





KATRIN UND ALEXANDER LAATSCH

GESCHICHTE DES LEBENS

VOM EINZELLER BIS ZUM MENSCHEN

4000 BIS 2500 MILLIONEN JAHRE VOR HEUTE



DIE ENTSTEHUNG DES LEBENS: EINZELLER

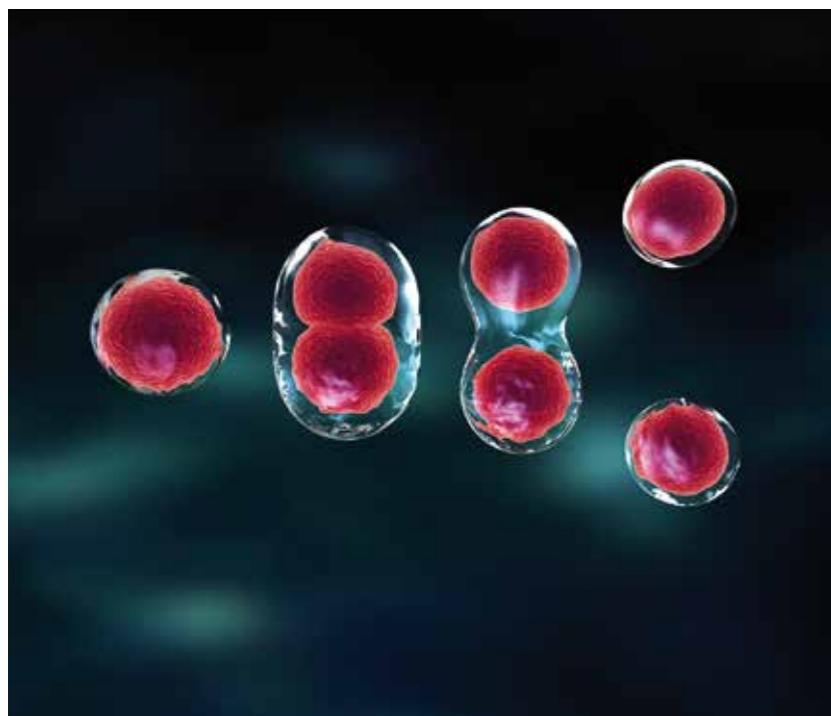
Schon sehr früh beginnt das Leben auf der Erde. Einzeller entwickeln im Urozean eine große Bandbreite an Stoffwechselfähigkeiten. Dazu gehört die Fotosynthese. Als mit ihrer Hilfe plötzlich größere Mengen Sauerstoff entstehen, steuert das Leben auf eine erste Katastrophe zu, aus der es jedoch gestärkt hervorgeht und mit einem neuen Zelltyp die Grundlage für komplexe Vielzeller legt.

DIE URZELLE: WIE ALLES BEGANN

Niemand weiß, wo genau das Leben auf der jungen Erde entstanden ist oder ob es vielleicht sogar mehrfach passierte. Es gibt jedoch recht gute Vorstellungen davon, wie dieser Ort möglicherweise aussehen hat, denn das heutige Leben trägt die Spuren seiner Kindheit noch immer in sich.

Schon der Blick in unseren eigenen Körper verrät einiges: Wir bestehen aus einer unvorstellbar großen Anzahl an mikroskopisch kleinen Zellen, den mit einer dünnen Membranhülle umschlossenen, kleinsten Einheiten des Lebens. Jede davon ist für sich allein prinzipiell lebensfähig. Vor allem ist eine Zelle in der Lage, sich in Tochterzellen zu teilen und so neue Zellen und neues Leben zu erschaffen. Das Leben verbreitet und entwickelt sich daher immer

Zellen sind mit bloßem Auge meist nicht zu erkennen, ihre typische Größe reicht von einem Tausendstel bis zu einem Zehntel Millimeter. Sie vermehren sich durch Teilung in zwei Tochterzellen.



weiter aus sich selbst heraus in einem riesigen Abstammungsbaum, in dem Zellen aus Zellen hervorgehen. Wo aber ist die erste Zelle entstanden, die Urzelle, die als einzige keinen lebenden Vorfahrer hat?

Ein erster Hinweis ist, dass unser Körper letztlich ein „wandelndes Aquarium“ darstellt, bei dem alle trockenen Oberflächen aus totem Material bestehen – praktisch unser gesamtes Äußeres ist eine Hülle aus der toten, obersten Hautschicht. Im Inneren dieses größtenteils mit Wasser gefüllten Aquariums leben unsere Zellen, die offenbar wie alles Leben auf Wasser angewiesen sind. Es liegt daher nahe zu vermuten, dass die erste Zelle im Wasser entstanden ist. In der Flüssigkeit, die unsere Körperzellen umgibt, sind verschiedene Salze gelöst. Ihre biologisch wichtigen Mengenverhältnisse, die auch medizinisch eine erhebliche Rolle spielen, entsprechen denen im Meerwasser. Dies spricht für den Urozean und gegen vereinzelte Süßwasseransammlungen auf der Uerde als Entstehungs-ort der ersten Zelle.

Zellen bestehen im Wesentlichen aus sogenannten organischen Molekülen, insbesondere Proteinen, Kohlenhydraten und Nukleinsäuren, die von Nährwerttabellen auf Lebensmittelverpackungen bzw. als genetisches Material bekannt sind. Bis ins 19. Jahrhundert glaubte man, diese könnten nur von lebenden Organismen gebildet werden.

Seit dem 20. Jahrhundert kann in Labor-experimenten immer besser demonstriert

werden, wie sich diese Substanzen schon vor der Entstehung des Lebens unter den Bedingungen auf der „anorganischen“ Uerde formen konnten. Viele dieser Moleküle haben die spezielle geometrische Eigenschaft, nicht mit ihrem Spiegelbild identisch zu sein. Dies entspricht unseren Händen, bei denen linke und rechte Hand spiegelbildlich, aber nicht identisch sind, was daran deutlich wird, dass ein Handschlag mit der eigenen rechten Hand nur mit der rechten Hand des Gegenübers „passt“, aber nicht mit dessen linker Hand (im Gegensatz zu einem Kochtopf, dessen Spiegelbild sich optisch und in seiner Nutz-

Linksdrehende Joghurtkulturen wurden nicht speziell gerührt, sondern ihre Milchsäurebakterien haben sich für eine bestimmte Molekülsorte „entschieden“.

barkeit nicht vom Original unterscheidet). Entsprechende Moleküle werden als „links-“ oder „rechtsdrehend“ bezeichnet, wie es auf vielen Joghurtbechern für die darin enthaltene Milchsäure angegeben ist. In Lebewesen kommen alle genannten Stoffgruppen nur in jeweils einer der beiden möglichen Formen vor, was zunächst sehr erstaunlich ist, denn wie linke und rechte Hände entstehen die beiden Molekülformen normalerweise immer in gleicher Anzahl. Lässt man alternative Theorien z. B. bezüglich spezieller kosmischer Strahlung außen vor, lässt dies den Schluss zu, dass zumindest das Leben, das wir heute auf der Erde kennen, vermutlich auf nur einen Entstehungsort zurückgeht: Zwei linke Hände passen beim Handschlag genauso perfekt zueinander wie ihre Spiegelbilder, zwei rechte Hände. Daher würden Zellen aus komplett spiegelbildlichen Molekülen ebenfalls gleich gut funktionieren, und keine hätte einen evolutiven Vorteil. Sollte das Leben mehrfach entstanden sein, wäre zu erwarten, dass es in der Hälfte der Fälle in der linken Version entstanden ist und in der anderen Hälfte in



Der Chemiker Friedrich Wöhler stellte im 19. Jahrhundert organische Substanzen im Reagenzglas her. Damit begann die bis dahin vertretene Auffassung ins Wanken zu geraten, dass organische Moleküle zu ihrer Erzeugung einer besonderen „Lebenskraft“ bedürften, die nur von lebenden Zellen ausginge.

der rechten. Da jedoch alle bekannten Zellen diesbezüglich identisch sind, spricht dies für eine einmalige Entstehung.

Wo entstand das Leben?

Proteine und Nukleinsäuren sind sehr große Moleküle, für deren Bildung einige Energie erforderlich ist. Nachdem zunächst lange angenommen wurde, dass diese aus Blitzen der jungen Uratmosphäre oder aus ultravioletter Strahlung stammte, wird heute überwiegend davon ausgegangen, dass das Leben in der strahlungsgeschützten Tiefsee entstand, und zwar an hydrothermalen Quellen. Von diesen gibt es zwei verschiedene Arten: schwarze und weiße Raucher. Beide kommen auch heute noch am Meeresboden vor, waren früher aber vermutlich sehr viel häufiger.

Aus schwarzen Rauchern tritt Wasser mit Temperaturen von teilweise mehr als 400 °C aus. Während der Vermischung mit dem kalten Meerwasser bilden sich schwarze Schwaden aus Eisen-Schwefel-Mineralien wie das als „Katzengold“ auch an Land zu findende Pyrit. Diese sind in der Lage, organische Moleküle zu binden und Energie für die Bildung

komplexerer Strukturen zu liefern. Während man nach der Entdeckung der schwarzen Raucher Ende der 1970er-Jahre zunächst davon ausging, den möglichen Entstehungsort des Lebens auf der Erde gefunden zu haben, sind nach neueren Ideen weiße Raucher die plausibleren Kandidaten. Sie sind insgesamt lebensfreundlicher und weisen moderatere Temperaturen von meist unter 100 °C auf. Ihr

mit weniger Druck ausströmendes Wasser ist nicht stark sauer wie bei schwarzen Rauchern, und sie sind offenbar über längere geologische Zeiten stabil, sodass für die Entwicklung des Lebens genug Zeit zur Verfügung stand. Die im Meerwasser von den schwarzen Rauchern stammenden Eisen-Schwefel-Mineralen wären in diesem Szenario ebenfalls zur Bildung organischer Biomoleküle nutzbar gewesen,

die durch die erhöhten Wassertemperaturen beschleunigt entstanden wären. Zusätzlich stoßen weiße Raucher einfache organische Moleküle selbst aus. Eine vielversprechende Möglichkeit ist, dass diese ersten Biomoleküle sich in der mikroskopisch feinen, mineralischen Struktur der weißen Raucher anreichern konnten, die gleichzeitig gute Voraussetzungen dafür bietet, dass sich ein erster

einfacher Stoffwechsel entwickeln konnte. Kleine Hohlräume im anorganischen Material der weißen Raucher hätten vermutlich verhindert, dass die ersten zukünftigen Zellbestandteile im riesigen Ozean verloren gingen, bis eine dieser anorganischen Zellen schließlich durch die Bildung von biologischen Membranen selbstständig werden konnte und nicht mehr auf den mineralischen Hohlraum

ALTERNATIVE THEORIEN ZUR ENTSTEHUNG DES LEBENS AUF DER ERDE

Die Frage nach dem Ursprung des Lebens hat den Menschen schon immer fasziniert – nicht nur, weil es um einen entscheidenden Punkt in unserer eigenen Geschichte geht, sondern weil dieser Moment so unvorstellbar weit in der Vergangenheit liegt, dass er unsere Geschichte mit der des Universums verbindet. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die damaligen Vorgänge auf der Erde im Universum einzigartig oder zumindest selten sind. Es verwundert daher nicht, dass es im Laufe der wissenschaftlichen Auseinandersetzung eine große Spannbreite an Hypothesen zu diesen Fragen gegeben hat und noch immer gibt.

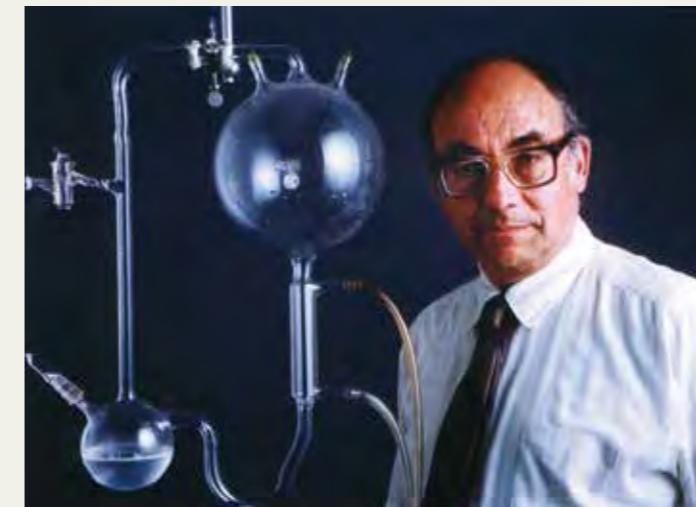
Einfache organische Moleküle sind im Weltraum offenbar weit verbreitet. Ein 1969 eingeschlagener Meteorit, der vielleicht sogar älter als die Sonne ist, enthält sogar mindestens viele Tausend verschiedene solcher Moleküle. Dies bestärkt die Spekulation, das Leben oder zumindest die dafür benötigten Bausteine könnten mit Meteoriten oder auf anderen Wegen, etwa vom Mars oder der Venus, aus dem All auf die Erde gekommen sein. Diese panspermie-Hypothese versucht vor allem zu erklären, wie sich offenbar so schnell aus einfachsten Molekülen komplexes Leben entwickelt hat. Neben einer Reihe inhaltlicher Schwierigkeiten bleibt jedoch vor allem unbefriedigend, dass die Hypothese die grundsätzliche Entstehung des Lebens nur räumlich und zeitlich verschiebt, aber nicht erklärt – mit vielleicht einer Ausnahme: Nukleinsäuren, die heutigen Informationsspeicher lebender Zellen, die schon früh entstanden sein müssen, bilden sich aus unbelebter Materie vermutlich sehr viel besser in kleineren Seen in einer ansonsten trockenen Umgebung als auf der vor etwa vier Milliarden Jahren praktisch vollständig von einem Ozean bedeckten Erde. Einige Argumente sprechen dafür, dass dies auf dem Mars geschehen sein könnte und das möglicherweise dort entstandene Leben mit



Marsmeteoriten treffen regelmäßig die Erde, nachdem sie durch Meteoriteneinschläge auf dem Mars ins Weltall geschleudert wurden. So gelangte vermutlich auch der Shergottit, zu dem dieses Bruchstück gehört, auf die Erde.

Meteoriten, die den Mars aufgrund seiner geringen Schwerkraft regelmäßig verlassen, auf unseren Planeten gelangt ist.

Zumindest heutige, irdische Bakteriensporen können eine solche, gegebenenfalls Hunderttausende oder Millionen Jahre lange, strapaziöse Reise inklusive Start und Landung offenbar überstehen. So könnte das Leben auf der Erde innerhalb kürzester Zeit Fuß gefasst haben, nachdem sich hier lebensfreundliche Bedingungen eingestellt hatten.



Stanley Miller führte 1953 das berühmte, nach ihm und seinem Doktorvater benannte Miller-Urey-Experiment durch, bei dem aus einer hypothetischen Uratmosphäre Bausteine des Lebens entstanden.

Eine nach aktuellem Forschungsstand noch der Spekulation zuzuordnende Hypothese beruht auf der recht jungen Erkenntnis, dass die heutige Erdatmosphäre bis in viele Kilometer Höhe in bislang nicht für möglich gehaltenem Ausmaß von Mikroben bevölkert ist. Das Leben könnte daher genau dort entstanden sein – weit über und in sicherem Abstand von der vor mehr als vier Milliarden Jahren noch viel zu heißen, zeitweise geschmolzenen Erdoberfläche. Einige chemische Rahmenbedingungen wären dort günstiger gewesen als im Urozean. Die feinen Wasserdrops der verdampften Ozeane mit darin enthaltenen Staubpartikeln hätten vielleicht als Vorläufer der ersten Zellen gedient, die regelmäßig vom Himmel fielen. Sobald die Ozeane bewohnbar waren, hätten sie sich dort erfolgreich vermehren können.

Ist das Leben einzigartig?

In den letzten Jahrzehnten ist von vielen namhaften Wissenschaftlern die Entstehung des Lebens als ein ungeheuer, sehr unwahrscheinlicher Zufall angesehen worden, bei dem durch eine glückliche Fügung alle erforderlichen Komponenten in der „Ursuppe“ richtig zusammenkamen. Die für das Leben erforderliche, wohlgeordnete Komplexität und damit das Leben selbst wäre demnach ein im Universum vielleicht einmaliges, mindestens jedoch extrem seltenes Zufallsprodukt.

Seit einigen Jahren mehren sich jedoch die Hinweise aus systematischen, interdisziplinären Überlegungen, Computersimulationen, beständig weiterentwickelten mathematischen Modellen und ersten gezielten Laborversuchen, dass die Entstehung von Leben vermutlich kein Zufall ist. Experimente aus dem 20. Jahrhundert, die auf verschiedene Weisen zu „Ursuppen“ aus einfachen Biomolekülen führten, sind offenbar keine ausreichende Erklärungsgrundlage, denn mittlerweile kann selbst das Vorkommen organischer Moleküle in Marsmeteoriten in Übereinstimmung mit Bodenproben, die vom Marsrover Curiosity untersucht wurden, ohne die Annahme von Lebewesen erklärt werden. Trotzdem, oder gerade aufbauend auf diesen vor-biologischen Prozessen, scheint die Entstehung von Leben ein planetarer Prozess zu sein, der zwangsläufig stattfindet, wenn bestimmte Rahmenbedingungen gegeben sind. In dieser Sichtweise ist Leben bzw. die Biosphäre ein notwendiger und vorhersagbarer Schritt in der Entwicklung eines entsprechenden Planeten. Die belebte Biosphäre bildet sich demnach aus letztlich vergleichbaren Gründen wie die Atmosphäre, Litosphäre und Hydrosphäre eines Planeten. Sie besteht aus sich beständig verändernden biologischen Arten, die Ökosysteme bilden, welche die Grundlage der Stabilität der Biosphäre sind. Astronomische Beobachtungen der letzten Jahre zeigen, dass das Universum offenbar eine unübersehbare Zahl von Exoplaneten beherbergt – es scheint realistisch zu sein anzunehmen, dass viele davon belebt sind.



Pyrit, auch Katzengold, Schwefel- oder Eisenkies genannt, ist ein auch heute noch sehr häufiges Mineral aus Eisen und Schwefel. Es hat bei der Entstehung des Lebens vermutlich eine wichtige Rolle gespielt.

angewiesen war – die erste Zelle war entstanden. Sie teilte sich und bevölkerte die Erde mit ihren Nachfahren. Währenddessen veränderten diese sich ständig und haben bis heute immer mehr unterschiedliche Lebewesen hervorgebracht.

Rechnet man die Entwicklung der Genome der heute existierenden Lebewesen auf



Die im ausströmenden Wasser gelösten Mineralien bestimmen die Farbe der „Fahnen“ und die Beschaffenheit der Schlote unterschiedlicher Hydrothermalquellen am Meeresboden.



das Genom der Urzelle zurück, so ergibt sich für diese ein Alter von ungefähr vier Milliarden Jahren – das Alter der Erde selbst ist mit etwa 4,6 Milliarden Jahren nur wenig älter. Das Leben entstand offenbar direkt nachdem sich das zuvor flüssige Gestein der Uerde so weit abgekühlt hatte, dass flüssiges Wasser nicht sofort verdampfte. Kürzlich wurden die ältesten Spuren, die Lebewesen zugeschrieben werden, in grönländischem Gestein gefunden. Sie sind 3,7 Milliarden Jahre alt. Chemische Hinweise auf Leben existieren sogar aus der Zeit vor 4,1 Milliarden Jahren. Es wäre demnach bereits im späten Hadaikum (bis vor vier Milliarden Jahren) entstanden, dem ersten Äon der Erdgeschichte.

Noch heute leben an den verbliebenen Hydrothermalquellen Vertreter der vermutlich ersten Nachfahren der ursprünglichsten, einzelligen Organismen: die Archaeen. Sie ähneln dem ersten Augenschein nach Bakterien und wurden früher mit ihnen gleichgesetzt.

ARCHEEN UND BAKTERIEN: EXTREMLEISTUNGEN DES LEBENDIGEN

Organismen, die unter extremen Umweltbedingungen wie großer Hitze oder Kälte oder hohen Säure- oder Salzgehalten leben können oder diese sogar benötigen, werden als „Extremophile“ bezeichnet. Viele von ihnen gehören zu den Archaeen. Einige von ihnen wachsen noch bei Temperaturen von mehr als 120 °C in heißen Quellen oder in gesättigten Kochsalzlösungen, deren Salzgehalt dem Zehnfachen von Meerwasser entspricht. Beispielsweise sind fast alle Mikroorganismen im Toten Meer Archaeen.

Auch ihre Stoffwechselleistungen sind beachtlich, keine anderen Organismen sind in der Lage, Methan (der Hauptbestandteil von Erdgas und gleichzeitig Treibhausgas) zu produzieren. Sie tun dies unter anderem bei der Kompostierung von organischem Material, in Biogasanlagen, im Verdauungstrakt von Wiederkäu-

ern und in sehr nassen Böden wie Reisfeldern. Noch vielseitiger sind jedoch die Bakterien: Es gibt bis hin zu Kunststoff kaum eine Substanz, die nicht von irgendeinem Bakterium abgebaut und verwertet werden kann, und sie halten mittlerweile im Ökosystem der Erde die Kreisläufe der Elemente Stickstoff, Schwefel und in Teilen Kohlenstoff und Phosphor aufrecht.

Biotechnologisch werden Bakterien nicht nur zur Reinigung von Haushalts- und der Entgiftung von Industrieabwässern eingesetzt, sondern auch zur Produktion verschiedenster Substanzen wie Biokunststoffen, Medikamenten, Industriechemikalien oder Nahrungsmitteln. Einige Arten widerstehen starker radioaktiver Strahlung, andere wurden noch kilometertief unter dem Ozeanboden gefunden, wieder andere wachsen bei -20 °C und zeigen sogar bei -200 °C noch immer Stoffwechselaktivität.



Nur wenige Lebewesen können in unverdünnten Bereichen des extrem salzhaltigen Toten Meeres leben. Es sind ausschließlich Einzeller, die überwiegend zur evolutiv sehr alten Gruppe der Archaeen gehören, von denen viele auf Extremlebensräume spezialisiert sind.



Die ältesten Lebensspuren finden sich in Stromatolithen, Gesteinen, in denen sich die Ablagerungen von Mikrobenmatten erhalten haben, die im Anschnitt als ringförmige Linien sichtbar werden. Der gezeigte Stromatolith stammt aus der Kreide.

Mittlerweile werden sie jedoch in Abgrenzung zu den „echten Bakterien“ als eine eigene von drei Domänen des Lebens betrachtet, die die höchste Ebene der biologischen Systematik für alle Lebewesen bilden (siehe Stammbaum, S. 266). Archaeen beinhalten besonders viele Proteine, die nur in Verbindung mit einem winzigen Eisen-Schwefel-Anteil funktionieren, und auch menschliche Zellen als ihre entfernten Verwandten benötigen solche Proteine noch. Diese haben damit quasi einen Teil der Minerale aus der Entstehungszeit

des Lebens am Meeresboden, der chemisch aktiven Grenzregion zwischen Erdmantel und Hydrosphäre, mitgenommen, sodass auch wir dieses Erbe noch immer in uns tragen. Weitere Entsprechungen der heutigen Archaeen zu den Bedingungen am vermuteten Ort der

Die ersten Lebewesen vertrugen keinen Sauerstoff, benötigten kein Sonnenlicht und liebten es heiß.

Entstehung des Lebens sind, dass sie meist keinen Sauerstoff vertragen, der auf der Urerde als Gas noch nicht vorhanden war, kein Sonnenlicht benötigen, und dass zu ihnen die einzigen Lebewesen zählen, die dauerhaft bei sehr hohen Temperaturen um 100 °C leben und sich vermehren können.

Die ersten echten Bakterien entwickelten sich vermutlich ebenfalls zu dieser Zeit oder kurz danach. Sie stellen eine Schwestergruppe oder eine Seitenlinie der Archaeen dar und haben sich mit der Zeit in etwas weniger extremen Lebensräumen zu einer großen Gruppe von Einzellern entwickelt, deren Vertreter zu einer Vielzahl erstaunlicher Stoffwechselleistungen in der Lage sind.

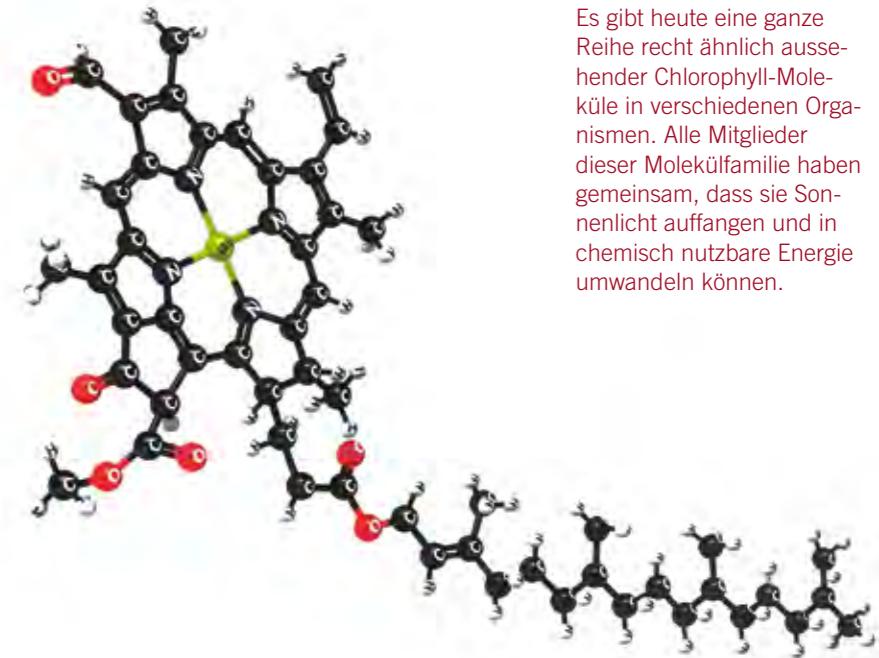


Im Gegensatz zu diesen stäbchenförmigen Legionellen, die Infektionserkrankungen hervorrufen können, ist die überwiegende Mehrzahl der Bakterien für den Menschen nicht nur harmlos, sondern in vielen Fällen sogar nützlich.

NUTZUNG DES SONNENLICHTS: DIE ERSTEN SOLARANLAGEN

Die ersten Organismen deckten ihren Energiebedarf durch die Verwertung energiereicher Substanzen, die sie als Nahrung aus ihrer Umgebung aufnahmen. Damit unterschieden sie sich in ihrem grundlegenden Stoffwechsel kaum von vielen heutigen Zellen, inklusive der menschlichen.

Allerdings ernährten sich die damaligen Zellen überwiegend von anorganischen Substanzen aus der Erdkruste statt von anderem organischen Material. Diese Nahrungsgrundlage ist auf Dauer nicht nachhaltig, weil sie nicht „nachwächst“. Doch schon bald nach dem Beginn des zweiten Äons der Erdgeschichte, dem Archaikum, vor knapp vier Milliarden Jahren, begann sich unter den Bakterien ein gänzlich neues Stoffwechselkonzept zu entwickeln, das dramatische Auswirkungen auf die weitere Entwicklung des Lebens haben sollte: Mehrere verschiedene Bakterien tauschten Teile ihrer genetischen Informationen untereinander aus und trugen



„Solarzellen“ sind eine sehr alte Erfindung der Natur – Bakterien nutzen die Sonnenenergie schon seit fast vier Milliarden Jahren.

so am Ende alle Komponenten zusammen, mit denen sie die „erneuerbare“ Energie des Sonnenlichtes nutzen konnten.

Eine solche „Solaranlage“ mit dem grün erscheinenden Molekül Chlorophyll im Zentrum kann von einer Zelle sowohl zur reinen Energiegewinnung genutzt werden als auch zum Aufbau von energiereichen Zuckern, die ihrerseits das ansonsten biochemisch kaum noch verwertbare Kohlendioxid zur Grund-

lage haben. Deshalb wird der gesamte Prozess der lichtgetriebenen Zuckersynthese „Fotosynthese“ genannt. Er ist entscheidend, um einen im Archaikum begonnenen Kreislauf aufrechtzuerhalten, der heute besonders augenfällig zwischen den Fotosynthetis betreibenden Pflanzen auf der einen Seite und auf der anderen Seite den Tieren abläuft, die dies nicht tun: Pflanzen nutzen das Sonnenlicht, um durch die Fotosynthese energiereiche Substanzen aufzubauen, die wie eine Batterie die Energie des Sonnenlichtes speichern. Tiere ernähren sich als Pflanzenfresser direkt, als Fleischfresser indirekt von diesen energierei-

Es gibt heute eine ganze Reihe recht ähnlich aussehender Chlorophyll-Moleküle in verschiedenen Organismen. Alle Mitglieder dieser Molekülfamilie haben gemeinsam, dass sie Sonnenlicht auffangen und in chemisch nutzbare Energie umwandeln können.

Auf der Erde besteht ein Stoffkreislauf, der Sonnenenergie zwischen nahezu allen Lebewesen verteilt. Organismen wie Pflanzen stellen mithilfe von Sonnenlicht aus Kohlendioxid energiehaltige Substanzen wie Zucker her. Organismen wie Tiere, einschließlich des Menschen, benötigen diese Stoffe als Energiequelle und stellen Kohlendioxid als Abbauprodukt den Pflanzen wieder zur Verfügung.



chen Verbindungen und bauen sie ab, um die darin gespeicherte Energie für sich zu nutzen. Da es sich um einen Kreislauf handelt, sind die Tiere nicht nur Nutznießer der Pflanzen, sondern auch die Pflanzen hängen von den Tieren ab, denn diese produzieren beim Abbau des Pflanzenmaterials das energiearme Endprodukt Kohlendioxid, das die Pflanzen wiederum als Ausgangsstoff für ihre Fotosynthese benötigen. Dadurch schließt sich der Kreislauf, der nur dann störungsfrei ablaufen kann, wenn beide Hälften in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Sind sie nicht miteinander im Gleichgewicht, ist der Zusammenbruch des dominierenden Prozesses durch einen Mangel an Ausgangsstoffen beziehungsweise Nahrungsmitteln vorprogrammiert. In der Frühphase des Lebens auf der Erde hatten fotosynthetisierende Bakterien die spätere Rolle der Pflanzen inne und nicht-fotosynthetisierende Einzeller nahmen den Platz ein, den sie später mit Tieren und einigen anderen komplexeren Organismen teilen mussten.

Jeder Organismus, insbesondere unter den Bakterien, optimiert seine Fotosynthesemaschinerie in Abhängigkeit von den Gegebenheiten seines Lebensraumes. So nutzen unterschiedliche Organismen unterschiedliche Farbanteile des insgesamt weißen Sonnenlichtes, sodass ebenso unterschiedliche Farben übrig bleiben, in denen sie dann gefärbt sind. Dadurch ergeben sich

Tiere und Pflanzen können nur gemeinsam überleben, alleine verhungern sie.

beispielsweise an sonnenbeschienenen Teichufern übereinanderliegende Schichtungen verschiedenfarbiger Bakterienarten, wobei die tieferliegenden diejenigen Lichtfarben für ihre Fotosynthese verwenden, die die darüber liegenden übrig gelassen haben. Je tiefer ein Organismus im Wasser lebt, desto stärker ist er

auf die Nutzung von Licht angewiesen, dessen Farbe sich auf der blauen Seite eines Regenbogens befindet. Wie jeder erleben kann, der in die „blauen Tiefen“ des Meeres blickt, liegt dies daran, dass Wasser Lichtfarben immer stärker herausfiltert, je näher diese der roten Seite des Regenbogens stehen. In die Tiefsee gelangt gar kein Sonnenlicht, aber selbst dort haben Fotosynthese betreibende Bakterien einen Ort zum Leben gefunden, und zwar wieder an heißen Quellen: Sie besitzen einen so lichtempfindlichen Fotosyntheseapparat, dass sie das schwache, für menschliche Augen nicht sichtbare Infrarotlicht nutzen können, das von der heißen Quelle abgegeben wird.

Arten der Fotosynthese

Ebenso wie es unterschiedliche Techniken der Fotosynthese gibt, existieren auch heute noch viele Varianten der Fotosynthese in den unterschiedlichen Abstammungslinien der Organismen, die diese einsetzen. Allen frühen Formen der Fotosynthese ist gemeinsam, dass sie entgegen der heute verbreitetsten und bekanntesten keinen Sauerstoff produzieren. Die Uerde blieb daher zunächst ein Ort, an dem freier Sauerstoff allenfalls in geringen Mengen aus der Spaltung von Wasser durch ultraviolette Strahlung aus dem All vorkam. Statt Sauerstoff freizusetzen, entsteht im Rahmen der sauerstofffreien Fotosynthese meistens Schwefel oder Sulfat aus dem für uns hochgiftigen Schwefelwasserstoff (bekannt als der Geruch von faulen Eiern). In einigen Fällen wird Wasserstoffgas benötigt, in anderen Eisensalze. Diese für uns heute sehr lebensfeindlich erscheinenden Substanzen erinnern sehr an die Bedingungen auf der frühen Erde und lassen eine frühe Entstehung dieser Formen der Fotosynthese selbst ohne die Berücksichtigung der entsprechenden genetischen Hinweise plausibel erscheinen. Dieses von Schwefel, Wasserstoff und Eisen abhängige bakterielle Leben existiert auch heute noch auf der Erde, und zwar nicht nur an ausgesuchten Tiefseeschlotten oder Schwefelquellen in vulkanischen Gebieten. Man findet es nahezu überall dort, wo auch heute kein oder sehr wenig Sauerstoff vorkommt, wie am

Grund vieler Gewässer, in überschwemmten Böden, Faulschlamm oder dem Verdaustrakt verschiedenster Tiere.

Bei einigen Archaeen hat sich im Gegensatz zu den Bakterien eine besondere Form der Lichtenergienutzung entwickelt. Sie betreiben keine Fotosynthese im engeren Sinne, weil sie nicht in der Lage sind, mithilfe des Lichtes neue Moleküle aus Kohlendioxid herzustellen. Stattdessen nutzen sie es rein zur Energiegewinnung, indem sie eine licht-

Im Gegensatz zu heutigen Pflanzen produziert die Fotosynthesemaschinerie von Bakterien, die in der Frühzeit der Evolution entstanden sind, noch keinen Sauerstoff.

betriebene Pumpe entwickelt haben, die in Kombination mit einer molekularen Turbine in ihrer Zellmembran chemisch verwertbare Energie produziert. Bemerkenswerterweise ähneln die dreidimensionale Struktur und die Funktionsweise dieser lichtbetriebenen

Am Abfluss einer Quelle sind unterschiedlich gefärbte, Fotosynthese betreibende Mikroben zu sehen.



Pumpe der Archaeen dem Sehpigment in den verschiedenen Augentypen der Tiere inklusive der lichtempfindlichen Komponente im menschlichen Auge. Man geht daher davon

Der lichtempfindliche Mechanismus in unseren Augen wird von evolutiv sehr alten Einzellern bereits zur Energiegewinnung genutzt.

Die hohen Salzkonzentrationen in den Trocknungsbecken für die Meersalzgewinnung sind ideale Lebensräume für salzliebende Archaeen sowie einige andere salztolerante Einzeller, die alle intensiv gefärbt sind.



aus, dass alle diese Strukturen auf einen schon sehr früh in der Entwicklung des Lebens entstandenen Vorläufer zurückgehen. Die Vertre-

ter der Archaeen, die zu dieser Lichtnutzung befähigt sind, sind salzliebend und verraten ihre besondere Fähigkeit der Lichtnutzung ebenfalls durch eine intensive Färbung.

Nach dieser Phase der ersten Lichtenergienutzung durch vergleichsweise einfache Fotosynthese-Mechanismen war auf der frühen Erde ein langfristig stabiler Stoff- und Energiekreislauf etabliert: Fotosynthetisch aktive Organismen bauen mithilfe des Sonnenlichtes energiereiche Biomasse aus Kohlendioxid auf. Andere Organismen verwenden diese als Nahrung, nutzen die enthaltene Energie und setzen Kohlendioxid wieder frei. Er kann so lange aktiv bleiben, wie Licht von der Sonne die Erde erreicht.

SAUERSTOFF ALS GIFTIGES ABGAS: FLUCH UND SEGEN

Vor grob 2,7 Milliarden Jahren, die Datierung ist unsicher, entwickelten die Vorfahren der heutigen Cyanobakterien eine revolutionär neue Form der Fotosynthese: Die Kombination von zwei Fotoreaktionszentren ermöglichte ihnen die Nutzung des Sonnenlichtes zur Spaltung von Wasser.

Durch diesen biochemischen Trick konnten sie unabhängig von den bisher verwendeten, selteneren Ausgangsstoffen wie Schwefel, Schwefelwasserstoff oder bestimmten Metallen Energie aus Sonnenlicht gewinnen und damit neue Zellbestandteile aufbauen. Neben dem erwünschten Wasserstoff, der für diesen Aufbau neuer Biomasse genutzt wurde, entstand als Abfallprodukt der Wasserspaltung gasförmiger Sauerstoff. Dieser ist chemisch sehr aggressiv – Metalle oxidieren (z. B. rostendes Eisen), organische Substanzen verbrennen (je nach Temperatur mehr oder weniger schnell) und noch heute werden wir deshalb nicht zuletzt in der Werbung regelmäßig auf die Gefahren „reaktiven Sauerstoffes“ hingewiesen, der zur Zellarbeitung beiträgt und durch Schädigung des Erbguts Tumore hervorrufen kann.

Im Gegensatz zu heute, nach mehr als zwei Milliarden Jahren evolutiver Anpassung an eine sauerstoffhaltige Atmosphäre, traf das erstmalige Auftreten größerer Mengen an freiem Sauerstoff die meisten Lebewesen damals völlig unvorbereitet. Es kam vermutlich zum größten Massensterben der Erdgeschichte, dem ein Großteil der damaligen Organismen zum Opfer fiel, denn der Sauerstoff ließ die empfindlichen Eisen-Schwefel-Strukturen im wahrsten Sinne des Wortes verrosteten, und giftige Peroxide, die heute u. a. als Desinfektions- und Bleichmittel eingesetzt werden, zerstörten weitere Komponenten der Zellen. Nur einigen wenigen Zellen gelang es, rechtzeitig



Schutzmechanismen zu entwickeln, die noch heute in allen ihren Nachfahren vorhanden sind, nämlich den Lebewesen, die dauerhaft Sauerstoff ausgesetzt sind. Dazu gehört auch

Das erste Auftreten von molekularem Sauerstoff löste vor 2,3 Milliarden Jahren ein Massensterben aus, denn Sauerstoff war für die damaligen Organismen ein tödliches Gift.

der Mensch, dessen Sauerstoff transportierende rote Blutkörperchen beispielsweise besonders geschützt sind.

Die wenigen der damals schon widerstandsfähigen Organismen überstanden mit-

Viel Chlorophyll – beim bekannten Nahrungsergänzungsmittel „Spirulina“ handelt es sich eigentlich um getrocknete und dann zu Tabletten gepresste Cyanobakterien, die manchmal auch „Blaualgen“ genannt werden. Dieser Organismengruppe gelang es, jene Form der Fotosynthese zu entwickeln, bei der Wasser gespalten und Sauerstoff freigesetzt wird.

hilfe der von ihnen erfundenen chemischen Sauerstoff- und Peroxidabwehr die vermutlich größte Krise in der Geschichte des Lebens, die sich vor wenig mehr als 2,3 Milliarden Jahren abspielte und heute „Große Sauerstoffkatastrophe“ genannt wird.

Was genau geschah in dieser Zeit? Direkt nach der ersten Sauerstoffproduktion durch die Cyanobakterien begann eine Phase der Ruhe vor dem Sturm, in der der entstehende Sauerstoff sofort verbraucht wurde, sodass er sich im Wasser und in der Atmosphäre nicht ansammeln konnte: Ein wichtiger, Sauerstoff verbrauchender Prozess war das Verrostern

Der erstmalig frei auftretende Sauerstoff führte zur Bildung der weltweit größten Eisenerzvorräte.

von Eisen, das in großer Menge im Ozean gelöst war. Es lagerte sich schichtweise ab und bildete Bändereisenerz, das heute zu den wichtigsten Eisenerzen weltweit zählt. Eisen gelangte vor allem durch Vulkanismus ins Wasser. Die Schichtung entstand vermutlich dadurch, dass der kontinuierlich entstehende Sauerstoff vom vorhandenen Eisen zunächst gebunden wurde. Als dieser Eisenvorrat

Das typische Linienmuster dieses gebänderten Eisenerzes aus Kanada entstand durch die Ablagerung eisenhaltiger Sedimente.



„verbraucht“ war, stieg die Sauerstoffkonzentration wieder und tötete die noch sauerstoffempfindlichen, frühen Cyanobakterien ab, sodass die Sauerstoffproduktion stark zurückging. Durch das langsam nachgelieferte Eisen wurde der verbliebene Sauerstoff allmählich verbraucht, sodass sich die Population der Cyanobakterien schließlich wieder erholt. Währenddessen lagerte sich eine siliziumhaltige Zwischenschicht auf den Eisensedimenten ab, bis der Zyklus erneut begann. Der Höhepunkt dieser Ablagerungen lag im danach benannten Siderium (vor 2,5 bis 2,3 Milliarden Jahren; abgeleitet von gr. *sideros* für Eisen).

Ein zweiter Prozess, durch den Sauerstoff gebunden wurde, fand überwiegend in der Atmosphäre statt: Die vor UV-Licht schützende Ozonschicht war damals noch nicht vorhanden. So konnte Methan, das aus dem Stoffwechsel der frühen Archaeen stammte, unter dem Einfluss der UV-Strahlung mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser reagieren. Methan wirkt im Vergleich zu Kohlendioxid wesentlich stärker als Treibhausgas, sodass sein allmähliches Verschwinden zur sogenannten Huronischen Eiszeit führte. Sie begann vor etwa 2,4 Milliarden Jahren, kurz vor der Großen Sauerstoffkatastrophe, nachdem bereits relevante Mengen Sauerstoff den Ozean verlassen konnten, und dauerte gut

300 Millionen Jahre. Sie war vermutlich die längste und umfangreichste Vereisung der Erdgeschichte, vielleicht sogar eine vollständige. Das Leben wurde dadurch auf eine weitere Probe gestellt, denn eine globale Vereisung der Ozeane blockiert nicht zuletzt das Sonnenlicht, sodass die Cyanobakterien vermutlich nur in kleinen, eisfreien Regionen in der Nähe vulkanischer Quellen überleben konnten. Schmelzende Gletscher setzen jedoch große Mengen Dünger aus Gesteinsabrieb frei, sodass anzunehmen ist, dass sich die Cyanobakterien nach dem Ende der Eiszeit massenhaft vermehrten und immer größere Sauerstoffmengen freisetzen.

Sauerstoff setzt sich durch

Schließlich waren alle Stoffe, die sich mit Sauerstoff verbinden und ihn dadurch unschädlich machen konnten, im Wesentlichen verbraucht, sodass dieser begann, sich im Wasser und in der Atmosphäre anzureichern.

Die Ozonschicht ist das Ergebnis biologischer Aktivität.

Die Auswirkungen des Sauerstoffes hinterließen überall ihre Spuren, denn auch die Gesteine der Erdoberfläche veränderten sich grundlegend durch die Einwirkung des erstmals vorhandenen Gases. So entstanden mehr als zweitausend verschiedene Minerale neu, und als der Sauerstoff hoch in die Atmosphäre vordrang, begann sich dort die Ozonschicht zu bilden, die das Leben seither vor zu intensiver UV-Strahlung schützt. Trotz ihrer einerseits verheerenden Wirkung schuf die Große Sauerstoffkatastrophe, die bei nahe alles Leben vernichtete, daher mit der Ozonschicht letztlich eine wichtige Rahmenbedingung, die Landleben, wie wir es kennen, überhaupt erst möglich machte (bis zu dem jedoch noch fast zwei Milliarden weitere Jahre vergehen sollten).



Mehr als die Hälfte der etwa 4500 bekannten Mineralien auf der Erde entstanden erst durch die Sauerstoff-freisetzung der Cyanobakterien. Dazu gehört der als Schmuckstein genutzte Türkis.



In Biogasanlagen werden biologische Materialien durch anaerobe Mikroorganismen vergärt. Archaeen sind im letzten Schritt für die Produktion des Methans verantwortlich, das brennbar ist und der Hauptkomponente von Erdgas entspricht.

die Fotosynthese der Cyanobakterien mit der Spaltung von Wasser in ebendiese Stoffe begonnen hat.

Organismen, die diese neue Form der Energiegewinnung mit Sauerstoff verwenden, werden als Aerobier bezeichnet. Vermutlich hat erst diese neue, auf Sauerstoff beruhende Energiequelle dazu geführt, dass sich später komplexe Vierzeller entwickeln konnten, die deutlich mehr Energie brauchen als ihre einfachen Vorfahren. Bis zu deren Auftreten vergingen nach derzeitigem Kenntnisstand vermutlich jedoch noch mehr als eine Milliarde Jahre. Dazu passt, dass bis heute erst drei vielzellige Organismen bekannt sind, die ihr gesamtes Leben ohne Sauerstoff verbringen – es handelt sich um drei winzige, unter einen Millimeter große Arten der Korsettlerchen, die im Jahr 2010 in einem sauerstofffreien Sediment des L'Atalante-Beckens im Mittelmeer, westlich von Kreta, gefunden wurden. Sie gehören damit zu den Anaerobiern, die wie die frühesten Lebewesen keinen Sauerstoff verwenden. Allerdings haben sie sich vermut-

lich erst vergleichsweise kürzlich aus aeroben Vorfahren entwickelt und diesem besonderen Lebensraum angepasst. Die Mehrheit der heutigen Anaerobier sind Archaeen und Bakterien, von denen sehr viele nach wie vor durch Sauerstoff vergiftet werden und absterben. Ihr Lebensraum beschränkt sich daher heute auf Gewässerregionen, Sedimente und Böden, die sauerstofffrei sind, sowie einige weitere mehr oder weniger häufige ökologische Nischen, in die ihre Vorfahren damals vor dem Sauerstoff flüchteten. Trotzdem nutzte die Sauerstoffkatastrophe auch den Anaerobiern, denn der Sauerstoff führte zur Bildung größerer Mengen vieler neuer chemischer Verbindungen, die die Anaerobier zu ihrem Vorteil zu nutzen wussten, indem auch sie ihre Stoffwechselfähigkeiten erheblich erweiterten. Viele neue Organismenarten entstanden vermutlich erst dadurch. Dazu gehörte auch eine Kooperation zwischen einer anaeroben Archaeenzelle und einem aeroben Bakterium, die die Voraussetzung für die Entwicklung komplexen Lebens einschließlich des Menschen war.

ENDOSYMBIONTEN – DIE SUBUNTERNEHMER DER ZELLE

Vermutlich haben sich schon sehr früh in der Entwicklung des Lebens Symbiosen zwischen verschiedenen Organismen ausgebildet. Ein symbiotisches Zusammenleben unterschiedlicher Organismen bedeutet, dass diese Partnerschaft für beide vorteilhaft ist.

So beschützen etwa viele Ameisenarten bereits seit Millionen von Jahren Blattläuse vor Fressfeinden und erhalten von diesen im Gegenzug Honigtau als Nahrung. Der Abtransport des klebrigen Ausscheidungsprodukts der Läuse hilft diesen wiederum, weil sie sonst daran selbst erstickten könnten. Hierbei handelt es sich um eine sehr lockere Symbiose, denn beide Organismen bleiben körperlich getrennt und überleben auch ohne den jeweiligen Symbiosepartner. Blattschneiderameisen hingegen sind

Eine Symbiose ist das Zusammenleben von Organismen zu gegenseitigem Nutzen.

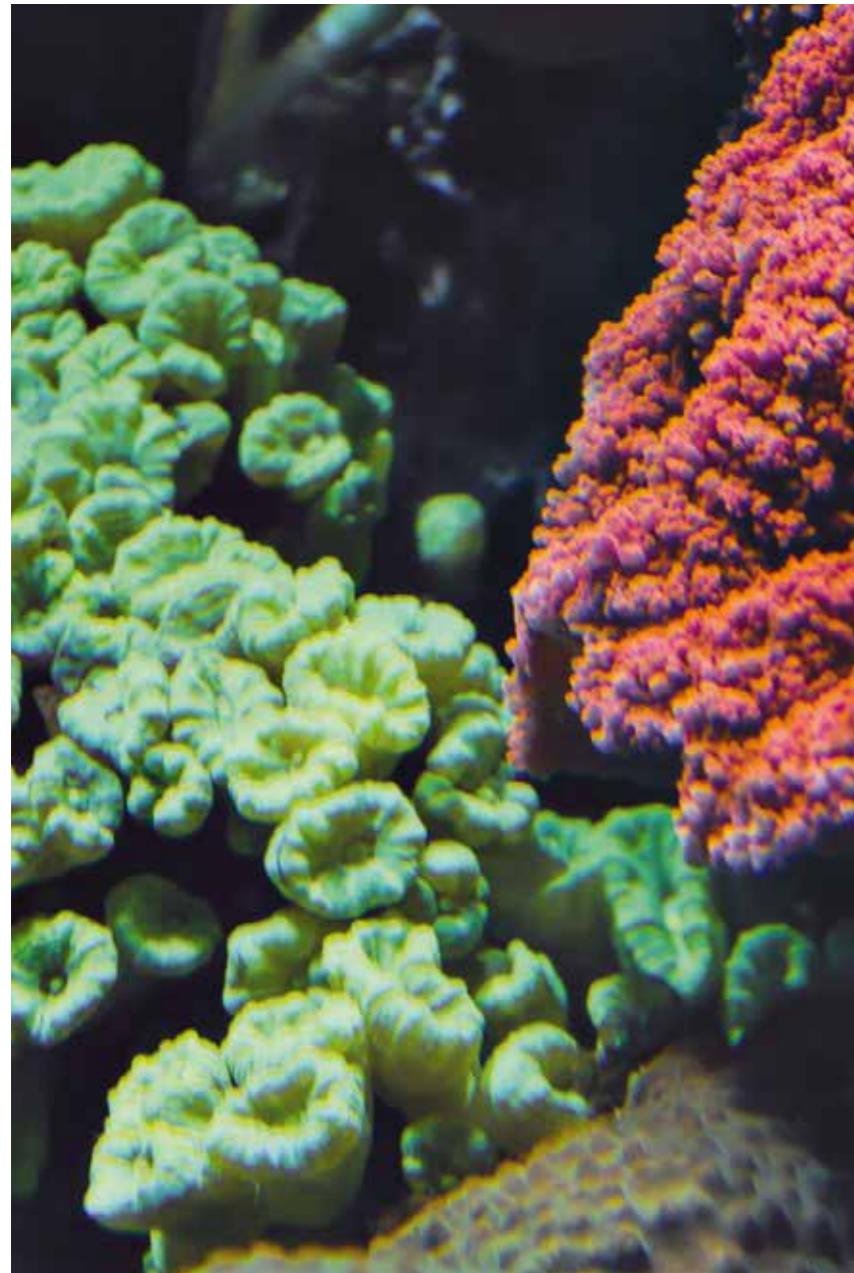
ebenfalls bereits vor Millionen von Jahren eine sehr viel engere Bindung mit Pilzen als Symbiosepartner eingegangen: Jede Kolonie kultiviert mit großer Sorgfalt einen Pilz in unterirdischen Bruthöhlen auf Blattstücken, die sie für den Pilz ernten und in ihr Nest transportieren. Die Ameisen schützen den Pilz vor Fraßfeinden und fremden Mikroorganismen. Dazu gehen einige Arten eine weitere Symbiose mit Bakterien auf ihrer Körperoberfläche ein, die dafür geeignete Antibiotika erzeugen. Beide Partner sind in der Symbiose auf den jeweils anderen angewiesen: Der Pilz dient den Ameisen als Nahrungsquelle, sie könnten sich ohne ihn nicht ausreichend er-

nähren. Für den Pilz ist die Symbiose ähnlich eng, denn er kann sich nicht mehr eigenständig fortpflanzen.

Noch einen Schritt weiter gehen Symbiosen, in denen ein Symbiosepartner im Inneren des anderen Partners lebt. Diese sogenannten Endosymbiosen sind ebenfalls sehr verbreitet, es gibt sie zum Beispiel bei Wiederkäuern, die in ihrem Verdauungstrakt



Gelingene Symbiose: Eine Ameise melkt eine Blattlaus. Die ersten Symbiosen zwischen einzelnen Zellen begannen aber weit vor dem Auftreten der Ameisen auf der Bühne des Lebens.



Die teilweise sehr intensiven Färbungen von Korallen werden durch die Fotosyntheseprinzipien bestimmter Algen hervorgerufen. Die Algen leben symbiotisch im Gewebe der Korallen und versorgen diese mit Nährstoffen, während die Koralle für einen geschützten „Platz an der Sonne“ sorgt.

Bakterien beherbergen, mit deren Hilfe sie in der Lage sind, die Zellulose zu verdauen, die der Hauptbestandteil ihrer pflanzlichen Nahrung ist. Ein anderes Beispiel sind Korallen, in denen endosymbiotische Algen leben, die ihnen nicht nur ein buntes Aussehen verleihen, sondern vor allem Fotosynthese betreiben und damit einen wichtigen Beitrag zur Ernährung der Korallen liefern. Das aktuell in vielen Riffen zu beobachtende Ausbleichen

der Korallen aufgrund erhöhter Wassertemperaturen oder anderer Umwelteinflüsse zeigt das Absterben der symbiotischen Algen an und zieht den Tod der Korallen nach sich.

Symbiosen dienen nicht notwendigerweise der Ernährung der Partner, aber dies war in der Frühzeit des Lebens vermutlich der Grund für die ersten dieser Partnerschaften.

Korallen sind Tiere, die mithilfe von Algen Fotosynthese betreiben können.

Es wird angenommen, dass der – zunächst zufällige – Austausch verschiedener Schwefelverbindungen oder von Methan und Wasserstoff zwischen zwei unterschiedlichen Arten früher Zellen recht verbreitet war. Sehr effektiv war dieser Prozess, wenn die eine Zelle Endprodukte des Stoffwechsels der anderen Zelle benötigte und umgekehrt. Beide hatten in einer Symbiose direkten Zugriff auf die von ihnen benötigten Stoffe und liefen nicht Gefahr, sich mit ihren eigenen „Abfallprodukten“ zu vergiften. Es liegt nahe anzunehmen, dass solche Partner einen erheblichen Evolutionsvorteil gegenüber „Einzelkämpfern“ hatten, sich im Laufe der Zeit durchsetzten und dadurch die symbiotische Lebensweise verbreiteten.

Zellen innig vereint

Was mit einer losen Assoziation zweier Zellen begann, wurde in einigen dieser Symbiosen irgendwann so eng, dass sich eine Endosymbiose entwickelte, ein Partner also im Körper des anderen lebte. Bei den in der Frühzeit des Lebens ausschließlich einzelligen Organismen bedeutete dies, dass eine Zelle im Inneren der anderen leben musste. Wie konnte sie dorthin gelangen?

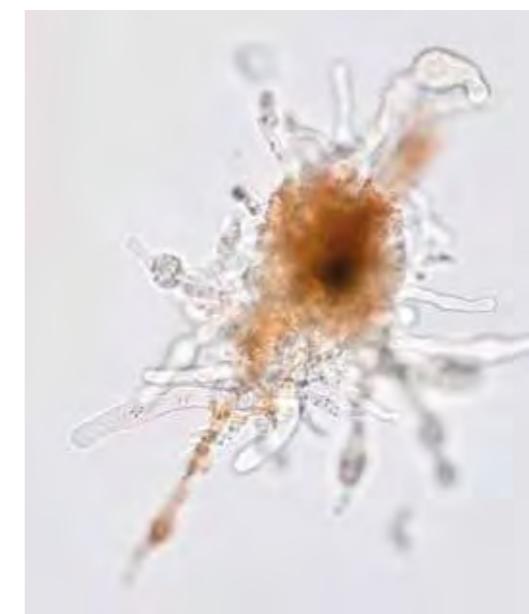
Wenn eine Zelle einen größeren Partikel, etwa als Nahrung, aufnehmen möchte, steht sie vor dem Problem, ihre Zellmembran dafür nicht öffnen zu können, da dies unweigerlich zum Auslaufen des Zellinneren und damit zum Tod führen würde. Die Zellmembran



muss daher bei der Aufnahme jeglicher Substanz von Außen intakt bleiben, denn sie hält die chemischen Substanzen des Lebens zusammen und bewahrt sie vor der Verdunstung im Ozean. Dies gelingt bei größeren Partikeln durch einen Trick: Die Zelle wölbt den Membranbereich unter dem aufzunehmenden Objekt nach innen, sodass dieses in eine dadurch gebildete Membrantasche sinkt, die sich immer weiter von der Umgebung abschnürt. Am Ende dieses Prozesses schnürt sich die Tasche samt Inhalt als membranumhülltes Bläschen ins Zellinnere ab. Diese Technik wurde später von einzelligen Amöben zu einer Jagdtechnik weiterentwickelt: Die Amöbe bildet sogenannte Scheinfüßchen aus, umfließt damit die Beute so lange, bis diese ganz eingeschlossen ist und dann ins Zellinnere befördert werden kann. Im menschlichen Körper machen bestimmte weiße Blutkörperchen, die Fresszellen, mit dieser Methode Jagd auf Krankheitserreger.

Bei der Bildung einer Endosymbiose zwischen Einzellern wird also einer der Symbio-

Die Fresszellen unseres Immunsystems bewegen sich fließend fort wie Amöben. Sie umfließen und fressen auf diese Weise auch Fremdkörper, beispielsweise Bakterien, wie in dieser Computerrekonstruktion dargestellt.

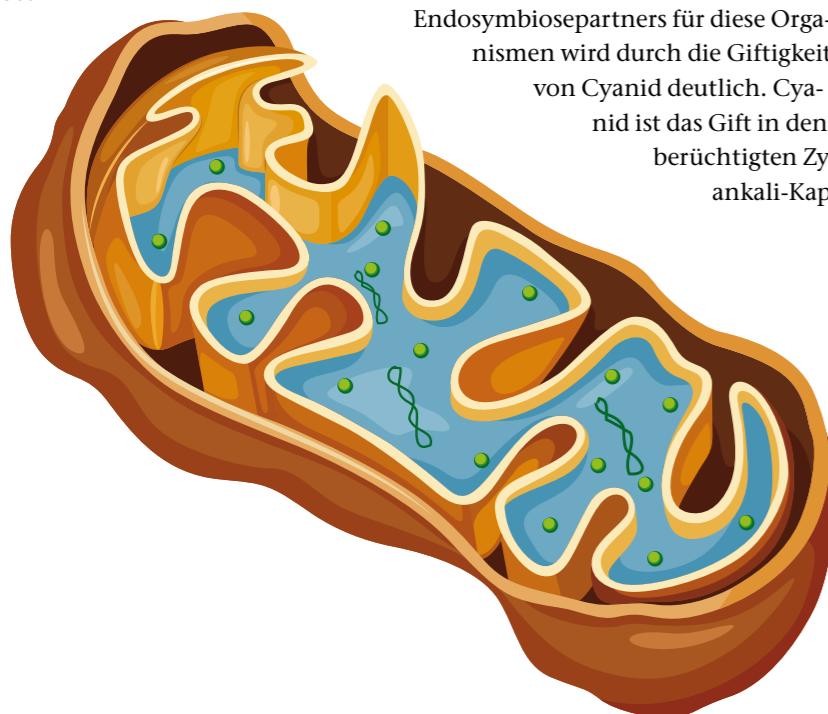


Mitunter ist beim Anblick einer Amöbe unklar, was sie als Nächstes tun wird. Die typischerweise zwischen einem Zehntel und knapp einem Millimeter großen Einzeller können eine Vielzahl von Scheinfüßchen aussüppen, von denen nur manche genutzt werden. Auf diese Weise erhöhen sich sowohl der Jagderfolg als auch die Fluchtmöglichkeiten.

zelle weiter und pflanzt sich dort auch fort. In der Geschichte des Lebens fanden und finden derartige Endosymbiosen vielfach statt. Einige davon sind dauerhaft bis heute stabil geblieben, zum Beispiel die Aufnahme eines aeroben Bakteriums, das Sauerstoff zur Energiegewinnung nutzen kann, durch eine anaerobe Archaeenzelle. Diese symbiotische Gemeinschaft bildete sich im Proterozoikum vermutlich irgendwann vor etwas weniger als zwei Milliarden Jahren, also einige Zeit nach der Großen Sauerstoffkatastrophe. Sie stellte die Archaeenzelle zusätzlich mit den Stoffwechselleistungen eines Bakteriums aus, allen voran der Fähigkeit, große Energiemengen aus der Nutzung von Sauerstoff zu beziehen. Gemeinsam waren sie in der Lage, sich im Laufe der Jahrtausende in eine Vielzahl unterschiedlichster Organismen weiterzuentwickeln: Sie waren der gemeinsame Urahn aller Tiere, Pflanzen und Pilze sowie vieler weiterer, zum Teil sehr kompliziert aufgebauter Einzeller wie Amöben, Pantoffeltierchen und verschiedenen Algen, aber auch des Erregers der Malaria oder der Kartoffelfäule, die Mitte des 19. Jahrhunderts eine der schwersten Hungersnöte in Europa auslöste.

Die Bedeutung der Stoffwechselleistung des Endosymbiosepartners für diese Organismen wird durch die Giftigkeit von Cyanid deutlich. Cyanid ist das Gift in den berüchtigten Zyankali-Kapseln.

Der Blick in ein Mitochondrium zeigt eine stark gefaltete innere Membran. An ihrer großen Oberfläche wird die chemische Energie erzeugt, die die Wirtszelle verwendet, in der das Mitochondrium lebt.

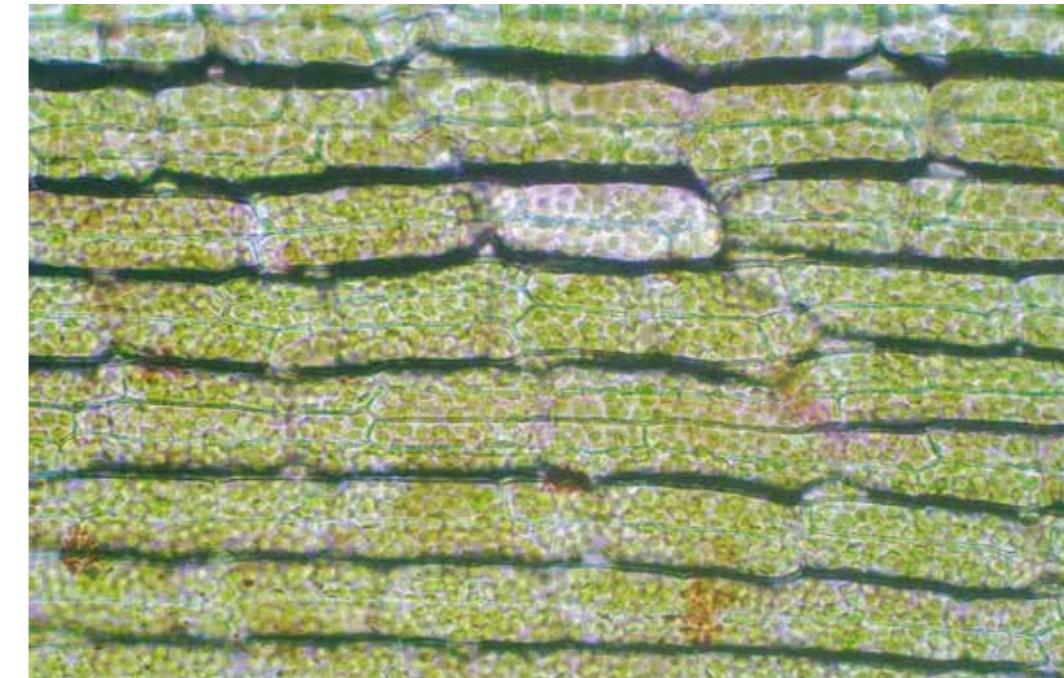


seln, ist aber auch in geringeren Mengen beispielsweise in Aprikosenkernen und einigen unverarbeiteten Lebensmitteln enthalten, wodurch es bei Unwissenheit gelegentlich zu tödlichen Unfällen kommt. Bereits relativ geringe Cyanidmengen dringen über die Zellmembran in die Zelle ein und reichen aus, um die Sauerstoffverwertung durch den Symbiosepartner komplett zum Erliegen zu bringen. Dies führt daher nicht nur beim Menschen innerhalb weniger Sekunden zum Tod.

Die beiden Symbiosepartner verbanden sich so eng miteinander, dass das endosymbiotische Bakterium sein Genom extrem verkleinerte – viele Gene waren für das geschützte Leben in der Wirtszelle nicht mehr erforderlich, andere wurden in das Genom der Wirtszelle übertragen, die sie entweder für sich selbst nutzte oder mit ihrer Hilfe den Symbionten versorgte. Der Symbiont wird heute als „Mitochondrium“ bezeichnet, oftmals versehen mit der Erklärung, dass es sich dabei um „die Kraftwerke der Zelle“ handelt. Dies verweist auf eine der Aufgaben eines Mitochondriums, die Gewinnung großer

Turbinen zur Energieumwandlung gehörten vermutlich zu den frühesten Erfindungen des Lebens.

Energiemengen mithilfe von Sauerstoff über molekulare Turbinen, die den menschengemachten Turbinen in Kraftwerken verblüffend ähneln. Seine Geschichte und Herkunft ist noch heute unter anderem daran ablesbar, dass das Mitochondrium im Gegensatz zu anderen Komponenten in der Zelle von einer doppelten Membran umgeben ist, nämlich der inneren, die auch heute noch chemisch der eines Bakteriums entspricht, und der äußeren Membran, die – wie jahrzehntelang angenommen – der Wirtsmembran entsprechen könnte, die bei der ursprünglichen Aufnahme des Symbionten abgeschnürt wurde. Neue Analysen legen jedoch nahe, dass auch die äußere Membran vom symbiotischen Bakterium



Mikroskopisch sehen Chloroplasten in ihren Wirtszellen wie grüne Flecken aus, die für das bloße Auge zum Grün des Blattes verschmelzen. In den hier zu sehenden Pflanzenzellen werden sie oft relativ schnell umherbewegt.

abstammt und die umhüllende Wirtsmembran im Laufe der Evolution aufgelöst wurde. Obwohl es auf den ersten Blick so aussieht, als sei das zum Mitochondrium „reduzierte“ Bakterium der unterlegene Partner, darf nicht vergessen werden, dass die ehemalige Archaeenzelle ebenfalls vollkommen auf seinen Endosymbionten mit dessen Stoffwechselleistungen angewiesen ist, um zu überleben. Der Endosymbiont steuert also auch seinen Wirt.

In der medizinischen Forschung wird seit einigen Jahren immer deutlicher, dass auch die endosymbiotischen Mikroorganismen in unserem Verdauungssystem einen erheblichen Einfluss auf uns als ihre Wirte haben. Sie beeinflussen offenbar unseren Gesundheitszustand bis hin zu unserem Verhalten, und das, obwohl sie nicht einmal Teil unserer Körperzellen sind, sondern sich lediglich im Darm aufhalten.

Cyanobakterien

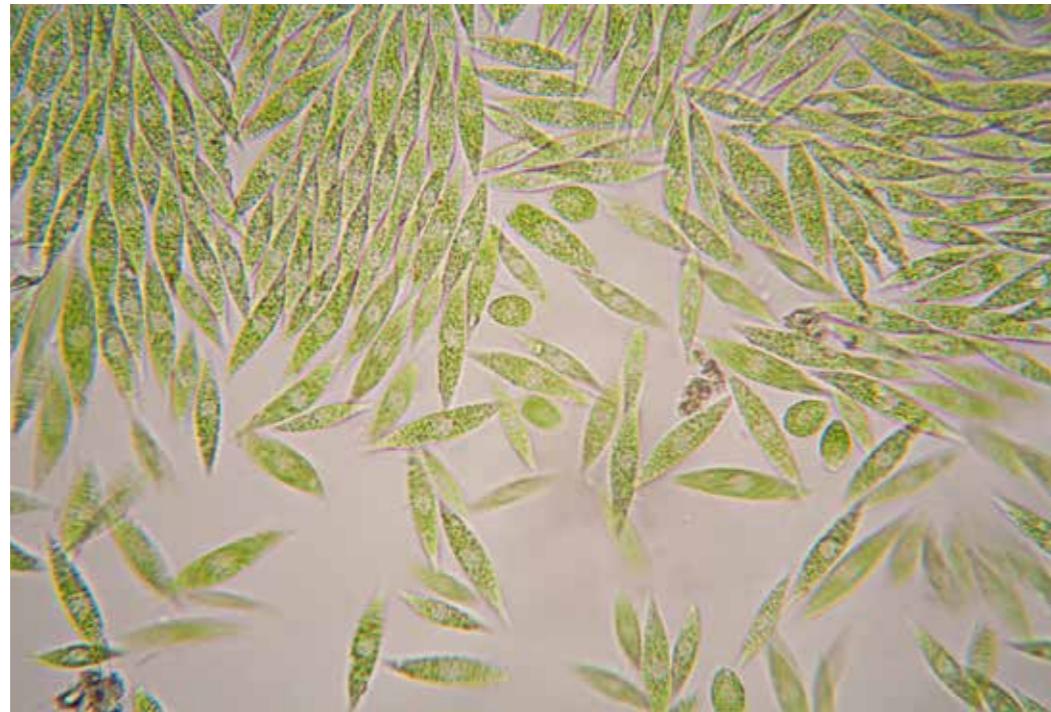
Es blieb jedoch nicht bei dieser einen Endosymbiose mit einem aeroben Bakterium. Ein weiterer Symbiosepartner, ein Cyanobakterium, kam etwas später hinzu und entwickelte sich neben dem Mitochondrium zu einem

„Plastiden“, der wie die Cyanobakterien in der Lage ist, mit Sonnenlicht Fotosynthese zu betreiben und dabei Sauerstoff zu produzieren. Solche Fotosynthese betreibenden Plastiden sind durch Chlorophyll grün gefärbt und werden als Chloroplasten bezeichnet. Dieses Dreiergespann stellte die erste Alge dar, deren heute noch vorkommende Nachfahren drei Entwicklungslinien entsprechen: die Rotalgen, die heute sehr kleine Gruppe der Glauco-

Algen sind eine verwandschaftlich ausgesprochen vielfältige und kompliziert zu durchschauende Organismengruppe.

phyten sowie die Grünalgen, aus denen später die Pflanzen hervorgingen. Es spricht heute bis hin zu Mikrofossilien einiges dafür, dass diese ursprünglichen Algen bereits außerhalb des Wassers die Oberflächen der Kontinente überzogen und die Aufnahme des Cyanobakteriums möglicherweise nicht im Ozean, sondern im Süßwasser stattfand.

Wie ihr deutscher Name zeigt, wurden die einzelligen Augentierchen früher zu den Tieren gezählt, denn obwohl sie Fotosynthese betreiben, fressen sie auch Nahrungs- partikel, schwimmen aktiv und orientieren sich mithilfe eines Augenflecks.



Seetang gehört zu den Braunalgen. Einige Arten können etwa einhundert Meter hohe Unterseewälder bilden.



Statt ein einfaches Cyanobakterium zu beherbergen, erwarben einige Zellen einen Chloroplasten, indem sie eine andere Alge aufnahmen, die ihrerseits bereits Mitochondrien und Plastiden besaß. Die sich aus dieser „sekundären Endosymbiose“ entwickelnden „komplexen Plastiden“ sind entsprechend von drei oder sogar vier Membranen umgeben.

Rotalgen wurden mehrfach in verschiedenen Entwicklungslinien aufgenommen und führten unter anderem zur Entwicklung der Braunalgen, von denen viele heute als Seetang bekannt sind. Nur eine der heute noch existenten Organismen-

gruppen hat eine Grünalge aufgenommen. Zu ihr gehören die einzelligen Augentierchen, die grün gefärbt sind, sich mithilfe eines Augenflecks am Einfallswinkel des Lichtes orientieren können und mitunter zu Algenblüten führen, etwa in Jaucheinansammlungen. Einige Algen aus der Gruppe der Dinoflagellaten gingen noch einen Schritt weiter und sind eine „tertiäre Endosymbiose“ eingegangen, indem sie als komplexe Plastiden eine Alge aufgenommen haben, die ihrerseits im Rahmen einer sekundären Endosymbiose eine Rotalge enthält.

Noch heute nehmen verschiedene, überwiegend einzellige Organismen einzellige Algen auf, um sie zur Fotosynthese zu nutzen. Der Ablauf reicht dabei von der kurzfristigen Nutzung der nicht langfristig lebensfähigen Plastiden aus verdauten Beuteorganismen bis hin zu einer längerfristigen, symbiotischen Gemeinschaft. Die Vermutung liegt nahe, dass der Entstehung der heutigen Algen im Proterozoikum ähnliche Abläufe zugrunde lagen und sich in einzelnen Fällen stabile Symbiosen ergaben, deren Nachfahren das heutige Leben auf der Erde prägen.

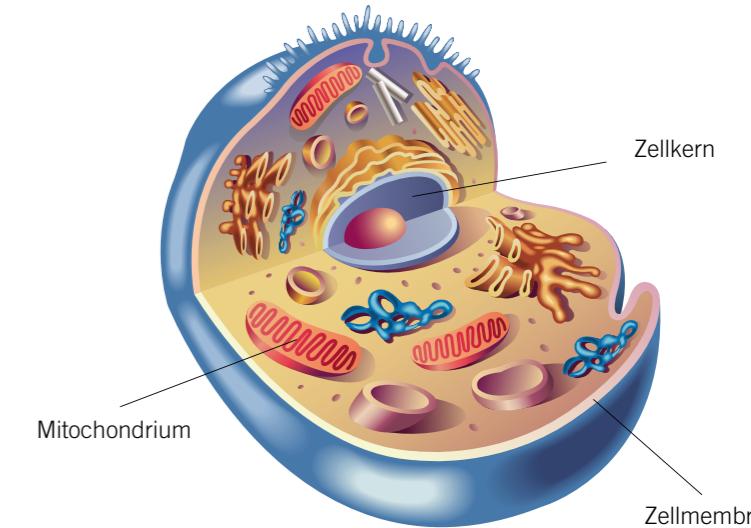
EUKARYONTEN: DIE ZELLE BEKOMMT VIELE ZIMMER

Die Etablierung der Mitochondrien war nicht die einzige revolutionäre Neuentwicklung der Zellen, die heute „Eukaryonten“ genannt werden. Der Name verweist darauf, dass diese Zellen über einen echten Zellkern verfügen, eine Struktur, die in ihren Vorfahren, den Prokaryonten, zu denen die Bakterien und Archaeen gehören, noch nicht vorhanden war.

In einem Zellkern ist das Erbgut der Zelle von einer recht aufwendigen Membran umschlossen, während es in Prokaryonten frei im Zellinneren schwimmt. Eine eukaryotische Zelle besitzt darüber hinaus noch viele weitere Zellbestandteile, die von Membranen umgeben sind. Dadurch werden diese zu eigenen, mehr oder weniger unabhängigen Räumen innerhalb der Zelle, sodass die Zelle in der Lage ist, darin unterschiedliche biochemische Prozesse ablaufen zu lassen, die sich ansonsten gegenseitig stören würden. Der Zellaufbau wurde dadurch sehr viel komplexer, und die Zelle erhielt unter anderem ein Verdauungssystem sowie ausgefeilte Mechanismen, um Substanzen kontrolliert und gezielt abgeben zu können. Auch das stabilisierende sowie für Bewegungen und innere Transportprozesse verantwortliche

Es gibt Algen, die nur aus einer Zelle bestehen und trotzdem hunderte Quadratmeter bedecken.

Zellskelett wurde erheblich aufwendiger und vielseitiger, sodass eukaryotische Zellen sehr viel formenreicher werden können als ihre prokaryotischen Ahnen. Zudem erlauben nicht zuletzt die Mitochondrien als vielfach in der Zelle vorhandene Stoffwechselzentren

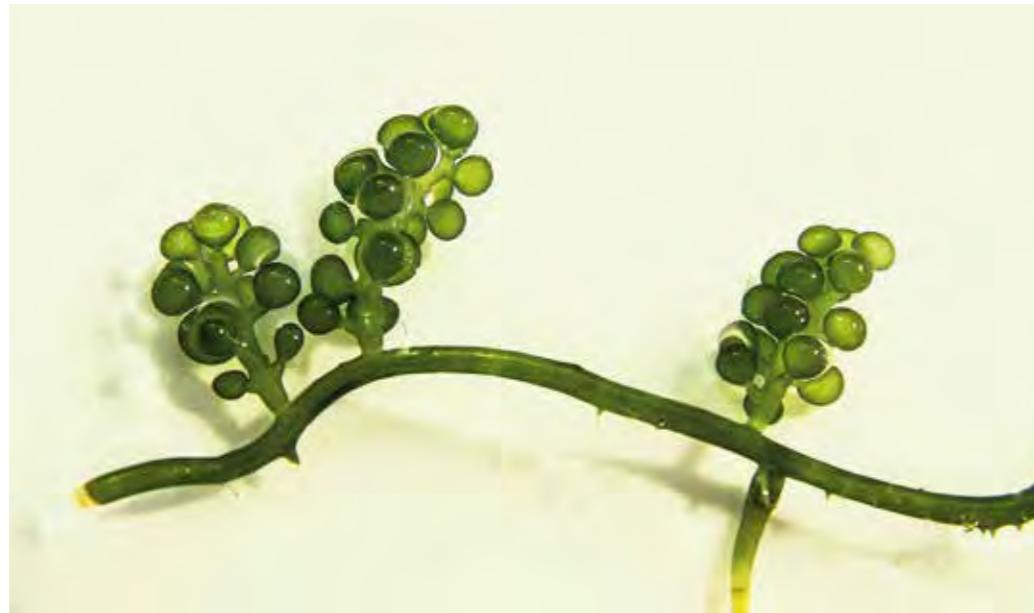


einen grundsätzlichen Größenzuwachs. Ein Extrembeispiel sind in dieser Hinsicht Caulerpa-Algen, mehrere Zentimeter hohe Algen, die mit ihren Ausläufern ganze Meeresbuchten überwuchern können (eine Art wird nach ihrer Einschleppung aus dem Indopazifik ins Mittelmeer wegen ihres aggressiven Wachstums „Killeralge“ genannt): Das gesamte Gelebte aus Algenkörpern besteht aus nur einer Zelle, die viele Zellkerne enthält.

Vor wenigen Jahren wurde an einem Unterwasservulkan in der Tiefsee vor Japan ein einzelliger Organismus gefunden, der zwar dem ersten Anschein nach eukaryontisch ist, bei genauerer Analyse jedoch Merkmale zeigt, die ihn weder als Eukaryont noch als Prokaryont erscheinen lassen: Sein Genom besitzt noch eine prokaryotische Struktur,

Eine eukaryotische Zelle beinhaltet eine Vielzahl evolutiv neuer Komponenten, von denen viele von Membranen umgeben sind. Besonders charakteristisch sind der Zellkern und die Mitochondrien. Bei Algen- und Pflanzenzellen kommen zu den Mitochondrien noch die Chloroplasten als weitere Endosymbionten hinzu.

Alle der jeweils einige Zentimeter großen „Algenpflänzchen“ bilden inklusive ihres gemeinsamen Verbindungsstranges eine einzige Zelle dieser tropischen *Caulerpa*-Alge.



„Lokis Schloss“ ist ein Hydrothermalfeld im Nordatlantik, an dem die Lokiarchaeen entdeckt wurden. Diese Einzeller könnten die heute engsten Verwandten der Eukaryonten sein.



ist jedoch schon von einer einfachen Membran umgeben, und die bereits vorhandenen Endosymbionten sind keine Mitochondrien, sondern ähneln noch Bakterien. Für ihn wurde bis auf Weiteres der Begriff „Parakaryont“ geschaffen, in der Annahme, dass es sich vielleicht um eine Übergangsform zwischen Pro- und Eukaryont handelt. Ob es sich um ein lebendes Fossil aus der Zeit der Eukaryontenentwicklung handelt, ist noch offen,

TAUCHFAHRT ZU „LOKIS SCHLOSS“

Gesicherter und bereits besser analysiert sind die ebenfalls erst kürzlich entdeckten Lokiarchaeen. Es sind Archaeen und damit eindeutig Prokaryonten, die jedoch bereits über einzelne, für Eukaryonten typische Gene verfügen und ihre Zellform ändern können. Sie wurden vor wenigen Jahren bei einer genetischen Analyse von Tiefseesedimenten in der Nähe einer „Lokis Schloss“ genannten Formation von schwarzen Rauchern gefunden, die zwischen Norwegen und Grönland liegen. Der Name verweist auf die nordische Gottheit Loki, einen Gestaltwandler. Da die Lokiarchaeen den genetischen Daten zufolge mit den Eukaryonten eine gemeinsame Abstammungsgruppe bilden, liegt es nahe anzunehmen, dass die erste eukaryotische Zelle aus einem ihrer direkten Vorfahren entstanden ist. Wenn sich experimentell bestätigen lässt, dass Lokiarchaeen ihre Verformbarkeit nutzen können, um potenzielle Endosymbionten aufzunehmen, würde sich diese Annahme weiter erhärten.

DIE ROLLE DER VIREN

Viren werden üblicherweise nicht als eigenständige Lebewesen angesehen, da sie in der Regel fast nur aus Erbmolekülen bestehen und alleine nicht in der Lage sind, die darauf gespeicherten Informationen zu verwerten. Entsprechend haben sie bei der Erforschung der Geschichte des Lebens lange Zeit nur eine Nebenrolle als Parasiten gespielt, die möglicherweise evolutive Prozesse in ihren Wirten vorangetrieben haben.

Seit einigen Jahren mehren sich jedoch die Hinweise, dass Viren vielleicht eine sehr viel direktere Rolle gespielt haben. Dazu passt, dass Viren mindestens in heutiger Zeit einen Großteil der Biomasse auf der Erde stellen (die meisten vermehren sich in Mikroorganismen der Ozeane, stellen dort den Kohlenstoffkreislauf sicher und sind für den Menschen harmlos). Einen ersten entscheidenden Auftritt gab es möglicherweise schon in einer sehr frühen Phase, als sich die Genome der ersten Zellen weiterentwickelten, denn unter Umständen waren es bestimmte Viren, die eine besondere chemische Variante der Erbmoleküle entwickelt haben, die von den Vorläufern aller heute existierenden Zellen übernommen wurde.

Noch wahrscheinlicher ist ein zweiter Auftritt, wieder an einem entscheidenden Übergang, nämlich der Entwicklung der Eukaryonten: Es gibt mittlerweile viele Hinweise, dass der Zellkern der Eukaryonten von einem Virus abstammt, Eukaryonten also aus drei Vorläufern hervorgegangen sind: einer Archaeenzelle, einem Bakterium und einem Virus. Dieses Virus hätte demnach den Urahn der Eukaryonten infiziert, die Zelle nach seinem Eindringen aber nicht wie üblich zu einer am Ende tödlichen Virusproduktion veranlasst, sondern sich lediglich bei jeder Zellteilung mit vermehrt und sich so extrem erfolgreich auf alle Tochterzellen ausgebreitet. Im Laufe der Zeit hätte dieses Virus dann als „Experte“ für die

Speicherung von Erbinformationen das Genom der Archaeenzelle sowie große Teile des bakteriellen Genoms, das zum mitochondrialen wurde, übernommen.

Genetischen Informationen, die von Viren ins eukaryotische Genom eingebracht wurden, wird mittlerweile auch eine Rolle für weitere entscheidende Entwicklungsprozesse der Eukaryonten zugeschrieben. Dazu gehören die geschlechtliche Fortpflanzung und die Entwicklung der Vielzelligkeit. Die Spuren evolutiv lange zurückliegender Virusinfektionen lassen sich in praktisch jedem eukaryotischen Genom nachweisen. Einige davon haben zur genetischen Evolution des betroffenen Organismus erheblich beigetragen.



Das Ebola-Virus ist mit einer Länge von bis zu wenigen Tausendstel Millimetern relativ groß, vermehrt sich besonders aggressiv und ist innerhalb der Primaten wenig wählerisch bei der Auswahl seiner Wirtszellen.

Die neuen Fähigkeiten der Eukaryonten machen diese den Prokaryonten nicht grundsätzlich überlegen. Im Gegenteil, in vielen, evolutiv sehr bedeutenden Aspekten fallen die Eukaryonten hinter den Prokaryonten zurück: Nach wie vor sind beispielsweise die Stoffwechselvielfalt der Bakterien oder die Fähigkeit der Archaeen, unter extremsten Lebensbedingungen zu existieren, unübertroffen. Auch bei der prinzipiellen Vermeh-

rungsgeschwindigkeit durch Zellteilung sind die komplizierten Eukaryonten den Prokaryonten unterlegen. Noch heute, fast zwei Milliarden Jahre nach dem vermuteten ersten Auftreten der Eukaryonten, stellen die Prokaryonten die bei Weitem größte Anzahl an Lebewesen auf der Erde. Ein entscheidender Vorteil ging jedoch offenbar mit der Entwicklung der Eukaryonten einher. Er machte diese evolutiv so erfolgreich, dass sie trotz

ihrer geringen Anzahl zusammengenommen geschätzt ungefähr genauso viel wiegen wie alle Prokaryonten: Als anpassungsfähige Meister der Komplexität waren die Eukaryonten in der Lage, große, vielzellige Organismen hervorzubringen, die aus unterschiedlichen, auf ihre jeweilige Aufgabe spezialisierten Zelltypen bestehen. Dadurch standen ihnen eine

Im Zeitraum von vor 1,8 Milliarden bis vor 800 Millionen Jahren entwickelten die Eukaryonten die Basis für eine förmliche Explosion vielzelliger Organismen verschiedenster Art.

große Vielzahl völlig neuer Lebensstrategien zur Verfügung, die für Prokaryonten nicht realisierbar sind.

Bis es zur echten Mehrzelligkeit kam, mussten jedoch noch erhebliche Vorarbeiten in der Entwicklung der einzelligen Eukaryonten geleistet werden, die vermutlich noch etwa eine Milliarde Jahre in Anspruch nahmen. Möglicherweise führten diese im bereits stärker mit Sauerstoff angereicherten Süßwasser auf den Kontinenten auch etwas schneller zum Erfolg als in den Ozeanen. Dort dauerte es sicher länger, bis sich das ursprüngliche,



Die Sternchenalge gehört zu den einzelligen Grünalgen, ist unbeweglich und lebt im Süßwasser. Mit einem Durchmesser von etwa einem Zehntel Millimeter ist sie relativ groß. In der Mitte ist der Zellkern zwischen den beiden Plastiden erkennbar, die jeweils eine Zellhälfte ausfüllen und für die Fotosynthese verantwortlich sind. Diese Alge ist ein Vertreter der Zieralgen, die vermutlich die engsten Verwandten der Landpflanzen sind.

aus heutiger Eukaryonten-Sicht lebensfeindliche chemische Milieu so verändert hatte, dass Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff ihre Dominanz zugunsten der blauen und sauerstoffreichen Ozeane verloren, die wir heute kennen. Die lange, fossilienarme und möglicherweise geologisch eher ruhige, scheinbar ereignislose Zeit wird verschiedentlich als „langweilige Milliarde“ bezeichnet. In ihr bildeten sich jedoch die drei Haupttypen der später komplexesten Vielzeller heraus, die sich bereits auf zellulärer Ebene unterscheiden lassen: die Pflanzen, Tiere und Pilze.

In der Entwicklungslinie, die über die Grünalgen zu den Pflanzen führte, bildete sich als charakteristischstes Merkmal neben der Aufnahme von Plastiden eine überwiegend aus Zellulose bestehende, stabile Zellwand um die empfindliche Zellmembran herum. Die typische Lebensstrategie einer Pflanze ist dementsprechend die eines relativ unbeweglichen Organismus, der seine Energie und Biomasse überwiegend aus der Fotosynthese seiner Plastiden bezieht.

Geschwister: Tiere und Pilze

Weder Pilze noch Tiere verfügen über Plastiden. Sie stehen sich entwicklungsgeschichtlich sehr viel näher als den Pflanzen und Algen, unterscheiden sich jedoch im Erscheinungsbild und Verhalten deutlich voneinander. Pilze haben eine Zellwand entwickelt, sie besteht im Gegensatz zur pflanzlichen jedoch meistens aus Chitin, der Substanz, die später auch im Tierreich von den Gliedertieren zum Aufbau ihres Außenskeletts genutzt wurde und auch bei Weichtieren und einigen Fischen vorkommt. Auch die Pilze verbringen daher ein relativ unbewegliches, sesshaftes Leben. Wie Tiere sind sie jedoch auf organische Nahrung angewiesen. Sie erschließen sie durch das Einwachsen von feinsten Fäden, den Pilzhyphen, die sich zu einem Pilzmyzel vereinigen. Die Verdauung findet außerhalb der Zellen statt, und die freigesetzten Nährstoffe werden anschließend aufgenommen. Ihre nahe Verwandtschaft zu den Tieren wird unter anderem dadurch deutlich, dass sie Zucker in Form von tierischer Stärke speichern.



Tierische Zellen haben keine Zellwand entwickelt und sind sehr beweglich und variabel. Obwohl es auch sesshafte Gruppen gibt, überwiegt bei Tieren eindeutig ein mobiler Lebensstil, der unter anderem dazu genutzt wird, Nahrung zu finden und aufzunehmen.

Pilze sind sehr viel näher mit den Tieren verwandt als mit Pflanzen.

Von allen drei eukaryontischen Gruppen, die komplexe vielzellige Organismen hervorgebracht haben, haben die Tiere die stärkste Spezialisierung entwickelt: Ein tierischer Organismus besteht aus bis zu deutlich mehr als 100 verschiedenen Zelltypen im Vergleich zu bestenfalls einigen Dutzend bei Pflanzen und Pilzen.

Die Welt der Einzeller

Die Dominanz, die Pflanzen, Tiere und Pilze in unserer Wahrnehmung haben, darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass unter den etwa 70 Abstammungslinien innerhalb der Eukaryonten die wenigen Linien mit vielzelligen Vertretern einer ungleich größeren Vielfalt einzelliger Organismen gegenüberstehen.

Unter diesen Zuchtkampignons sind die weißen, „wurzelartigen“ Pilzhyphen gut zu erkennen, die ein dichtes Myzel im strohhaligen Substrat bilden. Das Myzel verdaut mit der Zeit die organischen Substanzen, die im Substrat enthalten sind.

Pantoffeltierchen sind hochkomplexe, eukaryontische Einzeller, die sich mithilfe ihres Wimpernsaums schnell durchs Wasser bewegen und dabei Jagd auf kleinere Einzeller machen. Hier tauschen zwei Zellen genetisches Material für die Fortpflanzung aus.

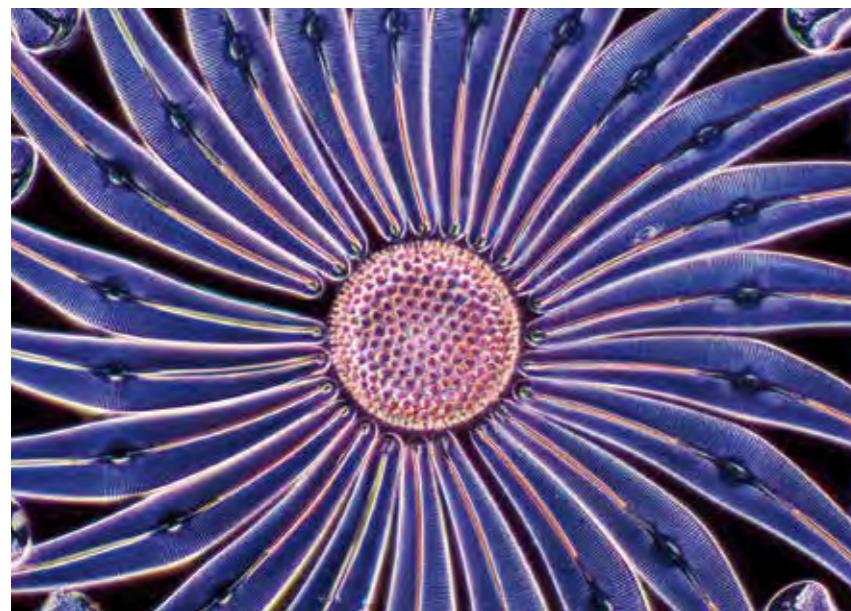


diesem Zusammenhang erlangte ein bereits im 19. Jahrhundert entdeckter Organismus einige Berühmtheit: Mit einen Durchmesser von etwa einem Viertel eines menschlichen Haars und einem amöbenartig verformbaren Körper lebt *Collodictyon triciliatum* am Boden eines norwegischen Sees. Er bewegt sich mithilfe von vier Geißeln fort und ist ein potenzieller Urahnen der Eukaryonten. Eine

Mikrofossilien können Hinweise liefern, wo es sich lohnt, nach Erdöl zu suchen.

Energiequelle zu nutzen. Gleiches gilt für die Fortbewegung und die Nahrungsaufnahme der Amöben durch eine sich fließend verlagernde Zelle, denn auch diese Fähigkeit trat in mehreren Entwicklungslinien unabhängig voneinander auf.

Kieselalgen weisen oft so regelmäßige und filigrane Strukturen auf, dass aus den ungefähr 0,1 Millimeter langen Zellen unter dem Mikroskop kleine Kunstwerke gelegt werden können. Ihr Reiz liegt oft in der perfekten Form – wie hier bei den länglichen „Blütenblättern“, die um eine kugelförmige Zentralzelle angeordnet wurden – und den Farbeffekten.



erst kürzlich anhand einer Bodenprobe vom kanadischen Bluff Wilderness Trail genetisch untersuchte kleine Organismengruppe entsprang dem Stammbaum der Eukaryonten immerhin schon vor einer Milliarde Jahren.

Einige der einzelligen Eukaryonten, beispielsweise Foraminiferen, entwickelten nicht verwesende Strukturen wie Zellskelette aus Kiesel säuren oder Kalk, die sich in den folgenden Perioden der Erdgeschichte weit verbreitet als Mikrofossilien ablagerten und eine bedeutende Rolle für die Datierung von Gesteinsschichten spielen, da ihr charakteristischer Aufbau einzelnen Arten zugeordnet werden kann. Aufgrund der individuellen Lebensbedürfnisse ist es sogar möglich, anhand der Artzusammensetzung gefundener Foraminiferenfossilien (etwa 40 000 ausgestorbene Arten der Foraminiferen sind bekannt) auf die Klimabedingungen einzelner Orte vergangener Epochen zurückzuschließen. Dies hat neben dem reinen Erkenntnisgewinn erhebliche wirtschaftliche Bedeutung bei der Abschätzung, ob zur Entstehungszeit bestimmter Gesteinsschichten Bedingungen herrschten, die etwa die Entstehung von Ölfeldern ermöglichen. Da diese Eukaryonten teilweise in riesiger Anzahl vorkamen, waren sie bisweilen selbst gesteinbildend und fügten den Gesteinen der Erdoberfläche Kreide und Kieselschiefer aus der Ablagerung ihrer Zellskelette hinzu.

DIE ERFINDUNG DER SEXUALITÄT – GESCHLECHTLICHE FORTPFLANZUNG

Bei der ungeschlechtlichen Zellteilung erhalten beide Tochterzellen eine vollständige Kopie des genetischen Materials der Ursprungszelle. Diese Art der Fortpflanzung ist sehr effizient, denn sie benötigt nur eine Ausgangszelle, und die Anzahl der Zellen verdoppelt sich mit jeder neuen Generation.

Eine Zelle ist jedoch im Laufe ihres Lebens immer wieder Umständen ausgesetzt, die ihr Überleben bedrohen. Vor allem Umweltveränderungen, räuberische Organismen, Nahrungskonkurrenten und Schäden an den Molekülen, die ihre genetische Information wie eine lange Folge an Buchstaben enthalten, sind häufige Gründe für den „gewaltsamen“ Tod einer prinzipiell unsterblichen Zelle.

Im Laufe der Evolution haben sich Mechanismen ausgebildet, mit deren Hilfe Zellen versuchen, dem Tod zu entgehen. Für das Verständnis einiger überraschender Wendungen in der Geschichte des Lebens ist es aber wichtig zu verstehen, dass das Überleben einer einzelnen Zelle nicht das vorrangige Ziel

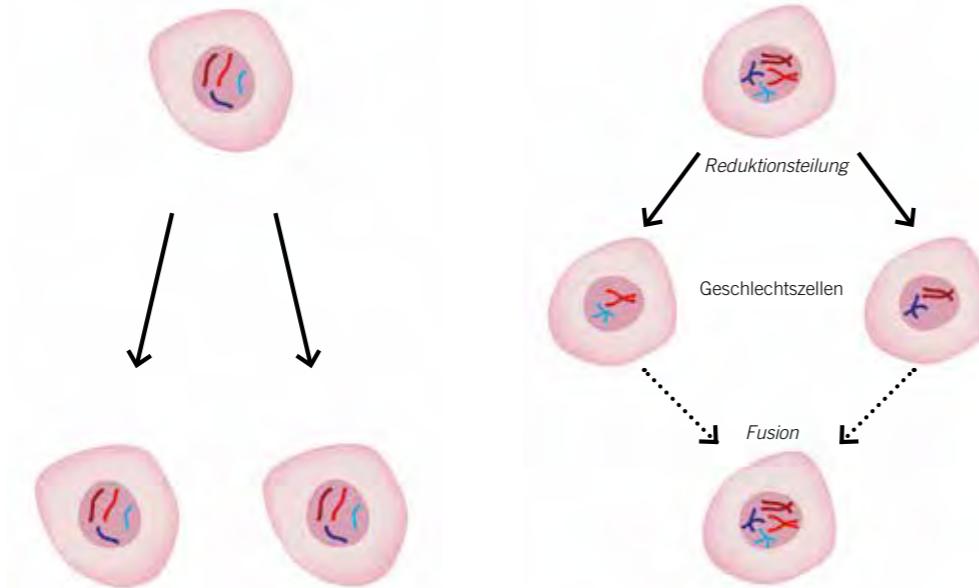
Die Evolution fördert die Verbreitung genetischer Information, nicht notwendigerweise das Überleben eines einzelnen Organismus.

der Evolution ist. Vielmehr ist das Wesentliche die Vervielfältigung der genetischen Information einer Lebensform. Dabei geht es im extremsten Fall nicht einmal um die Erbmoleküle als solche, sondern um den vom



Nur die zunächst geflügelten Königinnen und Drohnen eines Ameisenvolkes zeugen Nachwuchs. Die ungeflügelten Arbeiterinnen verzichten auf die eigene Fortpflanzung und tragen stattdessen zum Fortpflanzungserfolg ihrer Schwestern, der Jungkönniginnen, bei. Evolutiv ist dieses Verhalten sinnvoll, weil die Arbeiterinnen dadurch einen Großteil ihrer eigenen genetischen Information weiterverbreiten, denn die Jungkönniginnen sind ihnen genetisch sehr ähnlich.

Links: Bei der ungeschlechtlichen Fortpflanzung entstehen aus einer Ausgangszelle zwei genetisch identische Tochterzellen. Die Zellzahl verdoppelt sich.
Rechts: Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung entstehen im Rahmen der Reduktionsteilung aus einer Ausgangszelle zwei Tochterzellen mit jeweils nur einer Kopie des genetischen Materials (farbige Strukturen im Zellkern). Irgendwann müssen zwei solcher Zellen wieder fusionieren, wodurch sie wieder zwei Kopien enthalten. Im Ergebnis ist die Zellzahl gleich geblieben.



Besonderheit dieser Insekten den Arbeiterinnen genetisch nur ein Drittel so ähnlich sind wie deren Schwestern. Daher geben sie mit deutlich geringerer Wahrscheinlichkeit die genetische Information der Arbeiterin weiter. Um die genetische Information trotz immer wieder auftretender Schäden an den Erbmolekülen zu sichern, haben Zellen eine Reihe von Mechanismen entwickelt, um diese bei Bedarf reparieren zu können. Gehen jedoch größere Informationsabschnitte verloren, können diese – ähnlich wie bei der Datensicherung auf einem Computer – nur



Das Bakterium *Deinococcus radiodurans* ist extrem resistent gegenüber radioaktiver Strahlung. Es überlebt mehr als die 2000-fache Strahlungsmenge, die für Menschen tödlich ist. Der Grund dafür ist eine hocheffiziente Maschinerie zur Genomreparatur, die auf mindestens vier Genomkopien zurückgreifen kann.

mithilfe einer Sicherungskopie wiederhergestellt werden. Praktisch alle heute lebenden Organismen besitzen in ihren Zellen die Fähigkeit, verlorene gegangene Informationen aus einem passenden anderen Erbmolekül zu übernehmen. Insbesondere Prokaryonten sind darüber hinaus in der Lage, in solchen kritischen Phasen Erbmoleküle aus der Umgebung aufzunehmen. Diese stammen dann meist von anderen, aufgrund der schädigenden Umweltbedingungen bereits zugrunde gegangenen Zellen, oft der gleichen Art, sodass sie die gesuchte Erbinformation mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit tatsächlich enthalten.

Für eine Zelle mit diesen Reparaturfähigkeiten wäre es von erheblichem Vorteil, von vornherein über diese Sicherungskopie zu verfügen, anstatt auf die zufällige Aufnahme des richtigen Erbmoleküls aus einer bereits abgestorbenen Zelle angewiesen zu sein. Dies ist einer der Gründe, warum Eukaryonten in ihren Zellen über zwei Kopien ihres Genoms auf unterschiedlichen Erbmolekülen verfügen können. In der Regel werden beide Kopien aktiv verwendet, um die darauf gespeicherte Information auszulesen. Dadurch ergibt sich ein weiterer Vorteil, denn falls eine Einzelinformation auf einer der beiden Kopien durch eine nicht bemerkte Schädigung tatsächlich

nicht mehr nutzbar ist, erhält die Zelle die korrekte Information automatisch von der zweiten Kopie.

Einer Zelle mit zwei Kopien des Genoms stehen zwei unterschiedliche Formen der Zellteilung zur Verfügung. Eine entspricht der einfachen Verdopplung, nach der beide Tochterzellen wieder über jeweils zwei Genomkopien verfügen. Die andere hingegen ergibt Tochterzellen mit jeweils nur einem einfachen Genom. Sie wird deshalb bisweilen Reduktionsteilung genannt und erscheint erst einmal wenig vorteilhaft. Tatsächlich ist sie jedoch die Voraussetzung für eine außerordentlich erfolgreiche Vermehrungsstrategie, die die Entwicklung der Eukaryonten,

Warum die geschlechtliche Fortpflanzung so erfolgreich war, ist noch immer nicht abschließend geklärt.

insbesondere der vielzelligen Organismen, entscheidend geprägt hat: die geschlechtliche Fortpflanzung. Worauf dieser Erfolg und die weite Verbreitung innerhalb der Eukaryonten beruht, war lange ein Rätsel und ist bis heute noch nicht abschließend geklärt.

Sex oder nur Zellteilung?

Es ist zunächst einmal auffällig, dass sich auch heute noch viele einzellige Eukaryonten meistens wie Prokaryonten durch einfache Zellteilung vermehren, was der ungeschlechtlichen Fortpflanzung entspricht. Sobald sich jedoch die Umweltbedingungen verschlechtern und insbesondere Schäden am Erbgut drohen, wechseln sie zu geschlechtlicher Fortpflanzung, die mit einer Reduktionsteilung verbunden ist. Mittlerweile lässt sich dieses ungewöhnliche Verhalten erklären, denn nur während der Reduktionsteilung ist eine besonders effektive Reparatur von Schäden am Erbgut möglich, bei der beide Kopien besonders gut miteinander verglichen werden können.

Zellen mit nur einem Genom benötigen früher oder später wieder eine zweite Kopie. Diese erhalten sie, indem sie mit einer zweiten Zelle verschmelzen, die ebenfalls nur eine Kopie enthält, da sie auch aus einer Reduktionsteilung hervorgegangen ist. Diese Zellverschmelzung mit der Kombination von zwei Genomkopien ist der zentrale Vorgang der geschlechtlichen Fortpflanzung. Die beiden verschmelzenden Zellen werden als „Geschlechtszellen“ bezeichnet.

Das älteste Fossil, bei dem geschlechtliche Fortpflanzung belegt ist, ist eine 1,2 Milliarden Jahre alte, im nördlichen Kanada gefundene Rotalge, die bestimmten heutigen Rotalgen bereits sehr ähnlich ist. Da geschlechtliche Fortpflanzung jedoch in praktisch allen heutigen Eukaryonten beobachtet wird, ist mit ziemlicher Sicherheit davon auszugehen, dass sie bereits deutlich früher entstand, vermutlich schon bei der Entwicklung der Eukaryonten vor rund zwei Milliarden Jahren.

Warum war die geschlechtliche Fortpflanzung bei den Eukaryonten so erfolgreich? Zunächst einmal sind mit ihr zwei erhebliche Nachteile verbunden, die eigentlich gegen einen evolutiven Erfolg sprechen.

Korallen, frühe vielzellige Tiere, die vor etwa 700 Millionen Jahren entstanden, vermehren sich vielfach ungeschlechtlich: Jeder der mehr oder weniger runden Polypen einer Kolonie entsteht aus normalen Zellteilungen. Sie können jedoch auch Geschlechtszellen bilden, die wie hier zu sehen in großen Wolken von allen Individuen gleichzeitig, oft in Vollmondnächten, freigesetzt werden. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich passende Geschlechtszellen in den Weiten des Meeres tatsächlich treffen.



DIE ENTSTEHUNG DER GESCHLECHTER

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung der geschlechtlichen Fortpflanzung entstand ein Mechanismus, der verhindert, dass sich die Geschlechtszellen genetisch sehr ähnlicher Individuen vereinigen konnten. Dies würde den Vorteil der genetischen Vielfalt in den Nachkommen zunichtemachen. Durch bestimmte Eigenschaften auf molekularer Ebene, die genetisch festgelegt sind, sind nur solche Zellen zur gegenseitigen Fusion fähig, die sich diesbezüglich unterscheiden – ähnlich wie die beiden Hälften eines Druckknopfes, der sich nur schließen lässt, wenn zwei unterschiedliche Hälften zusammenkommen.

Abgesehen von diesen molekularen Unterschieden sahen jedoch zunächst alle Geschlechtszellen in Form und Größe gleich aus. In einigen Entwicklungslinien der Eukaryonten setzte jedoch ein Prozess ein, der nach heutigem Verständnis den Anteil der erfolgreich fusionierten Geschlechtszellen erhöht. Um dies zu erreichen, gibt es zwei entgegengesetzte Strategien: Einerseits kann die Größe der Geschlechtszelle erhöht werden, was ihr die Speicherung zusätzlicher Energie und damit ein längeres Überleben und Warten auf einen Befruchtungspartner ermöglicht. Auf der anderen Seite schränkt dies jedoch ihre Bewegungsfähigkeit zum Finden einer Partnerzelle ein, und die „Produktionskosten“ für den Organismus erhöhen sich, sodass dieser nur wenige solcher

Zellen herstellen kann und deshalb hoffen muss, dass möglichst viele davon auf eine Partnerzelle treffen. Die entgegengesetzte Strategie beinhaltet eine Verkleinerung der Zelle, die dadurch leicht beweglich wird, in großer Anzahl produziert werden kann, aber sehr empfindlich und kurzlebig ist.

Beweglich oder nicht?

Sobald ein Typ der Geschlechtszellen sich in Richtung einer der Strategien entwickelt, also zum Beispiel größer und damit unbeweglicher wird, muss der andere Typ sich in die entgegengesetzte Richtung hin zu mehr Beweglichkeit entwickeln, um den durch den Bewegungsverlust des anderen Typs hervorgerufenen Nachteil für die gesamte Art auszugleichen. Zwangsläufig muss sich der beweglicher werdende Typ auch verkleinern, wodurch er jedoch in größerer Anzahl produziert werden kann und damit den Anteil der erfolgreich befruchteten, unbeweglicheren Zellen erhöht. Am Ende dieser Entwicklung der Geschlechtszellen in unterschiedliche Formen stehen beispielsweise bei den Tieren sehr große, unbewegliche Eizellen und sehr kleine, aktiv schwimmende Spermien. Für die Pflanzen gilt dies entsprechend, bei ihnen ging jedoch die Eigenbeweglichkeit der kleineren Geschlechtszellen im Laufe der frühen Entwicklung der Samenpflanzen verloren – Palmfarne und

Ginkgos besitzen sie noch, Nadelbäume und Blütenpflanzen nicht mehr. Generell wird das Geschlecht, das große Geschlechtszellen produziert, als weiblich bezeichnet und das Geschlecht mit den kleineren Geschlechtszellen als männlich.

Da sich beide Geschlechter finden und erkennen müssen, folgte eine mehr oder minder ausgeprägte Geschlechterdifferenzierung auch im Aussehen der jeweiligen Individuen, insbesondere bei den Tieren. Da die Partnerwahl bei den meisten Tierarten durch die Weibchen erfolgt, sehen diese im Vergleich zu den Männchen oft unauffälliger aus. Es gibt Hinweise darauf, dass die männlichen Individuen einer Art aus evolutiver Sicht als genetische Testobjekte aufzufassen sind, da ihre Variabilität meist höher ist als die der weiblichen Individuen. Diese dienen daher eher der Stabilisierung des genetischen Pools einer Art. Die höhere Variabilität der Männchen führt dazu, dass sie extremere – sowohl vorteilhafte als auch nachteilige – Eigenschaften aufweisen. So schwanken beispielsweise Körper- und Organgrößen in Männchen stärker als in Weibchen, Verhaltensmuster sind weniger einheitlich und die Leistungsfähigkeit einzelner Männchen in bestimmten Bereichen liegt oft höher als die der Weibchen (einzelne andere Männchen sind entsprechend deutlich leistungsschwächer als die Weibchen). Diese Aufteilung der genetischen Variabilität zwischen den Geschlechtern ist im Zusammenhang mit der geschlechtlichen Fortpflanzung vorteilhaft. Denn wenn es den Weibchen im Rahmen der Partnerwahl gelingt, die vorteilhaften Entwicklungen



Der Größenunterschied zwischen Eizelle (links) und Spermium (rechts) ist üblicherweise erheblich. Die großen unbeweglichen Geschlechtszellen werden definitionsgemäß vom weiblichen Geschlecht produziert, die kleinen beweglichen vom männlichen.

in der männlichen Population zu identifizieren, werden nur diese in die von den Weibchen „gepflegte“ genetische Linie der Art aufgenommen.

Ein Nachteil ergibt sich aus der etwas später entstandenen Geschlechterdifferenzierung, die dazu führte, dass nur Geschlechtszellen unterschiedlicher Geschlechter miteinander fusionieren können. Dadurch müssen sich männliche und weibliche Geschlechtszellen beziehungsweise die dazugehörigen Individuen zunächst einmal finden, um Nachwuchs zu zeugen. Dies bringt einen mitunter erheblichen Aufwand mit sich und birgt bei geringen Populationsdichten das Risiko, dass Individuen sich aufgrund einer erfolglosen Suche nicht fortpflanzen können. Ein weiterer Nachteil ist die schlechtere Fortpflanzungseffizienz. Eine Zellteilung führt zu zwei Tochterzellen, die Zahl der Nachkommen bei ungeschlechtlicher Fortpflanzung verdoppelt sich daher mit jeder Generation. Eine ein-

fache Reduktionsteilung zur Produktion von Geschlechtszellen verdoppelt zwar auch die Zellanzahl, aber zwei so entstehende Geschlechtszellen fusionieren anschließend mit je einer anderen, die beide ebenfalls aus einer Reduktionsteilung hervorgegangen sind. Im Ergebnis sind aus zwei Ausgangszellen nur zwei neue entstanden, aus denen in der nächsten Generation wieder nur zwei neue Zellen hervorgehen. Bei der ungeschlechtlichen Vermehrung hingegen entstehen aus zwei Ausgangszellen bereits vier neue und daraus dann acht, sodass es nach ebenfalls zwei Generationen bereits viermal so viele Zellen gibt. Die geschlechtliche Vermehrung hat daher einen deutlichen Vermehrungsnachteil, der sich von Generation zu Generation erheblich vergrößert.

Vorteile der geschlechtlichen Fortpflanzung

Den offenkundigen Nachteilen müssen erhebliche Vorteile gegenüberstehen. Tatsächlich kommen mehrere zusammen: Zum einen werden weitreichende, in der Regel schädliche Veränderungen der Erbinformation durch die bereits beschriebene Reparaturmöglichkeit während der Reduktionsteilung verhindert. Zum anderen führt die geschlechtliche Fortpflanzung aufgrund der Neukombination zweier einfacher Genome dazu, dass vorteilhafte genetische Neuentwicklungen nicht nacheinander in der gleichen Abstammungslinie entstehen müssen. Stattdessen können sie während der Verschmelzung der Geschlechtszellen aus verschiedenen Individuen kombiniert werden. Dadurch wird es sehr

viel wahrscheinlicher, dass mehrere positive Eigenschaften in einem Individuum zusammenkommen und von diesem weitervererbt werden.

Die Fähigkeit, genetische Information bei jedem Fortpflanzungsschritt neu kombinieren zu können, ermöglicht außerdem eine deutlich schnellere Ausprägung vorteilhafter Fähigkeiten. Dies liegt daran, dass die beiden Genomkopien nicht vollkommen identisch sind, sondern sich hier und da in kleinen Details unterscheiden. Je nachdem, welche Detailinformationen kombiniert werden, ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften des zugehörigen Individuums. Bestimmte Eigenschaften, die zeitweise keinen Vorteil bieten, können so quasi unsichtbar im Genom verbleiben, bis sie in späteren Generationen



Durch den Mechanismus der geschlechtlichen Fortpflanzung lässt sich ein Labradoodle (rechts) durch Kreuzung eines Labradors (links) und eines Pudels (Mitte) züchten, da sich die Eigenschaften der Elterntiere in den Nachfahren mischen. Ohne geschlechtliche Fortpflanzung müsste ein Pudel von alleine Labrador-Eigenschaften entwickeln oder umgekehrt, was äußerst unwahrscheinlich ist.



An der Fellfarbe der Katzenbabys ist gut zu erkennen, dass sie sich genetisch unterscheiden, obwohl sie aus demselben Wurf stammen. Dieser Effekt ist die Folge der individuellen Neukombination der elterlichen Erbinformation.

wieder benötigt werden. Aus den gleichen Gründen haben unerkannte Schäden auf einer Kopie des Genoms oft keine relevanten Konsequenzen, da die intakte zweite Kopie die benötigte Information zur Verfügung stellt. Diese Vorteile sind jedoch nur dann umfänglich nutzbar, wenn ein Organismus tatsächlich den Großteil seiner Lebenszeit über zwei Genomkopien verfügt. Dies war

offenbar in frühen Eukaryonten noch nicht der Fall, da sich die Phase mit zwei Kopien zunächst vermutlich auf die Zeit beschränkte, die sich unmittelbar an die Verschmelzung der beiden Ursprungszellen anschloss. Die Vorherrschaft der Phase mit zwei Kopien entwickelte sich erst später, aber nur in einigen Entwicklungslinien der Eukaryonten: bei den Tieren beispielsweise relativ früh und bei

den Pflanzen relativ spät, nämlich erst nach der Abspaltung der Moose im pflanzlichen Stammbaum. Daher besitzen die Zellen der grünen Pflänzchen auch heutiger Moose noch immer nur eine Genomkopie. Unter anderem bei den Pilzen ist dieser Entwicklungs- schritt bislang gänzlich ausgeblieben.

Als weiterer Vorteil der geschlechtlichen Fortpflanzung führen spezielle Mechanismen der Reduktionsteilung dazu, dass die Nachkommen sich genetisch unterscheiden, Geschwister also nicht wie bei ungeschlechtlicher Fortpflanzung identisch sind. Diese Erhöhung der Diversität wirkt sich ebenfalls positiv auf die Anpassungsfähigkeit und das Bestehen wenigstens eines Nachkommens in Konkurrenzkämpfen aus. Ein klassisches Beispiel dafür sind die – geschlechtlich entstandenen – Samen eines Baumes, die alle in seiner Nähe keimen und untereinander um

Sex ist aus evolutiver Sicht ein rein pragmatischer Anpassungsvorteil.

den begrenzten Platz konkurrieren. Der Sämling mit der besten Neukombination der Erbinformation hat die größten Erfolgschancen.

Die Verkleinerung des Genoms auf eine Kopie im Zuge der Reduktionsteilung führt pro entstehender Geschlechtszelle zwangsläufig zum Verlust der Hälfte der Detailinformationen, um die sich die beiden ursprünglichen Kopien unterscheiden. Obwohl dies zunächst als Nachteil erscheinen kann, hat es einen sehr positiven Nebeneffekt, denn auf diese Weise ist es möglich, im Rahmen der geschlechtlichen Fortpflanzung nachteilige Erbanlagen zu eliminieren. Bei der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist dies nicht möglich, da hier das komplette Genom verdoppelt und weitergegeben wird.

Vielzelligkeit

In einigen Entwicklungslinien der Eukaryonten entstanden vermutlich schon früh erste Formen eines weiteren Phänomens, das



Viele Flechten gehören zu den Organismen, die aktiv auf geschlechtliche und ungeschlechtliche Vermehrung setzen und dazu jeweils spezielle Körperstrukturen ausbilden.