

The Beauty of Early Life

Spuren frühen
Lebens

Eine Kooperation mit dem
Naturkundemuseum
Karlsruhe

26.3.-10.7.22



„Die biologische Vielfalt ist unsere wertvollste, aber am wenigsten geschätzte Ressource.“

– Edward O. Wilson (1929–2021), US-amerikanischer Biologe

Als 1859 das Hauptwerk von Charles R. Darwin, *On the Origin of Species (Über die Entstehung der Arten)*, erschien, fehlten ihm fossile Zeugnisse aus der Frühzeit des Lebens, um belegen zu können, dass Evolution keine Theorie, sondern ein Fakt ist. Heute, mehr als 150 Jahre später, ist Darwins Dilemma gelöst. Neue Fossilfunde von allen Kontinenten bestätigen die von ihm beschriebenen Evolutionsprozesse.

Seit Anbeginn des Lebens stehen Organismen in gegenseitigen Abhängigkeits- und Einflussverhältnissen. Lebewesen existieren nicht für sich allein, sondern leben von- und miteinander. Der Garten Eden, dieser paradiesische Ort des friedlichen Zusammenlebens, ist vielleicht eine Erinnerung an das Ediacarium, eine Periode der Erdgeschichte, in der es noch keine räuberischen Lebewesen gab.

Die Ausstellung *The Beauty of Early Life* nähert sich dem wissenschaftlichen Diskurs über die Entstehung des Lebens mit einem Fokus auf der Frühzeit der Erdgeschichte vom Präkambrium über das Kambrium bis zum Ordovizium, also der Zeit vor ca. 3,8 Milliarden bis 444 Millionen Jahren. Eine besondere Rolle spielen Fossilien, die versteinerten Zeugnisse vergangener Lebensformen. Unzählige Tier- und Pflanzenarten, Pilze und Mikroorganismen sind entstanden, seitdem es Leben auf der Erde gibt. Die meisten davon sind wieder ausgestorben. Vermutlich ist weniger

als ein Prozent dieses Artenreichtums fossil erhalten geblieben.

Überreste von Meeresorganismen und Pflanzen bilden die Grundlagen für unsere fossilen Brennstoffe. Wir bedienen uns am gespeicherten Leben der Erdgeschichte und verbrauchen in wenigen hundert Jahren, was in Millionen von Jahren entstanden ist. Durch die Auswirkungen des menschlichen Handelns sind heute mehr als ein Drittel aller lebenden Arten vom Aussterben bedroht. Doch nicht nur das: Mit ihrem Tun gefährdet die Menschheit letztlich auch sich selbst.

In der Kombination fossiler Funde mit künstlerischen Werken aus der klassischen Moderne bis hin zu aktueller Medienkunst kommt – an der Schnittstelle von Kunst und Wissenschaft – in dieser Ausstellung die bisher kaum wahrgenommene Schönheit und Vielfalt des frühen Lebens erstmalig umfassend zur Geltung.



Meilensteine auf dem Weg zum Leben auf der Erde

Die Entstehung des Lebens ist noch immer eines der schwierigsten Themen der Naturwissenschaften. In zehn Kapiteln werden hier die wesentlichen Schritte erläutert – von der Entstehung des Sonnensystems und der Erde über die Herkunft des Wassers bis zur Bildung der ersten Zellen.

1 Wie entstanden das Sonnensystem und die Erde?

Unser Sonnensystem entstand vor 4,75 Mrd. Jahren durch Verdichtung von kosmischem Staub und Kondensation von Gasen. Es bildete sich dabei ein Spiralnebel mit der Sonne im Zentrum.

Erste Planeten formten sich bereits 10 Mio. Jahre nach der Entstehung des Sonnensystems, als kosmischer Staub und kleinere Aggregate auf Bahnen um die Sonne herum miteinander kollidierten. Je größer die Masse dieser Zusammenballungen wurde, desto stärker wurde ihre Gravitation, also die Kraft, mit der Körper anderes Material anziehen. Dadurch wuchsen sie immer weiter und wurden schließlich zu Planeten. Auf diese Weise entstand neben den anderen Gesteins- und Gasplaneten vor 4,56 Mrd. Jahren auch die Erde.

Erde und Mond sind ein untrennbares System. Allerdings entstand der Erdtrabant nicht zeitgleich mit der Erde, sondern etwas später, vor 4,51 Mrd. Jahren. Ein Planet namens Theia, etwa so groß wie der heutige Mars, bildete mit der frühen Erde zunächst ein Doppelplanetensystem, kollidierte dann aber schließlich mit ihr. Das beim Zusammenprall herausgeschleuderte Material sammelte sich als Schuttring um die Erde. Innerhalb weniger Millionen Jahre ballten sich die Komponenten zum Mond zusammen.

Der Zusammenprall der Erde mit Theia setzte derart viel thermische Energie frei, dass die feste Kruste der Erde komplett aufschmolz. Aus dem Weltall betrachtet glich die Erde vermutlich einem Globus mit einem Ozean aus geschmolzenem Gestein (Magma).

Im Laufe von Jahrmillionen kühlte die Erde ab und die Erdoberfläche verfestigte sich. Zunächst entstanden kleine Inseln aus Erdkruste im erdumspannenden „Magmaozean“. Vor 4,4 Mrd. Jahren war die Bildung der Erdkruste und damit die Schaffung erster Kontinente abgeschlossen. Bis vor 3,9 Mrd. Jahren schlugen immer wieder Meteoroiden und Asteroiden auf der Erde ein und zerstörten Teile der jungen Erdoberfläche. Diese brachten aber nicht nur Zerstörung, sondern auch wichtige Bausteine des Lebens.

2 Woher stammt das Wasser auf der Erde?

Wasser ist ein Grundbaustein des Lebens. Nur wenn dauerhaft flüssiges Wasser auf der Erdoberfläche vorhanden ist, kann sich Leben entwickeln. Woher es stammt, ist noch nicht vollständig geklärt. Vermutlich waren es mehrere Prozesse, welche die Erde zu einem „blauen Planeten“ mit Ozeanen, Seen und Flüssen machten:

1. Die frühe Erde war wesentlich heißer als die heutige. Daher war auch die vulkanische Aktivität höher. Dies hatte zur Folge, dass große Mengen Gas, darunter auch Wasserdampf, in die Atmosphäre ausgestoßen wurden.

Als die Erde weiter abkühlte und die Temperatur vor 4,2 Mrd. Jahren schließlich unter 100 °C fiel, kondensierte der Wasserdampf in der Atmosphäre. Wahrscheinlich war es eine derart große Menge, dass es mehrere zehntausend Jahre lang regnete. Das Wasser sammelte sich in Senken und es bildeten sich Ozeane.

2. In der Frühzeit der Erde schlugen unzählige Asteroiden und Kometen auf unserem Planeten ein und brachten Wasser auf die Erde.

Kometen stammen aus dem äußeren Bereich des Sonnensystems. Durch die große Entfernung zur Sonne und die damit verbundenen niedrigen Temperaturen kommen die Hauptkomponenten Wasser, Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Methan dort nicht als Gase, sondern als Eis vor. Stürzt ein Komet auf die Erde, schmilzt das Eis und Wasser oder Wasserdampf wird freigesetzt.

Meteoroide sind Bruchstücke von Asteroiden, die bei Kollisionen im Asteroidengürtel aus ihrer Bahn geschleudert werden. Sie können sich in Richtung Erde bewegen und dort als Meteorite einschlagen. Auch sie enthalten Wasser und andere für die Entstehung des Lebens wichtige Bausteine.

3 Wo finden wir heute die ältesten Minerale und Gesteine?

Die ältesten bisher bekannten Minerale werden auf ein Alter von 4,4 Mrd. Jahren datiert. Es handelt sich um Zirkone, die in einem Sedimentgestein in der Jack-Hills-Bergkette in Westaustralien gefunden wurden. Zu den ältesten Gesteinen gehören die Acasta-Gneise aus Nordkanada (4,31 Mrd. Jahre), Amphibolit-Gesteine von Nuvvuagittuq aus der Hudson Bay im nordöstlichen Teil von Kanada (4,28 Mrd. Jahre) und die Isua-Gneise aus Grönland (3,8-3,7 Mrd. Jahre).

Das Alter der frühesten Gesteine wurde mit Hilfe radio-metrischer Datierung ermittelt. Gesteine bestehen aus einer Vielzahl von Mineralen, die sich durch Kristallisation beim Abkühlen einer Gesteinsschmelze bilden. Methoden wie die Uran-Blei-Datierung nutzen den natürlichen Zerfall der in den Mineralen vorkommenden radioaktiven Isotope. Direkt nach der Entstehung eines Minerals beginnt Uran 238U zu Blei 206Pb und Uran 235U zu Blei 207Pb zu zerfallen. Der Zerfall des ursprünglichen Isotops (Mutterisotop) in ein stabiles Produkt (Tochterisotop) erfolgt mit konstanter Rate (Halbwertszeit). Die Halbwertszeit definiert dabei die Zeitspanne, in der die Hälfte des Mutterisotops zerfallen ist, die Anzahl der Tochterisotope nimmt mit der Zeit entsprechend zu. Mithilfe eines Massenspektrometers wird die Anzahl der vorhandenen Mutter- und

Tochterisotope gemessen. Mit diesem Verhältnis von Mutter- zu Tochterisotopen kann man die Zeit bestimmen, die vergangen ist, um die gemessene Anzahl an Tochterisotopen zu bilden. Damit kann man dann das Alter des Minerals berechnen.

4 Was ist Leben?

Bevor man sich die Frage nach der Entstehung des Lebens stellt, muss man eine andere Frage beantworten: Was ist Leben? Eine allgemein anerkannte Definition gibt es bis heute nicht. Es gibt jedoch physikalisch-chemische Eigenschaften, die für ein lebendes System unabdingbar sind:

1. Abgrenzung

Charakteristisch für Leben ist die Entwicklung eines Innen und eines Außen. Beides muss voneinander unterscheidbar sein. Biologisch gesehen ist dies die Zelle, die kleinste lebende Einheit aller Organismen. Alle Vorgänge des Lebens beruhen auf Aktivitäten in Zellen, die von einer Membran umgeben sind.

2. Stoff- und Informationsaustausch mit der Umgebung

Die Zellmembran ist durchlässig. Dies ermöglicht einen kontrollierten Stoffwechsel (Metabolismus) mit einer Vielzahl von chemischen Reaktionen.

Mit der Nahrung wird Energie aufgenommen und Zellmaterial wird aufgebaut. Beim Stoffwechsel entsteht auch „Abfall“, der wieder ausgeschieden wird.

Zellen können außerdem auf Reize von außen reagieren und Informationen austauschen.

3. Wachstum und Fortpflanzung

Leben ist kein einmaliger Vorgang, sondern ein immerwährender Prozess mit andauernder Veränderung und Wiederholung. Eine zentrale Eigenschaft von Leben ist also die Fähigkeit zum Wachstum und zur Fortpflanzung (Replikation).

Wenn all diese Kriterien erfüllt sind, kann Leben entstehen und sich weiterentwickeln.

Viren, z. B. das Coronavirus SARS-CoV-2, werden übrigens *nicht* zu den Lebewesen gezählt. Sie verfügen weder über die Fähigkeit zur selbstständigen Replikation noch über einen eigenen Stoffwechsel. Sie sind dafür immer auf Wirtszellen angewiesen.

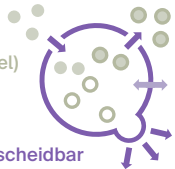
Durchlässigkeit

Stoffaustausch mit der Umgebung möglich (Stoffwechsel)

Abgrenzung

Zellhülle (Membran)

Innen und Außen sind unterscheidbar



Informationsaustausch
Reaktion auf Reize
möglich

Wachstum
und Fortpflanzung
in bestimmten Phasen

Wesentliche Kennzeichen lebender Systeme

5 „Ursuppe“ und „Urpizza“ – wie hat alles angefangen?

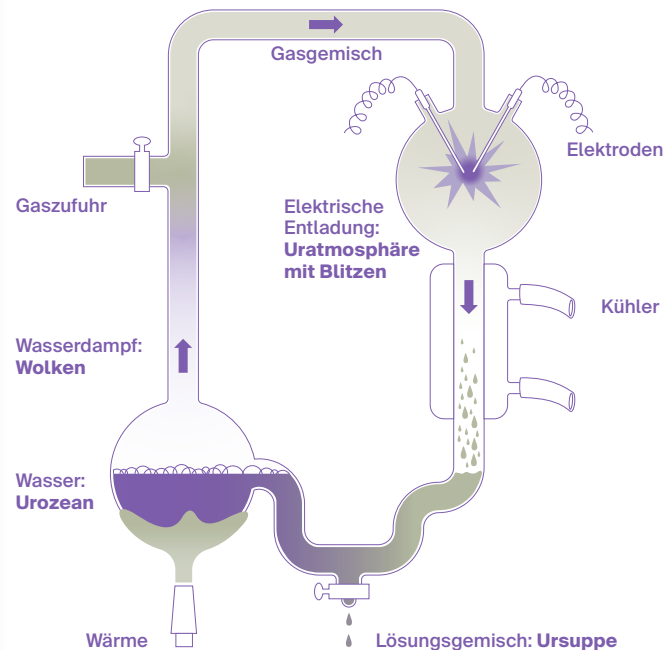
Schon Charles Darwin vermutete 1871, dass das Leben in „warmen Tümpeln“ aus Proteinen entstanden sein könnte. Der russische Biochemiker Alexander Oparin stellte zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Hypothese auf, dass sich in der frühen Hydrosphäre unter Einwirkung von Blitzen, Sonneneinstrahlung und Vulkanismus organische Moleküle bildeten, aus denen die ersten Lebensformen entstanden. Er prägte dafür den Begriff „Ursuppe“.

Die Chemiker Stanley Miller und Harold Urey stellten 1953 eine chemische Evolution mit dem „Ursuppenexperiment“ nach. In einer speziellen Anlage erzeugten sie Wasserdampf, mischten diesen mit Ammoniak, Methan, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid und führten dem Gemisch elektrische Energie in Form von Blitzen zu. Das Ergebnis war eine Sensation: In der entstandenen Lösung fand man Aminosäuren, Fettsäuren, Kohlenhydrate und weitere organische Verbindungen, also wichtige kohlenstoffhaltige Bausteine des Lebens auf der Erde.

Mittlerweile sind Aminosäuren auch in Meteoriten nachgewiesen. Es steht also außer Frage, dass sich lebensnotwendige organische Moleküle an verschiedenen Orten bilden können. Immer noch ungelöst ist aber die

Frage, wie aus diesen Bausteinen Leben entstehen konnte. Ein „Ursuppenozean“ bietet hierfür kein geeignetes Umfeld, denn darin sind die Stoffe so weit verdünnt, dass die Entstehung von Leben unmöglich ist. Eine mögliche Antwort auf diese Frage bietet die Theorie der „Eisen-Schwefel-Welt“. Demnach könnte die Synthese organischer Moleküle wie Peptide und Ribonukleinsäure (engl. *ribonucleic acid*, RNA) sich an mineralischen Oberflächen abgespielt haben. Dort sollen die Moleküle sich in zellähnlichen Strukturen gesammelt und dann weiterentwickelt haben. Sie wurden dabei durch elektrische Kräfte fixiert und konnten deshalb miteinander reagieren. Die mineralischen Oberflächen könnten als Ersatz für eine Zellhülle gedient haben. In Anlehnung an die „Ursuppe“ spricht man hierbei oft von der „Urpizza“.

Bildungsorte von Eisen-Schwefel-Mineralen wie Pyrit findet man heutzutage im Umfeld hydrothermaler Quellen in der Tiefsee, bei den sogenannten Schwarzen Rauchern (engl. *Black Smoker*). Dort sind die sauerstofffreien Bedingungen der Urerde erfüllt.



Schema des „Ursuppenexperiments“ von Harold Urey und Stanley Miller zur abiotischen Synthese von organischen Molekülen

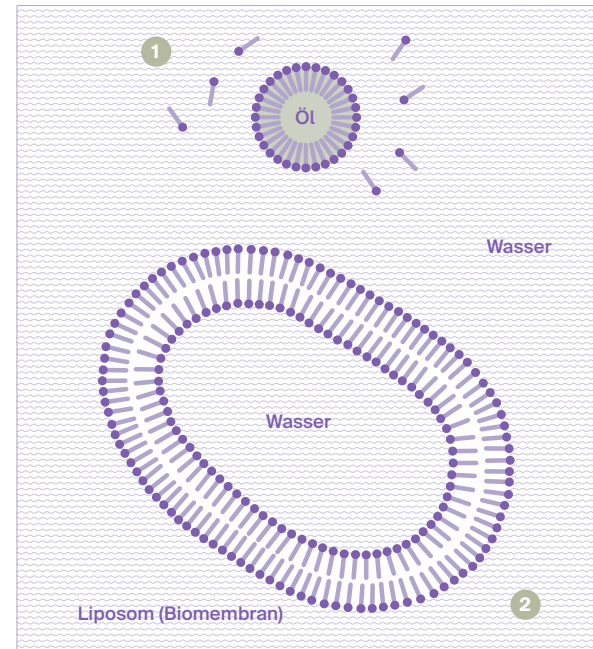
6 Die „RNA-Welt“ – noch kein Leben, aber auf dem besten Weg dahin

Für die Entstehung von Leben sind organische Moleküle zwar die Grundlage, aber es sind außerdem Systeme nötig, die einen Stoffwechsel und eine Vermehrung ermöglichen. Doch wie entstehen diese? Die Theorie der „RNA-Welt“ versucht, diese Frage zu beantworten.

Vieles spricht dafür, dass Ribonukleinsäure in einer frühen Phase des Lebens die Rolle des Erbgutspeichers übernahm – lange Zeit vor der DNA. Die RNA ist vermutlich das erste Molekül in der Geschichte des Lebens, das sowohl chemische Reaktionen katalysieren als auch sich selbst kopieren und vervielfältigen konnte. Damit erübrigt sich die Frage, was zuerst da war: Stoffwechsel oder Vermehrung. Die RNA übernahm zunächst die Funktion des Stoffwechsels und dann auch der Replikation, in Form sogenannter Ribozyme (gefaltete RNA-Moleküle).

Man geht davon aus, dass mit dem Auftreten der RNA die Zeit reif war für die Entwicklung erster zellähnlicher Formen mit einem lebensähnlichen System. Diese sogenannten Protozellen besaßen eine einfache Hülle, bestehend aus Proteinen oder aus Fettmolekülen (Lipide), die sich in wässriger Lösung spontan bilden können. Es ist sehr wahrscheinlich, dass in der frühesten

Phase des Lebens die RNA in Protozellen eingeschlossen wurde und dort in mehreren Zyklen die eigene Synthese katalysierte.



Entstehung einer einfachen Zelle mit einer Zellmembran

Moleküle mit einem wasserliebenden und einem wasserabweisenden Teil, z. B. Lipide, formen im Wasser automatisch kleine, ölhaltige Bläschen (1). Ordnen sich die Moleküle in Lipid-Doppelschichten mit dem wasserliebenden Teil jeweils nach außen und innen an, bilden sich wassergefüllte Bläschen. Es entsteht eine Protozelle, die Urform aller biologischen Zellen (2).

7 Das Leben beginnt – wann und wo entstanden die ersten Zellen?

Mit der Einhüllung von RNA in Protozellen startete die biologische Evolution. Die ersten Zellen bildeten sich möglicherweise schon vor 4,3 Mrd. Jahren, spätestens aber nach dem weltweit gehäuften Auftreten großer Meteoriteneinschläge vor 3,9 Mrd. Jahren.

Nicht geklärt ist bislang, wo sich die ersten Zellen gebildet haben, aus denen das Leben hervorgegangen ist. Möglich ist, dass sich dieser Prozess an mehreren Orten gleichzeitig oder nacheinander abspielte. Die Bildung der ersten Zellen steht aber wahrscheinlich in Zusammenhang mit heißen Wässern. Hierbei stehen vor allem folgende Bereiche im Fokus:

1. hydrothermale Tiefseequellen
(z. B. "Schwarze Raucher" und "Weiße Raucher"),
2. hydrothermale Quellen auf der Erdoberfläche
(z. B. Yellowstone Caldera, USA),
3. hydrothermale Spalten in Gesteinen der kontinentalen Kruste.

In allen drei Bereichen ist der Gesteinsuntergrund porös und wird von heißen Wässern durchflossen. Darin kommt eine Vielzahl anorganischer Verbindungen vor: Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Ammoniak, Methan, Zyanwasserstoff, Schwefelverbindungen und

Phosphate. Dieser Chemie-Cocktail enthält alle Stoffe, die zur Bildung von Aminosäuren, Zuckerverbindungen und Nukleinbasen und damit zur Bildung biologisch funktionierender Zellen benötigt werden.

Die winzig kleinen Porenräume im Gesteinsuntergrund waren durchlässige „Reaktionskammern“, in denen organische Verbindungen zu Biomolekülen reagierten, die später wichtige Funktionen in der Zelle übernahmen. Möglicherweise dienten die Wände dieser Porenräume zunächst als eine Art Zellmembran. Erst später entwickelten sich echte Zellen mit einer organischen Zellmembran.

Unabhängig davon, in welchem Milieu die ersten Zellen entstanden und damit das Leben auf der Erde begann – es muss langfristig vor Sonnenwind, UV-Strahlung, Meteoriteneinschlägen, längerer Trockenheit und Erosion geschützt gewesen sein. Auch Schwankungen der Temperatur und des pH-Wertes dürfen nicht zu stark gewesen sein. Sonst hätte die Gefahr bestanden, dass wichtige chemische Bausteine wie die RNA und Proteine immer wieder zerstört werden.

8 Woher kam die Luft zum Atmen?

Während sich die ersten Zellen bildeten, änderte sich auch die Zusammensetzung der Atmosphäre. Die Uratmosphäre entstand vor mehr als 4 Mrd. Jahren durch vulkanische Entgasung, bei der Ammoniak, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Methan, Stickstoff, Wasser und Wasserstoff freigesetzt wurden.

Bis vor 3,7 Mrd. Jahren existierte eine Atmosphäre ohne freien Sauerstoff (anoxisch). Dies änderte sich, als Cyanobakterien anfangen, im Zuge ihrer Photosynthese Sauerstoff zu produzieren. Dieses für uns so lebenswichtige Element ist bei ihrem Stoffwechsel nur ein Abfallprodukt. In den folgenden 1,2 Mrd. Jahren wurden das bis dahin im Ozean gelöste Eisen und andere Elemente oxidiert und chemisch gefällt. Es bildeten sich Sedimente, die sogenannten Gebänderten Eisenerze (engl. *Banded Iron Formations*). Sie sind die größten nutzbaren Eisenerzvorkommen der Erde.

Zu Beginn des Paläoproterozoikums vor 2,5 Mrd. Jahren waren Eisen und andere Elemente also größtenteils mineralisch gebunden. Der nun überschüssige Sauerstoff reicherte sich in der Atmosphäre an – der Planet konnte anfangen „aufzuatmen“. Dieses Ereignis wird als „*Great Oxygenation Event*“ oder auch als „Große Sauerstoffkatastrophe“ bezeichnet, denn für anaerobe,

also an ein Leben ohne freien Sauerstoff angepasste Organismen ist freier Sauerstoff toxisch.

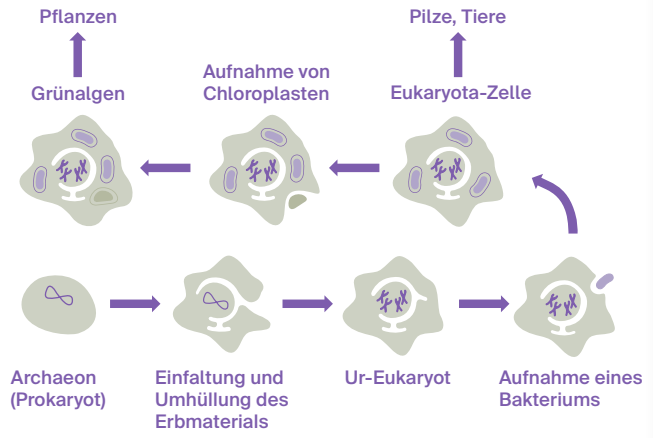
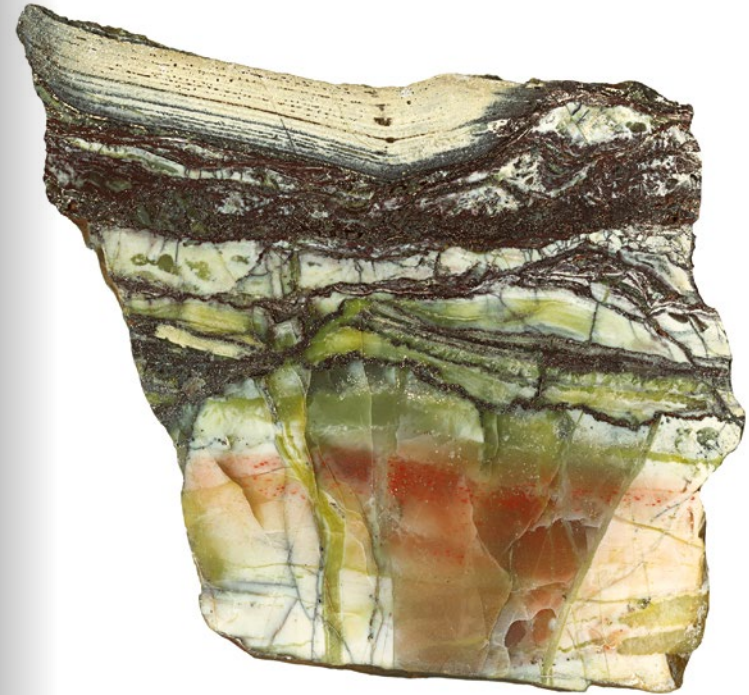
Es gab jedoch auch Lebewesen, die Sauerstoff nicht nur tolerierten, sondern ihn im Laufe der Zeit auch effektiv verwerten konnten. Diese Sauerstoffatmung stellt wesentlich mehr nutzbare Energie zur Verfügung als die Atmung ohne Sauerstoff. Sie war letztlich die Voraussetzung für die Entwicklung und den Siegeszug mehrzelliger Lebewesen.

9 Aus zwei mach eins – wie entstanden die ersten eukaryotischen Zellen?

Die ersten echten Zellen waren Prokaryota (griech. Vorkerner, Zellen ohne Zellkern), zu denen die Archaea (früher Archaeobakterien genannt) und die Bacteria zählen. Vermutlich sind aus den Prokaryota die Eukaryota (griech. Echkerner, mit echtem Zellkern) entstanden: Durch das Umschließen des Erbgutes in der Zelle mit einer Hülle wurde aus einem Archaeon der sogenannte Ur-Eukaryot. Dieser nahm später ein kleineres und Sauerstoff atmendes Bakterium auf, ohne es zu verdauen. Ein solcher Aufnahmeprozess wird als Endosymbiose bezeichnet. Das so aufgenommene Bakterium wird zum Kraftwerk der Zelle, dem Mitochondrium. Diese neue, nun aus mehreren Prokaryoten bestehende

Zelle wurde zum Vorläufer aller Tier- und Pilzzellen. Im Laufe der Evolution nahmen einige dieser Eukaryota-Zellen zusätzlich Cyanobakterien in sich auf, aus denen sich die Photosynthese betreibenden Chloroplasten entwickelten. Diese Endosymbiose führte zur Entwicklung der Pflanzen.

Wichtig bei einer Symbiose ist, dass beide Seiten einen Vorteil daraus ziehen: In diesem Fall bietet die große Zelle konstante Lebensbedingungen, während die kleinere Energie liefert oder eine andere wichtige Aufgabe innerhalb der größeren Zelle erfüllt.



Die Endosymbiontentheorie (nach der US-amerikanischen Biologin Lynn Margulis)

















10

Welche Lebewesen waren zuerst auf der Welt?

Der älteste Organismus, dem Leben in seiner heutigen Form zugrunde lag, ist nicht direkt nachgewiesen wie ein Fossil, sondern hypothetisch. Dennoch muss es nach der Evolutionslehre einen „LUCA“ (*Last Universal Common Ancestor*), einen Urvorfahren, gegeben haben. Er stellte den letzten gemeinsamen Vorfahren der drei Domänen des Lebens dar: der Archaea, der Bacteria und der Eukaryota.

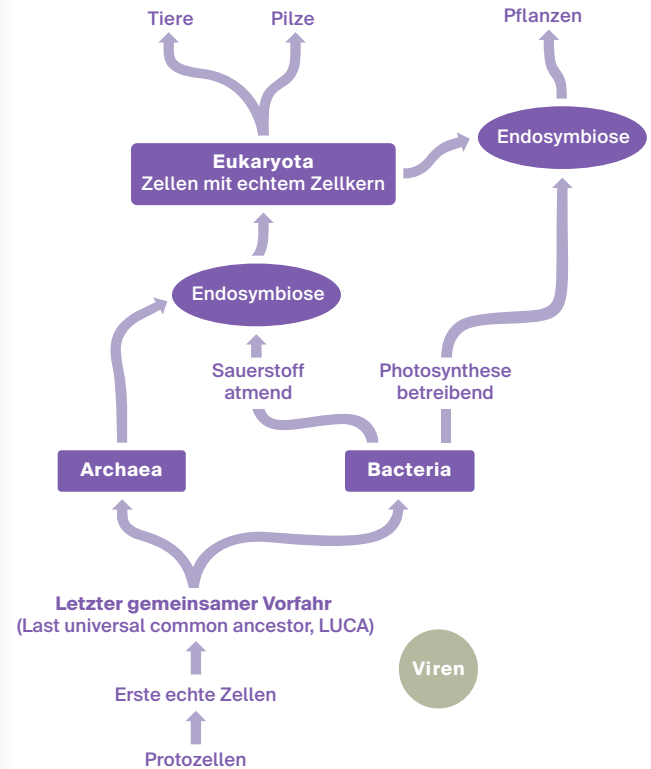
Bei den ältesten heute bekannten präkambrischen, zweifelsfrei fossilen Überresten handelt es sich um Ablagerungen, die durch den Stoffwechsel von Mikroorganismen entstanden. Die von diesen Kleinstlebewesen produzierten feinlagigen Gesteine werden als Stromatolithe (griech. „geschichteter Stein“) bezeichnet und zählen zu den biogenen Sedimenten. Deren älteste Nachweise sind 3,8-3,7 Mrd. Jahre alt und stammen aus dem Isua-Grünsteingürtel in Südwest-Grönland. Auch in Westaustralien wurden sehr alte Stromatolithe gefunden: in der Dresser-Formation mit einem Alter von 3,49 Mrd. Jahren und in der Strelley-Pool-Formation mit einem Alter von 3,42 Mrd. Jahren.

Waren Stromatolithe im Präkambrium noch weltweit verbreitet, so ist ihr heutiges Vorkommen auf extreme Umgebungen beschränkt. Ein Beispiel ist das extrem

salzige Wasser des Hamelin Pool in der westaustralischen Shark Bay. Die dort vorkommenden Stromatolithe wachsen mit etwa 0,3 mm pro Jahr sehr langsam.

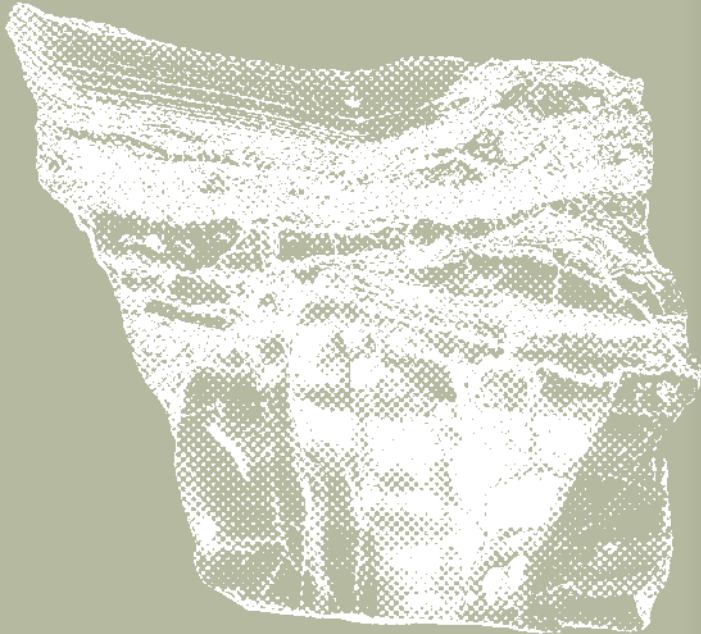
Die ältesten Eukaryota zugeschriebenen Fossilien sind 2,3-1,9 Mrd. Jahre alt und wurden in den Kieselschiefern der Gunflint-Formation im Grenzgebiet von Minnesota und Ontario entdeckt. Bei diesen Mikrofossilien handelt es sich um Versteinerungen von Einzellern.

Mehr als eine Milliarde Jahre alt sind auch Fossilien der Gattungen *Chuaria*, *Grypania* und *Horodyskia*, doch ist deren systematische Einordnung noch unklar. Es könnten große Eukaryoten gewesen sein, aber auch Kolonien von Cyanobakterien. Mit dem wachsenden Interesse an der Entstehung der heutigen Vielfalt von Organismen gibt es immer mehr derartige Funde. Vielleicht können besser erhaltene Fossilien oder neue Untersuchungsmethoden bald noch mehr Licht in das Dunkel der Frühzeit des Lebens bringen.



Die Entstehung der drei Domänen des Lebens: Archaea, Bacteria und Eukaryota (Tiere, Pilze und Pflanzen)

Das Proterozoikum



Das Proterozoikum ist ein Abschnitt bzw. Äon der Erdgeschichte, der sich vom Ende des vorangegangenen Archaikums vor 2,5 Mrd. Jahren bis zum Beginn des Erdaltertums (Paläozoikum) vor 541 Mio. Jahren erstreckte. Im frühen Proterozoikum ereignete sich vor 2,4 Mrd. Jahren die „Große Sauerstoffkatastrophe“, ein in relativ kurzer Zeit erfolgter Anstieg der Konzentration von molekularem Sauerstoff (O_2). Dieser war ein Abfallprodukt früher, als Anaerobier bezeichneter einzelliger Organismen, für die Sauerstoff tödlich war oder zumindest den Stoffwechsel hemmte. Durch frei verfügbaren Sauerstoff wurde atmosphärisches Methan zunehmend oxidiert, was zu einer Abkühlung der Erde und Vereisungen globaler Dimensionen führte.

Es folgte ein Zeitraum von 1,85-0,85 Mrd. Jahren vor heute, den der englische Paläontologe Martin Brasier als *boring billion* bezeichnet hat, als die „langweilige Milliarde“, da sich die klimatischen Bedingungen auf der Erde stabilisierten und scheinbar auch in der Evolution des Lebens kaum Fortschritte zu verzeichnen waren.

Dieses Bild wandelt sich langsam, da – insbesondere in China – mehr und mehr Fossilien von Eukaryota – Zellen mit echtem Zellkern – gefunden werden, die aus dem Zeitraum der *boring billion* stammen. Viele dieser Funde bereiten jedoch Probleme bei ihrer biologischen Einordnung. Schon die Frage, ob ein Fossil z. B. der zeitlich und geographisch weit verbreiteten

Gattung *Grypania* einen großen Einzeller zeigt oder eine Kolonie kleinerer Bakterien, ist nicht eindeutig zu beantworten.

Die häufigsten Fossilien des Proterozoikums sind zweifellos Stromatolithe: biogene, durch den Stoffwechsel von Mikroorganismen wie insbesondere Cyanobakterien entstandene, geschichtete Sedimentgesteine, die auf allen Kontinenten der Erde gefunden worden sind. An mikroskopisch untersuchten Dünnschliffen von Stromatolithen konnten vielfach sogar noch deren zelluläre Strukturen studiert werden. Die Bezeichnung Stromatolith (griech. *stroma* = Decke und *lithos* = Stein) wurde 1908 von dem deutschen Geologen Ernst Kalkowsky eingeführt, basierend auf Funden im Norddeutschen Buntstandstein.



Der Garten von Ediacara: erstes komplexes Leben



Das Ediacarium ist die jüngste Periode des Neoproterozoikums, mit dem die Erdfrühzeit endete, das sogenannte Präkambrium. Das Ediacarium begann vor 635 Mio. Jahren und endete vor 541 Mio. Jahren. Es wurde nach den Ediacara Hills benannt, einem in den Flinders Ranges gelegenen Gebirgszug 650 km nördlich von Adelaide, Hauptstadt des australischen Bundesstaates South Australia.

Der australische Geologe und Paläontologe Reginald C. Sprigg entdeckte hier 1946 bei der Überprüfung der Profitabilität stillgelegter Minen Fossilien altertümlicher Lebewesen. Diese gelten seither als die ersten präkambrischen Makrofossilien, also mit bloßem Auge sichtbaren Fossilien, die entdeckt wurden.

Der australische Paläontologe Martin F. Glaessner und andere Geowissenschaftler haben die Fossilien aus dem 560 Mio. Jahre alten Rawnsley-Quarzit der Ediacara Hills jahrzehntelang erforscht. Weltweit wurden inzwischen Dutzende weiterer Fundstätten von Fossilien aus dem Ediacarium entdeckt. Deren wichtigste sind die 570 Mio. Jahre alte Doushantuo-Formation aus der südchinesischen Provinz Guizhou, die 565 Mio. Jahre alte Mistaken-Point-Formation der kanadischen Insel Neufundland, die 570–543 Mio. Jahre alte Nama Group aus Namibia und die 555 Mio. Jahre alte Ust'-Pinega-Formation der am Weißen Meer gelegenen Omega-Halbinsel im Nordwesten Russlands.

Inwieweit die Ediacara-Organismen mit heutigen Lebewesen verwandt sind, ist umstritten. Der deutsche Paläontologe Adolf Seilacher betrachtete Ediacara-Organismen 1989 im Rahmen seiner Vendobionten-Hypothese als riesenwüchsige Einzeller, die sich auf dem Meeresgrund von Mikrobenmatten ernährten. Der US-amerikanische Paläontologe Mark A. S. McMenamin sah 1998 in der Ediacara-Lebensgemeinschaft einen friedlichen „Garten von Ediacara“, eine Lebewelt, in der es noch keine Prädatoren gab, also noch keine räuberischen Organismen. Der irische Paläontologe Breandán Anraoi MacGabhann schließlich betonte 2014, dass Bezeichnungen wie „Ediacara-Biota“ oder „Ediacara-Fauna“ vermieden werden sollten, da diese suggerieren, dass die in Fossilfundstätten aus dem Ediacarium entdeckten Organismen miteinander verwandt seien, was jedoch vielfach noch ungeklärt ist.

Publikationen der letzten Jahre deuten aber mehr und mehr an, dass zumindest ein Teil der Funde aus dem Ediacarium mit heutigen Organismen verwandt ist. Aus neuen, auf der Onega-Halbinsel entdeckten Fossilfunden der häufigen, flach gebauten, segmentierten und bis über einen Meter langen Gattung *Dickinsonia* konnte organisches Material herausgelöst und untersucht werden. Dabei wurden Sterole identifiziert, Abbauprodukte von tierischem Cholesterol, was nahelegt, dass *Dickinsonia* ein Vertreter des Tierreichs war.

Die Ediacara-Gattung *Kimberella*, ursprünglich als Medusenstadium (Qualle) eines Hohltiers angesehen, wird von vielen Paläontologen als Weichtier betrachtet, da *Kimberella* bei der Nahrungssuche charakteristische Spurenfossilien erzeugte, welche an die Kratzspuren heutiger Weichtiere (Mollusca) erinnern, die durch deren Raspel- oder Reibezungen (Radula) entstehen.

Die kambrische Explosion



Das Kambrium begann vor 541 Mio. Jahren und endete vor 485 Mio. Jahren. Es ist die älteste Periode des Erdaltertums (Paläozoikum) und wurde nach dem lateinischen Namen von Wales, *Cambria*, benannt, da dort viele aus diesem Abschnitt der Erdgeschichte stammende Fossilien gefunden wurden. Noch ältere Fossilien waren lange Zeit unbekannt, auch zu den Lebzeiten von Charles Darwin. Ältere Schichten als jene aus dem Kambrium wurden unter den Begriffen „Präkambrium“, „Erdfrühzeit“ oder „Abiotikum“ zusammengefasst, da der Eindruck bestand, dass es vor dem Kambrium noch kein Leben auf der Erde gegeben hat.

Der Beginn des Kambriums ist durch mehrere deutliche Änderungen im Fossilbefund markiert: Fossilien, die für das Ediacarium charakteristisch waren, fehlen weitgehend. Stattdessen treten im frühen Kambrium Spurenfossilien auf, die belegen, dass es Tiere gab, die sich in den Meeresboden eingraben konnten, was im Ediacarium noch nicht der Fall war. Die sogenannte „Kleinschalige Fauna“ (*Small-Shelly-Fauna*), nur einige Millimeter große, mineralisierte Fossilien, markiert ebenfalls den Übergang vom Ediacarium zum Kambrium.

Mit dem Kambrium wird vor allem der Begriff „kambrische Explosion“ in Verbindung gebracht. Dieser bezieht sich darauf, dass im Kambrium scheinbar plötzlich bzw. „explosionsartig“ in dem – in geologischen

Dimensionen – kurzen Zeitraum von fünf bis zehn Mio. Jahren die Vielfalt an Lebewesen zugenommen hat, darunter auch die ersten Prädatoren bzw. räuberischen Organismen. Alle heute bekannten Tierstämme tauchen erstmals im Fossilbefund des Kambriums auf. Die Artenvielfalt war zwar noch relativ gering, doch waren mit dem Kambrium bereits die grundlegenden Körperbaupläne der Stämme mehrzelliger Tiere vorhanden, die seither die Erde bevölkern.

Besonders markant ist das Auftauchen der ersten Trilobiten in 521 Mio. Jahre alten kambrischen Gesteinen. Trilobiten, deutsch auch „Dreilapper“ genannt, sind eine Klasse meeresbewohnender Gliederfüßer (Arthropoda), deren Artenreichtum im Kambrium rasch zunahm. Die meisten Trilobiten verfügten über ein „Exoskelett“, eine stabile äußere Hülle, weshalb sie viel häufiger fossilisieren konnten als Weichkörper-Organismen. Daher sind Trilobiten-Fossilien weltweit gefunden worden: von Spitzbergen bis Tasmanien. Paläontologen haben bereits über 25.000 Arten mit großem Formenreichtum beschrieben, die zu mehr als 5.000 Gattungen gehören, und noch immer werden bislang unbekannte Trilobiten entdeckt. Sie gelten als die bekanntesten Tiere des Erdaltertums (Paläozoikum), an dessen Ende sie vor 252 Mio. Jahren ausstarben.

Trilobiten-Fossilien wurden bereits im 17. Jahrhundert entdeckt und beschrieben. Doch erst im 20. Jahrhun-

dert stellte sich heraus, dass Trilobiten die Meere des Erdaltertums weniger stark dominierten als der Fossilbefund vermuten ließ. Die Entdeckung von kambrischen Fossilfundstätten, in denen nicht nur Organismen mit Exoskelett gefunden wurden, sondern auch Weichkörper-Organismen überliefert sind, ermöglicht ein neues Verständnis der Biodiversität des Kambriums. Derartige Fundstellen werden „Konservatlagerstätten“ genannt.

Die zwei bekanntesten kambrischen Konservatlagerstätten sind: erstens der 1909 von dem US-amerikanischen Paläontologen Charles Doolittle Walcott entdeckte Burgess-Schiefer (Burgess Shale) bei Field im Südosten der kanadischen Provinz British Columbia, mit einem Alter von 505 Mio. Jahren; zweitens der Maotianshan-Schiefer (Maotianshan Shales), der 1912 von einer Gruppe französischer Forscher um den Paläontologen Henri Mansuy bei Chengjiang im Osten der chinesischen Provinz Yunnan entdeckt worden war, dessen wissenschaftliche Bedeutung aber erst 1984 von dem chinesischen Paläontologen Hou Xianguang erfasst wurde, als er dort erste Fossilien mit Weichteilerhaltung entdeckte. Mit einem Alter von 518 Mio. Jahren sind die Funde aus der Chengjiang-Region 13 Mio. Jahre älter als jene aus dem Burgess-Schiefer. Weitere kambrische Konservatlagerstätten sind inzwischen auch aus anderen Regionen bekannt, z. B. den USA, Grönland, Schweden und Australien.

Das große ordovizische Biodiversifikations-Ereignis (GOBE)



Die nach dem walisischen Keltenstamm der Ordovicer benannte Periode des Ordoviziums begann vor 485 Mio. Jahren und endete vor 444 Mio. Jahren. Nachdem am Ende des Kambriums viele Arten ausgestorben waren, kam es im Ordovizium zu einer „adaptiven Radiation“. Dabei entstanden – im Gegensatz zum Kambrium – zwar keine grundsätzlich neuen Baupläne unter den Organismen, aber nach Maßgabe der Verfügbarkeit ökologischer Nischen zahlreiche neue Arten. Es änderte sich also vor allem die Diversität (Vielfalt) der Organismen, nicht jedoch die Disparität (Ungleichheit) zwischen den Organismen. Dieses Ereignis, die starke Erhöhung der Artenvielfalt im Verlauf des Ordoviziums, wird „Großes Ordovizisches Biodiversifikations-Ereignis“ (GOBE) genannt.

Viele der neuen Arten waren Filtrierer, also Tiere, die ihre Nahrung, z. B. Plankton, aus dem Wasser herausfilterten. Insgesamt wurden bereits über 4.000 fossile Tiergattungen aus dem Ordovizium beschrieben. Ein Großteil der Fossilien stammt von skeletttragenden Organismen wie Gliederfüßern (Arthropoda), z. B. Dreilappern (Trilobita), oder von Stachelhäutern (Echinodermata), z. B. Seelilien und Haarsternen (Crinoidea), Seesternen (Asteroidea) und Schlangensterne (Ophiuroidea).

Von Konservatlagerstätten, in denen auch Weichkörper-Organismen fossil überliefert sind, die normaler-

weise im Fossilbefund fehlen, ist bekannt, dass die meisten Arten Weichkörper-Organismen waren. Da die Zahl der skeletttragenden Organismen-Arten im Ordovizium auf über 20.000 geschätzt wird, kann die Gesamtzahl der Arten nach dem exponentiellen Wachstum der Biodiversität im Ordovizium in der Größenordnung von 200.000-250.000 Arten gelegen haben.

Gegen Ende des Ordoviziums ereignete sich jedoch das „Ordovizische Massenaussterben“, welches zu den größten Massenaussterbe-Ereignissen der Erdgeschichte zählt. Etwa 85 % der Arten, 60 % der Gattungen und 26 % der Familien aller meeresbewohnenden Organismen starben aus. Dieses Ereignis wird mit einer raschen und dramatischen Abkühlung in Verbindung gebracht, welche auf eine Drift des Gondwana-Kontinents in Richtung Südpol zurückgeführt wird.

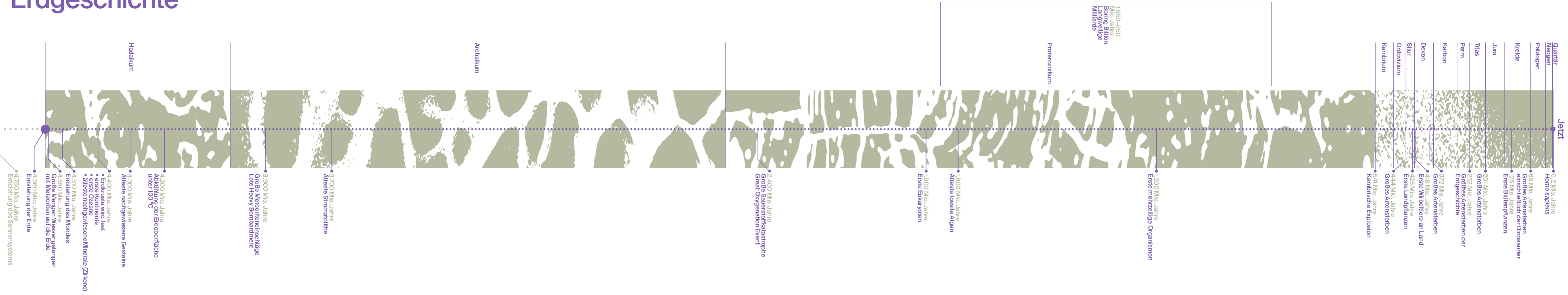
Viele Forschungsergebnisse belegen, dass die Erde, unser Heimatplanet, im 21. Jahrhundert am Beginn eines weiteren Aussterbeereignisses steht.

„Nun stehst du hier, inmitten des physischen und biologischen Vermächtnisses von vier Milliarden Jahren. Vielleicht gehst du spazieren, wo einst Trilobiten über einen uralten Meeresboden krabbelten, wo Dinosaurier einen von Ginkgos bewachsenen Abhang entlang trampelten oder wo Mammuts über eine eisige Grassteppe herrschten. Einst war dies ihre Welt, heute ist es deine. Im Unterschied zu den Dinosauriern kannst du jedoch die Vergangenheit begreifen und dir die Zukunft ausmalen. Die dir zugefallene Welt gehört dir nicht einfach, sie liegt vielmehr in deiner Verantwortung. Was damit als nächstes passiert, hängt von dir ab.“

Mit freundlicher Genehmigung zitiert aus: A. H. Knoll, *A brief history of Earth: four billion years in eight chapters* (New York: Custom House, 2021).



Meilensteine der Erdgeschichte



The Beauty of Early Life. Spuren frühen Lebens

26.3.–10.7.2022

Ausstellung

Kuratiert von: Norbert Lenz, Peter Weibel mit Eduard Harms, Hannah Jung, Philipp Ziegler

Ausstellungsteam: Dennis Grabow, Michaela Spiske, Ozan Türkyilmaz, Beatrice Zaidenberg

Naturwissenschaftliche Unterstützung: Andrew H. Knoll (Harvard University), James W. Schopf (UCLA), Volker Storch (Universität Heidelberg), Helmut Tischlinger (Stammham)

Leitung Museums- und Ausstellungstechnik: Martin Mangold

Technische Projektleitung: Anne Däuper, Andrea Hartinger

Aufbauteam: Claudius Böhm, Mirco Frass, Leonard Friess, Rainer Gabler, Gregor Gaissmaier, Ronald Haas, Daniel Heiss, Christof Hierholzer, Werner Hutzenlaub, Alexandra Kempf, Gisbert Laaber, Christian Nainggolan, Marco Preitschopf, Martin Schläfke, Marc Schütze

Ausstellungsgrafik: Matter Of

Grafik Naturkundemuseum: Susanne Asher, Verena Mildenberger

Fotos Fossilien: Mathias Vielsäcker

Texte: Dennis Grabow, Eduard Harms, Hannah Jung, Norbert Lenz, Jessica Menger, Laura Schmidt, Michaela Spiske, Ozan Türkyilmaz, Peter Weibel, Beatrice Zaidenberg, Philipp Ziegler

Lektorat: Katharina Freisinger, Nina Gothe, Peter Dahm Robertson

Übersetzung: Katharina Freisinger, Peter Dahm Robertson

Externe Firmen: Artinate, COMYK Agentur für Grafik und Litho, Essential Art Solutions, Richfelder Kunstprojekte

Restauratorische Betreuung: Henrike Mall, Leonie Rök

Geologische Präparation: Christiane Birnbaum, Beate Stäblein, Tim Niggemeyer

Registrarin: Natascha Daher

Reisemanagement: Anna Maganuco

Kommunikation und Marketing: Tanja Binder, Marlen Ernst, Ida Kammerer, Samira Kaiser, Svenja Liebig, Anouk Widmann, Lea-Marie Wild, Lisanne Zecha

Presse: Kathrin Luz, Luz Communication, Köln

Museumskommunikation: Janine Burger, Banu Beyer, Mona Feyrer, Regine Frisch, Alexandra Hermann, Barbara Zoé Kiolbassa, Lilli Roser, Charlotte Schmalzbauer, Ulrich Steinberg

ZKM Shop und Infotheke: Almut Werner, Daniela Doermann, Tatjana Draskovic, Ines Karabuz, Ophelia Kühn, Jutta Schuhmann, Marina Siggelkow

Besonderer Dank an: die Künstler:innen, die Leihgeber:innen, Idis Hartmann, Anett Holzheid, Hanna Jurisch, Jens Lutz, Daria Mille, Miriam Stürner

Broschüre

Redaktion und Projektkoordination: Hannah Jung, Philipp Ziegler

Texte: Dennis Grabow, Eduard Harms, Hannah Jung, Norbert Lenz, Michaela Spiske, Peter Weibel

Lektorat: Katharina Freisinger, Nina Gothe

Grafik: Matter Of

Druck: Stober Medien GmbH

Papier: MaxiOffset 90 g/m², MaxiGloss 90 g/m²

Kooperationspartner:

//////KIII zkm karlsruhe

NATURKUNDEMUSEUM
KARLSRUHE

Die Ausstellung *The Beauty of Early Life* findet im ZKM im Rahmen des Programms *It's about Life* statt, gefördert im Impulsprogramm *Kultur trotz Corona* des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Medienpartner:

arte

Öffnungszeiten:

Montag–Dienstag: geschlossen
Mittwoch–Freitag: 10:00–18:00 h
Samstag–Sonntag: 11:00–18:00 h

ZKM | Zentrum für Kunst und Medien Karlsruhe

Lorenzstraße 19, 76135 Karlsruhe
www.zkm.de

Vorstand ZKM: Peter Weibel
Geschäftsführende Vorständin: Helga Huskamp
Verwaltungsleitung: Boris Kirchner

Stifter des ZKM:


Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT,
FORSCHUNG UND KUNST


Karlsruhe

Partner des ZKM:

— EnBW

Abbildungen Seiten 23-38

- 1: Fossile Mikrobenmatte, Dresser Formation, 3,49 Mrd. Jahre alt, Australien
- 2: Stromatolith, Strelley Pool Chert, 3,42 Mrd. Jahre alt, Australien
- 3: Ediacara-Tier *Dickinsonia*, Ust' Pinega Formation, 555 Mio. Jahre alt, Russland
- 4: Schwammähnliches Tier *Chancelloria*, Wheeler Formation, 507 Mio. Jahre alt, USA
- 5: Trilobit *Olenellus*, Pioche Formation, 510 Mio. Jahre alt, USA
- 6: Grünalge *Marpolia*, Marjum Formation, 502 Mio. Jahre alt, USA
- 7: Gliederfüßer *Leanchoilia*, Burgess Shale, 505 Mio. Jahre alt, Kanada
- 8: Gliederfüßer *Fuxianhuia*, Maotianshan Shale, 518 Mio. Jahre alt, China
- 9: Schlangensterne *Ophiura*, Ktaoua Formation, 450 Mio. Jahre alt, Marokko

Teilnehmende Künstler:innen:

Memo Akten - Suzanne Anker - Hans Arp - Brett Baker & Laura Hug - Willi Baumeister - Sonia Mehra Chawla - Paul Rosero Contreras - James Darling & Lesley Forwood - Anna Dumitriu & Alex May - ecoLogicStudio (Claudia Pasquero & Marco Poletto) - Max Ernst - Thomas Feuerstein - Ernst Haeckel - Jens Harder - Aleš Hieng, Ida Hiršfenfelder, Robertina Šebjanič - Institut für Biologische Grenzflächen 1, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Manfred Kage - Agnieszka Kurant - Sonia Levy - Bernd Lintermann, Derek Hauffen - Martin Lisec - Andy Lomas - Len Lye - Louise Mackenzie - Reiner Maria Matysik - Joan Miró - Jakub Nepraš - OOZE (Eva Pfannes & Sylvain Hartenberg), Marjetica Potrč - Dan Rees - Maija Tammi - Yves Tanguy - Xandra van der Eijk - Martin Walde - Carmel Wallace

