung (Replikation) zu katalysieren: Komplementäre Nukleotide lagern sich an einen einzelnen Strang an und werden durch die Katalyse zu einem komplementären Strang verknüpft. Die Fähigkeit zur Katalyse ist durch heutige RNA-Moleküle belegt (Ribozyme). Die Biosynthese von RNA und Proteinen konnte also in der Anfangsphase des Lebens allein mit Hilfe der verschiedenen RNAs erfolgen. Diese Stufe der Entwicklung des Lebens wird als **RNA-Welt** bezeichnet. Die gebildeten Proteine erwiesen sich im Lauf der Zeit als leistungsfähigere Katalysatoren, so dass es wahrscheinlich zu einer Arbeitsteilung zwischen RNA-Molekülen als Informationsträgern und Proteinen als Katalysatoren kam (**RNA-Protein-Welt**).

Nun konnte ein rückgekoppelter Reaktionszyklus entstehen, in dem RNA-Moleküle die Bildung von Proteinen katalysierten und unter den Proteinen auch solche waren, welche wieder die Replikation von RNA-Molekülen katalysierten. Manfred EIGEN hat 1987 in seiner Hypothese zum „Hyperzyklus“ dargestellt, wie sich ein „Urgen“ über einen Reaktionszyklus vermehren konnte. Danach haben sich die unter den Bedingungen der Ureerde gebildeten vier RNA-Bausteine autokatalytisch zu einer langen Kette zusammen gelagert. Dieser Nukleotidstrang enthielt die Informationen für die Ausbildung von Proteinen. Darunter katalysierten einige die

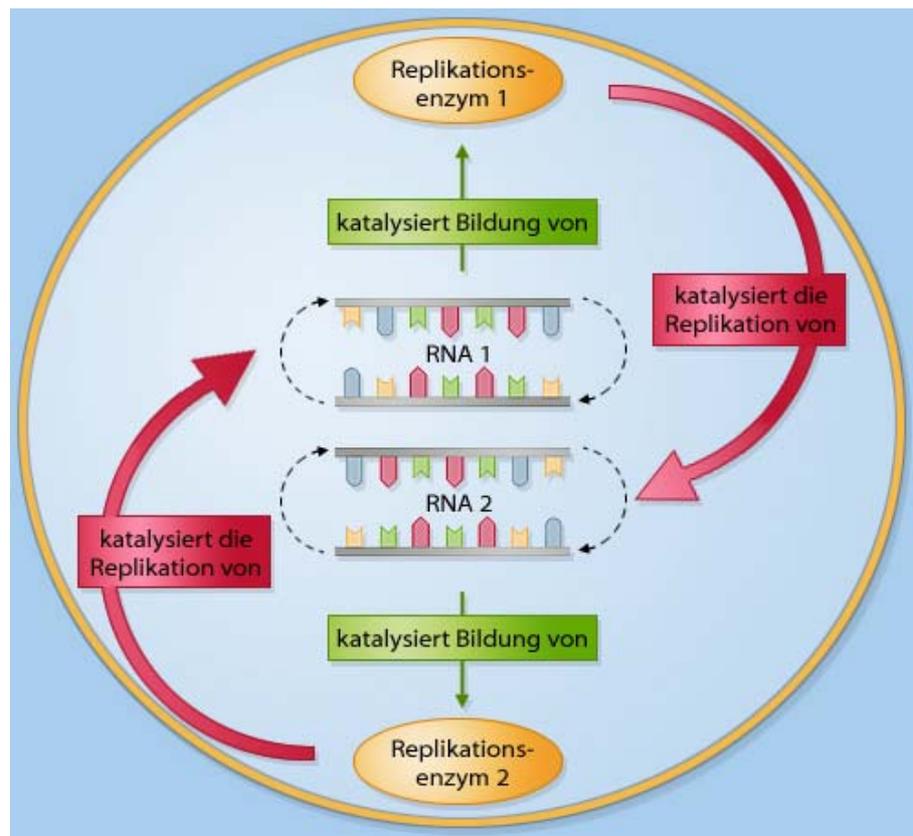


Abbildung 1: Modell eines membranumhüllten Hyperzyklus nach EIGEN. Die Elemente des Hyperzyklus reproduzieren sich selbst. Sie sind sowohl Katalysator als auch Informationsträger. Im Hyperzyklus kann bereits die elementarste Form von Stoffwechsel und Vererbung gesehen werden. Mutationen können den Zyklus verändern oder erweitern.



Replikation von RNA. Die entstehenden Elemente reproduzieren sich selbst, indem sie über wenige Schritte wieder die Herstellung der Ursprungs-RNA katalysieren (s. Abb. 1).

Darüber hinaus werden die Moleküle, die durch Einbindung in den Zyklus an ihrer eigenen Reproduktion beteiligt sind, bevorzugt gebildet.

Wenn im Verlauf der chemischen Evolution einfache Proteine und Nukleotidstränge mit katalytischen Eigenschaften entstanden, war die Ausbildung eines Hyperzyklus eine zwangsläufige Folge (*Theorie von der Selbstorganisation der Materie*). Bereits auf dieser molekularen Ebene gab es verschiedene Varianten, die einer Selektion unterlagen: Wurde die Reaktionsabfolge aufgrund einer Mutation in einem Nukleotidstrang beschleunigt, entstanden bevorzugt die Produkte des veränderten Zyklus.

Wurde ein Hyperzyklus zusätzlich von einer Membran umschlossen, kam eine vorteilhafte Mutation nur noch der Protozelle zugute, in der sie auftrat. Dadurch konnte sich diese Protozelle einschließlich ihres verbesserten Genoms schneller als andere Protozellen vermehren. Die ständig wachsende Menge ihrer Nachkommen verdrängte allmählich die Nachkommen ihrer Konkurrenten. Mit der Entstehung membranumgrenzter Räume lag gleichzeitig eine erste einfache Lebensform mit eigenem Genom vor. Die Membranen mussten allerdings für bestimmte Stoffe durchlässig sein. Nur so konnte die einfache Lebensform die zur Energieversorgung notwendigen Stoffe aufnehmen und unbrauchbare Stoffe abgeben.

Anschließend entwickelten sich diese Vorläufer der ersten Zellen vermutlich dadurch weiter, dass zusätzliche Nukleotidstränge aufgenommen wurden, die neue Stoffwechselreaktionen ermöglichten. Mit zunehmender Entwicklung musste es eine Arbeitsteilung zwischen Vermehrung der Nucleotidstränge (Replikation) und Biosynthese der Proteine (Translation) geben. Die DNA entstand als der RNA stark ähnelndes, aber aufgrund ihrer Doppelhelix-Struktur chemisch stabileres Molekül. Damit hatte die DNA als Speicherform für genetische Informationen einen Selektionsvorteil gegenüber der RNA, sie übernahm die Replikation. Die RNA wurde für die Translation zuständig, also für die Übertragung der Information, den Transport der Aminosäuren und die Synthese der Proteine. In der weiteren Evolution überdauerten jene Zellen, in denen es eine eindeutige Informationskette von der DNA über die RNA zum Protein gab.

Leben ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass ständig Energie aufgenommen werden muss, um zu wachsen, um sich zu vermehren und Stoffwechselvorgänge anzutreiben. Die ersten Lebewesen ernährten sich vermutlich chemoautotroph oder heterotroph. Schon relativ früh schafften es Vorläufer von Bakterien, die Energie vom Sonnenlicht in chemische Energie umzuwandeln. Sie wurden fotosynthetisch aktiv.

Am Ende dieser Entwicklungen standen erste echte Lebewesen in Form von einzelligen Prokaryoten. Die beschriebenen Entwicklungsschritte sind in sich schlüssig und konnten teilweise durch Modellexperimente bestätigt werden. Der Gesamttablauf ist jedoch nicht endgültig entschlüsselbar, da der Faktor Zeit im Laborexperiment nicht reproduziert werden kann. Es gibt zudem keine Fossilien, an denen der Prozess der Entwicklung des Lebens nachvollzogen werden könnte.

Erste Spuren von echten Lebewesen hat man in sogenannten Stromatolithen entdeckt. In diesen gebänderten Gesteinsschichten befinden sich die Reste von Bakterien, die vor ca. 3,5 Mrd. Jahren gelebt und bereits Fotosynthese betrieben haben. Von der chemischen Evolution, also der Entstehung erster lebenswichtiger Moleküle, bis zur Entstehung von Einzellern mit Membranen hat es wahrscheinlich nur wenige Jahrmillionen gedauert.



2 Aufgaben

- 1) Geben sie die Theorie des Hyperzyklus nach Manfred EIGEN in eigenen Worten wieder.
- 2) Beschreiben Sie die evolutiven Folgen der Entwicklung von Membranen.
- 3) Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit Konkurrenz zwischen Protobionten zu einer evolutiven Weiterentwicklung führt?



Übersicht über die Erdzeitalter

Zeitalter	Periode	Serie	Alter in Mio. Jahren	bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Biosphäre
Känozoikum	Neogen	Holozän (Neuzeit)	0,01	historische Zeit - kulturelle Evolution des Menschen
		Pleistozän		Eiszeitalter
		Pliozän	1,8	Beginn der Eiszeiten Australopithecus
		Miozän	5	Ausbreitung der Gräser und Kräuter erste Vorfahren des Menschen
	Paläogen	Oligozän	23	erste Menschenaffen
		Eozän	34	Radiation der Säugetiere, die meisten modernen Ordnungen entstehen
		Paläozän	55	Radiation der Blütenpflanzen
			65	
Zeitalter	Periode		Alter in Mio. Jahren	bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Biosphäre
Mesozoikum	Kreide		65	großes Massensterben († Saurier, † Ammoniten) erste Blütenpflanzen (Bedecktsamer) Gondwana zerbricht
		Jura	145	erste Vögel Pangäa zerbricht in die Kontinente Laurasia und Pangäa Radiation der Saurier
	Trias	199	erste Saurier und Säugetiere nacktsamige Pflanzen beherrschen die Landschaft	
Paläozoikum	Perm	251	großes Massensterben (ca. 80 - 90% aller Arten) Radiation der Reptilien	
	Karbon		299	ausgedehnte Wälder Radiation der Insekten und Amphibien erste Reptilien
		Devon	359	erste Samenpflanzen (Nacktsamer) erste Gefäßpflanzen an Land (Rhynia) erste Landtiere (Gliederfüßer, Insekten) erste Amphibien
	Silur	416	Ammoniten, Kiefer tragende Fische † Trilobiten erste Landpflanzen	
	Ordovizium	443	Auftauchen erster Wirbeltiere (kieferlose Fische) Zeitalter der Trilobiten	
	Kambrium	488	adaptive Radiation der Tiere, die meisten rezenten Tierstämme tauchen auf; Entwicklung von Skeletten bei vielen Arten	
	Präkambrium	Proterozoikum		542
Archaikum			2500	3500 älteste prokaryotische Fossilien 3800 Entstehung des Lebens auf der Erde
			4600	



Baustein 4: Gruppenpuzzle - Entwicklung der Biosphäre

❶ Allgemeine Informationen

Die Erde bildete sich vor etwa 4,6 Milliarden Jahren als eigener Planet. Das Leben auf der Erde ist vor ungefähr 3,8 Milliarden Jahren entstanden und hat sich seitdem stetig entwickelt. Zur besseren Übersicht über diese Entwicklung unterteilen Wissenschaftler/innen den Zeitraum von der Entstehung des Lebens bis heute in einzelne Abschnitte, die Erdzeitalter. Diese wurden jeweils in mehrere Perioden unterteilt. Die verschiedenen Zeitabschnitte werden in der Regel in Millionen Jahren angegeben. Die Texte der Expertengruppen behandeln jeweils ein Erdzeitalter.

Übersicht über die Themen der Expertengruppen:

- Expertengruppe 1: Die Erde im Präkambrium
- Expertengruppe 2: Die Erde im Paläozoikum (Erdaltertum)
- Expertengruppe 3: Die Erde im Mesozoikum (Erdmittelalter)
- Expertengruppe 4: Die Erde im Känozoikum (Erdneuzeit)

❷ Durchführung:

- 1) Bestimmen Sie eine/n Moderator/in, der/die die Erfüllung des Arbeitsauftrages in ihrer Gruppe in der vorgegebenen Zeit sicherstellen soll. Nutzen Sie den "Arbeitsbericht für Gruppen" (Modul 3, Baustein 6, Material 3).
- 2) Erarbeiten Sie sich Wissen zum Thema Erdzeitalter in **Expertengruppen**. Verteilen Sie hierfür die diesem Material beigefügten Texte in Ihrer Gruppe. **Vorgehensweise:** Lesen Sie sich *ihren* Text einmal durch ohne sich Notizen zu machen. Lesen Sie sich den Text ein zweites Mal durch und schreiben die wichtigsten Inhalte stichpunktartig heraus, sodass Sie in einem Vortrag den Inhalt mündlich darstellen könnten. Suchen Sie dann die Mitschüler/innen der anderen Gruppen, die das gleiche Thema bearbeitet haben, um mit ihnen eine Expertengruppe zu bilden. Vergleichen Sie ihre Ergebnisse in der Expertengruppe in folgender Weise: Ein Gruppenmitglied trägt seine Zusammenfassung mündlich vor. Ein von ihm nach seinem Vortrag bestimmtes weiteres Mitglied wiederholt und ergänzt das Gesagte. Anschließend haben alle die Möglichkeit, weitere Verbesserungen und Ergänzungen vorzuschlagen. Am Ende soll jedes Gruppenmitglied in der Lage sein, den Inhalt des Textes wiederzugeben. Bearbeiten Sie anschließend gemeinsam die Aufgaben zu Ihrem Text und erarbeiten Sie eine stichwortartige Zusammenfassung der Ergebnisse, die Sie später an ihre Stammgruppenmitglieder vermitteln möchten. Die Aufgabenlösungen und die Zusammenfassung legen Sie ihrer Lehrkraft zur Korrektur vor. Danach begeben Sie sich wieder in ihre ursprünglichen Arbeitsgruppen (**Stammgruppen**) und stellen nacheinander die Arbeitsergebnisse der verschiedenen Expertengruppen vor. Dies geschieht auf die gleiche Weise wie in den Expertengruppen. Eine Person trägt vor und eine weitere wiederholt und ergänzt das Gesagte. Danach sollte jedes Mitglied der Stammgruppe den Inhalt *aller* Texte kennen.



Expertengruppe 1: Die Erde im Präkambrium

Entstehung von Leben und die frühen Prokaryoten

Die unvorstellbar lange Zeit von der Entstehung des Planeten vor etwa 4,6 Milliarden Jahren bis zum Beginn des Kambriums vor 542 Millionen Jahren bezeichnet man als Präkambrium (lat. *prae* vor, *cambría* römische Bezeichnung für Nordwales). In dieses Erdzeitalter fällt die Entstehung des Lebens vor etwa 3,8 Milliarden Jahren. Das Präkambrium wird von Geologen in die Perioden Archaikum (4600 – 2500 Millionen) und Proterozoikum (2500 – 542 Millionen) unterteilt. Aus dem Präkambrium kennt man nur verhältnismäßig wenige Fossilien. Dies liegt daran, dass erst gegen Ende dieses Erdzeitalters Lebewesen auftraten, die Hartteile (Schalen, Panzer) bildeten. Auch haben sich viele Gesteine aus dieser Zeit durch *Metamorphose* verändert, wodurch möglicherweise darin enthaltene Fossilien zerstört wurden. Zu den wenigen Fossilien, die dennoch erhalten geblieben sind, gehören Stromatolithen. Die Ältesten von ihnen stammen aus 3,5 Milliarden Jahre alten Gesteinsschichten Westaustraliens. Stromatolithen sind Gesteinskrusten, die von Prokaryoten (Organismen ohne Zellkern) gebildet wurden. Vermutlich handelte es sich bei diesen um Cyanobakterien ("Blaualgen"). Sie lebten im Meer (s. Abb. 1).



Abbildung 1: Stromatolithen aus Westaustralien, etwa 3,5 Milliarden Jahre alt. Dünnschliffe durch die im Querschnitt feinschichtigen Stromatolithen zeigen unter dem Mikroskop einzellige, blaualgenartige Gebilde. (Foto: U. KULL, Universität Stuttgart)

Noch heute werden Stromatolithen von Cyanobakterienkolonien gebildet. Diese Kolonien bilden lagige Matten, zwischen denen Kalkstein ausfällt. Stromatolithen bildeten die ersten Riffe seit dem frühen Proterozoikum (vor 2,5 Mrd. Jahren), die schon Ausdehnungen von mehreren Tausend Kilometern erreichten und Atolle um vulkanische Inseln bildeten.

Man geht davon aus, dass die Prokaryoten, die die ersten Stromatolithen bildeten, bereits zur Fotosynthese fähig waren. Die Bindung des Treibhausgases CO_2 durch Fotosynthese trug dazu bei, dass vor etwa 2,2 Milliarden Jahren die erste große Eiszeit auftrat. Diese führte zu einer Abnahme der fotosynthetisch aktiven Prokaryoten und damit zu einer Verringerung der CO_2 -Bindung. Starker Vulkanismus und Gesteinsmetamorphose führten ebenfalls zu einem Wiederanstieg des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre und damit zur erneuten Erwärmung der Erde. Daran wird deutlich, dass die Tätigkeit der Lebewesen gemeinsam mit Prozessen im Inneren der Erde schon in der Frühzeit des Planeten zu einem Wechsel von Warm- und Kaltzeiten geführt haben.

In der Fotosynthese wird Sauerstoff freigesetzt. Dieser löste sich zunächst im Meer und gelangte schließlich auch in großer Menge in die Atmosphäre, wo er sich anreicherte. Er bewirkte u.a. die Oxidation von Eisenverbindungen, so dass sich auf der Erdoberfläche bräunlich rötliche Eisenoxide bildeten.

Entwicklung der Eukaryoten

Sauerstoff schuf auch eine Voraussetzung für die Entwicklung der ersten Eukaryoten im Meer. Eukaryoten sind Organismen, die aus einer oder mehr als einer Zelle bestehen, und die einen Zellkern und andere Arten von Zellorganellen besitzen. Zu diesen Organellen gehören z. B. die Mitochondrien, in denen die Zellatmung abläuft. In der Zellatmung werden mit Hilfe von Sauerstoff organische Stoffe oxidiert, wobei der Organismus Energie gewinnt. Die ältesten Eukaryoten sind 1,5 Milliarden Jahre alt.

In der Folgezeit bildeten die Kontinente einen einzigen Großkontinent. Dadurch nahm die Zahl der Subduktionszonen und somit auch der Vulkanismus ab. Weil folglich auch der CO₂-Gehalt der Atmosphäre stark abnahm, vereiste die Erde. Einige Wissenschaftler/innen nehmen an, dass sie sogar komplett von Eis bedeckt wurde ("Schneeballerde"). Diese stärkste Vereisung der Erde wurde durch das erneute Zerbrecen des Superkontinents beendet, wodurch wieder mehr CO₂ aus dem Erdinneren freigesetzt wurde.

In vielen Teilen der Erde wurden kurz nach jener Epoche die ältesten Fossilien eindeutig mehrzelliger Organismen gefunden. In Erdschichten, die sich in der Zeit von vor 650 und 540 Millionen Jahren bildeten, findet man Abdrücke flach gebauter Organismen, die heute keine lebenden Verwandten mehr haben. Nach dem ersten Fundort in Australien nennt man diese Gruppe von Lebewesen Ediacarafauna. Die meisten dieser Abdrücke entstanden im weichen Meeresboden. Es handelt sich um Organismen, die im Aussehen den heutigen Quallen, Seefedern oder auch Ringelwürmern ähneln (s. Abb. 2). Sie werden allerdings nicht diesen Tiergruppen zugeordnet. Man nimmt viel mehr an, dass sie eine eigene Evolutionslinie bilden.

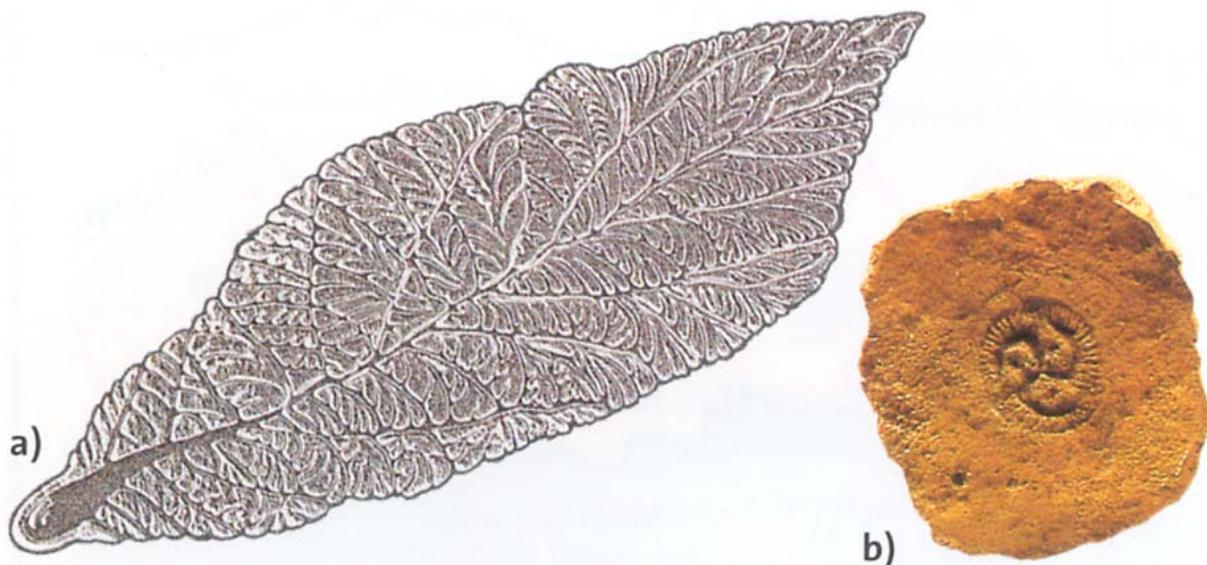


Abbildung 2: Vertreter der Ediacara-Lebenswelt des obersten Präkambriums. a) Form mit „Steppdeckenmuster“ (Größe ca. 12 cm); b) Tribrachidium (Südaustralien, Größe ca. 8 cm). (Bilder: U. Kull, Universität Stuttgart)

Die Ausbildung der heute noch vorkommenden Stämme hat erst zu Beginn des Erdaltertums im **Kambrium**, vor 542 Millionen Jahren, stattgefunden.



Aufgaben

- 1) Nennen Sie Lebewesen, die es schon seit mehr als 3 Mrd. Jahren auf der Erde gibt.
- 2) Rechnen Sie aus, wie viele Jahre seit der Entstehung des Lebens vergangen sind bis es zur Aufspaltung der Tiere in verschiedene Großgruppen kam.
- 3) Begründen Sie, weshalb es von den Lebewesen des Präkambriums nur wenig Fossilien gibt.
- 4) Nennen Sie Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und unbelebter Erde im Präkambrium.

Vertiefende Aufgaben

- 5) Informieren Sie sich über die Aussagen der Endosymbiontentheorie. Skizzieren Sie die Schritte von Prokaryoten zu den beiden verschiedenen Eukaryotentypen.
- 6) Nennen Sie die fünf Reiche, in welche die heute auf der Erde vorkommenden Lebewesen eingeteilt werden können.
- 7) Nennen Sie Unterschiede zwischen Prokaryoten und Eukaryoten und ordnen Sie die fünf Reiche der Lebewesen diesen beiden Gruppen zu.

Expertengruppe 2: Die Erde im Paläozoikum (Erdaltertum)

Tiere mit Skelett ab dem Kambrium

Im **Kambrium** (vor 542 - 488 Millionen Jahren) bildeten sich zahlreiche Tierarten, die unterschiedlich ökologisch angepasst waren (adaptive Radiation). Damals entstanden die Vorfahren aller heutigen Tierstämme. Kennzeichnend für diese Epoche ist, dass einerseits viele Tiere größer wurden und andererseits Tiere mit Hartteilen auftraten, die ähnlich noch heute in den Kalkschalen von Muscheln oder Schnecken, im Außenskelett der Krebse und Insekten und im Skelett der Wirbeltiere vorkommen. Hartteile bedeuteten Selektionsvorteile für die Organismen. Diese waren dadurch besser vor Fressfeinden geschützt. In den Hartteilen könnten sich auch schädliche Stoffwechsel-Endstoffe abgelagert haben. Kalkschalen lagerten sich auf dem Meeresboden ab. Im Laufe von Jahrmillionen sind durch diese Ablagerungen riesige Sedimentschichten aus Kalkstein entstanden, der heute als Baumaterial verwendet wird.

Zu den Tieren mit hoher Arten- und Individuenzahl gehörten im Kambrium und in dem sich anschließenden **Ordovizium** (vor 488-443 Millionen Jahren) Trilobiten, Armfüßer, Stachelhäuter und auch schon erste Wirbeltiere. Sie alle lebten auf dem Meeresboden. Die zu den Gliederfüßern (Arthropoden) gehörenden krebsähnlichen Trilobiten ernährten sich vorwiegend von organischen Ablagerungen (s. Abb. 3). Sie sind für diese frühe Zeit des Erdaltertums typisch und werden daher als Leitfossilien benutzt. In jener Zeit entstanden auch die ersten Weichtiere (Mollusken) mit Muscheln, Schnecken und Nautiloiden. Nautiloiden gehören wie Tintenfische zur Gruppe der Kopffüßer (Cephalopoden). Die ersten Wirbeltiere waren kleine fischähnliche Lebewesen. Sie besaßen noch keine Kiefer, ähnlich wie die heutigen Neunaugen.

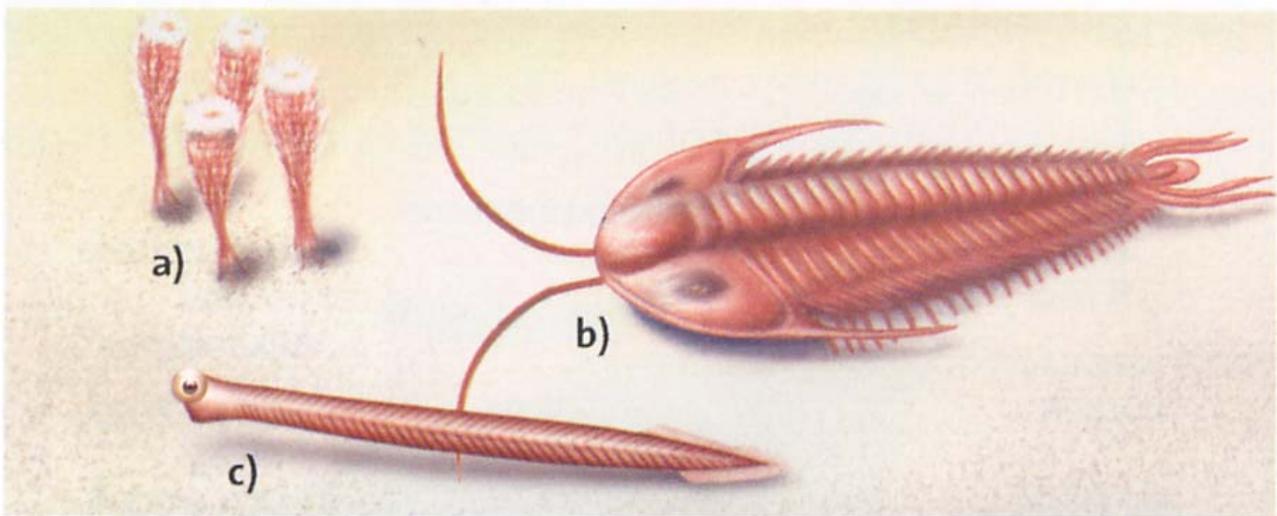


Abbildung 3: Lebewesen des Kambriums. a) Vertreter des schwammähnlichen Tierstamms der Archaeocyathiden (kamen nur im Kambrium vor); b) Trilobit (*Paradoxides*), bis 50 cm groß; c) Conodonten-Tier (Grafik: BAYRHUBER & KULL 2005: Linder Biologie).

Die ersten schwimmenden Räuber

Im **Silur** (vor 443 - 416 Millionen Jahren) entwickelten sich im Wasser schwimmende Räuber. Es waren die zu den Kopffüßern gehörenden Ammoniten und Kiefer tragende Fische, wie Panzerfische. Mit diesen Fischen sind die Vorfahren der zu den Knorpelfischen zählenden Haie und auch die Vorfahren der Strahlenflosser verwandt, zu denen die heute häufigsten Fische, die Knochenfische, gehören. Die schnellen räuberischen Fische trugen vermutlich entscheidend dazu bei, die sich langsam bewegenden und durch ihr schwach verkalktes Außenskelett nur wenig geschützten Trilobiten auszurotten.



Pflanzen gehen an Land

Vom Silur sind Pflanzen, Nacktfarne, bekannt, die im Grenzbereich zwischen Land und Wasser wuchsen. Diese nur wenige Zentimeter großen Pflanzen ohne Blätter und echte Wurzeln besaßen Spaltöffnungen und Leitgewebe. Sie waren noch nicht gegen Trockenheit geschützt. So konnten sie sich nur an feuchten Stellen halten. Nachdem die Pflanzen das Land besiedelt hatten, konnten ihnen auch Tiere folgen die von Pflanzen lebten. Erst ab dem **Devon** (vor 416 - 359 Millionen Jahren) lösten die Sporenpflanzen der Bärlapp-Gewächse, Schachtelhalme und Farne die Nacktfarne auf dem Festland ab. Diese neuartigen Pflanzen besaßen echte Wurzeln und ein leistungsfähigeres Wasserleitungssystem als die Nacktfarne.

Im Wasser lebende Pflanzen können Wasser über ihre gesamte Oberfläche aufnehmen und abgeben. Landpflanzen nehmen Wasser über die Wurzeln auf und müssen sich vor Wasserabgabe schützen. Ihre Oberfläche ist daher weitgehend wasserundurchlässig. Höher entwickelte Landpflanzen haben außerdem ein Gefäßsystem mit Xylem zum Transport von Wasser und darin gelösten Nährsalzen und Phloem zum Transport der Assimilationsprodukte. Größere Landpflanzen brauchen ein Stützgewebe, um den aufrecht stehenden Pflanzenkörper zu halten. Diese Funktion übernehmen das Xylem und das Holz. Belaubte Pflanzen haben eine größere Oberfläche für die CO₂-Aufnahme und die Lichtaufnahme und damit eine höhere Fotosyntheserate als blattlose Pflanzen. Die Ausbildung flächiger Blätter wurde begünstigt, weil im Devon der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wegen der Fotosynthese der Pflanzen abnahm. Im Devon kamen zu den Sporenpflanzen die Nacktsamer (Gymnospermen) als erste Samenpflanzen hinzu. Sie waren die Vorläufer der Nadelbäume und des heute noch vorkommenden Ginkgobaums. Im oberen Devon gab es unter den Sporenpflanzen schon bis zu 30 m hohe Bäume, mit festen verholzten Stämmen, die Wälder bildeten.

Zwischen dem Ausgangsgestein und den darauf wachsenden Pflanzen gibt es Wechselbeziehungen. Einerseits setzen Baumwurzeln und mit ihnen in Symbiose lebende Pilze chemische Verbindungen frei, die zu einer tief greifenden und raschen Verwitterung der Gesteine führen. Mit der Verbreitung von Landpflanzen auf der Erdoberfläche stieg die Verwitterungsrate. Andererseits halten Pflanzenwurzeln den Boden fest und schützen ihn so vor Erosion.

Die ersten Tiere verlassen das Wasser

Im Silur verließen wahrscheinlich die ersten Tiere das Wasser. Sie konnten zumindest zeitweise an Land leben. Man nimmt an, dass Quastenflosser oder die mit ihnen verwandten Lungenfische als erste Wirbeltiere das Land besiedelten. Im Oberdevon erschienen die ersten Amphibien. Der Übergang vom Wasserleben zum Landleben erforderte auch für die Tiere eine Umstellung im Körperbau und in den Lebensfunktionen. Anstatt mit Kiemen atmen die an Land lebenden Amphibien über Lungen. Der Körper muss vor Austrocknung geschützt werden. Bei den Amphibien entwickelten sich Beine aus den Schwimmlaugen der fischähnlichen Vorläufer.

Amphibien und Insekten im Karbon

Im **Karbon** (vor 359 - 299 Millionen Jahren) lag Mitteleuropa in der Nähe des Äquators. In dem feuchtwarmen tropischen Klima gab es ein üppiges Pflanzenwachstum (s. Abb. 4). Aus den nicht verwesenen Resten baumartiger Sporenpflanzen entstand die heute als Brennstoff genutzte Steinkohle. Sie gab dem Karbon seinen Namen (lat. *carbo*, Kohle). Von den im Karbon lebenden Amphibien waren einige bis zu sechs Meter lang. Sie sahen dicken Alligatoren ähnlich. Andere Amphibien waren klein und schlangenähnlich. Ebenfalls auf dem Land breiteten sich geflügelte Insekten aus. Eine Art erinnert an eine Libelle. Mit einer Flügelspannweite von einem halben Meter war sie viel größer als heutige Insekten. Die Insekten entwickelten

schon verschiedene Lebensformtypen: Blattfresser, Pflanzensaftsauger, Räuber mit Laufbeinen und Räuber mit Greifbeinen.

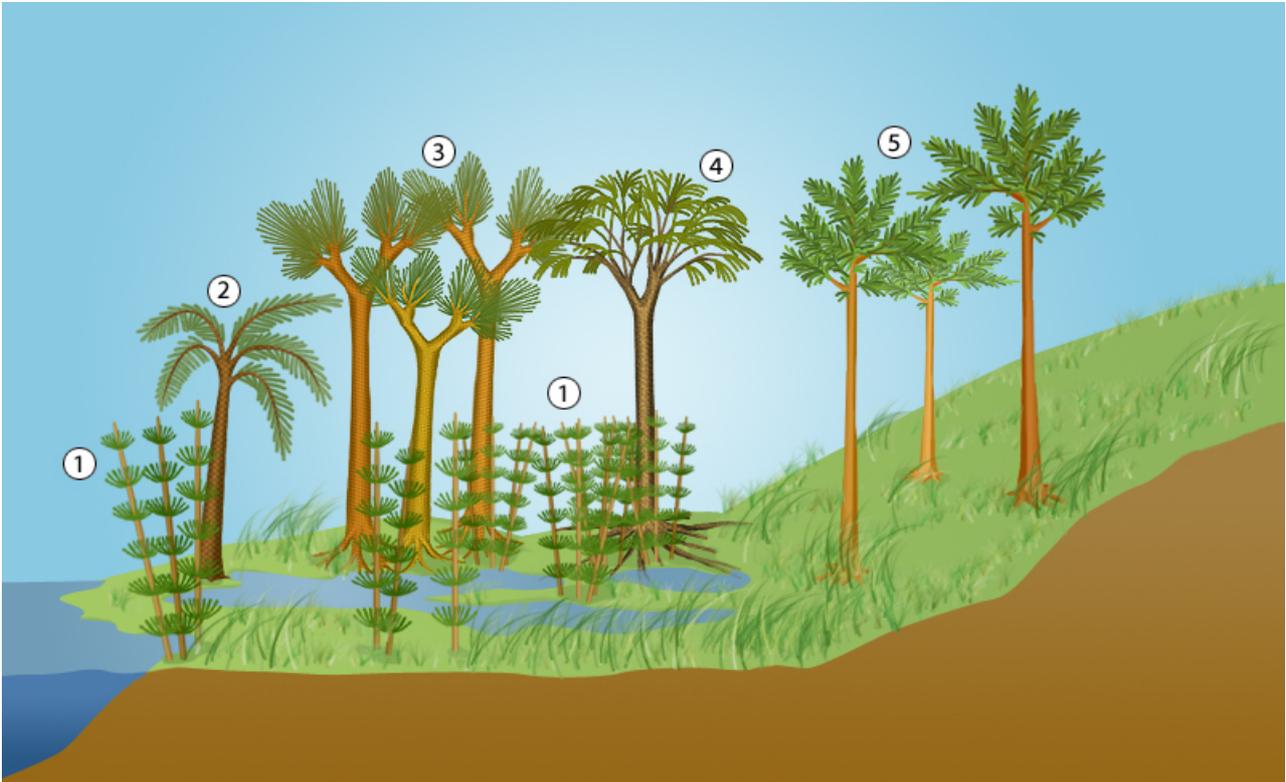


Abbildung 4: Rekonstruktion einer karbonischen Landschaft mit typischer Flora. 1 Calamiten (Schachtelhalme), 2 Baumfarne, 3 Siegelbäume, 4 Schuppenbaum, 5: Cordaiten (Nacktsamer).

Amphibien werden von Reptilien zurückgedrängt

Aus dem Oberkarbon sind die ersten Reptilien bekannt. Es waren bis zu 30 cm lange eidechsenähnliche Tiere. Ab dem **Perm** (vor 299 - 251 Millionen Jahren) machten die Reptilien eine adaptive Radiation durch und begannen die Amphibien zurück zu drängen. Reptilien waren höher entwickelt als Amphibien. Mit ihren spitzeren Zähnen konnten sie erbeutete Tiere besser halten und mit ihren längeren Beinen konnten sie schneller laufen. Während Amphibien in ihrer Fortpflanzung ans Wasser gebunden sind, legen Reptilien nach innerer Befruchtung ihre Eier außerhalb des Wassers ab. Das dotterreiche Ei ist von einer robusten Schale umhüllt, die den Embryo vor Austrocknung schützt.

Am Ende des Perms kam es zu einem großen Massensterben, das zwischen 80 und 95 % aller Organismen vernichtete. Was letztendlich zu diesem Massensterben geführt hat, ist nach wie vor ungeklärt.



Aufgaben

- 1) Streichen Sie im folgenden die richtige Aussage an und begründen Sie diese Aussage.
 - A) Pflanzen und Tiere haben gleichzeitig das Festland besiedelt.
 - B) Tiere haben vor den Pflanzen das Festland besiedelt.
 - C) Pflanzen haben vor den Tieren das Festland besiedelt.
- 2) Nennen Sie heute vorkommende Tiergruppen, die schon seit dem Beginn des Erdaltertums existieren.
- 3) „Fische sind nicht gleich Fische“. Begründen Sie diese Aussage anhand des Textes.
- 4) Nennen Sie Beispiele für Anpassungsformen beim Übergang vom Wasser zum Leben an Land
 - bei Pflanzen und
 - bei Tieren.
- 5) Nennen Sie Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre einerseits und Atmosphäre und Lithosphäre andererseits im Paläozoikum.

Vertiefende Aufgaben

- 6) Diskutieren Sie die folgende Aussage: „Amphibien sind im Gegensatz zu Reptilien an das Leben im oder am Wasser gebunden“. Informieren Sie sich dabei über die Fortpflanzung von Amphibien (z. B. Frosch, Kröte oder Salamander) und Reptilien (z. B. Eidechse, Schlange, Schildkröte oder Krokodil).
- 7) Informieren Sie sich über die Art und Weise der Befruchtung
 - bei Sporenpflanzen (z. B. Farne oder Moose) und
 - bei Blütenpflanzen (z. B. Nadel-, Laubbaum oder krautige Blütenpflanze).Benötigen beide Pflanzengruppen Wasser zur Befruchtung?
- 8) Die Evolution der Landwirbeltiere ging von Fischen aus. Nennen Sie die Gruppe der Fische, welche als Stammform anzusehen ist und stellen Sie die charakteristischen Merkmale der heutigen fünf Wirbeltiergruppen (Fische, Amphibien, Reptilien, Säugetiere, Vögel) in einer Tabelle zusammen.

Expertengruppe 3: Die Erde im Mesozoikum (Erdmittelalter)

Der Großkontinent „Pangäa“ zerbricht

Fast alle größeren Teile der kontinentalen Kruste waren zu Beginn des Erdmittelalters, am Anfang der **Trias** (vor 251-199 Millionen Jahren), noch zusammengedrückt und bildeten den Großkontinent Pangäa. Im Vergleich zu heute lag der Meeresspiegel damals verhältnismäßig tief. Ein Großteil des Festlandes war weit entfernt vom Meer. Es herrschte daher im Innern des Kontinents ein trockenes (arides) Klima.

Mit dem **Jura** (vor 199-145 Millionen Jahren) begann der Großkontinent in einen nördlichen Teil Laurasia (mit Landmassen aus dem heutigen Nordamerika, Asien und Europa) und in einen südlichen Teil, (Gondwanaland) auseinander zu brechen. Dazwischen schob sich das Tethys-Meer. Der Meeresspiegel stieg an. Weite Teile des heutigen Mitteleuropas waren vom Meerwasser überflutet. Am Meeresgrund lagerten sich von den Flüssen mitgebrachte Schwebstoffe und die Kalkschalen von Muscheln, Schnecken und Armfüßern ab. Dieses Material ist im Laufe der Zeit versteinert. Durch Erdbewegungen wurden diese in Jahrtausenden gebildeten Sedimentgesteine hoch gedrückt. Heute sind sie in der Schwäbischen- und Fränkischen Alb und im Schweizer Jura vorwiegend als Kalkstein sichtbar. Dieses Gestein enthält viele Fossilien.

Am Ende der **Kreide** (vor 145-65 Millionen Jahren) brach Gondwana auseinander. Die damals dazu gehörenden Festländer Antarktis, Südamerika, Indien und Australien drifteten in verschiedene Richtungen. Nur Afrika blieb zurück. Dadurch wurden bestehende Pflanzen- und Tierpopulationen räumlich getrennt.

Ammoniten als Leitfossilien

Die Lebewesen im Erdmittelalter unterschieden sich erheblich von denen im Erdaltertum. Die Weichtiere (Mollusken) breiteten sich weiter aus und entwickelten sich in verschiedene Gruppen: in Muscheln, die in oder auf dem Meeresboden von organischen Stoffen lebten, in pflanzenfressende und räuberische Schnecken und vor allem in die zu den Kopffüßern gehörenden, räuberisch lebenden Ammoniten und Belemniten. Einige Ammoniten-Arten lebten nur in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum. Sie starben schon nach fast einer Million Jahre aus. Ihre Versteinerungen dienen den Erdwissenschaftler/innen heute als wichtige Leitfossilien (s. Abb. 5).

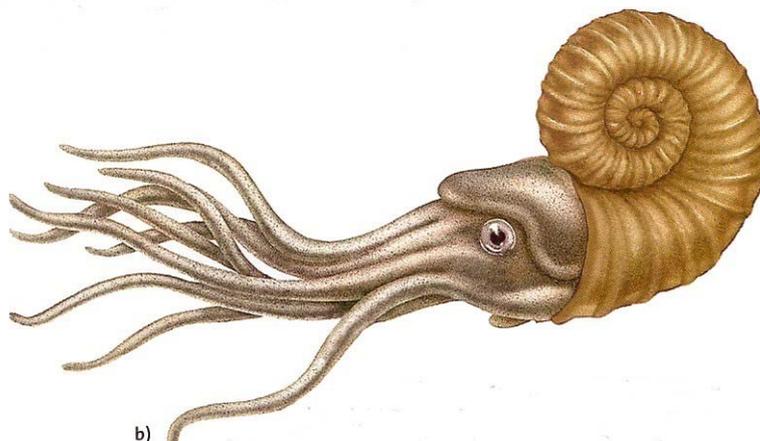


Abbildung 5: Ammonit. a) Gehäuse (Jura); b) Rekonstruktion. Ammoniten gehören zu den Tintenfischen (Kopffüßern). Das Gehäuse ist gekammert, in der vordersten Kammer sitzt das Tier (Wohnkammer). Größte Formen: Gehäusedurchmesser bis 2,5 m (Kreide) (Quelle: BAYRHUBER & KULL 2005: Linder Biologie).



Saurier leben im Wasser, in der Luft und an Land

Das Erdmittelalter war die große Zeit der Reptilien. Erste Saurier sind aus der **Trias** belegt. Von den zu den Reptilien gehörenden Schildkröten und Sauriern gingen einige vom Land wieder zurück ins Meer. Die Plesiosaurier hatten flügelartige Paddelbeine und wurden bis zu 12 m lang. Sie ernährten sich von Fischen.

Die Saurier entwickelten sich zur herrschenden Tiergruppe unter den Wirbeltieren. Sie machten als Fischsaurier (*Ichthyosauria*) den räuberischen Fischen Konkurrenz. In der Körpergestalt gleichen diese Fischsaurier mehr einem Delphin als einem Fisch. *Ichthyosauria* legten keine Eier, sondern brachten lebende Junge zur Welt.

Die Flugsaurier (*Pterosauria*) mit einer Flügelspannweite bis zu 11m hatten Flughäute zwischen dem fünften Finger und dem Rumpf. Wahrscheinlich benutzten sie ihre Flügel nur zum Start und segelten danach ohne Flügelschläge mit dem Luftstrom. Sie suchten im Flug vermutlich die Bodenoberfläche nach Aas ab. Wie die Vögel hatten auch die Flugsaurier hohle Knochen.

An Land nahmen die Dinosaurier fast alle ökologischen Nischen ein. Sie waren anfangs klein. Viele von ihnen blieben auch später unter einem Meter lang. Die Beine der Dinosaurier standen unter dem Körper. Dadurch konnten sie schnell laufen. Entgegen bisheriger Meinung wird heute angenommen, dass Dinosaurier homoiotherm ("gleichwarm") waren. Sie konnten also ähnlich wie Vögel und Säugetiere ihre Körpertemperatur regeln und daher auch in kühleren Tages- und Jahreszeiten aktiv sein. Dinosaurier brüteten ihre Eier aus und kümmerten sich anschließend um ihre Jungen, was fossile Nester nahe legen.

Dinosaurier mit vogelähnlichem Becken (*Ornithischia*) waren Pflanzenfresser. In der Gruppe der Dinosaurier mit echsenähnlichem Becken (*Saurischia*) gab es Pflanzen- und Tierfresser. Beide Gruppen enthielten Arten mit kurzen Vordergliedmaßen, die sich auf zwei Beinen fortbewegten. In beiden Gruppen entwickelten sich riesengroße Tiere. Es waren dies die größten und schwersten Landtiere, die es je auf der Erde gegeben hat. Der größte Dinosaurier, *Diplodocus*, war ein Pflanzenfresser. Aus seinen relativ kleinen Füßen schließt man, dass *Diplodocus* sich auf dem härteren Boden auf dem Festland bewegt hat. Aus der Anordnung von versteinerten Spuren wird gefolgert, dass es unter den Dinosauriern gesellig lebende Arten gab.

In der Pflanzenwelt herrschten seit der Trias die Nacktsamer (Gymnospermen) vor. Es waren Vorfahren unserer heutigen Nadelbäume (Koniferen), Palmfarnen (Cycadeen) und vom Ginkgo, der bis heute als lebendes Fossil überdauert hat (s. Abb. 8).

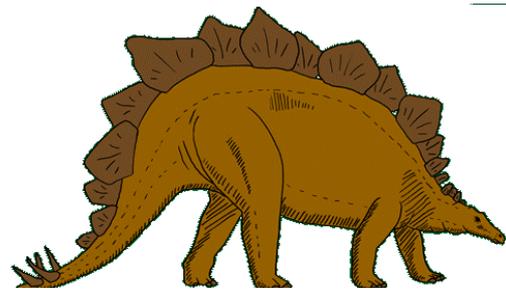


Abbildung 6: Stegosaurus (*Ornithischia*). (Grafik: www.dinosaurier-interesse.de).

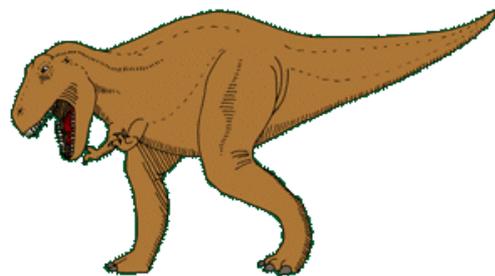


Abbildung 7: Tyrannosaurus Rex (*Saurischia*) (Grafik: www.dinosaurier-interesse.de).



Am Ende des Jura (weißer Jura) entwickelten sich die ersten Vögel. Im Solnhofen Plattenkalk wurde das Fossil eines *Archaeopteryx* entdeckt. Dieser urtümliche Vogel hatte schon Federn. Sein Skelett zeigt sowohl Reptilien- als auch Vogelmerkmale. *Archaeopteryx* hatte Kiefer mit Zähnen und eine verlängerte Schwanzwirbelsäule.

Die bereits in der Trias entstandenen Säugetiere führten etwa 200 Millionen Jahre ein Schattendasein neben den alles beherrschenden Sauriern. Sie waren verhältnismäßig klein, durchschnittlich nicht größer als eine Ratte.

Die Kreide endet mit einem Einschlag eines Asteroiden

Die Epoche der Kreide war eine Übergangszeit. Große pflanzenfressende Entenschnabelsaurier und Nasornsaurier lebten zusammen mit dem räuberischen *Tyrannosaurus* in den warmen Gebieten auf der Nordhalbkugel. Knochenfische, fleischfressende Krebstiere und moderne Vertreter von Muscheln, Schnecken, Schlangen, Schildkröten, Eidechsen, Krokodilen und Salamandern begannen sich auszubreiten. Die Säugetiere blieben weiterhin klein. Unter den einzelligen Organismen im Meer machten Kieselalgen (Diatomeen) und die mit einer gekammerten Kalkhülle versehenen Foraminiferen eine evolutionäre Expansion durch. Abgestorbenes kalkiges Kleinstplankton dieser Tiere fiel auf den Meeresboden. Daraus entstanden mächtige Ablagerungen von Schreibkreide, die man heute an der Südküste Englands und auf der Insel Rügen findet.

Unter den Pflanzen entwickelten sich die Bedecktsamer (Angiospermen). Der sich in der Erdneuzeit fortsetzende Erfolg dieser Blütenpflanzen beruht darauf, dass die in den Samen gespeicherten Nährstoffe schnell dem keimenden Samen zur Verfügung gestellt werden können. Außerdem entstanden Symbiosen zwischen vielen Blütenpflanzen und den sich ebenfalls stark entwickelnden Insekten.

Zum Ende der Kreidezeit schlug ein Asteroid im Gebiet des Golfes von Mexiko (Chicxulub-Krater) auf die Erde. Dabei wurden massenhaft Staub, Wasser und Schwefeldioxid in die Atmosphäre geschleudert. Als Folge verdunkelte sich die Erde, weniger Sonnenlicht erreichte die Erdoberfläche, sie kühlte ab. Aus Schwefeldioxid und Wasser in der Atmosphäre entstand saurer Regen. Ein später auftretender Treibhauseffekt führte zur starken Erhitzung der Erdoberfläche. Diese Erscheinungen trugen vermutlich zum Massensterben, am Ende der Kreide bei, dem vor allem die Dinosaurier, aber auch die meeresbewohnenden Reptilien, Ammoniten, Belemniten und die auf dem Land lebenden bis zu 15 m langen Krokodile zum Opfer fielen. Ein Teil der Tiergruppen verschwand allerdings schon vor dem Ende der Kreide, bei anderen Gruppen nahm die Artenzahl allmählich ab. Dies dürfte durch eine Klimaänderung verursacht worden sein, deren Wirkung durch den Einschlag des Asteroiden verstärkt wurde.



Abbildung 8: Ginkgo. Die Gabelnervigkeit der zweilappigen Blätter erinnert an Farne.
(Foto: <http://www.maximilian-weinzierl.de>)



Aufgaben

- 1) Begründen Sie, weshalb das Klima des inneren Festlandteiles der Pangäa trocken (arid) war.
- 2) Diskutieren Sie, weshalb die Säugetiere über 200 Millionen Jahre klein und unscheinbar blieben und sich erst nach der Kreide in eine Vielzahl von Lebensformtypen entwickelt haben.
- 3) Begründen Sie, weshalb nach dem großen Aussterbeereignis am Ende der Kreide nicht die übrig gebliebenen kleinen Reptilien, sondern die übrig gebliebenen kleinen Säugetiere eine erfolgreiche Radiation durchlaufen haben.
- 4) Nennen Sie Ursachen für die erfolgreiche Ausbreitung der bedecktsamigen Blütenpflanzen (Angiospermen) seit der Kreide.
- 5) Zeigen Sie, dass Dinosaurier Brutpflege betrieben haben.
- 6) Nennen Sie Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre einerseits und den anderen Sphären der Erde im Mesozoikum.

Vertiefende Aufgaben

- 7) Definieren Sie den Begriff „lebendes Fossil“ und recherchieren Sie Beispiele aus der Tier- und Pflanzenwelt.
- 8) Einige Pflanzen- und Tierarten gelten als Leitfossilien:
 - Welche Eigenschaften sollte eine fossile Art haben, damit sie von den Geowissenschaftlern als Leitfossil benutzt werden kann?
 - Welche Erkenntnisse können Wissenschaftler aus dem Vorhandensein bestimmter Leitfossilien in einer Gesteinsschicht ziehen?
- 9) Der „Urvogel“ *Archaeopteryx* wird auch als Mosaikform bezeichnet. Definieren Sie den Begriff Mosaikform und finden Sie weitere Beispiele für solche Tiere oder Pflanzen.



Expertengruppe 4: Die Erde im Känozoikum (Erdneuzeit)

Unterteilung der Erdneuzeit

Die Erdneuzeit (Känozoikum) wurde früher in das mehr als 60 Millionen Jahre lange Tertiär und in das knapp 2 Millionen Jahre lange Quartär eingeteilt. Heute unterteilt man das Känozoikum in zwei etwa gleich lange Abschnitte, in das **Paläogen** (Beginn vor 65 Millionen Jahren), das die Serien Paläozän, Eozän und Oligozän umfasst und in das **Neogen** (Beginn vor 23 Millionen Jahren) mit den Serien Miozän, Pliozän, Pleistozän und Holozän.

Die rasante Entwicklung der Blütenpflanzen

Beim Übergang vom Erdmittelalter zur Erdneuzeit veränderte sich der Charakter der Landflora. Die große Radiation der Blütenpflanzen setzte sich fort. Dabei entstanden die modernen Familien der Blütenpflanzen. Ein bedeutender Entwicklungsschritt war die Entstehung der Gräser. Als Windbestäuber sind Gräser nicht auf Insekten angewiesen. Durch Bildung von Ausläufern, einer Form von ungeschlechtlicher Fortpflanzung, können Gräser große Gebiete erobern. Im Gegensatz zu den anderen Pflanzen liegt bei Gräsern das Wachstumsgewebe nicht an der Spitze der Pflanze sondern an der Basis in Bodennähe. Sie können wieder nachwachsen, nachdem sie von Tieren abgeweidet oder vom Menschen abgemäht worden sind. Gräser sind auch dort erfolgreich, wo große Herden von Huftieren weiden, wie auf den Savannen und Steppen.

Säugetiere lösen die Saurier ab und entfalten sich

Zu Beginn des **Paleozäns** (vor 65-55 Millionen Jahren) waren die Säugetiere klein, die größten unter ihnen nicht größer als ein mittelgroßer Hund. Sie ähnelten in ihrer Gestalt einer Ratte. Ihre primitiven, d.h. ursprünglich gebauten Gliedmaßen hatten noch fünf Finger bzw. Zehen. Bei der Fortbewegung berührten der Handteller und die Ferse den Boden.

Kurze Zeit nach Beginn des **Eozäns** (vor 55-34 Millionen Jahren) diversifizierten sich die Säuger so weit, dass schon die meisten modernen Ordnungen existierten. Fledermäuse flatterten durch die Nacht, große Wale durchschwammen die Meere, kleine Primaten (Affen) kletterten auf den Bäumen. Unabhängig voneinander entwickelten sich Unpaarhufer (Pferde, s. Abb. 9, Nashörner) und Paarhufer (Rinder, Antilopen, Schafe, Ziegen, Schweine, Kamele), ferner Rüsseltiere, Nagetiere (Mäuse, Hamster, Hörnchen, Biber), Hasenartige (Hasen, Kaninchen), Raubtiere (Hunde, Katzen, Bären, Marder), Insektenfresser (Spitzmäuse, Maulwürfe). Unter den Nashornverwandten lebte eine Art mit einer Schulterhöhe bis zu 5,5 m. Es ist wahrscheinlich das größte Säugetier, das je existierte. Damit hatten die Säugetiere alle Lebensräume besetzt, die im Erdmittelalter von Dinosauriern besetzt waren. Etwas früher als diese Säugetiere mit einer Plazenta haben sich die ebenfalls zur Gruppe der Säugetiere gehörenden Beuteltiere mit Känguru und Koala sowie die Kloakentiere mit dem Schnabeltier von den gemeinsamen Säugervorfahren abgespalten.



Abbildung 9: Fossil eines Urpferdchens (*Propalaeotherium parvulum*) aus dem Eozän (ca. 50 Mio. Jahre). Diese nur fuchsgroßen Tiere sind aufgrund vieler übereinstimmender Merkmale in die Verwandtschaft mit heutigen Pferden einzuordnen. (Foto: E. HAUPT / B. SIMON, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung)

Die modernen Familien der Säugetiere entstehen

Im **Oligozän** (vor 34 - 23 Millionen Jahren) setzte sich die Anpassung an die modernen Verhältnisse fort. Viele Familien aus dem Eozän starben aus. Zahlreiche noch heute lebende Gruppen breiteten sich aus, wie die Nagetiere mit z.T. winzigen Arten einerseits und die schweren Elefanten als größte heute lebende Landsäugetieren andererseits. Die Familie der Pferde verschwand aus Eurasien. Sie überlebte in Nordamerika und besiedelte erst später wieder Eurasien. Der zu den Primaten gehörende *Aegyptopithecus*, ein auf Bäumen lebender Verwandter unserer Menschenvorfahren, erinnert in seinem Aussehen an eine heutige Meerkatze. Etliche der damals lebenden Vögel waren bis zu zwei Meter große Stelzvögel. Sie ähnelten den heutigen Störchen und Reiher.

Im Verlauf des Neogens änderten sich die Lebensbedingungen auf der Erde erheblich. Zu den bedeutendsten Veränderungen zählen die Ausbreitung der Gräser und der Kräuter sowie die Entwicklung der Wirbeltiere hin zu modernen Formen. Frösche, Schlangen, Singvögel, Wale, Ratten und Mäuse entfalten sich in auffälliger Weise. Aus den Vorfahren der heutigen Menschenaffen entwickelten sich auch die Vorfahren der ersten Menschen.

Entstehung von Savannen und die Ausbreitung von Gräsern und Huftieren

Im **Miozän** (vor 23 - 5 Millionen Jahren) sanken die Temperatur und die Niederschlagsmengen in weiten Gebieten der Erde. Diese Klimaverschlechterung führte zur Abnahme der Waldflächen. Dadurch entstanden



neue Lebensräume für Kräuter. Viele dieser niedrig wachsenden unverholzten Pflanzen sind einjährig. Sie sterben nach Freisetzung ihrer Samen ab. Andere überdauern ungünstige Jahreszeiten in unterirdischen Organen. Sehr erfolgreich in der Ausbildung neuer Arten waren die Korbblütler (*Asteraceae*) mit heute ungefähr 13.000 Arten und die Gräser mit etwa 10.000 Arten.

Zusammen mit den sich ausdehnenden offenen Landschaften in Form von Savannen und lichten Waldgebieten breiteten sich viele neogene Säugetiergruppen aus. Einige der großen pflanzenfressenden Huftiere, wie Antilopen, Rinder und Pferde, waren an eine rasche Fortbewegung angepasst und auch an die Ernährung von den harten, Kieselsäure enthaltenden Gräsern. Bei diesen Pflanzenfressern entwickelten sich hochkronige, ständig nachwachsende Zähne. Zusammen mit den Pflanzenfressern entwickelten sich auch deren Feinde unter den Hunde- und Katzenartigen. Diese modernen Greifsäuger waren an die Jagd in offenem Gelände besser angepasst als ihre aussterbenden Vorfahren.

Die modernen Eiszeiten beginnen, Menschen breiten sich auf der Erde aus

Zu Beginn des **Pliozän** (vor 5 - 1,8 Millionen Jahren) herrschte auch in den höheren Breiten ein verhältnismäßig warmes Klima. In der Mitte des Pliozäns kühlte die Nordhalbkugel ab. Die modernen Eiszeiten begannen. Stadien maximaler Vereisung mit sinkendem Meeresspiegel folgten wärmere Epochen (Interglaziale bzw. Zwischeneiszeiten), in denen die Gletscher zurückgingen und der Meeresspiegel wieder anstieg. Durch das Zurückweichen des Meeres während einer solchen Vereisung entstand eine Landbrücke zwischen Nordamerika und Asien im Bereich der Beringstraße. Über diese Landbrücke gelangten z. B. Säugetiere in die Neue Welt. Von Amerika nach Eurasien sind Pferde gewandert. Fossilien von den vor 3-4 Millionen Jahren lebenden und aufrecht gehenden *Australopithecus*-Arten, ausgestorbenen frühen Verwandten des Menschen, hat man bisher nur in Afrika gefunden. Der moderne Mensch *Homo sapiens* tauchte vor mehr als 250 000 Jahren in Afrika auf.

Indizien für die Klimaveränderungen im **Pleistozän** (Beginn vor 1,8 Millionen Jahren) sind fossil erhaltene Pollen vorwiegend von Windbestäubern. In Norddeutschen Mooren findet man mehrere Tausend Jahre alte Pollen von Birken und Kiefern. Daraus lässt sich schließen, dass Norddeutschland zu jener Zeit ein boreales Klima hatte, ähnlich wie heute in Skandinavien.

Die jüngste geologische Serie, das **Holozän**, begann vor 0,01 Millionen Jahren, also mit der letzten Nacheiszeit. Sie dauert bis heute an.



Aufgaben

- 1) Die Erdneuzeit wird als Zeitalter der Säugetiere und der Gräser bezeichnet. Begründen Sie diese Aussage.
- 2) Äußern Sie sich zu der These, dass sich Huftiere in Savannen und Steppen deshalb so erfolgreich und in größeren Herden ausbreiten konnten, weil diese Landschaften vorwiegend mit Gräsern bewachsen sind.
- 3) Die Radiation der Blütenpflanzen hatte eine Radiation verschiedener Tiergruppen zur Folge, so der Singvögel, der Mäuse, Ratten, der Schlangen und besonders der Insekten wie Schmetterlinge und Bienen. Begründen Sie diese Erscheinung.
- 4) Begründen Sie, weshalb Pollen Hinweise auf das Klima vor Tausenden von Jahren in einem bestimmten Gebiet geben.
- 5) Nennen Sie Beziehungen zwischen der Biosphäre und den anderen Sphären der Erde im Känozoikum.

Vertiefende Aufgaben

- 6) Definieren Sie mit Hilfe weiterer Literatur den Begriff „Coevolution“ und verdeutlichen Sie diesen Begriff an einem Beispiel.
- 7) Plazentatiere, Beuteltiere und Kloakentiere sind verschiedene Gruppen innerhalb der Säugetiere. Stellen Sie tabellarisch Gemeinsamkeiten und Unterschiede der drei Gruppen bezüglich der Fortpflanzung und Entwicklung heraus und erläutern Sie, weshalb Beuteltiere heute fast nur in Australien vorkommen.
- 8) Diskutieren Sie, weshalb sich einjährige Pflanzen behaupten konnten, obwohl sie bereits nach einer Vegetationsperiode absterben.

Aufgaben für die Stammgruppen

- 1) Erstellen Sie gemeinsam eine graphische Übersicht oder eine Präsentation über die Erdzeitalter mit den darin enthaltenen geologischen Perioden. Markieren Sie wichtige erdgeschichtliche Ereignisse sowie das Auftreten oder Aussterben von Pflanzen- und Tiergruppen. Achten Sie bei der Gestaltung darauf, dass die Zeitabstände maßstabsgetreu sind. Es ist günstig, für die letzten erdgeschichtlichen Epochen eine gesonderte Zeitleiste zu entwickeln.
- 2) Informieren Sie sich über die Bedeutung der Begriffe „adaptive Radiation“ und „ökologische Nische“ und stellen Sie der Stammgruppe jeweils kurze Beispiele aus jedem der Texte vor.
- 3) Überprüfen Sie, inwiefern es einen Zusammenhang zwischen dem Aussterben einiger Tiergruppen und der adaptiven Radiation oder dem Neuaufreten anderer Tiergruppen geben kann.
- 4) Vergleichen Sie das zeitliche Auftreten von Massenaussterben mit der Dauer eines Erdzeitalters bzw. mit dem Beginn eines neuen Erdzeitalters und deuten Sie das Ergebnis.
- 5) Diskutieren Sie die These, dass die Evolution der Lebewesen die Lebensbedingungen auf der Erde stetig veränderte und somit den weiteren Verlauf der Evolution beeinflusste. Belegen Sie Ihre Argumentation an Beispielen.

Baustein 5: Kohlebildung und das Klima im Karbon

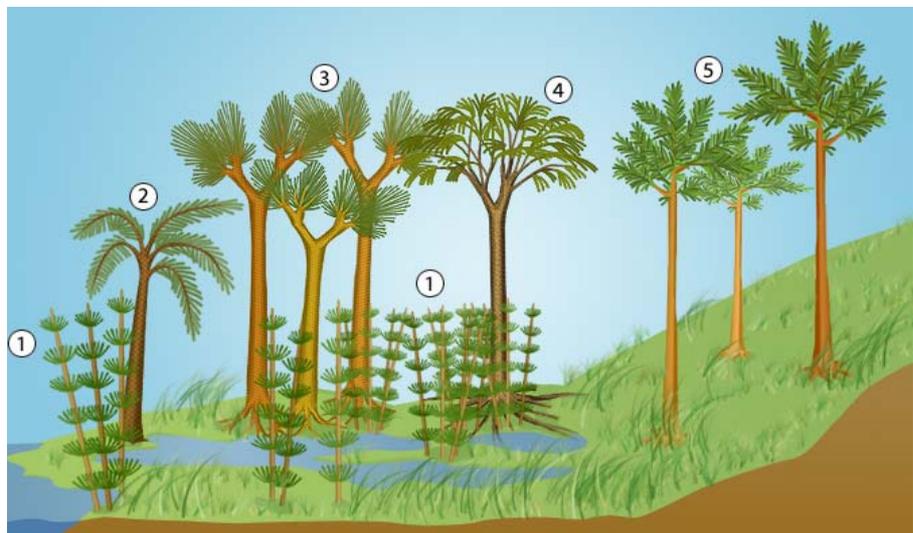
Entstehung von Steinkohle

1 Umweltbedingungen und Pflanzen in den Steinkohlewäldern

Die heutigen Teile Mitteleuropas und Nordamerikas mit ihren mächtigen Steinkohleschichten (Flözen) lagen zur Zeit des Karbon (vor 359 - 299 Mio. Jahren) in der Nähe des Äquators. In riesigen feuchtwarmen Sumpfniederungen gediehen im Oberkarbon baumartige Sporenpflanzen aus den Gruppen der Bärlappgewächse, Farne, Schachtelhalme und Samenfarne. Außerdem kamen die zu den Nacktsamern gehörenden Cordaiten vor. Die für die Bildung von Steinkohle wichtigsten Pflanzen in den Kohlesümpfen gehörten zu den Bärlappgewächsen. Dies waren v.a. der Schuppenbaum mit einer Wuchshöhe bis zu 30 m und der Siegelbaum mit einer Höhe bis zu 40 m. Die bis zu 20 m hohen baumartigen Calamiten (Schachtelhalme) waren wie die bis zu 30 m hohen Cordaiten ebenfalls an der Bildung von Steinkohle beteiligt (s. Abb. 1).

Abb. 1: Rekonstruktion einer karbonischen Landschaft mit typischer Karbonflora.

- 1: Calamiten (Schachtelhalme),
- 2: Baumfarne,
- 3: Siegelbäume,
- 4: Schuppenbaum,
- 5: Cordaiten.



Aus abgestorbenen Pflanzen entsteht Steinkohle

Werden abgestorbene Pflanzen von Wasser und/oder Sedimenten überdeckt, so geraten sie unter Luftabschluss, wie das auch noch heute in Mooren geschieht. Durch den Druck später auflagernder Sedimente setzt ein als „Inkohlung“ bezeichneter Prozess der chemischen Umwandlung ein. Die dabei entstehenden flüssigen und gasförmigen Stoffe werden herausgedrückt. Es bleibt vorwiegend fester Kohlenstoff zurück. Aus heterogenem, verschiedenfarbigem Pflanzenmaterial entsteht so die homogen aussehende schwarze Steinkohle. Stark mit Sediment verunreinigte Kohle enthält noch deutlich erkennbare fossilisierte Teile von Pflanzen, wie Stämme und Blätter. Damit die großen Massen an Steinkohle entstehen konnten, mussten im Karbon riesige Mengen an pflanzlicher Biomasse erzeugt worden sein. Für die Entstehung von einem Kubikmeter Kohle sind mehrere Kubikmeter Holz notwendig. So konnten zunächst Torf und Braunkohle und viele Millionen Jahre danach unter hohem Druck auch Steinkohle entstehen.

Unter heutigen Bedingungen würde es in den Regenwäldern in der Nähe des Äquators nicht zu solch gewaltigen Ablagerungen abgestorbener Pflanzenteile kommen, wie seinerzeit im Karbon oder fast 200 Millionen Jahre später während der Kreide, als die „Deisterkohle“ südlich von Hannover gebildet wurde. Es wird vermutet, dass es im Karbon keine oder nur wenige Pilze gab, die abgestorbene Pflanzen zersetzen konnten. Abgestorbene Pflanzen werden heute normalerweise von Tieren aufgefressen oder von Mikroorganismen

abgebaut (Destruenten). Je nach Höhe der Temperatur und Luftfeuchtigkeit wird ein umgestürzter Baum mehr oder weniger schnell zersetzt. In dem das ganze Jahr über feuchtwarmen tropischen Regenwald ist ein auf dem Boden liegender Baum normalerweise schon nach einem Jahr von Pilzen, Termiten und anderen von totem Holz lebenden Tieren abgebaut. (Zum Vergleich: In den kalten relativ trockenen arktischen und subarktischen Nadelwäldern mit kurzem Sommer dauert es viele Jahre, bis eine abgestorbene Kiefer zersetzt ist.)

Anstieg und Rückgang des Meeresspiegels und die Folgen für die Steinkohlenflöze

Im Karbon wechselte mehrmals die Höhe des Meeresspiegels. Bei jedem Anstieg des Meeresspiegels (Transgression) wurden Gebiete mit Steinkohlewäldern überschwemmt. Während der Überflutung setzten sich auch Sedimente ab. Nach dem Rückzug des Meeres (Regression) dehnten sich in dieser Region erneut Wälder aus. Aus dem vor einer Transgression gewachsenen Holz entstand Steinkohle. Die während einer Transgression abgelagerten Sedimente versteinerten. So lässt sich erklären, dass sich Steinschichten zwischen den Kohleschichten befinden.

Gegen Ende des Karbons stießen zwei große Kontinentalplatten gegeneinander, Gondwana und Euramerika. Durch diese Kollision wurde in Europa das Variskische Gebirge aufgefaltet. Als Folge dieser Auffaltung liegen im Ruhrgebiet die meisten Kohleflöze nicht wie ursprünglich horizontal, sondern sie sind schräg gestellt und auch teilweise gegeneinander versetzt

Die Biosphäre als prägende Kraft bei der Entstehung von Steinkohle

Am Beispiel der Kohlebildung im Karbon lassen sich Wechselwirkungen zwischen der Biosphäre und den drei anderen Sphären der Erde, der Atmosphäre, der Lithosphäre und der Hydrosphäre verdeutlichen. Zu Beginn des Karbons hatte die Atmosphäre einen deutlich höheren Gehalt an Kohlenstoffdioxid als heute (vgl. Abb. 2). Auf der Erde herrschte ein Treibhausklima. Die Polkappen waren eisfrei. Durch das gewaltige Wachstum von Pflanzen im Karbon wurde der Atmosphäre viel CO₂ entzogen. Dieser in den Pflanzen gespeicherte Kohlenstoff gelangt wieder als CO₂ in die Atmosphäre zurück, wenn die abgestorbenen Pflanzen von Mikroorganismen zersetzt werden (Kurzzeitkreislauf des Kohlenstoffs). Der in abgelagerter Kohle in der Lithosphäre eingebettete Kohlenstoff ist dem Kurzzeitkreislauf entzogen. Als Folge davon sinkt die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre. Weniger CO₂ in der Atmosphäre bedeutet weniger Absorption von Sonnenenergie in der Atmosphäre. Als Folge davon kommt es zur Abkühlung.

Zum Ausgang des Karbons bildeten sich Eiskappen an den Polen der Erde und das Klima ging in ein „Eishausklima“ über.

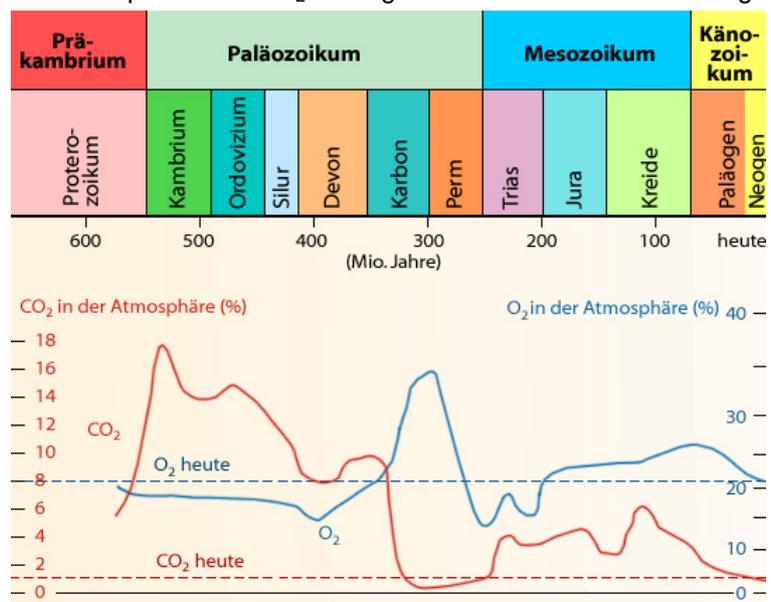


Abb. 2: Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt der Erdatmosphäre im Verlauf der Erdgeschichte. Neben absoluten Werten (Skalen links und rechts) sind zum Vergleich auch die heutigen Werte angegeben (rote und blaue Strichlinien) (verändert nach VAN ANDEL 1994).



② Aufgaben:

- 1) Nennen Sie Voraussetzungen für die Bildung von Steinkohle.
- 2) Erläutern Sie, ob es unter heutigen Bedingungen im Ruhrgebiet zur Entstehung von Steinkohle kommen könnte.
- 3) Stellen Sie die Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Klima am Beispiel von Kohlenstoffdioxid schematisch in einem Wirkungsdiagramm dar.
- 4) Nennen Sie Gründe dafür, dass es im Karbon zu einer Klimaveränderung auf der Erde gekommen ist.
- 5) Beschreiben Sie die Änderung des Sauerstoffgehaltes der Atmosphäre aufgrund des starken Pflanzenwachstums in den Steinkohlewäldern und nennen Sie Gründe für die Änderung.



Baustein 5: Kohlebildung und das Klima im Karbon

Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre im Karbon

Lebewesen sind nicht nur von anderen Lebewesen sondern auch von ihrer abiotischen Umgebung abhängig. Sie unterliegen Einflüssen des Klimas, der Luft (Atmosphäre), des Bodens (Lithosphäre) und des Wassers (Hydrosphäre). Lebewesen tragen umgekehrt aber auch zur Veränderung ihrer abiotischen Umwelt bei. Sie nehmen Stoffe aus ihrer Umgebung auf und geben Stoffe an ihre Umgebung ab. Das erfolgt nicht nur zu Lebzeiten, sondern auch nach dem Tod. Dabei entstehen Stoffkreisläufe. Die Wechselwirkungen zwischen den Sphären begannen schwach ausgeprägt schon bei der Entstehung der ersten Lebewesen. Sie wurden immer häufiger, je mehr Biomasse entstand und setzen sich bis heute fort. Große Veränderungen bewirkte die sprunghafte Entwicklung der Landpflanzen im Zeitalter des Karbons (359-299 Mio.). Sein Name (lat. *carbo*, Kohle) leitet sich aus den in dieser Zeit existierenden riesigen Steinkohlewäldern ab.

Die Fotosynthese beeinflusst die abiotischen Sphären

Die Biosphäre beeinflusst z.B. den CO₂-Gehalt des Meeres und der Atmosphäre. Nimmt die Fotosyntheserate und damit auch die Biomasse der Pflanzen zu, wird der Atmosphäre verstärkt CO₂ entzogen. Ein geringer CO₂-Gehalt in der Atmosphäre bewirkt einen geringen natürlichen Treibhauseffekt: Es wird vermehrt Wärme von der Erdoberfläche in den Weltraum abgestrahlt, die Temperatur sinkt ("Kühlhausklima"). Immer mehr Niederschlag fällt nun als Schnee. In Polnähe oder auf den Kuppen hoher Gebirge wird der Schnee zu Eis umgewandelt. Das in Form von Eis gebundene Wasser geht dem Wasserkreislauf für lange Zeit verloren. Da es sich dabei um riesige Wassermassen handelt, sinkt der Meeresspiegel. Hoher CO₂-Gehalt der Atmosphäre führt dagegen zu einem „Treibhausklima“: Je höher der Anteil an CO₂, desto mehr von der Sonne eingestrahelte und in Wärme umgewandelte Energie bleibt in der Atmosphäre zurück. Die Temperatur steigt an, der Meeresspiegel ebenfalls.

Mit der Zersetzung einer Pflanze nach ihrem Tod durch Pflanzenfresser bzw. Mikroorganismen und Pilze gelangt der in den organischen Stoffen gespeicherte Kohlenstoff in Form von CO₂ wieder in die Luft oder bei Wasserpflanzen in das umgebende Wasser (Kohlenstoffkreislauf). Mit der Besiedlung des Festlandes durch Pflanzen traten weitere Wechselwirkungen zwischen der Biosphäre und den drei anderen Sphären der Erde, der Atmosphäre, der Lithosphäre und der Hydrosphäre, auf. Abgestorbene Biomasse wird von Mikroorganismen zersetzt. In Wechselwirkung mit dem darunter liegenden Ausgangsgestein entstehen Humus und Böden.

Entstehung von Kohle und das Klima im Karbon (359-299 Mio.)

Im frühen Paläozoikum war die CO₂-Konzentration um ein Vielfaches höher als heute (vgl. Abb. 1). Das Klima war deshalb wärmer, und die Erde hatte damals keine polaren Eiskappen. Nach der pflanzlichen Besiedlung des Festlandes ab dem Ende des Silurs und der damit zunehmenden Fotosynthese sank der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre. Die Ausdehnung der Vegetation auf dem Land erreichte im Karbon einen Höhepunkt. Die CO₂-Konzentration sank daher im Karbon deutlich und erreichte etwa heutige Werte (vgl. Abb. 1). Das vorher herrschende Treibhausklima ging im Verlauf des Karbons in ein „Eishausklima“ über. Die Temperaturen sanken, Eiskappen bildeten sich an den Polen, der Meeresspiegel sank.

Die Pflanzen der riesigen Wälder im Karbon wurden nach ihrem Absterben nicht zersetzt. Es wird vermutet, dass es zu jener Zeit keine oder nur wenige Pilze gab, welche die abgestorbenen Pflanzen zersetzen. So

entstanden aus den Pflanzenresten zunächst Torf und Braunkohle sowie einige Millionen Jahre danach auch Steinkohle.

Als Folge vermehrten Pflanzenwachstums und damit einer hohen Fotosyntheserate, nahm im Karbon der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre stark zu (s. Abb. 1). Dies hatte Auswirkungen auf die Entwicklung und Aktivität von Tieren und auch Einfluss auf die Oxidationsrate von eisenhaltigen Mineralen in Gesteinen. Beispielsweise wurde die Entwicklung von Rieseninsekten mit einer Flügelspannweite bis zu 80 cm möglich.

Durch Pflanzen wird auch der Wasserhaushalt beeinflusst. Eine Zunahme der Vegetation verstärkt die Verdunstung, erhöht die Luftfeuchtigkeit und damit die lokalen Niederschläge. Diese Zusammenhänge werden im tropischen Regenwald deutlich, wo es fast täglich regnet. Geht dagegen die Vegetation zurück, wird es zunehmend trockener, und die Niederschläge werden geringer.

Durch das kühlere und trockenere Klima im ausgehenden Karbon und zu Beginn des Perm verringerte sich die Geschwindigkeit der Verwitterung von Kalkstein, es wurde also weniger Kohlenstoffdioxid aus der Lithosphäre freigesetzt. Auch dies trug zur Abnahme des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre bei, so dass sich auch die Bedingungen der Fotosynthese verschlechterten. Weiterhin trockneten die Sumpfgebiete in den Steinkohlewäldern aus. Dazu trug die Bildung des Superkontinents Pangäa bei. Dadurch nahmen die Trockengebiete zu und die Flachmeergebiete ab. Als Folge der Trockenheit konnte kein Torf mehr entstehen. Die abgestorbenen Pflanzen wurden mikrobiell zersetzt und das entstehende Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre abgegeben. Dadurch wurde ein erneuter Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre eingeleitet.

Wahrscheinlich aufgrund der Temperaturveränderung starben viele Arten aus. Nun konnten sich an Trockenheit angepasste Lebewesen entfalten. Kohle konnte unter diesen Bedingungen nicht mehr entstehen.

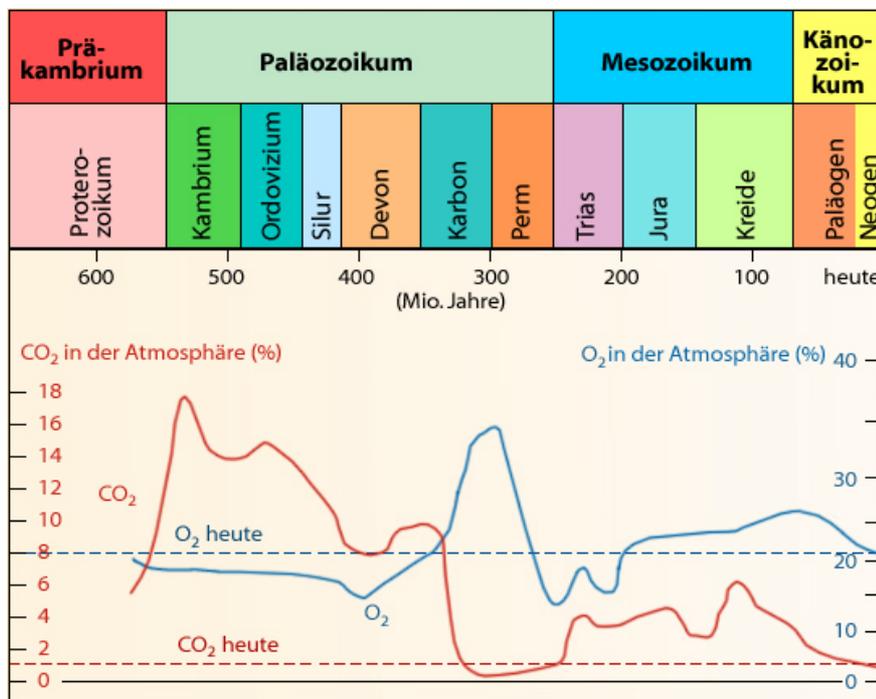


Abb. 1: Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt der Erdatmosphäre im Verlauf der Erdgeschichte. Neben absoluten Werten (Skalen links und rechts) sind zum Vergleich auch die heutigen Werte angegeben (rote und blaue Strichlinien). (verändert nach VAN ANDEL 1994)



② Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie die klimatischen Veränderungen während des Karbons und stellen Sie deren Ursachen und deren Folgen dar.
- 2) Nennen Sie weitere Wechselwirkungen zwischen den Sphären der Erde im Karbon.
- 3) Erläutern Sie, welche Folgen ein trockenes Klima für die Konzentration von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre und für die Temperatur auf der Erdoberfläche hat.



Baustein 6: Die Grube Messel - eine Goldgrube für Paläontolog(inn)en

❶ Die Grube Messel - vom Steinbruch zum Weltkulturerbe

Ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurde Ölschiefer 35 km südöstlich von Frankfurt am Main abgebaut. Als sich der Abbau wirtschaftlich nicht mehr lohnte, sollte diese bei Messel gelegene Grube mit Müll gefüllt werden. Doch in dem Ölschiefer bei Messel waren Fossilien bis dahin unbekannter Tiere frei gelegt worden. Ein heftiger Streit entbrannte zwischen Anhängern der wirtschaftlichen Nutzung als Mülldeponie für das dicht besiedelte Rhein-Main-Gebiet und den Befürwortern und Bürgerinitiativen für die Erhaltung der Grube mit einmaligen Fossilien. Das Land Hessen übernahm mit hohem finanziellen Aufwand das Gelände, und die UNESCO erklärte 1995 die Fossilagerstätte in Messel zum Weltkulturerbe.

Im Ölschiefer von Messel sind in einzigartiger Weise Teile von Pflanzen und Fossilien von Fischen, Amphibien, Reptilien, Vögeln, Säugetieren und Insekten erhalten, die im Eozän lebten. Bei einigen der aus dem Ölschiefer präparierten Tiere sind außerdem die Haut mit Haaren und Federn und sogar der Mageninhalt so gut erhalten, dass Wissenschaftler/innen Schlüsse über die Lebensweise der damaligen Tiere ziehen können.

Heute wissen wir, weshalb vor 50 Mio. Jahren eine Vielfalt von subtropischen und tropischen Tieren im Gebiet des heutigen Mitteleuropa gelebt haben. Man kann auch den guten Erhaltungszustand der Fossilien erklären.

Wie kam es zu den vielen fossilisierten Tieren in Messel?

Auf der Erde herrschte im Eozän (vor 55 – 34 Mio. Jahren) ein warmes ausgeglichenes Klima mit einer Temperatur von mehr als 20 °C im Jahresmittel. Europa war zu jener Zeit ringsum von Meeren umgeben und gleichzeitig durch Meeresarme zergliedert. So konnten sich verschiedene lokale Populationen von Tieren und Pflanzen entwickeln. Um die Wende vom Paläozän zum Eozän gab es eine globale Meeresspiegel-senkung. Als Folge davon entstanden Landbrücken von Nordamerika über die Beringstraße nach Asien und von Nordamerika über Grönland nach Europa. Eine kurzzeitige Landverbindung überbrückte außerdem das Thetys-Meer zwischen Europa und Afrika. So konnten Tiere zwischen den Kontinenten wandern.

Aktuelle Forschungsbohrungen und geophysikalische Untersuchungen belegen, dass die Geschichte der berühmten Fossilagerstätte bei Messel mit einer Naturkatastrophe vor etwa 50 Mio. Jahren begann. Ansteigendes etwa 1000 Grad heißes Magma kam mit Grundwasser unter der Erdoberfläche in Kontakt. Die daraufhin erfolgenden Wasserdampfexplosionen hinterließen einen tiefen Krater, der sich bald mit Wasser füllte. Einzellige Grünalgen vermehrten sich zunächst. Sie starben massenhaft ab, nachdem die Nährstoffe im See verbraucht waren. Bei der Verwesung der Algen wurde der im Wasser gelöste Sauerstoff aufgebraucht. Die tieferen Wasserschichten wurden sauerstofffrei und somit lebensfeindlich. Kraterwälle verhinderten eine Umschichtung des Wassers durch Stürme und verhinderten auch eine Sauerstoffeintragung durch Fließgewässer. Gelangten Pflanzenreste und Tierkadaver in den See, wurden sie in den Faulschlamm des Seebodens eingebettet. Sie konnten wegen des Sauerstoffmangels nicht verwesen. Aus den Seesedimenten bildete sich im Laufe von Jahrmillionen ein Ölschiefer, der reich an organischen Substanzen ist und viele Fossilien enthält.

Konservierung abgestorbener Lebewesen

Der Erhaltungszustand der Messeler Fossilien ist außergewöhnlich gut. Aus den Skelettresten lässt sich die vollständige Körpergestalt rekonstruieren. Von manchen Säugetierarten wurden trüchtige Weibchen mit ungeborenen Föten gefunden. Eine Besonderheit von Messel sind die erhaltenen Konturen der Weichteile. Die Körperumrisse sind als schwarze Schatten im Gestein abgebildet. So sind die äußeren Ohren von Säugern, einzelne Haare im Fell und sogar die Flughäute von Fledermäusen zu erkennen. Dieser „Hautschatten“ stammt von versteinerten Bakterien. Diese anaeroben Einzeller lebten im sauerstofffreien Wasser des Sees. Sie ernährten sich von organischer Substanz der auf den Boden gesunkenen Kadaver. Die Bakterienrasen zeichneten auf diese Weise die äußeren Umrisse des abgestorbenen Tieres exakt nach.

Bedingt durch die Landbrücken lebten Tiere aus verschiedenen Regionen in dem damaligen Gebiet bei Messel. Als Folge der ungewöhnlichen guten Konservierung im sauerstofffreien Seeboden sind uns Fossilien vieler Arten aus verschiedenen Tiergruppen erhalten. Im folgenden werden einige wichtige Vertreter aufgeführt.

Insekten

Unter den Insekten sind Käfer, Wanzen und Hautflügler am häufigsten gefunden worden. Die Königinnen einer Riesenameise, die mit den heutigen Roten Waldameisen verwandt ist, hatten Flügelspannweiten von 16 Zentimetern. Es sind nicht nur die größten Ameisen, sondern auch die größten Hautflügler die je gelebt haben. Bei den Blatt- und Prachtkäfern sind sogar die metallisch leuchtenden Strukturfarben der Deckflügel erhalten geblieben.



Abb. 2: Schlammfisch (*Cyclurus kehrer*). Fische sind unter den Wirbeltieren die mit Abstand häufigsten Funde, da die Ablagerungen aus einem ehemaligen See stammen.

(Foto: E. HAUPT / B. SIMON, © FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung)

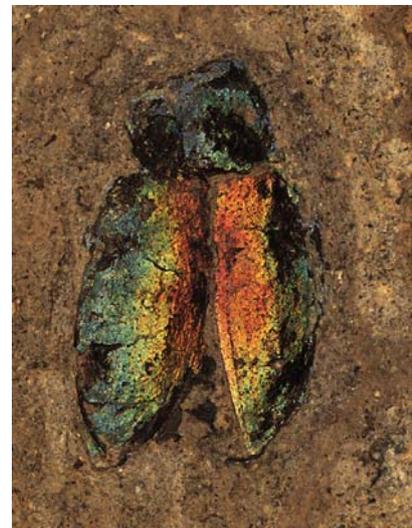


Abb. 1: Blattkäfer (*Chrysomelidae*). Bei diesem nur 5 mm großen Käfer entstehen die Farben durch Lichtbrechung und Reflexion an feinsten Chitinstrukturen, die durch sorgfältige Präparation freigelegt wurden.

(Foto: J. HABERSETZER / B. SIMON, © FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung)

Fische und Reptilien

Die beiden häufigsten der bisher bekannten Fischarten sind der bis zu 80 cm lange Knochenhecht und der Schlammfisch. Von den acht gefundenen Krokodilarten lebten die meisten auf dem Land. Das amphibisch lebende Asienkrokodil ähnelte den heutigen Nilkrokodilen und war bis zu fünf Meter lang. Schildkröten sind mit fünf Arten vertreten und hatten eine Körperlänge je nach Art von 30 – 60 cm. Die Weichschildkröten waren voll an das Wasserleben angepasst, die Sumpfschildkröte lebte wahrscheinlich auch vorwiegend im Wasser und ist nur zur Eiablage an Land gegangen. Bisher wurden 20 Schlangen- und Echsenarten entdeckt. Bei einer der heutigen Python ähnelnden Würgeschlange fand man einen kleinen Alligator im Magen-Darm-Trakt.

Vögel

Unter den vielfältigen Vogelarten dominierten die Hopfe und Spechte. Ebenfalls häufig waren Verwandte von Mausvögeln, die heute nur in Afrika vorkommen, und eine auf dem Wasser lebende Ralle, deren Verwandte heute nur noch in Südamerika zu finden sind. Es gibt ebenfalls Fossilien von Kolibris, Papageien und größeren flugunfähigen Vögeln, so einen bis zu zwei Meter hohen Strauß. Singvögel fehlten in der Fauna von Messel, sie tauchen erst im Oberoligozän auf, vor etwa 30 Mio. Jahren.

Säugetiere

Die Grube Messel ist vor allem durch ihre exzellent erhaltenen Säugetierfossilien weltberühmt geworden. Derzeit sind 45 Säugetierarten bekannt. Unter den Beuteltieren gibt es ein an heutige Kängurus erinnerndes Tier mit sehr kurzen Vorderbeinen, verlängerten Hinterbeinen und einem außerordentlich langen Schwanz. Dieser schnelle Hüpfier war nach dem Mageninhalt zu urteilen ein Räuber, im Gegensatz zu den von Pflanzen lebenden rezenten Kängurus.

Von den plazentalen Säugetieren sind Vertreter folgender Gruppen als Fossilien gefunden: Insektenfresser, Uraubtiere, Schuppentiere, Zahnarme, Nager, Fledermäuse, Primaten, Raubtiere, Unpaarhufer und Paarhufer.

Die beiden entdeckten Arten vom Urpferdchen waren 30 cm bzw. 60 cm hoch. Sie trugen an den Vorderfüßen noch vier und an den Hinterfüßen je drei Hufe (Zehen). Der Mageninhalt von einem Urpferdchen ist in gutem Zustand erhalten. Danach und nach dem Gebiss zu urteilen, ernährten sich die Urpferdchen von Laub und Früchten. Aus Fossilfunden lässt sich schließen, dass eine Stute jeweils nur ein Junges austrug.

Heute sind die etwa 50 cm langen Schuppentiere in den Tropen Afrikas und Südostasiens verbreitet. Die Funde in Messel weisen daraufhin, dass Schuppentiere wahrscheinlich ihren



Abb. 3: Fossil eines Urpferdchens (*Propalaeotherium parvulum*) aus dem Eozän. Diese nur fuchsgroßen Tiere sind aufgrund vieler übereinstimmender Merkmale in die Verwandtschaft mit heutigen Pferden einzuordnen. Der überlieferte Magen-Darm-Inhalt ermöglicht direkte Rückschlüsse auf ihre Ernährung, die aus Laubblättern und Früchten bestand.

(Foto: E. HAUPT / B. SIMON, © FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG, Abt. Messelforschung)



Ursprung in Europa hatten und nicht in Afrika, wie bisher angenommen. Die in Messel lebenden Schuppentiere besaßen wie die heutigen Arten einen Panzer aus Hornschuppen, waren zahnlos und hatten zu Grabhänden umgewandelte Vorderbeine. Dem Mageninhalt nach zu urteilen, ernährten sich die damaligen Schuppentiere wie die heutigen von Ameisen und Termiten.

In Messel hat man drei Arten von Igelverwandten gefunden. Alle drei tragen ein ähnlich gebautes Gebiss. Im Gegensatz zu den schlechter erhaltenen Fossilien anderer Regionen haben die Fossilien in Messel gut erhaltene Borsten, Stachel und Beine unterschiedlicher Länge. Die eine Art, ein Allesfresser hat kräftige Stacheln und ging bei einem Angriff wahrscheinlich mehr in die Defensive. Die zweite Art ist weniger bestachelt und floh wahrscheinlich mit Hilfe ihrer verlängerten Hinterbeine vor Feinden. Diese Art war auch Allesfresser mit einer Vorliebe für Fisch. Eine dritte Art vereinigte die Überlebensstrategie beider Arten. Sie hatte ein Stachelkleid und verlängerte Hinterbeine. Diese Art lebte wahrscheinlich von kleinen Insekten.

Obwohl in der Grube von Messel schon viele Arten gefunden sind, vermutet man, dass weitere Forschungsgrabungen noch etliche Neufunde hervorbringen werden.

🔗 Aufgaben:

- 1) Erläutern Sie, weshalb während des Eozäns so viele verschiedene Tiere in der heutigen Gegend von Messel gelebt haben.
- 2) Stellen Sie die Gründe für den guten Erhaltungszustand der Fossilien in der Grube Messel dar.
- 3) Früher konnten anhand von Fossilien Aussagen über das Skelett des jeweiligen Tieres gemacht werden. Seit Messel weiß man auch etwas über die Lebensweise vieler Tiere aus dem Eozän. Begründen Sie!



Baustein 6: RENATE RABENSTEIN: Fossilien aus dem „Weltnaturerbe Grube Messel“ im naturwissenschaftlichen Unterricht

Messel wurde im Dezember 1995 als erstes auf Fossilienfunden begründetes Weltnaturerbe Europas in die UNESCO Welterbeliste aufgenommen. Hier ist die Zeit vor rund 50 Millionen Jahren dokumentiert, in der durch das Aussterben der Saurier ökologische Nischen frei wurden und sich die Familien der modernen Säugetiere herausbildeten.

Überliefert ist eine semiaquatische Lebensgemeinschaft mit zahlreichen Arten von Pflanzen, Wirbellosen und Wirbeltieren aus den Lebensräumen Wasser, Land und Luft (VON KOENIGSWALD & STORCH 1998). Die Fundstätte ist bekannt für die herausragende Erhaltung der überlieferten Organismen: Statt isolierter Zähne und Knochen werden meist vollständige und oft artikulierte Wirbeltierskelette gefunden, fossilisierte Bakterien zeichnenden Weichteilstrukturen (Federn und Haare) nach und erhaltene Magen-Darm-Inhalte erlauben direkte Rückschlüsse auf die Ernährung (vgl. Schulbuchbeispiel Messeler Urpferdchen der Gattung *Propalaeotherium*). Darüber hinaus sind sogar sinnesphysiologische und verhaltensbiologische Aussagen zu Echoortung, Flugbiologie und Entwicklungsbiologie der Fledermäuse und zur Fortpflanzungsbiologie der Urpferdchen möglich. Weiterhin zählen Messeler Wirbeltiere z.B. Fische der Gattungen *Cyclurus* und *Atractosteus* zu den „lebenden Fossilien“ (THENIUS 2000).

Die oftmals kompletten und ästhetisch ansprechenden Messeler Fossilien erleichtern Schüler/innen den Zugang zu ausgestorbenen Lebewesen. Die Erhaltung von Weichteilstrukturen und Magen-Darm-Inhalten sowie die relative zeitliche Nähe und damit die Vergleichbarkeit zu heutigen Lebewesen vereinfachen das Verständnis paläontologischer Methoden. Die funktionsmorphologische Arbeitsweise wird am Beispiel unterschiedlich eingensichtiger Messeler Säugetiere entwickelt. Anhand ausgewählter Arten erarbeiten die Schüler/innen dann eigenständig im Vergleich zwischen Fossilfund und Rekonstruktion Begründungen für die Rekonstruktion sowie mögliche Abweichungen. Bezugspunkte zwischen Paläontologie und Alltagserfahrung der Schüler/innen bilden die lokalen und regionalen Fossilienfundstätten, die außerschulischen Lernorte Museen und Ausstellungen (NOTTBOHM 1998) und die Frage, was von heutigen biologischen Objekten unter welchen Bedingungen fossil erhalten werden könnte. Dadurch wird der evolutionsbiologische Aspekt des Themas Fossilien um eine Projektion in die Zukunft erweitert. Für lokale und regionale Schulen



Abb. 1: Kleines Urpferdchen (*Propalaeotherium parvulum*). Die Urpferdchen zählen zu den bekanntesten Fossilfunden aus Messel. Die kleine Art erreichte eine Schulterhöhe von ca. 30 cm. Der überlieferte Magen-Darm-Inhalt ermöglicht direkte Rückschlüsse auf ihre Ernährung, die aus Laubblättern und Früchten bestand. Foto: E. Haupt / B. Simon (© FIS, Abt. Messelforschung)



Abb. 2: Schlammfisch (*Cyclurus kehreri*). Fische sind unter den Wirbeltieren die mit Abstand häufigsten Funde, da die Ablagerungen aus einem ehemaligen See stammen. Die meisten Schlammfische wurden wie dieses Exemplar 20 bis 30 cm lang. Ausnahmsweise finden sich aber auch nur 5 cm kleine oder bis 70 cm große Tiere. Foto: E. Haupt / B. Simon (© FIS, Abt. Messelforschung)



(Rhein-Main-Neckar-Gebiet) bietet sich eine Verbindung des Unterrichts mit dem Besuch des Welterbes und/oder der regionalen Museen an (Hessisches Landesmuseum Darmstadt, Senckenbergmuseum Frankfurt a. M., Fossilien und Heimatmuseum der Gemeinde Messel), und auch in überregionalen Ausstellungen werden exemplarisch Messeler Fossilien gezeigt (z.B. Karlsruhe, Stuttgart, Hamburg).

Neben der skizzierten evolutionsbiologischen Einbindung in den Biologieunterricht stellt das „Welterberbe Grube Messel“ ein Refugium für zahlreiche vom Aussterben bedrohte Tier- und Pflanzenarten dar, ist geologisch für Schüler/innen interessant durch seine spektakuläre Entstehung als Maar (Wasserdampfexplosionen) und durch die politische Entwicklung der Jahre 1971 bis 1995 (Pläne zur Errichtung einer Mülldeponie bis zur Ernennung als UNESCO-Welterbestätte) relevant im gesellschaftswissenschaftlichen Kontext (RABENSTEIN 2002).

Modulare Materialien für den Biologie-Unterricht wurden von der Autorin im Jahr 2001 für die Abteilung Messelforschung am Forschungsinstitut Senckenberg erarbeitet und in Führungen im Senckenbergmuseum und im Welterbe getestet und weiterentwickelt. Sie werden derzeit an Frankfurter Studienseminaren und Schulen in Zusammenarbeit mit Lehrern und Lehrerinnen im Biologie-Unterricht erprobt und sollen danach publiziert werden (RABENSTEIN in Vorbereitung).

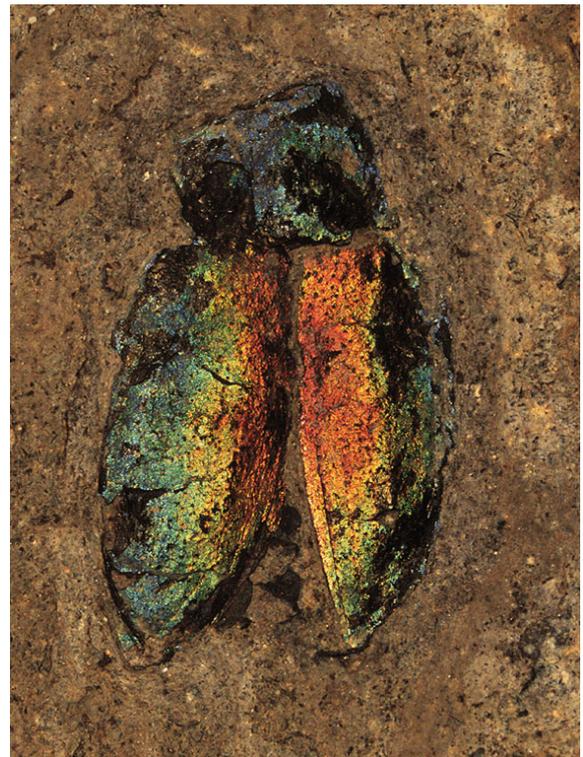


Abb. 3: Blattkäfer (Chrysomelidae). Bei diesem nur 5 mm großen Käfer entstehen die Farben durch Lichtbrechung und Reflexion an feinsten Chitinstrukturen, die durch sorgfältige Präparation freigelegt wurden. Foto: J. Habersetzer / B. Simon (© FIS, Abt. Messelforschung)



Abb. 4: Forschungsbohrung 2001.

Eine Kernbohrung im Zentrum der Grube Messel im Jahr 2001 führte zu neuen Erkenntnissen über die Entstehung des eozänen Seebeckens. Vor rund 50 Millionen Jahren entstand es durch unterirdische Wasserdampf-Explosionen.

**Literatur**

NOTTBOHM, G. (1998): Erdgeschichte – Paläontologie, 19 - 33. In: HEDEWIG, R., KATTMANN, U. & RODI, D. (Hrsg.) Handbuch des Biologieunterrichts: Sekundarbereich I, Band 7: Evolution; Aulis Verlag; Köln

VON KOENIGSWALD, W. & STORCH, G. (Hrsg.) (1998): Messel, ein Pompeji der Paläontologie. – 1 - 151; Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen

RABENSTEIN, R. (2002): „Fossilienfundstätte Grube Messel“ – Deutschlands Weltnaturerbe im Bildungskontext der UNESCO. – UNESCO heute, Zeitschrift der Deutschen UNESCO Kommission, Jg. 49 (3): 18 - 19 sowie Website "unesco heute online", Online-Magazin der Deutschen UNESCO-Kommission, Ausgabe 10: www.unesco-heute.de/1002/messel.htm

THENIUS, E. (2000): Lebende Fossilien – Oldtimer der Tier- und Pflanzenwelt, Zeugen der Vorzeit. – 5 - 228; Pfeil Verlag, München

Kontaktadresse

Dr. Renate Rabenstein

Renate.Rabenstein@senckenberg.de

Diplom-Biologin / Diplom-Pädagogin

Tel 069 – 7542-278

c/o Abt. Messelforschung

Fax 069 – 7542-203

Forschungsinstitut Senckenberg

Mobil 0172 – 68 66 226

Senckenberganlage 25

D-60325 Frankfurt a. M.