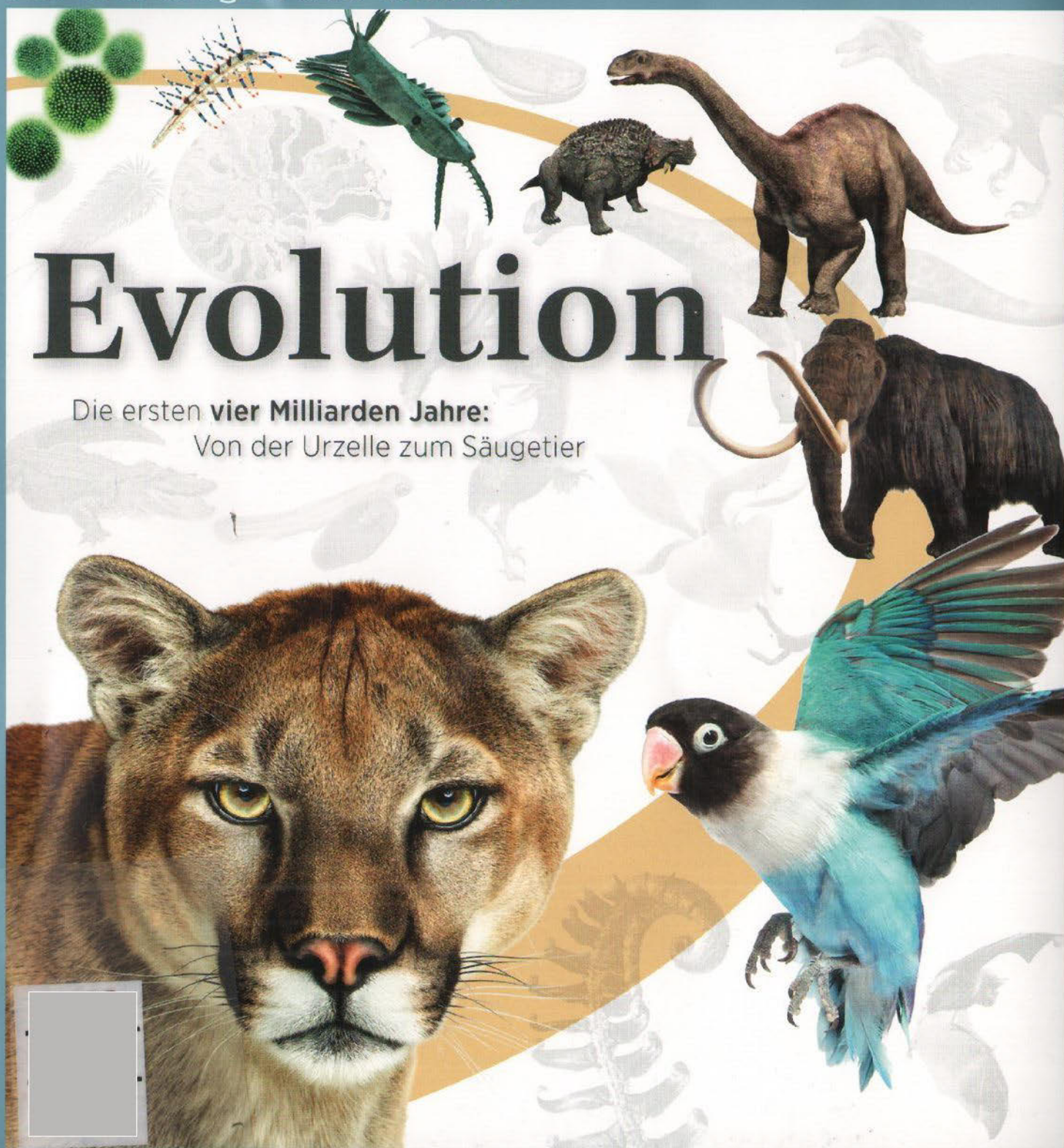


GEO kompakt Nr. 23

Die Grundlagen des Wissens

Evolution

Die ersten **vier Milliarden Jahre:**
Von der Urzelle zum Säugetier



GEBURT DES LEBENS

Wie aus toter Materie der erste Organismus erwuchs

WACHSTUM

Wenn aus einer Zelle ein ganzer Körper entsteht

LANDGANG

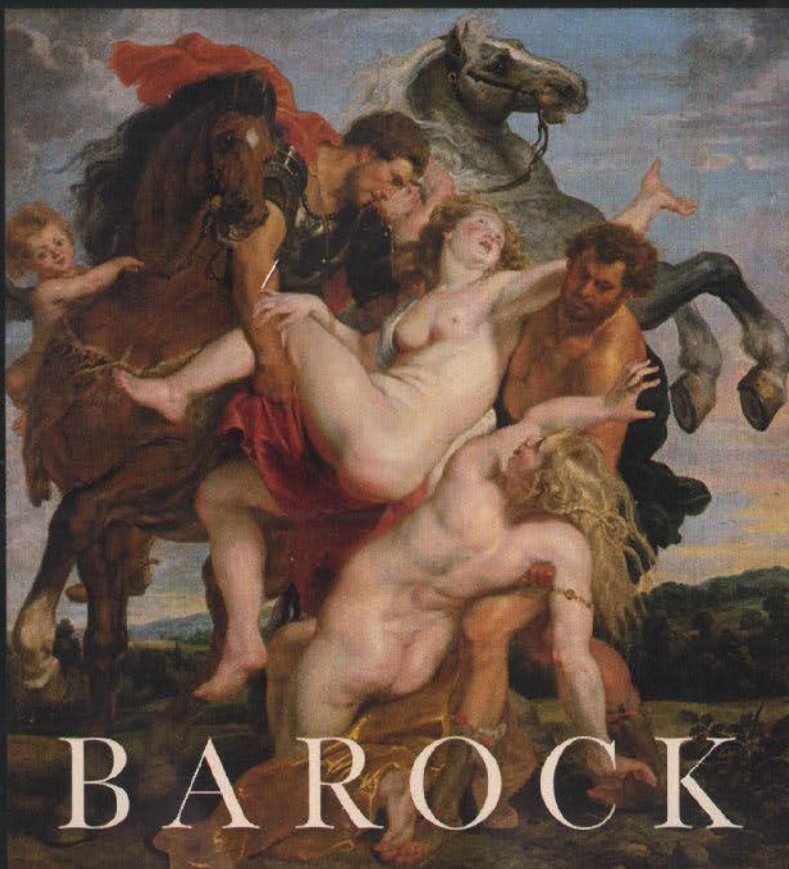
Als das Leben die Kontinente eroberte

MASSENSTERBEN

Weshalb Katastrophen die Evolution vorantrieben

NR. 1
GEO EPOCHE EDITION
DIE GESCHICHTE DER KUNST

BAROCK GEO EPOCHE EDITION



DAS ZEITALTER DER INSZENIERUNG
1600 – 1750

Jetzt im Handel!

- Die Geschichte der Kunst
- Prachtvolle Bildstrecken
- Großformat
- Nur 15,90 EUR

Neu: GEO EPOCHE EDITION. Erleben
Sie Kunstgeschichte im Großformat.



Liebe Leserin, lieber Leser,

vielen von dem, was Sie auf den nächsten 150 Seiten lesen, basiert auf Spekulationen – wenn auch auf höchst begründeten.

Wenn wir schreiben, dass sich das Leben vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren entwickelt hat, dann bedeutet das: Forscher haben in 3,5 Milliarden Jahre altem Gestein Spuren früher Bakterien gefunden. Was den Schluss zulässt: Die erste Zelle muss irgendwann in der Zeit davor entstanden sein. Doch wann genau, das lässt sich nach derzeitigem Forschungsstand nicht präziser beantworten.

Wenn wir angeben, dass bestimmte Bakterien vor mehr als 2,7 Milliarden Jahren erstmals Photosynthese betrieben, bei der Sauerstoff freigesetzt wurde, dann bedeutet das: Geologen haben nur in 2,7 Milliarden Jahre alten sowie in jüngeren Schichten Eisenoxid gefunden, also die Verbindung von Eisen und Sauerstoff. Was den Schluss zulässt: In jener Epoche müssen große Mengen dieses Gases erstmals in die Umwelt gelangt sein – und das können nur Einzeller per Photosynthese produziert haben.

Und wenn wir vermerken, vor 395 Millionen Jahren sei es zum ersten Landgang eines Wirbeltiers gekommen, dann bedeutet das: Paläontologen haben in versteinertem Schlack einer Küstenregion aus jener Zeit Fußabdrücke eines Vierbeiners gefunden.

Doch in diesem Fall wie auch in den ersten beiden erwähnten Beispielen gilt natürlich: Die Zeitangaben

sind nur so lange valide, wie keine älteren Fossilien oder andere Relikte gefunden werden.

Dennoch gelingt es den Wissenschaftlern, die Vorgänge aus der Frühzeit der Erdgeschichte oft überraschend präzise zu rekonstruieren. Etwa, wie es an einem Seeufer des Urkontinents Laurussia ausgesehen haben muss, als dort vor 328 Millionen Jahren Riesenskorpione Jagd auf Tausendfüßer machten. Welches Klima zu jener Zeit herrschte, welche Pflanzen dort wuchsen und wie groß

die Urahnen der Amphibien und Reptilien wurden, die sich damals anschickten, die Landmassen zu erobern. Ohne die oft staunen machende Arbeit von Chemikern und Molekularbiologen, von Botanikern und Zoologen, von Genetikern und Geologen wäre es unseren Reportern nicht möglich gewesen, jenes Panorama früher Zeitalter zu entwerfen, das wir auf den folgenden Seiten vor Ihnen ausbreiten.

Auch die beiden Illustratoren Jochen Stuhmann und Tim Wehrmann, die exklusiv für GEOkompakt die zwölf großen Epochen der Naturgeschichte rekonstruiert haben, konnten sich dabei auf wissenschaftliche Erkenntnisse verlassen

und so den Verlauf der Evolution präzise in Szene setzen.

Es war das größte und mit Abstand aufwendigste Illustrationsprojekt in der Geschichte unseres Magazins, und ich lade Sie ein, mit uns einzutauchen in längst vergangene Welten.



Der Biologe Rainer Harf hat das Konzept dieses Heftes erarbeitet und die Produktion koordiniert

Herzlich Ihr

Michael Siefen

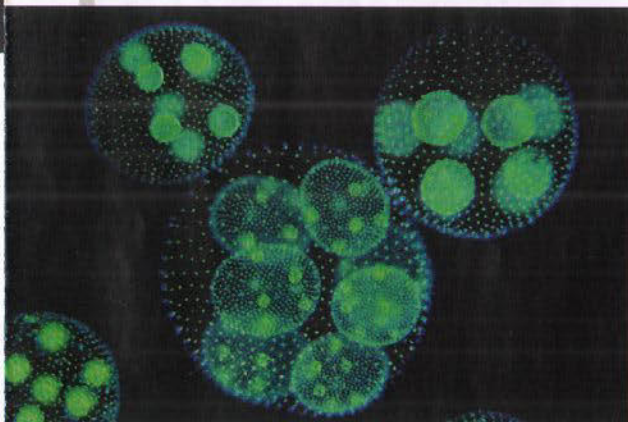


➔ **Vor mehr als 3,5 Mrd. Jahren:** In den Wänden von Tiefseeschloten bildet sich der erste Organismus. Seite 36



➔ **Vor 3,5 Mrd. Jahren:** Die ersten Parasiten entstehen - die Viren. Seite 50

➔ **Vor 2,7 Mrd. Jahren:** Bakterien nutzen per Photosynthese die Energie der Sonne und setzen dabei Sauerstoff frei. Seite 60



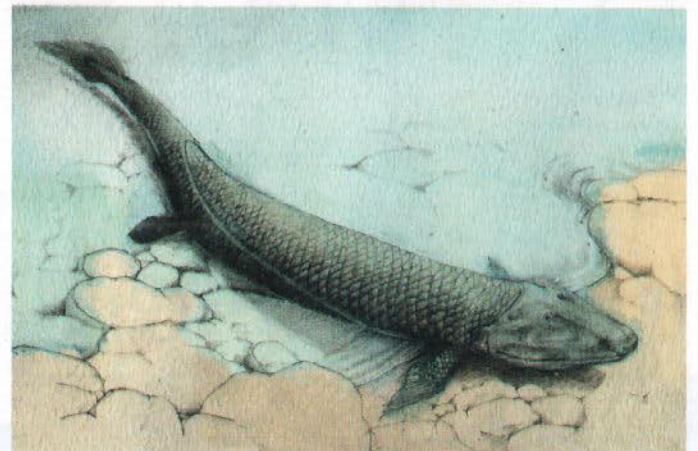
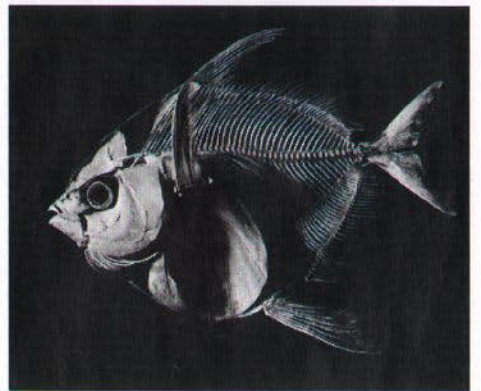
➔ **Vor 1,2 Mrd. Jahren:** Manche frühen Vielzeller ähneln diesen Algen - sie sind die Ahnen aller Pflanzen. Seite 72

Vor 900 Mio. Jahren: Pilze entwickeln sich. Sie bilden ein eigenes Reich neben Tieren und Pflanzen. Seite 124



➔ **Vor 750 Mio. Jahren:** Schon die Zellen der ersten Tiere sind Meisterwerke. Nach und nach entstehen aus ihnen komplexe Gewebe wie diese (oben). Seiten 72, 80

➔ **Vor 542 Mio. Jahren:** Die Entwicklung von Außen- und Innenskelett treibt die Evolution an. Im Meer entstehen neue Tierstämme. Seite 84



➔ **Vor 460 Mio. Jahren:** Mit erstaunlichen Anpassungen schaffen es Pflanzen und Tiere, eine fremde Welt zu erobern: die Kontinente. Seite 98

Die Ahnentafel aller Kreaturen

Von der Vielfalt des Lebendigen **5**

Vier Milliarden Jahre Evolution

Die zwölf großen Epochen der Naturgeschichte **10**

Als die Materie lebendig wurde

Wie ein unsichtbarer Prozess die Natur veränderte **34**

Die erste Zelle

Was genau geschah, als im Meer der Vorfahr aller Organismen heranreifte **36**

Viren

Warum die kleinen Parasiten so erfolgreich sind **50**

Die Kraft des Lichts

Als Mikroben die Sonne entdeckten **60**

Die Zelle und ihr Kern

Das höhere Leben begann mit einer Partnerschaft im Meer **68**

Die zweite Schöpfung

Mit den Vielzellern entstanden die Ahnen aller komplexen Lebewesen **72**

Die Anatomie der Zellen

Wie die Bausteine der Tiere und Pflanzen noch heute konstruiert sind **80**

Erfolgsmodell Skelett

Als Panzer und Knochen die Tierwelt revolutionierten **84**

Ein Fisch mit Beinen

Der lange Weg vom Meer aufs Land **98**

Das Prinzip Wachstum

Wenn aus einer winzigen Kugel ein ganzer Körper reift **108**

Das Geheimnis der Giganten

Wissenschaftler arbeiten am Rätsel um die größten Dinosaurier **110**

Konvergenz

Warum die Natur das Auge mehr als 50 Mal hervorgebracht hat **120**

Weder Pflanze noch Tier

Das vergessene Reich der Pilze **124**

Katastrophen

Weshalb Asteroiden und Vulkanausbrüche die Evolution vorantreiben **140**

Triumph der Säuger

Als die Felltiere den Planeten eroberten **142**

Bildnachweis **119**

Impressum **119**

Vorschau: »Die Eroberung der Welt« **154**

Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 14. Mai 2010

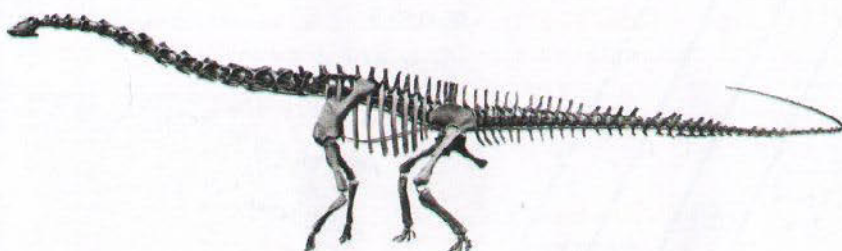
Alle Fakten und Daten in diesem Heft sind vom GEOkompakt-Verifikationsteam auf ihre Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden.

Informationen zum Thema und Kontakt zur Redaktion unter www.geokompakt.de



Vor 330 Mio. Jahren: Auf den Kontinenten breiten sich erstmals riesige Wälder aus - und bald werden Tausendfüßer zwei Meter groß.

Seite 20



Vor 210 Mio. Jahren: Die Langhalsosaurier entwickeln sich zu den größten Landtieren aller Zeiten. Forscher versuchen heute, das Geheimnis dieses Riesenwachses zu lüften.

Seite 110



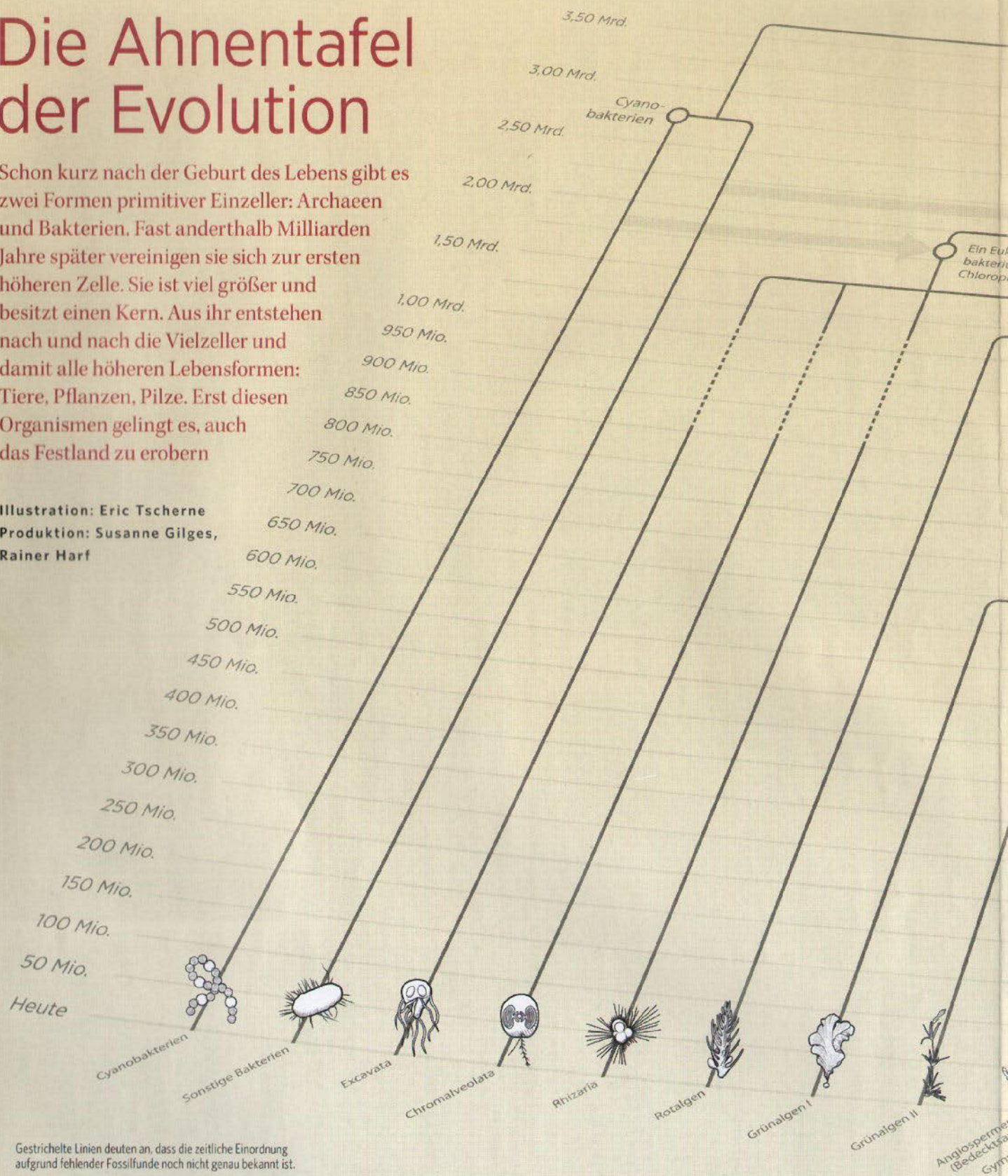
Vor 65 Mio. Jahren: Eine Gruppe fellttragender Tiere, die zuvor nur in der Nacht aktiv waren, erobert die Welt - nach dem Untergang der Dinosaurier bricht die Zeit der Säuger an.

Seite 142

Die Ahnentafel der Evolution

Schon kurz nach der Geburt des Lebens gibt es zwei Formen primitiver Einzeller: Archaeen und Bakterien. Fast anderthalb Milliarden Jahre später vereinigen sie sich zur ersten höheren Zelle. Sie ist viel größer und besitzt einen Kern. Aus ihr entstehen nach und nach die Vielzeller und damit alle höheren Lebensformen: Tiere, Pflanzen, Pilze. Erst diesen Organismen gelingt es, auch das Festland zu erobern

Illustration: Eric Tscherne
Produktion: Susanne Gilges,
Rainer Harf



Gestrichelte Linien deuten an, dass die zeitliche Einordnung aufgrund fehlender Fossilfunde noch nicht genau bekannt ist.

DER ZEITSTRAHL DER LEBENSENTSTEHUNG

■ 3,5 Mrd. Jahre

■ 3,0 Mrd. Jahre

■ 2,5 Mrd. Jahren

vor mind. 3,5 Mrd. Jahren

DAS LEBEN ENTSTEHT: Schon bald nachdem sich die Urzelle gebildet hat, entstehen zwei Typen einfacher Organismen - Bakterien und Archaeen.

vor mind. 2,7 Mrd. Jahren

PHOTOSYNTHESE: Bestimmte Bakterien fangen mit Farbstoffen Sonnenlicht ein und nutzen dessen Energie. Sie werden zu Cyanobakterien, die Sauerstoff ausscheiden. Dessen Gehalt in Meer und Atmosphäre steigt im Laufe von Jahrtausenden dramatisch an.

Viren

Diese winzigen Parasiten machen eine eigene Evolution durch. Sie sind jedoch bei ihrer Vermehrung auf andere Lebewesen angewiesen.

Archaeen

Archaeen

Die Vorfahren der Pilze und Tiere entwickeln sich

Ahnen der Pilze und Tiere trennen sich

Erster tierischer

Tiere

Neumünder

Chordatiere

Wirbeltiere

Helicocrithus

Ostracodermen

Conodontentiere

Therapsiden

Dinosaurier

Vögel

Schlangen/Echsen

Amphibien

Quastenflosser

Strahlenflosser

Knorpeltiere

Neunaugen

Lanzettfischchen

Stachelhäuter

Weichtiere

Säugetiere

Schildkröten

Krokodile

1 Mrd. Jahre

800 Mio. Jahre

600 Mio. Jahre

vor mind. 1 Mrd. Jahren

AHN VON TIER UND PILZ: Ein einzelliger Eukaryot, der sich mit einer Geißel im Meer fortbewegt, spaltet sich in die Vorfahren der Tiere und Pilze auf.

vor 900 Mio. Jahren

PILZE: Im Meer lebende Einzeller entwickeln sich zu vielzelligen Formen, die Geflechte aus Fäden bilden - die Vorfahren der heutigen Pilze.

vor 750 Mio. Jahren

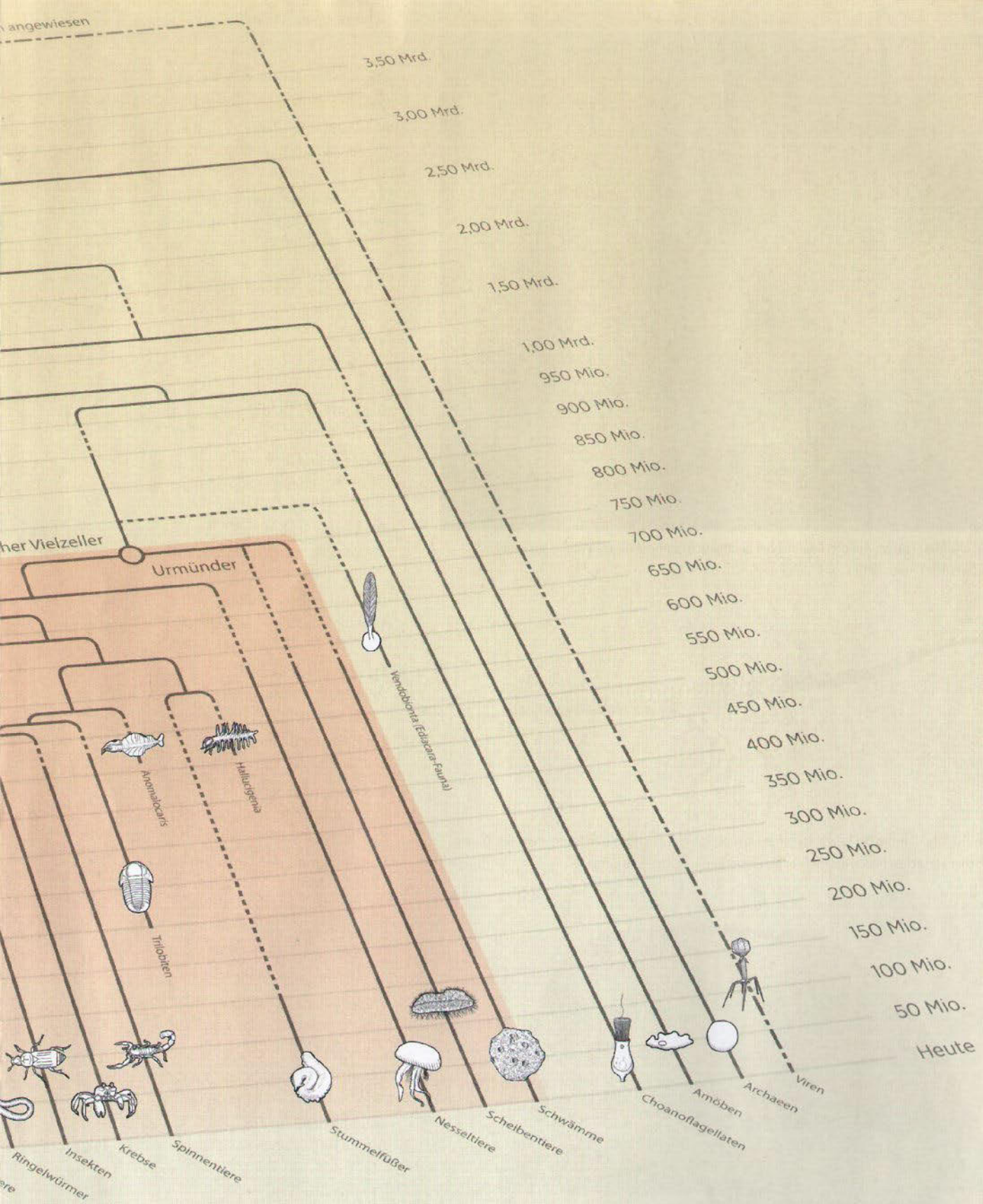
ERSTES TIER: Ein Vielzeller wird zum Ahn aller Tiere. Diese haben meist einen komplexen Körperbau, Sinnesorgane und können sich bewegen.

vor 542 Mio. Jahren

KAMBRISCHE RADIATION: Im Meer entsteht innerhalb von 20 Millionen Jahren eine riesige Vielfalt an Tierstämmen - darunter fast alle, die es heute noch gibt.

vor 460 Mio. Jahren

BESIEDLUNG DES LANDES: Moose (die Nachfahren der Grünalgen) erobern das Land. Aus ihnen entstehen später Farne und Samenpflanzen.



■ 400 Mio. Jahren

vor 395 Mio. Jahren

ERSTE VIERFÜßER: Fische, die Flossen in Beine umwandeln und mit Lungen atmen, werden zu den Ahnen der Landwirbeltiere.

■ 200 Mio. Jahre

vor mind. 200 Mio. Jahren

SÄUGETIERE: Im Schatten der Saurier entsteht eine neue Tiergruppe: warmblütig, mit Fell; ihre Jungen versorgt sie mit Muttermilch.

■ heute

vor 65 Mio. Jahren

ENDE DER SAURIER: Durch einen Asteroiden sterben die Dinosaurier aus. Die Säugetiere erleben dadurch einen Aufschwung.

o. Jahren
LANDES:
(grünalgen)
entwickeln
mpflanzen



Evolution

Die **Geschichte** des **Lebens**

Präkambrium

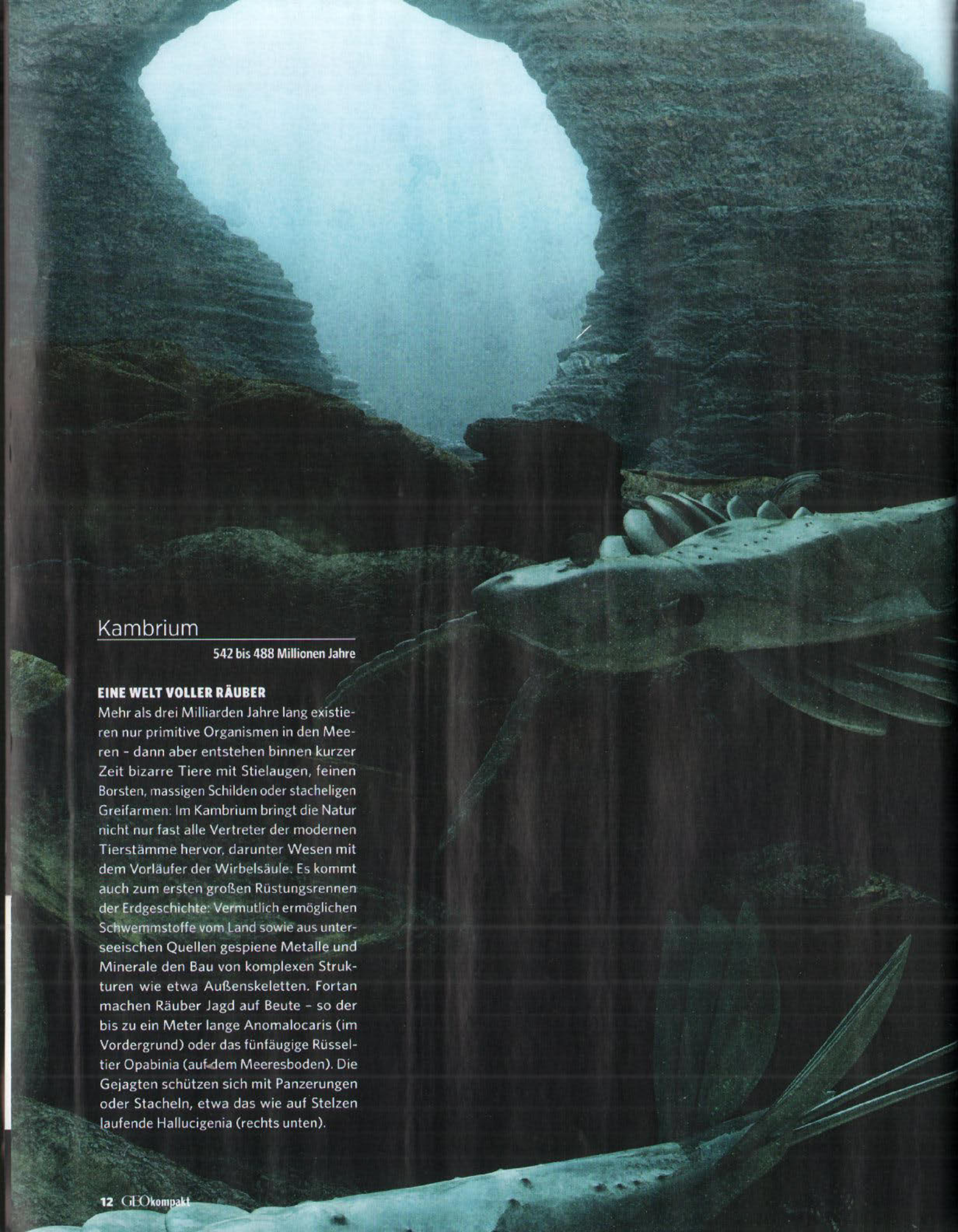
mind. 3,5 Milliarden bis 542 Millionen Jahre

DIE ERSTEN ZELLEN

Paläontologen teilen die Naturgeschichte in der Regel in zwölf Epochen ein, die anhand für sie typischer Fossilien definiert werden. Die erste dieser Epochen beginnt vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren, als aus toten, anorganischen Verbindungen über mehrere Zwischenschritte die erste Zelle entsteht: eine winzige Fabrik des Lebens mit einfachen Stoffkreisläufen und der Fähigkeit, sich zu teilen und dabei Erbinformationen weiterzugeben. Aus diesem Grundmodul bilden sich knapp 2,5 Milliarden Jahre später vielzellige, kugelige Gemeinschaften (links). Sie sind die frühesten komplex gestalteten Lebewesen – und der Beginn aller Vielfalt, die sich in den kommenden Zeitaltern entwickelt.

Illustrationen: Jochen Stuhmann, Tim Wehrmann
Produktion: Susanne Gilges, Rainer Harf, Torsten Laaker
Texte: Henning Engeln, Jörn Auf dem Kampe

Seit mehr als 3,5 Milliarden Jahren gibt es Leben auf der Erde und damit einen Zustand, der mit den Gesetzen von Physik oder Chemie allein nicht zu erfassen ist – aus wenigen Grundbausteinen nur haben sich Zellen geformt, sind höhere Organismen entstanden, hat die Natur ein komplexes Beziehungsgeflecht von Räubern und Beute hervorgebracht wie auch eine Vielfalt von Tieren, Pflanzen und Pilzen, die selbst planetare Katastrophen nicht haben auslöschen können. Die Geschichte der Evolution ist ein Epos von Anpassung, Untergang und beständiger Neuerfindung



Kambrium

542 bis 488 Millionen Jahre

EINE WELT VOLLER RÄUBER

Mehr als drei Milliarden Jahre lang existieren nur primitive Organismen in den Meeren – dann aber entstehen binnen kurzer Zeit bizarre Tiere mit Stielaugen, feinen Borsten, massigen Schilden oder stacheligen Greifarmen: Im Kambrium bringt die Natur nicht nur fast alle Vertreter der modernen Tierstämme hervor, darunter Wesen mit dem Vorläufer der Wirbelsäule. Es kommt auch zum ersten großen Rüstungsrennen der Erdgeschichte: Vermutlich ermöglichen Schwemmstoffe vom Land sowie aus unterseeischen Quellen gespiene Metalle und Minerale den Bau von komplexen Strukturen wie etwa Außenskeletten. Fortan machen Räuber Jagd auf Beute – so der bis zu ein Meter lange *Anomalocaris* (im Vordergrund) oder das fünffüßige Rüsseltier *Opabinia* (auf dem Meeresboden). Die Gejagten schützen sich mit Panzerungen oder Stacheln, etwa das wie auf Stelzen laufende *Hallucigenia* (rechts unten).

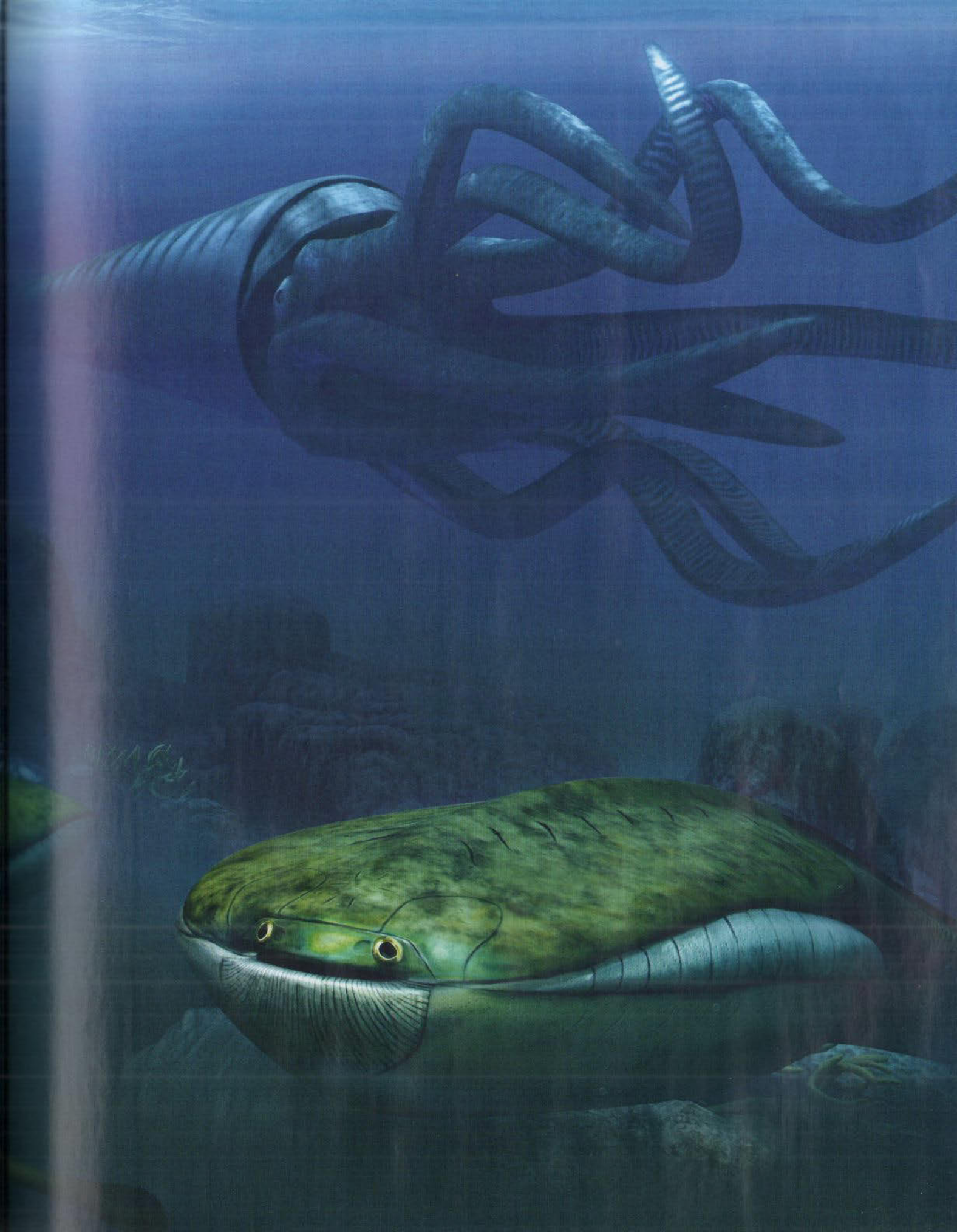


Ordovizium

488 bis 444 Millionen Jahre

NEUE VIelfALT IM OZEAN

Noch immer gedeiht das Leben - abgesehen vom Landgang einfacher Algen und Flechten - ausschließlich im Meer. Darunter sind gewaltige Räuber: so die bis zu elf Meter langen *Cameroceas* (rechts), die größten Kopffüßer aller Zeiten. Die frühesten Fische (*Sacabambaspis*, im Vordergrund) besitzen weder Kiefer noch Zähne. Sie verfügen über einfache Flossen am Schwanz und schützen sich mit derben Kopfplatten aus einem knochenähnlichen Material. In ihre rundlichen Mäuler saugen die archaischen Wirbeltiere weiche Algenmatten und Mikrobenkolonien, die sie im Schlamm aufwühlen - am Fuß der ersten Korallenriffe der Erdgeschichte.





Silur

444 bis 416 Millionen Jahre

PIONIERE AN LAND

Nach den ersten primitiven Flechten und Algengewächsen entwickeln sich vor rund 420 Millionen Jahren komplexer gebaute Gefäßpflanzen an Land. Die etwa vier Zentimeter hohe *Cooksonia* gehört zu den frühesten Gewächsen, die sich der Trockenheit, den Temperaturunterschieden und dem schädlichen Dauerbombardement ultravioletter Sonnenstrahlung anpassen können. *Cooksonia* besiedelt die Ufer der Meere und Flüsse und verankert dazu ihren Körper mit wurzelähnlichen Auswüchsen im Boden; über diese Triebe saugt sie Süßwasser und Minerale auf. Auch Gliederfüßer wie Skorpione sowie Weichtiere trotzen den harten Bedingungen. Schalenwesen wie die hier abgebildeten vier bis fünf Zentimeter breiten Muscheln schützen sich mit ihrem Gehäuse vor Austrocknung.





Devon

416 bis 359 Millionen Jahre

LANDGANG DER NACHZÜGLER

In den Meeren, Flüssen und Seen entfaltet sich eine ungeheure Vielfalt an Fischen, darunter solche der Gattung *Dipterus* (vorn). Eine anatomische Neuerung erlaubt diesem Süßwasserbewohner den Vorstoß in sauerstoffarme Zonen: Er besitzt eine primitive Lunge, mit der er über Wasser Luft atmen kann. Diese Innovation ermöglicht Tiktaalik (hinten), einem Urahn der Amphibien, sogar den Landgang. Als eine der ersten Wirbeltierspezies dringt er, unter anderem dank stabiler Flossen, auf die Ufer vor. Dennoch gehören die Fische zu den Nachzüglern auf den Kontinenten – Gliederfüßer, Weichtiere und Pflanzen haben sich dort längst ausgebreitet. Wie auch die *Prototaxis*-Pilze, deren säulenartige Fruchtkörper bis zu acht Meter hoch aufragen.







Karbon

359 bis 299 Millionen Jahre

DIE ERSTEN WÄLDER

Das Leben hat sich an Land etabliert und lässt kaum noch Zonen aus. Erstmals bedecken ausgedehnte Wälder die Landmassen, die beginnen, sich zum Superkontinent Pangaea zu verbinden. Bis zu 40 Meter hohe Bärlapp-Bäume und zehn Meter mächtige Schachtelhalme dominieren das neue Ökosystem Wald. Und es ist die Zeit der Gliedertiere: Am Fuß der Baumriesen machen zwei Meter lange, schwer gepanzerte Arthropleura (links), die den modernen Tausendfüßern ähneln, Jagd auf Libellen mit Spannweiten von bis zu 60 Zentimetern.



Perm

299 bis 251 Millionen Jahre

RÄUBER AUF DEM SUPERKONTINENT

In diesem Zeitalter rücken die einzelnen Festlandmassen Pangaeas immer weiter zusammen. An dessen Rändern herrscht eher tropisches, feuchtes Klima, im Inneren liegt eine gewaltige Wüste. Die beherrschenden Vierbeiner sind die Pelycosaurier, zu denen auch Dimetrodon gehört. Diese Fleischfresser haben erstmals speziell entwickelte Zähne, mit denen sie Beute erlegen können, die so groß ist wie sie selbst. Mit dem Rückensegel fangen die kaltblütigen Tiere vermutlich Sonnenstrahlen auf, um sich aufzuheizen.

Das Perm endet mit dem größten Massensterben aller Zeiten - vermutlich ausgelöst durch einen gigantischen Vulkanausbruch.





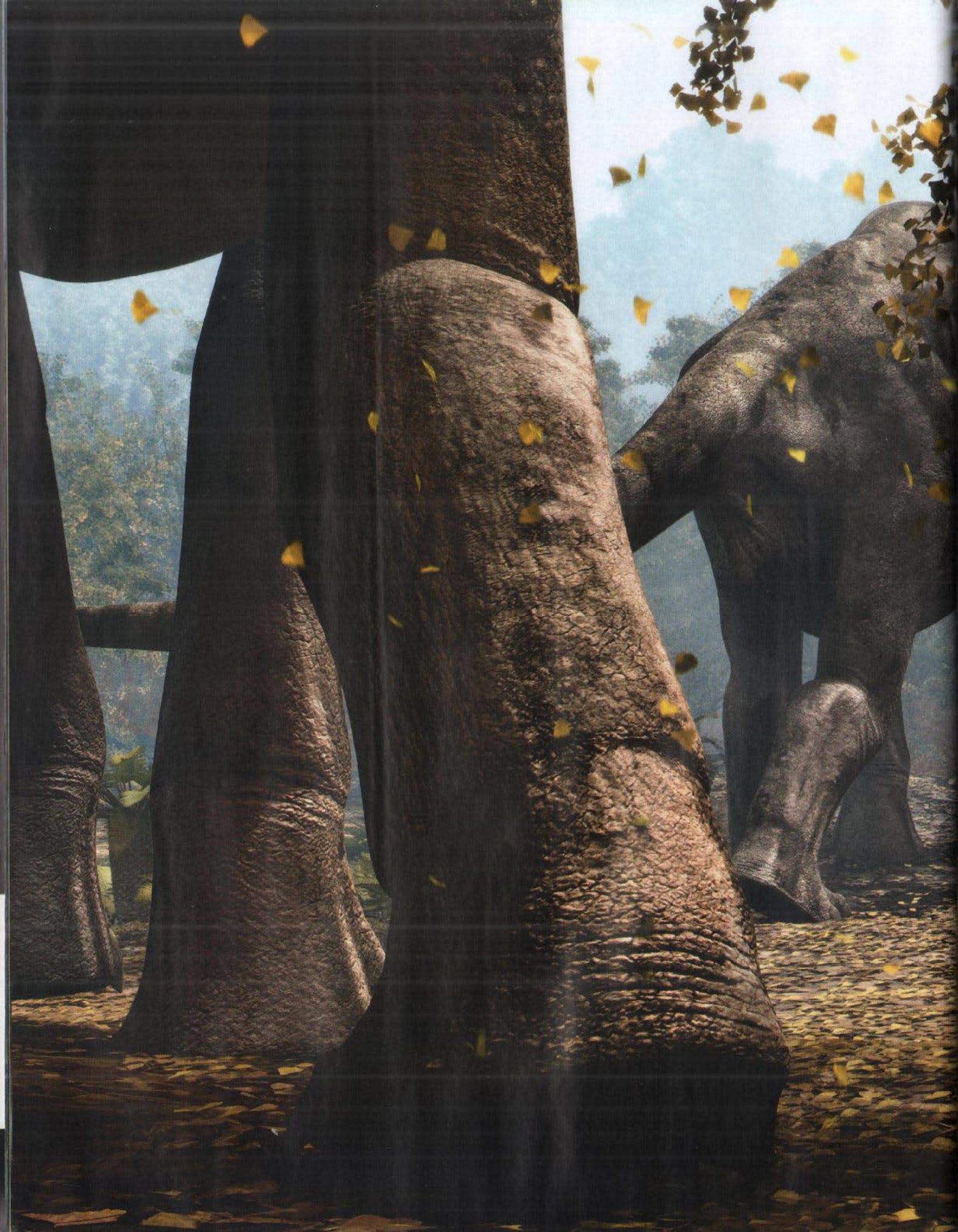


Trias

251 bis 200 Millionen Jahre

ZU WASSER, ZU LAND UND IN DER LUFT

Die Reptilien werden zu den dominierenden Tieren. Einigen gelingt es, den Luftraum zu erobern – wie der etwa ein Meter langen Flugechse Eudimorphodon. Andere passen sich mehr und mehr dem Leben im Wasser an. Der sechs Meter lange Tanystropheus jagt mit seinem schlangenähnlichen Hals in Küstengewässern nach Beute, lebt aber auch an Land. Andere Reptilien, wie die Fischechsen, existieren bereits komplett im Meer. An Land tauchen die ersten Dinosaurier auf – leicht gebaute Echsen mit säulenförmigen Beinen. Ginkgo- und Nadelbäume verbreiten sich.



DIE ÄRA DER GIGANTEN

Vor etwa 200 Millionen Jahren entwickeln sich die größten Landtiere, die je die Erde bevölkert haben: die haushohen Sauropoden – etwa der Brachiosaurus (links). Eine spezielle Lungenkonstruktion, der leichte Körperbau, möglicherweise Warmblütigkeit sowie eine besondere, pflanzliche Nahrung ermöglichen den Riesenwuchs. Der Urvogel Archaeopteryx (vorn) beginnt neben den Flugsauriern den Luftraum zu erobern. In den Wäldern wachsen Ginkgobäume und die an heutige Palmfarne erinnernde Williamsonia. Verbreitet sind auch Farne und Nadelbäume.





Kreide

145 bis 65 Millionen Jahre

DIE ERDE WIRD ZUM BLÜTENMEER

Die Samenpflanzen entwickeln ein neues Fortpflanzungsorgan: die Blüte. Manche nutzen den Wind, um die männlichen Geschlechtszellen (Pollen) zu anderen Blüten zu tragen. Andere - wie hier Magnolien - gewinnen Insekten für diese Aufgabe, indem sie sie mit leuchtenden, duftenden Blüten und zum Teil mit nahrhaftem Nektar anlocken. In dieser Periode erleben die Dinosaurier ihre größte Vielfalt. Manche, etwa Gallimimus (rechts), tragen ein Federkleid, um sich zu wärmen.

DER SIEGESZUG DER FELLTRÄGER

Die warmblütigen, felltragenden Säugetiere gebären lebende Junge und ernähren sie mit Muttermilch. In der Erdneuzeit werden sie zur vorherrschenden Wirbeltiergruppe. Zu ihnen gehören die Chalicotherien (rechts), zwei Meter lange Huftiere, die auf ihren überlangen Vordergliedmaßen im Knöchelgang laufen, sowie das elefantenähnliche Deinotherium (hinten). Auch Riesenschweine sowie die gigantischen Indricotherien – 30 Tonnen schwere Riesen aus der Nashornverwandtschaft – leben in der Erdneuzeit. Manche Huftiere, die Ahnen der Wale, passen sich wieder ans Wasser an, andere Säuger an das Leben auf Bäumen, etwa die Affen. Blütenpflanzen und Insekten bringen eine große Vielfalt hervor.









Quartär

2,6 Millionen Jahre bis heute

DAS ENDE DER RIESEN

Seit 2,6 Millionen Jahren durchlebt die Erde Klimaschwankungen mit extrem kalten Perioden, den Eiszeiten. In Südamerika leben noch bis vor 1,8 Millionen Jahren gewaltige, flugunfähige Terrorvögel, die hier ein vier Meter langes Riesengürteltier angreifen, das sich mit seiner Stachelkeule am Schwanzende zu wehren sucht. In den kalten Steppen entwickeln sich speziell angepasste Arten, etwa Mammuts, Riesenhirsche, Wollnashörner oder Höhlenbären. Und in Afrika vergrößert vor 2,5 Millionen Jahren ein aufrecht gehender Affe sein Gehirn und erfindet die ersten Werkzeuge: Er wird zum Menschen. Der macht sich bald darauf auf, die gesamte Erde zu erobern – und vermutlich fallen diesem gefährlichsten Jäger aller Zeiten die urzeitlichen Riesentiere zum Opfer. □

Als die Materie lebendig wurde

Vor mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren formte sich auf der archaischen Erde aus unbelebten Molekülen erstmals ein lebendiges Wesen. Damals begann jener unsichtbare Entwicklungsprozess, der das Leben seither beständig verwandelt und weiterentwickelt: die Evolution

Text: Rainer Harf

Rund 100 Milliarden Galaxien gibt es im Universum. In jeder einzelnen Galaxie strahlen 100 Milliarden Sterne. Und um jeden zweiten dieser Sterne, so schätzen Wissenschaftler, dreht sich ein System aus mehreren Planeten. Es existieren also neben der Erde mindestens zehn Trilliarden weitere Welten. Und doch könnte es durchaus sein, dass auf keinem anderen Himmelskörper jenes wundersame Zusammenspiel von Materie existiert, das uns Menschen so vertraut ist wie Tag und Nacht: das Leben.

Denn niemand weiß – und vielleicht wird niemand jemals wissen –, ob die Erde eine Entsprechung hat in der Weite des Alls oder ob sie einzigartig ist in einem ansonsten leblosen Kosmos.

Fest steht jedenfalls, dass es auf unserem Planeten vor mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren zu einem unwahrscheinlichen, staunenswerten Ereignis kam: Empfindungslose Moleküle ordneten sich in einem hochkomplexen Prozess zu einem sensiblen Organismus, einer mikroskopisch kleinen Urzelle – zum ersten Lebewesen.

Wo genau sich dieses Geschöpf entwickelte, wo genau sich also Chemie in Biologie wandelte, ist nicht bekannt. Es wird aber ein Ort gewesen sein, der jenen labilen organischen Stoffen – den Bausteinen der Lebewesen – Schutz bot vor den Urgewalten der jungen Erde, vor den kosmischen Strahlen und der zerstörerischen Energie der Asteroiden, die fortwährend in den Ozean einschlugen.

Die meisten Forscher vermuten, dass die ersten Kreaturen in winzigen

Bläschen im Gestein unterseeischer Schlotte reiften. Andere gehen davon aus, dass Kämmerchen im Meereis oder in Tonsedimenten die Brutstätten des Lebens bildeten.

Doch wo auch immer sich die Genese des Seins einst abgespielt hat – sie kam einem Fieber der Materie gleich: Das Leben, sobald es erwacht war, griff um sich und steckte weitere Materie mit Leben an.

Es war genau dies – die Fähigkeit, sich zu vermehren, Nachkommen hervorzu bringen, ja, gewissermaßen sich selbst zu gebären –, das bereits jene frühen Kreaturen von allem Anorganischen unterschied. Kein Felsen oder Stein, kein noch so einfach geformtes Sandkorn vermag ein Ebenbild seiner selbst zu erschaffen.

Die erste Zelle barg bereits einen Bauplan, der sämtliche Informationen darüber enthielt, wie ihr Inneres beschaffen war. Eine Anleitung, die genau festlegte, welche biochemischen Kreisläufe sie am Leben hielten. Und die vor allem eines vorgab: Welche Stoffe zu welcher Zeit gebildet werden mussten, damit sich das kleine Wesen verdoppeln konnte.

Dieser Bauplan war gespeichert in einem einzigartigen Molekül, das bis heute alles Lebendige regiert: der DNS. Mit jeder Verdoppelung vererbte die Zelle diese molekulare Anleitung an ihre Nachkommen, sodass auch sie sich vermehren konnten.

JAHRMILLIONEN nach der Bildung der ersten Urzelle breiteten sich an jenem unbekannten Ort der Schöpfung schleimige Matten aus. In ihnen wimmelte es von Leben, dort drängten sich Milliarden über Milliarden von Einzellern – und es wurden immer mehr.

Bereits damals, zur Zeit jener frühen Mikroben, wirkte ein unsichtbarer Prozess, ohne den sich das Leben aus diesem archaischen Stadium nicht hätte erheben können. Es war eine fortwährende Veränderung und Weiterentwicklung: die Evolution.

Denn nicht alle Einzeller waren gleich. Zwar stammten sie von ein und demselben Urahn ab, hatten also einen gemeinsamen Vorfahr. Doch nicht bei jeder Verdoppelung stellten die Zellen exakte Kopien ihres Erbguts her. Immer wieder machten sie Fehler, schrieben durch Zufall den Bauplan um und erzeugten damit Nachkommen, die sich von ihnen unterschieden.

Meist führten solche mangelhaften Kopien dazu, dass ihre Träger lebensunfähig waren. Hin und wieder aber kam es dazu, dass die Fehler in der DNS unvorhergesehene Vorteile mit sich brachten.

Dann entstanden Geschöpfe, die mitunter den anderen Organismen in ihrer Umgebung überlegen waren – Bakterien, die möglicherweise besser mit ihrer Energie haushielten als andere. Oder Einzeller, die mit einem Mal völlig neuartige Biomoleküle herzustellen vermochten. Oder solche, die sich schneller vermehrten als ihre Artgenossen – und diese mit der Zeit verdrängten.

In den Matten der Mikroben herrschte also ein Wettkampf ums Überleben. Diese Rivalität untereinander, dieses Sichbehaupten-Müssen führte schließlich dazu, dass das Leben nicht auf der Stufe mikroskopisch kleiner Einzeller blieb.

Denn nichts anderes als Konkurrenz ist es letztlich, was die Evolution seit jeher vorantreibt. Und nichts anderes als Innovationen und Erfolge haben die Geschichte des Lebens geschrieben.

Wie ein Fieber ergriff das Leben die ganze Erde

Im Laufe von Jahrmillionen entwickelten sich immer neue Kreaturen, die immer neue Räume erkundeten. Nicht alle Organismen verharrten am Ort ihrer einstigen Entstehung: Manche siedelten in der Tiefsee, andere an den Hängen unterseeischer Berge oder im flachen Wasser der Küsten.

Mit der Zeit füllte sich der gesamte Ozean mit Leben. Und die Wesen, so winzig sie auch waren, begannen, die gewaltige Oberfläche des Globus mitzugestalten.

Unter ihnen stach eine überaus erfolgreiche Gruppe von Mikroben heraus – die Cyanobakterien. Sie hatten gelernt, die Energie der Sonne zu nutzen und mit der Kraft von Lichtstrahlen letztlich ihren Stoffwechsel anzutreiben.

Dabei schieden ihre kleinen Körper einen flüchtigen Stoff aus. Ein farb- und geruchloses Gas, das den Planeten für immer veränderte: Sauerstoff.

Die luftige Substanz stieg aus den Ozeanen in die Atmosphäre auf, wandelte sich in der Höhe zu Ozon und bildete dort eine unsichtbare Hülle, die den Globus fortan vor schädlicher UV-Strahlung schützte. Zudem reagierte das Gas mit Eisen zu rötlichem Rost, überall färbten sich die Felsen, und alsbald glich das Gestein der Erde dem ihres kosmischen Nachbarn, des Mars.

Unaufhaltsam entwickelten sich die Lebewesen weiter, und schließlich gelang manchen der Schritt, sich aus dem Mikrokosmos zu erheben: Ihre Zellen trennten sich nach der Teilung nicht mehr, sondern blieben aneinander hängen und bildeten die ersten größeren Körper, die aus vielen, teils Hunderten, später Tausenden, Millionen Zellen bestanden.

Bald trieben kugelige Algen in grünen Massen durch die Ozeane: die Ahnen der Pflanzen. Ihnen folgten fädige Urpilze. Und Jahrmillionen später – so zumindest eine gängige Theorie – kroch das erste Tier über den Meeresgrund. Ein Scheibchen nur, nicht größer als ein Millimeter.

UND DOCH: Aus den Nachfahren dieses unscheinbaren Wesens erwuchsen nach und nach äußerst komplexe Kreaturen: Organismen mit Beinen oder Flossen, mit Fangarmen und Greifzangen, mit Zähnen, Gehäusen, Stacheln und Saugnapfen. Gliederfüßer stakten über den Ozeanboden, glasige Quallen pulsierten in der Strömung, Kraken langten mit Tentakeln nach Beute, und Urfische schossen mit kräftigem Flossenschlag durchs Wasser.

Und schließlich, nachdem das Leben Milliarden Jahre im Meer verbracht hatte, machten sich einige Organismen auf, eine weitere Welt zu erobern, das Land. Pflanzen erkundeten die Küsten, Tiere wagten sich aufs Trockene, drangen immer weiter landeinwärts.

Vor rund 350 Millionen Jahren dann begrüneten urtümliche Wälder die vormals karge Erde. Im Schatten der Bäume reckten Pilze ihre Hüte aus dem Boden; Skorpione und Spinnen, Echsen und Asseln raschelten im Laub.

Das Leben, jenes Fieber der Materie, hatte sich nun über den gesamten Pla-

neten ausgebreitet. Und unmerklich hatte es sich auf eine höhere Ebene des Seins geschwungen.

Denn mit den Tieren wurde die Erde nicht mehr nur *belebt*, sondern auch *erlebt*. Anders als Pflanzen und Pilze bildeten die beweglichen Geschöpfe komplexe Sinnesorgane aus, mit denen sie ihre Umgebung wahrnehmen konnten: Sie sahen die Welt, rochen sie und hörten Geräusche. In ihren Körpern arbeitete ein Netz aus Nerven, das imstande war, das Wahrgenommene zu bewerten und eine Entscheidung zu treffen – zur Flucht, zum Angriff, zum Verharren.

Diese Neuronennetze hatten etwas Magisches, Unerklärbares an sich, denn in ihnen erschuf Materie etwas Gegenstandsloses: den Geist, das Empfundene, Gefühle, ja – den ersten Gedanken.

Schon ein Frosch, das kann man zumindest vermuten, hält kurz inne und überlegt, ob und wann er nach einer Mücke schnappt. Ein Gepard passt sicherlich nicht ohne einen Gedanken den richtigen Moment ab, um loszuspringen und eine Antilope zu erlegen.

Besonders bei jenen Tieren, die in Gruppen lebten, die einander halfen und begannen, Gefühle füreinander zu entwickeln, reiften die Gedanken. Vor mehreren Hunderttausend Jahren dann schaute sich eine Spezies, der Mensch, in der Welt um und wunderte sich.

Der Mensch versuchte – und versucht noch immer – zu verstehen, was das Leben ist und wie es einst entstanden ist. Und noch immer schaut er hinaus in die Weite des Alls und fragt sich, ob irgendwo da draußen ein ähnliches Wunder geschehen ist. □

Rainer Harf, 33, ist Redakteur im Team von GEOkompakt.



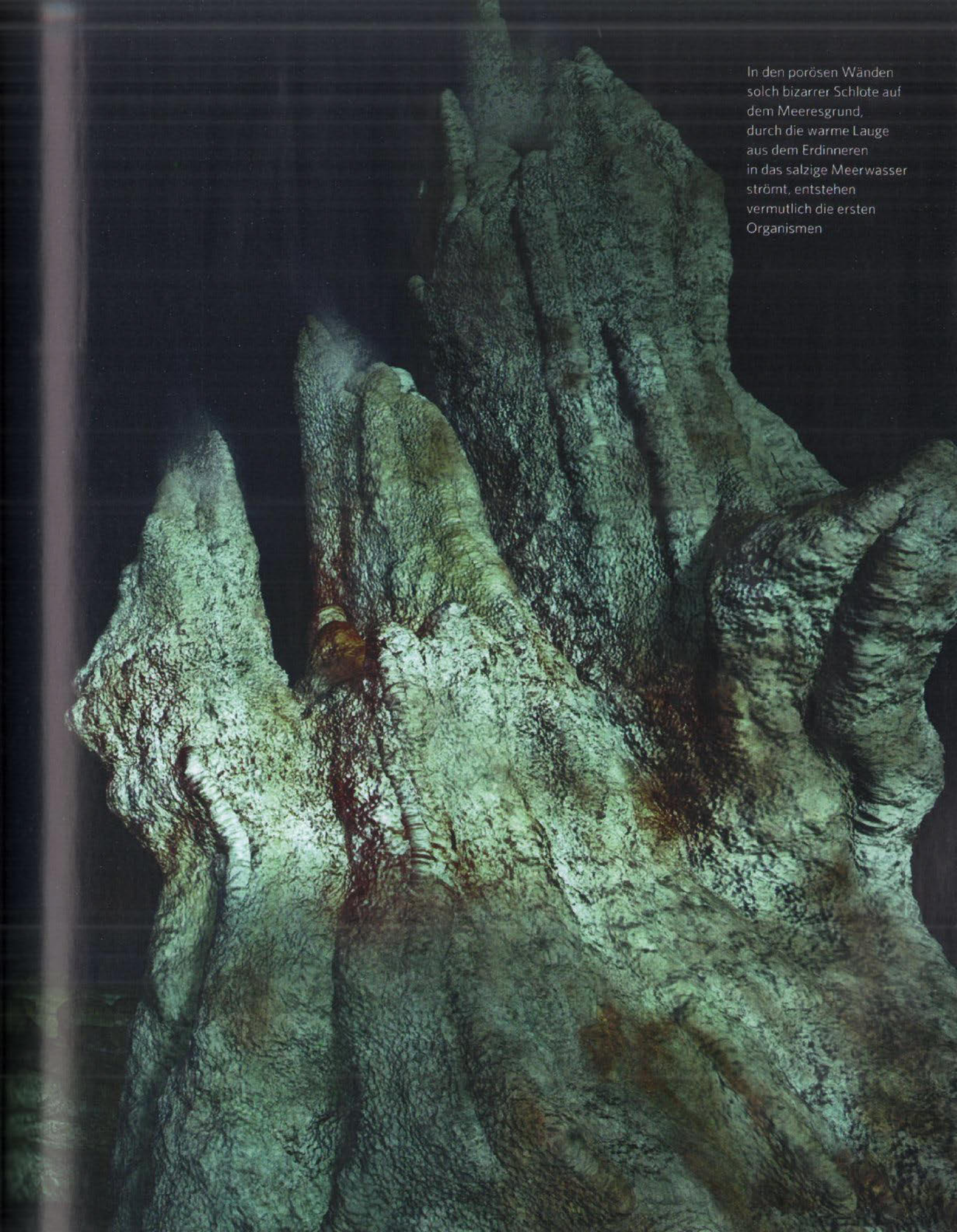
Entstehung des Lebens

Das Wunder in der Finsternis

Auf der jungen Erde bahnt sich vor vier Milliarden Jahren ein Prozess an, der den Planeten wie kein anderer verändern wird: Aus unbelebter Materie entsteht Leben, Chemie wandelt sich in Biologie. An Quellen auf dem Grund des Ozeans vereinigen sich einfache Substanzen zu immer komplexeren Stoffen.* Nach und nach formt sich aus ihnen der erste Organismus: eine winzige Urzelle, mit der die wundersame Geschichte des Lebens beginnt

Text: Martin Paetsch
Illustrationen: Tim Wehrmann

* So zumindest lautet die unter Forschern am weitesten verbreitete Theorie.



In den porösen Wänden
solch bizarrer Schlote auf
dem Meeresgrund,
durch die warme Lauge
aus dem Erdinneren
in das salzige Meerwasser
strömt, entstehen
vermutlich die ersten
Organismen

Wie in steinernen Kammern...

V. Das Erbmolekül DNS

Neben der RNS entsteht ein anderes Molekül, die Desoxyribonukleinsäure, kurz DNS (13). Sie bildet einen Doppelstrang, der einer Wendeltreppe ähnelt. Die DNS ist weit stabiler als die RNS. Sie übernimmt fortan die Speicherung von Informationen (etwa für den Bau von Eiweißen) und wird so zur Erbsubstanz. Damit ist aus der Molekülsuppe in den Gesteinsbläschen schon fast ein Organismus geworden, eine Proto-Zelle. Sie vermag Nachkommen zu zeugen, indem sie Kopien ihrer DNS an andere Gesteinskammerchen weitergibt, und sie nutzt Energie, um Substanzen zu bilden, betreibt also Stoffwechsel. Fortbewegen kann sie sich allerdings noch nicht – sie ist gefangen in einer steinernen Hülle.

IV. RNS und Eiweiße

Die Nukleotide verknüpfen sich zu langen Ketten, der Ribonukleinsäure, kurz RNS (11). Sie besteht unter anderem aus Zucker und jeweils einer von vier Nukleinsäurebasen. Dies ist vermutlich das erste Molekül, das sich selbst vervielfältigen kann – eines der Grundmerkmale sämtlicher Lebewesen. Die Peptide wiederum fügen sich zu unterschiedlichen Eiweißen (12) zusammen. Schließlich kommt es zu einer Kooperation: Die RNS entwickelt sich zu einem Bauplan, der die jeweilige Gestalt eines Eiweißes bestimmt.

III. Nukleotide und Peptide

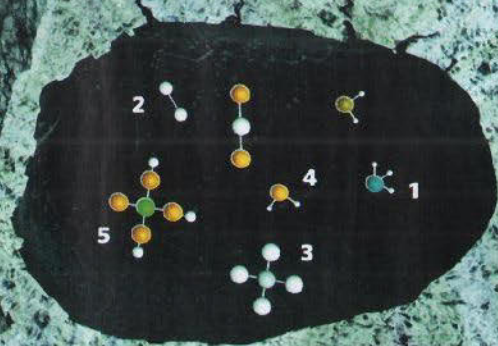
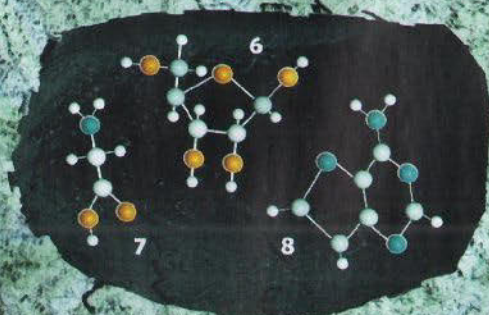
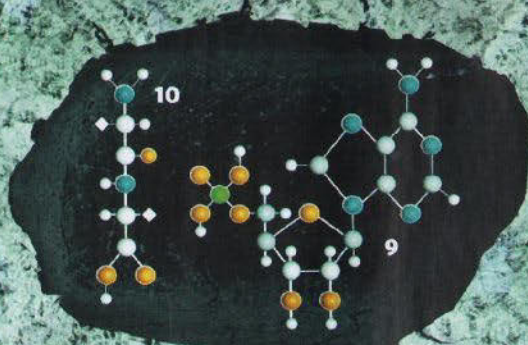
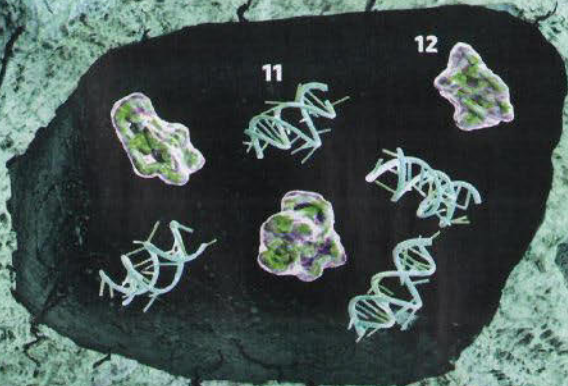
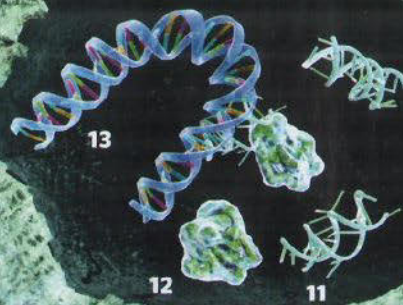
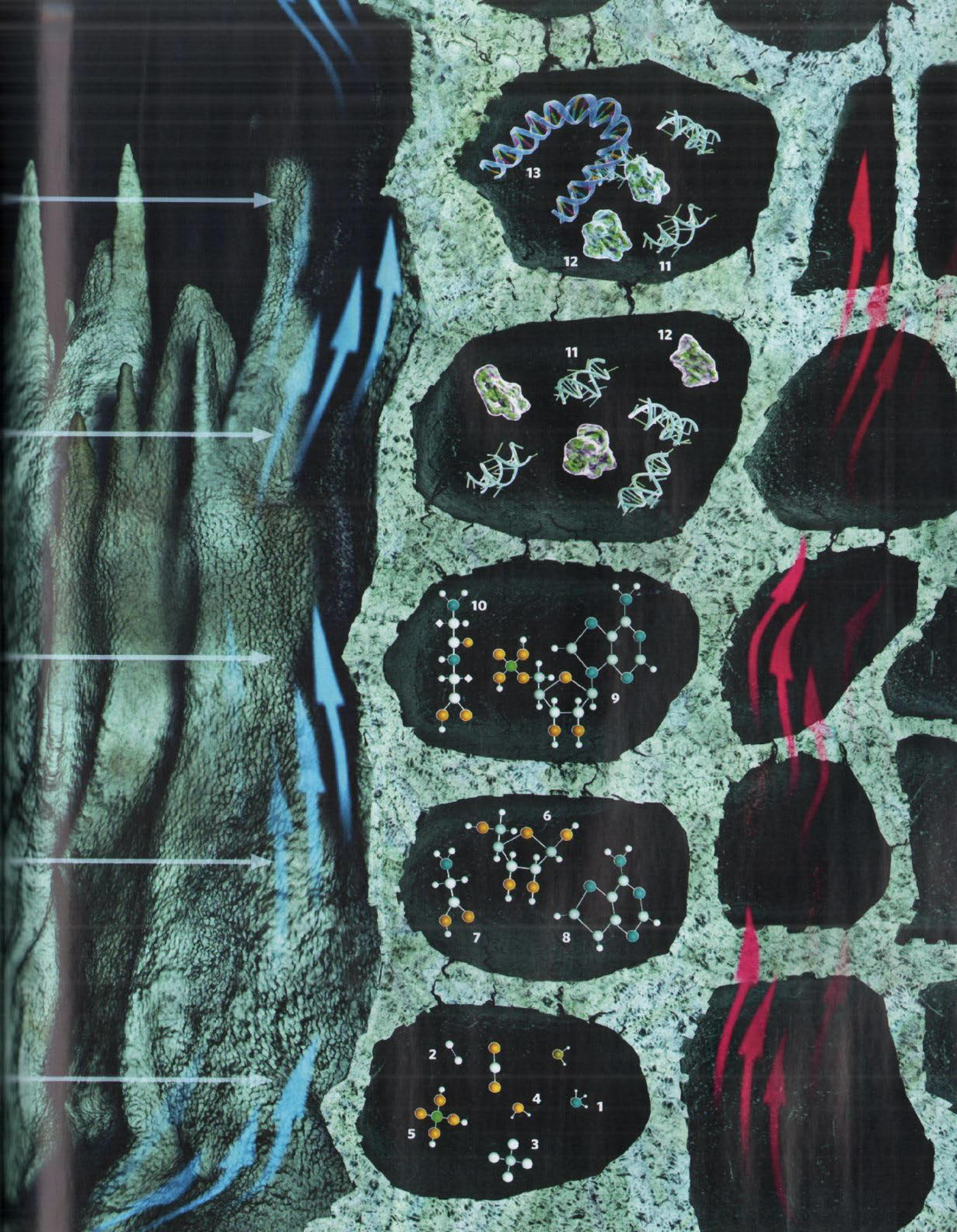
Infolge weiterer Reaktionen vereinigen sich bestimmte Substanzen in den Kammerchen zu sogenannten Nukleotiden (9), den Einheiten der späteren Erbmoleküle. Schließlich bilden sich unterschiedliche Nukleotide, die jeweils aus einem Zuckermolekül, einer energiereichen Phosphatverbindung und einer von fünf sogenannten Nukleinsäurebasen (Adenin, Guanin, Thymin, Cytosin, Uracil) zusammengesetzt sind. Unabhängig davon verknüpfen sich manche Aminosäuren zu kurzen Ketten, den Peptiden (10), Vorstufen der Eiweißmoleküle.

II. Zucker, Aminosäuren und Nukleinsäurebasen

Die Kammerchen verwandeln sich in kleine Labore: Die Substanzen sammeln sich in ihnen an und reagieren weiter zu immer neuen Stoffen. Vor allem in Kammern, die 50 bis 70 Grad Celsius warmes Wasser durchströmt, herrschen dafür ideale Bedingungen. In ihnen entstehen größere Moleküle, darunter Zuckerverbindungen (6), Aminosäuren (7) sowie Nukleinsäurebasen (8) – die Bausteine hochkomplexer organischer Substanzen. Die Eisensulfid-Hülle der Gesteinsbläschen beschleunigt die chemischen Reaktionen.

I. Der Beginn der Genese

Die steinernen Wände unterseeischer Schlote bestehen aus einem Geflecht mikroskopisch kleiner Eisensulfid-Kammern, die von schwach saurem Ozeanwasser (blaue Pfeile) umspült werden. Die Hüllen dieser Gesteinsbläschen sind so porös, dass sie untereinander in Verbindung stehen. Durch den schwammartigen Fels fließt heißes, basisches Quellwasser (rote Pfeile). Es schwemmt Stoffe aus dem Inneren der Erde herauf, die miteinander reagieren – darunter Ammoniak (1), Wasserstoff (2), Methan (3), Schwefelwasserstoff (4) und Phosphorverbindungen (5). Beim Zusammentreffen der beiden unterschiedlichen Flüssigkeiten (Ozeanwasser und Quellwasser) laufen chemische Reaktionen ab, bei denen Energie frei wird und neue Stoffe entstehen.



...die ersten Lebewesen entstehen

IX. Der Übergang zum freien Dasein

Vermutlich vor mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren trennen sich die Zellen von ihren Gesteinskammern – vielleicht, weil die Wände der unterseeischen Schlote einstürzen. Die Bakterien und Archaeen entweichen aus ihren steinernen Brutkästen und leben fortan in der Nähe der Schlote in Rissen und Spalten. Dort vermehren sie sich und besiedeln nach und nach ihre sterile Umwelt. 1,5 Milliarden Jahre später wird aus den Mikroben eine dritte Domäne des Lebens hervorgehen, die der Eukaryoten (Zellen mit Kern). Diese ersten Eukaryoten sind die Urahnen aller höheren Organismen: der Pflanzen, Pilze und Tiere.

VIII. Bakterien und Archaeen

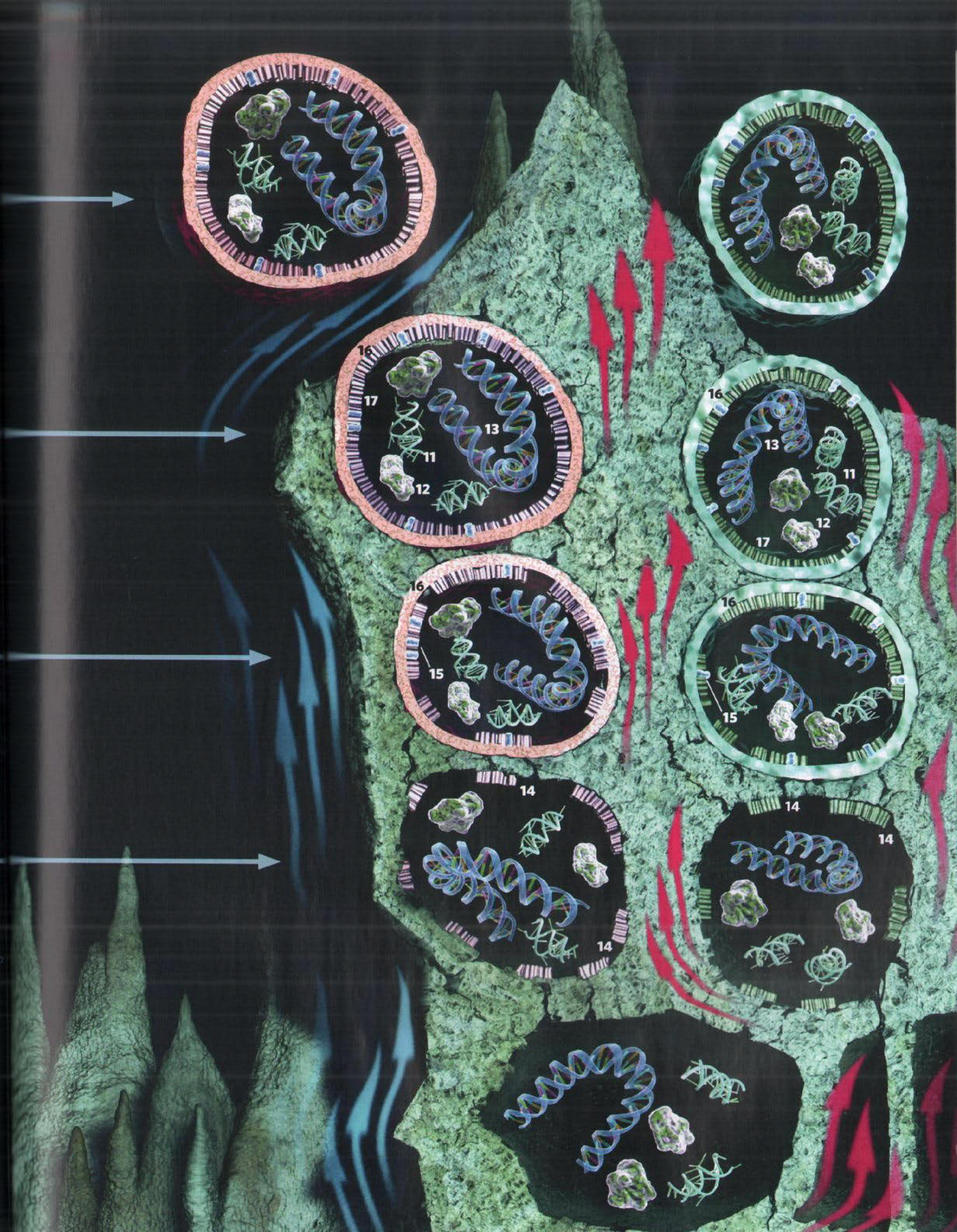
Die zwei unterschiedlichen Zellen verfügen nun über je zwei Schutzhüllen, die durchlässig sind für bestimmte Stoffe: eine fetthaltige Membran (17) sowie eine derbe, widerstandsfähige Zellwand (16). Die Zellen vermögen jetzt aus einfachen Stoffen zahlreiche komplexe Moleküle zu erzeugen, etwa RNS (11) und Eiweiße (12). Sämtliche Informationen über deren Aufbau speichern sie in ihrer Erbsubstanz, der DNS (13). All diese Merkmale machen die Gebilde zu den ersten echten Lebewesen. Sie begründen zwei Domänen im Stammbaum der Organismen: die der Archaeen (im Bild links) und die der Bakterien (rechts).

VII. Die Bildung einer Zellwand

Die wasserabweisenden Membranen kleiden die Innenseite der steinernen Bläschen immer weiter aus. In sie lagern sich spezielle Eiweiße (15) ein, die die energiereiche Spannung zwischen Außen- und Innenwelt nutzen können. Diese Spannung treibt wiederum chemische Prozesse voran. Zudem entwickelt jeder der beiden Bläschentypen eine zweite, noch robustere Schutzschicht – die Zellwand (16). Diese Wand verleiht den sich entwickelnden Zellen Form und Festigkeit. Wie die Membranen unterscheiden sich auch die Zellwände der beiden Lebensformen in ihrer chemischen Zusammensetzung.

VI. Die Trennung in zwei Typen

Die kleinen biochemischen Reaktoren stellen bald auch Lipide (14) her: wasserabweisende Moleküle, zu denen etwa Fette gehören. Diese Lipide lagern sich an der Innenseite der steinernen Kammern an. Allmählich wächst so eine organische Zellmembran heran, deren Bauplan ebenfalls auf der DNS gespeichert ist. Bereits in diesem Stadium formen sich zwei chemisch unterschiedliche Membranen (rote Schraffur in der linken Kammer, grüne in der rechten). Damit trennt sich das frühe Leben in zwei Typen auf – die Vorformen der späteren Archaeen (im Bild links) und der Bakterien (rechts).



Eine schier endlose Wasserfläche erstreckt sich bis zum Horizont. Kein Land, keine Küste durchbricht die Fluten, nur einige qualmende Vulkane erheben sich aus dem Ozean – aus einem gewaltigen Urmeer, das vor mehr als vier Milliarden Jahren die gesamte Welt umspannt.

Die Erde ist kein ruhiger, beschaulicher Ort. Immer wieder schlagen Asteroiden im Wasser ein, senden Schockwellen um den Globus. Die kosmischen Geschosse bringen das Meer zum Kochen, riesige Dampfwolken steigen auf.

In den Pausen zwischen den Kollisionen wüten Stürme, durchzucken Millionen Blitze die Atmosphäre. Enorme Gezeitenwellen rasen durchs Meer, hervorgerufen durch den Mond, der zu jener Zeit den Planeten eng umkreist und nachts riesenhaft am Himmel steht.

Er ist gut 500 Millionen Jahre zuvor durch die Kollision eines Himmelskörpers mit der Urerde entstanden – und zieht nun in einem Radius von nur 20 000 Kilometern seine Bahnen um sie herum. Erst im Laufe der nächsten Jahrtausende wird er sich allmählich immer weiter entfernen.

Die Luft enthält kaum Sauerstoff, ist angefüllt mit Kohlendioxid und giftigen Vulkangasen. Nur schwach leuchtet die Sonne hinter diesen Schwaden. Und doch bestrahlt sie die Erdoberfläche mit UV-Licht von tödlicher Intensität.

Nichts lebt auf diesem höllischen Planeten. Kein noch so kleiner Organismus bewegt sich durch den Ozean.

Die Erde: ein steriler Ort. Ein Himmelskörper aus unbelebter Chemie; bestimmt von Metallen, von Mineralen, von Salzen und Energie.

Und doch bahnt sich in jenen Zeiten bereits ein Prozess an, der den Planeten wie kein anderer verändern wird. Ein wundersamer, beinahe magischer Schritt, der einmalig ist in der Geschichte der Erde – ja vielleicht sogar einmalig in der Geschichte des gesamten Kosmos: Aus unbelebter Materie wird Leben entstehen. Es ist die Verwandlung von Chemie in Biologie.

Dieser Schritt ist weit größer als der vom Ein- zum Vielzeller, vom Urwurm zum Menschen. Denn das größte Wunder des Lebens ist: seine Entstehung.

DER SCHÖPFUNGSAKT vollzieht sich vermutlich in der Tiefe des Ozeans (manche Forscher halten auch andere Orte für denkbar, siehe Seite 46). Dort

und schließlich das erste Wesen formen: eine Urzelle. Ein primitiver Organismus noch, ein archaisches Bakterium, mikroskopisch klein, labil, verletzlich.

Aber dennoch: ein Lebewesen.

Ein Organismus also, der von seiner Außenwelt durch eine Hülle abgeschirmt ist, der dementsprechend einen Körper hat. Ein Wesen, das Energie nutzt, um biochemische Reaktionen in Gang zu setzen, das folglich Stoffwechsel betreibt. Und schließlich eine Kreatur, die ihren Bauplan in Form eines genetischen Codes im Inneren trägt und Kopien ihrer selbst herzustellen vermag, die sich also vermehren kann.

Und selbst diese einfachsten Zellen, die Grundeinheiten des Lebens, sind bereits Meisterwerke von ungeheurer Komplexität.

Sie sind so vielschichtig und ausgereift, dass kein noch so schneller Computer sämtliche Abläufe in ihrem

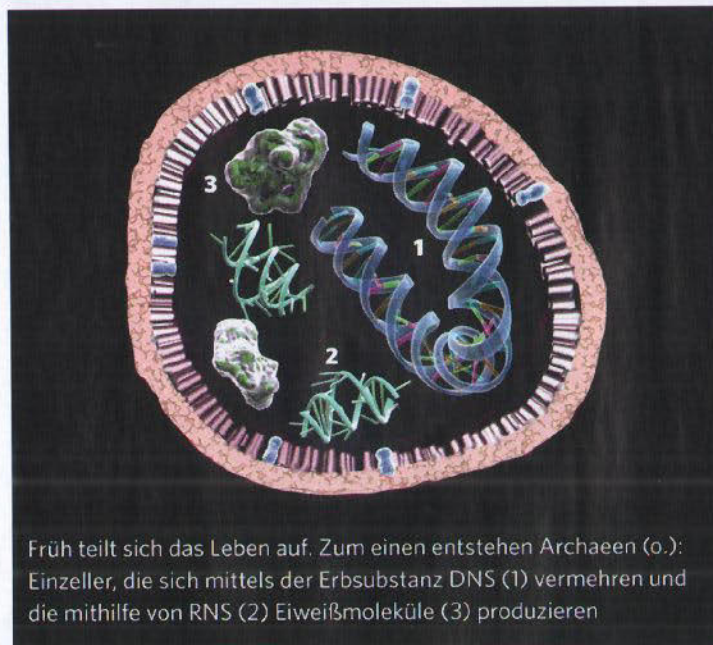
Inneren annähernd simulieren könnte: Eine einzelne Bakterienzelle besteht aus rund 26 Millionen Molekülen, darunter auch kompliziert aufgebaute Proteine, von denen einige sich aus mehr als 100 000 Atomen zusammensetzen.

Ständig greifen Abertausende dieser Stoffe ineinander wie die Räder einer perfekt aufeinander abgestimmten Maschinerie, die Sekunde für Sekunde mehr als 200 000 neue Moleküle produziert, um zu wachsen und sich zu vermehren.

Wo konnten sich unter den höllischen Bedingungen, wie sie vor gut vier Milliarden Jahren auf der

noch unfertigen Erde herrschten, derart filigrane Moleküle bilden? Derart ausgefeilte, geradezu intelligent anmutende Strukturen?

Zu jener Zeit gibt es auf dem infernalischen Planeten vermutlich nur einen



Früh teilt sich das Leben auf. Zum einen entstehen Archaeen (o.): Einzeller, die sich mittels der Erbsubstanz DNS (1) vermehren und die mithilfe von RNS (2) Eiweißmoleküle (3) produzieren

unten, an den Wänden heißer Schlote am Meeresgrund, wird der Funke des Seins zünden. Wie von Geisterhand werden sich Atome zusammenschließen und Ketten bilden, Moleküle werden beginnen zusammenzuarbeiten

Ort, der zumindest notdürftigen Schutz vor den zerstörerischen Naturgewalten bietet: den Meeresboden.

Zehn Kilometer tief ist der archaische Ozean. Die enorme Wasserschicht wirkt wie ein Schutzschild. Sie blockiert die UV-Strahlung, dämpft die Schockwellen der Asteroideneinschläge.

IN DIESER finsternen Welt, fernab vom Tageslicht, sprudelt an manchen Orten heißes Wasser aus dem Ozeanboden. Einige dieser hydrothermalen Quellen liegen direkt über geschmolzenem Gestein. Meerwasser sickert herab zu den brodelnden Magmakammern, erhitzt sich stark, steigt wieder auf.

Ätzend und an die 400 Grad Celsius heiß ist das Tiefenwasser, wenn es unter hohem Druck aus dem Boden schießt. Bei dieser Temperatur würden jene empfindlichen Moleküle, die zur Entstehung des Lebens nötig sind, erst gar nicht entstehen oder auseinanderbrechen.

Doch abseits dieser kochend heißen Fontänen, etwas weiter entfernt von den vulkanisch aktiven Zonen, liegen ruhigere Quellen. Hier kann Meerwasser durch Risse ins Erdinnere strömen, bis zu acht Kilometer tief in den Grund.

Dort reagiert es mit dem Gestein, löst Minerale und erwärmt sich. Doch wenn es aus der Tiefe emporquillt, ist es lediglich 40 bis 90 Grad warm – und alkalisch wie eine starke Seifenlauge.

Eine schmierige Flüssigkeit, die völlig anders beschaffen ist als der Ozean ringsum. Denn da die Atmosphäre voller Kohlendioxid ist, lösen sich große Mengen des Gases als Kohlensäure im Meer – und verwandeln den Urozean in eine schwach saure Brühe.

Dort aber, wo diese beiden so ungleichen Lösungen aufeinandertreffen,

kommt es zu chemischen Reaktionen. Als Folge davon rieseln Minerale auf den Meeresboden und formen Ablagerungen.

Und so wachsen im Laufe von Jahrtausenden meterhohe Schlote empor,

kammern des Lebens, die Vorläufer heutiger Zellen.

Anfangs enthalten sie zwar nur warmes Quellwasser, angereichert mit Stoffen, die bei Reaktionen in der Tiefe entstanden sind. Doch schon jetzt

Schon früh entwickeln sich vier unterschiedliche Lebensformen

die durchzogen sind von einem Netz aus Poren und Kanälen.

Außen sind diese unterseeischen Kamine von einem Schaum aus Eisensulfid bedeckt: Dieses Mineral entsteht, wenn im Meerwasser gelöstes Eisen mit Schwefel aus der Tiefe reagiert. Unter dem Druck der heißen Lauge wird es

besitzen sie eines der wichtigsten Merkmale des Lebens: eine Umhüllung.

Sie bilden also kleine, in sich geschlossene Räume, die durch eine Art Haut aus Eisensulfid von der Außenwelt getrennt sind. Diese mineralische Hülle ist fest genug, um die im Bläschen enthaltenen Moleküle vom Chaos des Ozeans abzuschirmen. Und zugleich ausreichend durchlässig, um bestimmte Stoffe von außen einströmen zu lassen.

Im Inneren der kleinen Kämmerchen kann sich also ein völlig eigenes chemisches Milieu entwickeln.

Umspült werden die Bläschen von einer Substanz, auf der alles künftige Leben aufbauen wird: Kohlenstoff, enthalten im Kohlendioxid, das im Ozean gelöst ist.

Kein anderes Element eignet sich so gut dafür, Moleküle in allen nur denkbaren Formen zu bilden. Denn Kohlenstoff ist chemisch überaus bindungs-

freudig: Beliebig viele seiner Atome können sich aneinanderreihen und so Ringe, Gitter oder lange Ketten formen.

An diese Gerüste können wiederum andere Elemente andocken, darunter Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff oder



Gleichzeitig mit den Archaeen bilden sich die Bakterien. Sie unterscheiden sich von den Archaeen vor allem in der chemischen Struktur ihrer Zellwand (1) und ihrer Membran (2)

zu winzigen Bläschen aufgeworfen, die zum Teil nur wenige Tausendstelmillimeter groß sind.

Diese Bläschen sind nichts weiter als leblose Hohlräume. Und doch werden aus ihnen möglicherweise die Brut-

Schwefel. Bis zu vier weitere Atome zugleich vermag jedes Kohlenstoffatom an sich zu binden.

Nach dem Baukastenprinzip können so Hunderte unterschiedlicher Stoffe entstehen.

Den Vorläufern der Urzellen kommt zudem ein chemisches Ungleichgewicht zugute, das sie an noch mehr Energie gelangen lässt: Die Bläschen werden außen vom Meerwasser umflossen, das zu dieser Zeit eine Säure ist. In-

Moleküle wie etwa Formaldehyd (eine Substanz aus nur vier Atomen). Doch nach einiger Zeit bilden sich komplexere Substanzen, in denen neben Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff auch andere Elemente eingebunden werden.

Das Baumaterial gibt es in den Bläschen. Denn in der Tiefe hat sich das Quellwasser mit unterschiedlichen Stoffen angereichert; so ist darin zum Beispiel Ammoniak gelöst, ein stechend riechendes Gas, das Stickstoff enthält.

Mit den Zellen entstehen die ersten Schmarotzer: die Viren

In diesen Prozessen entstehen zwar nur „tote“ Verbindungen, doch manche der molekularen Gebilde gleichen bereits mikroskopisch kleinen Maschinen: Sie vermögen beispielsweise andere Moleküle zu transportieren, Atombindungen aufzubrechen oder so miteinander zu verschmelzen, dass neue Mikromaschinen mit anderen Eigenschaften entstehen.

Und was auch immer diese winzigen Automaten tun – ihnen allen liegt ein Gerüst von Kohlenstoffatomen zugrunde.

DAMIT SICH aber überhaupt solche Moleküle bilden können, ist Energie nötig, die dem im Kohlendioxid gebundenen Kohlenstoff erst verfügbar macht.

Diese Kraft entströmt der Erde: Das aus der Tiefe emporsteigende Quellwasser, das die Bläschen durchfließt, enthält Wasserstoff. Der kann sich mit dem im Kohlendioxid enthaltenen Kohlenstoff verbinden.

Zwar läuft diese Reaktion in der Regel sehr langsam ab. Doch die Eisensulfidhülle der Bläschen dient als chemischer Beschleuniger, der die Verbindung der zwei Stoffe fördert: Die ersten Kohlenwasserstoffe entstehen.

nen sind sie dagegen mit einer Lauge gefüllt. Zwischen diesen beiden Lösungen aber besteht ein elektrisches Gefälle: Geladene Teilchen in der Säure strömen zur Lauge hin – ähnlich wie Wasser, das einen Hang hinunterfließt. Und so wandern die winzigen Ladungsträger aus dem Meerwasser durch die

JEDE DER winzigen Kammern ähnelt also einem Labor: In ihm vermischen sich, angetrieben von der Energie des Wasserstoffs sowie vom Ladungsunterschied innerhalb und außerhalb der Zelle, mehrere Chemikalien miteinander.

Zahllose solcher Labore reihen sich in der Schlotwand aneinander. Und in allen ist die Mixtur unterschiedlich, in jedem herrschen andere Bedingungen.

Denn abhängig von der Entfernung zur Quelle ist die Lauge wärmer oder kühler, und von Kammer zu Kammer schwanken zudem die Konzentrationen der verschiedenen Moleküle.

Das Labyrinth aus Hohlräumen gleicht einem Laborkomplex, in dem etliche Versuche parallel ablaufen. Einem Experimentierfeld der Natur, auf dem immer neue Reaktionen erprobt werden.

Einige kommen schnell zum Erliegen oder erweisen sich als Sackgassen: In manchen Kammern etwa entsteht nichts als eine teerartige Substanz, welche die Hohlräume verstopft.

In anderen Reaktoren dagegen reifen immer komplexere chemische Prozesse heran: Denn jene Substanzen, die bei ersten, noch einfachen Reaktionen entstanden sind, dienen als Ausgangsstoffe für weitere Reaktionen. So bildet sich



1,5 Milliarden Jahre nach der Geburt des Lebens vereinigen sich Teile der Bakterien und Archaeen zu ersten Eukaryoten: Diese weit aus größeren Einzeller lagern ihr Erbgut (1) nun in einem Kern (2)

steinerne Hülle ins Innere der Kammern. Dieser Teilchenstrom kann helfen, chemische Reaktionen anzutreiben.

Zwar produziert die Verbindung von Wasserstoff und im Wasser gelöstem Kohlendioxid zunächst nur recht simple

nach und nach eine Kette chemischer Prozesse, die immer neue Zwischenprodukte hervorbringt.

In den Bläschen setzen sich dabei jene Reaktionen durch, die am meisten Wasserstoff verwerten, also besonders viel Energie nutzbar machen.

Entsteht ein Kraftüberschuss, kann er die Zwischenprodukte dazu anregen, mit mehreren verschiedenen Stoffen zu reagieren – und dabei auch solche Verbindungen einzugehen, die ohne den zusätzlichen Energieschub nicht möglich wären. So kommen Seitenreaktionen in Gang, die von der Hauptreaktion abzweigen und die Molekültiefe weiter erhöhen.

In einigen der Bläschen etablieren sich schließlich sogar stabile chemische Kreisläufe, die immer wieder aufs Neue beginnen: Kleinen Fabriken gleich, produzieren sie einen stetigen Strom molekularer Verbindungen. Diese Moleküle sammeln sich in den Hohlräumen und konzentrieren sich dort immer weiter.

Schwappt ein Teil dieser Molekülsuppe nun auf andere Bläschen über, können sie dort die gleichen Reaktionen anstoßen: So vermag sich ein erfolgreicher chemischer Kreislauf über seine Nachbarschaft auf zahlreiche weitere Kammern auszudehnen.

Zwischen den leblosen Bläschen ist damit eine Art Wettstreit entbrannt – eine chemische Evolution, bei der sich jene Reaktionen durchsetzen, die besonders stabil sind und besonders viel Energie erzeugen.

Nach und nach reifen in diesem Prozess immer komplexere Moleküle heran. Zu den ersten größeren Atomkonstrukten, die durch die Bläschen treiben, zählen Aminosäuren – jene chemischen Grundbausteine des Lebens, die auch heute noch millionen-

fach in jeder Zelle vorkommen. Denn mehrere Aminosäuren können sich zu Ketten zusammenschließen, ähnlich wie Perlen auf einer Schnur. Auf diese Weise entstehen Proteine (Eiweiße).

Ganz allmählich bilden sich so in den Bläschen immer längere Schnüre aus Aminosäuren, die sich zudem verknäueln (siehe Seite 38).

So formen sich die ersten Eiweiße – Substanzen, die später in sämtlichen Zellen des Lebens wichtige Aufgaben übernehmen werden: Manche Eiweiße etwa stabilisieren die Form einer Zelle, andere fördern Reaktionen zwischen zwei Stoffen, wieder andere verankern sich in der Zellmembran.

Und noch eine weitere Klasse lebenswichtiger Stoffe entsteht bereits früh: die Nukleotide, die Grundbausteine der späteren Erbmoleküle. Insgesamt bilden sich fünf verschiedene Arten von Nukleotiden, die jeweils aus einem

Anfangs schweben diese Stoffe nur vereinzelt in der Lauge. Doch Temperaturunterschiede in den Schloten führen dazu, dass sich immer mehr von ihnen auf engem Raum zusammenballen.

Denn in den Poren sind die der heißen Quelle zugewandten Wände wärmer, die auf der Ozeanseite dagegen kühler. So beginnt das Wasser durch die miteinander verbundenen Hohlräume zu zirkulieren. Teils von der Strömung mitgerissen, teils von der Wärmeenergie angetrieben, konzentrieren sich die Nukleotide millionenfach am Grund des Porensystems.

Derart dicht zusammengedrängt, können sich die Nukleotide (ähnlich wie bereits die Aminosäuren) zu längeren Ketten verbinden: zu Ribonukleinsäuren, kurz RNS.

Jedes RNS-Molekül sieht aus wie ein winziger Faden, der sich zu einer ganz bestimmten Form zusammenknäueln,

je nachdem, in welcher Reihenfolge sich die unterschiedlichen Nukleotide zusammenschließen.

Möglicherweise übernehmen die RNS-Moleküle in den Kammern zunächst nur die Funktion als Energievermittler und -speicher: indem sie Energie aufnehmen und bei Bedarf in eine andere Reaktion speisen, sie also wieder abgeben.

Vielleicht beschleunigen die RNS-Moleküle auch die Verkettung von Aminosäuren, die sich dann dank der RNS weitaus rascher zu Eiweißen verknüpfen lassen. In modernen Zellen bestimmt die jeweilige Ab-

folge von RNS-Molekülen, in welcher Reihenfolge sich welche Aminosäuren zusammenfügen. Sie legen also den Aufbau jedes Eiweißmoleküls fest.

Wie es in den Urzellen zu diesem Schritt kam, ist nicht bekannt. Forscher



Zugleich mit Archaeen und Bakterien entwickeln sich die Viren: winzige Partikel, die nur aus einer Eiweißhülle (1) und der Erbsubstanz (2) bestehen. Um sich fortzupflanzen, dringen sie in Zellen ein

bestimmten Zuckermolekül, einer energiereichen Phosphatverbindung sowie einer von fünf variierenden sogenannten Nukleinsäurebasen (Adenin, Guanin, Thymin, Cytosin, Uracil) zusammengesetzt sind.

Die Suche nach dem Ursprung

Wo entstand einst das Leben? Forscher halten neben der Tiefsee noch weitere Orte für denkbar

Zwar stimmen viele Wissenschaftler heute weitgehend darin überein, wie das Leben einst entstanden ist, welche grundlegenden Faktoren also nötig waren, damit Zellen überhaupt reifen konnten (etwa Energie, eine Membran als Schutz vor der Außenwelt und die Fähigkeit, ihren Bauplan in einem Molekül zu speichern). Doch wo sich die erste Zelle bildete, ist immer noch umstritten. Die bei Weitem plausibelste Theorie geht davon aus, dass das Leben einst im Gestein heißer Tiefseequellen herangereift ist. Manche Forscher halten vier weitere Orte für denkbar.

I. Das All. Nach dieser Theorie sind die ersten Organismen nicht auf der Erde, sondern im Kosmos entstanden: auf Planeten wie dem Mars oder auf Kometen, die hauptsächlich aus gefrorenem Wasser bestehen. Das Eis solcher Himmelskörper würde labile Zellen vor tödlicher kosmischer Strahlung schützen. So könnten frühe Lebensformen durch Zufall auf die Erde gelangt sein – und sich dort weiterentwickelt haben.

Der schwedische Chemiker Svante Arrhenius hat diese Theorie bereits 1906 in ihren Grundzügen aufgestellt. Und noch heute halten Evolutionsbiologen sie für denkbar. Denn immer wieder stoßen sie auf mögliche Lebensspuren aus dem All: In den 1970er Jahren fanden Astronomen Hinweise für solche Spuren auf kosmischen Staubpartikeln; und 1996 entdeckten NASA-Forscher auf einem Meteoriten mikroskopisch kleine Steinstrukturen, die von fossilen Einzellern stammen sollen.

II. Der Ozean. Um nachzuweisen, dass die ersten Zellen einst im offenen Meer entstanden, versuchte der US-Chemiker Stanley Lloyd Miller 1953, Leben im Labor zu erzeugen. Der 23-Jährige vermutete, dass die Ur-Atmosphäre vor allem aus Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Wasser bestand, und mischte alles in einem Glaskolben zusammen. Dieses Gebräu erhitze er, bis die entstehende Gasgemisch in einen zweiten Kolben strömte. Um dort uralte Blitze zu simulieren, steckte er zwei

Elektroden in das Gefäß und setzte sie unter Spannung, sodass zwischen ihnen Funken zündeten. Die elektrische Energie regte die Chemikalien tagelang zu Reaktionen an. Und tatsächlich: In der braunen Brühe, die entstand, wies Miller einfache organische Verbindungen nach.

Das Experiment war eine Sensation, Miller wurde weltbekannt. Doch heute



In einem gasgefüllten Glaskolben erzeugte der US-Chemiker Stanley Miller organische Stoffe wie Aminosäuren

zweifeln viele Wissenschaftler an der Beweiskraft des Versuchs: Zum einen ist mittlerweile erwiesen, dass im Urozean vor allem Kohlendioxid gelöst war – ein Gas, das Miller in seinem Laboraufbau nicht berücksichtigte. Zum anderen entstanden bei dem Ursuppen-Experiment nur einzelne Bausteine, etwa Aminosäuren, die sich jedoch nicht zu Eiweißmolekülen zusammenfügten. Eiweiße aber gehören zu den Grundbausteinen aller lebenden Zellen.

III. Das Meereis. Seit mehr als zehn Jahren erforscht der Hamburger Physiker Hauke Trinks das Eis der Arktis. Er geht davon aus, dass schon die Pole der Urerde sehr kalt waren – so kühl, dass Meerwasser

gefroren und dann als Geburtsstätte des Lebens diente. Denn die Kälte macht organische Moleküle stabiler, sodass sie auch komplizierte Veränderungen ihrer Struktur verkraften können. Zudem ist Meereis ein hochkomplexes, von mikroskopisch kleinen Poren und Kanälen durchsetztes Medium, das sich aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen zusammensetzt: Bläschen, gefüllt mit Kohlendioxid sowie gefrorenem Süßwasser und hochkonzentrierter Salzlösung, drängen sich auf winzigem Raum.

An der Grenze von Eis und Salzwasser entsteht eine elektrochemische Spannung. Unter anderem diese Energie könnte Moleküle zu Reaktionen antreiben: Trinks vermutet, dass sich so Aminosäuren bilden und sogar Eiweiße. Noch immer unternimmt der 67-Jährige regelmäßig Expeditionen nach Spitzbergen, um seine Theorie zu untermauern.

IV. Tonminerale. Ton entsteht durch Verwitterung von Gestein. Poröse Tonminerale liegen in hauchdünnen Kristallschichten übereinander. An diese Schichten könnten sich einst, so mutmaßt der britische Chemiker Graham Cairns-Smith, organische Moleküle angelagert haben (darunter sogar Vorformen von Erbmolekülen).

Ähnlich wie die Bläschen im Gestein der Tiefseeschlote waren die winzigen Poren im Ton möglicherweise Brutkammern des Lebens: Dieser Theorie nach stabilisierte die Oberfläche der Poren die empfindlichen Biomoleküle und schützte die organischen Substanzen vor zerstörerischer UV-Strahlung. Die Tonminerale beschleunigten zudem die Verkettung einfacher Moleküle zu komplexeren Stoffen, und die Kammern gaben diesen Substanzen bereits ihre Form vor. Im Laufe der Zeit hat sich das primitive Leben irgendwann von seinem tönernen Schutzraum gelöst.

Mittlerweile vermuten Forscher, dass auch andere Minerale als frühe Molekülfabriken gedient haben könnten: Feldspat und Zeolith, die sich unter anderem in Vulkangesteinen finden.

Johannes Schneider

spekulieren, dass möglicherweise aufgrund der Form oder der elektrischen Ladung einzelne RNS-Moleküle mit ausgewählten Aminosäuren in Wechselwirkung getreten sind und so eine grobe Selektion startete.

Fest steht: Irgendwann in jener Vorzeit des Lebens muss es in einigen Kammern zu einem weiteren Schritt gekommen sein, der die Chemie an die Schwelle zur Biologie stellt: Eiweiße und RNS beginnen sich gegenseitig zu unterstützen – RNS-Moleküle beschleunigen nun die Bildung solcher Eiweiße, die ihrerseits der RNS dabei helfen, sich zu verdoppeln.

Der Aufbau und die Form dieser RNS-Moleküle bestimmen also nicht nur, welche *Eiweiße* gebildet werden. Die Moleküle können sich zudem mit ebendieser Information *selbst* vermehren. Sie besitzen gewissermaßen einen Bauplan ihrer selbst. So bilden sich in den Bläschen die ersten Erbmoleküle: Datenträger, die chemische Prozesse beeinflussen und zugleich sich selbst zu vervielfältigen vermögen.

Ein primitiver genetischer Code ist geboren. Eine komplexe Abfolge von molekularen Bausteinen (den Nukleotiden), die sich verdoppeln und damit weitergegeben werden können.

Das ist ein entscheidendes Kriterium dafür, dass ein Gebilde als lebendig bezeichnet wird.

DIE RNS-MOLEKÜLE haben jedoch als Datenträger einen Nachteil: Sie sind nicht besonders stabil. Immer wieder zerfallen sie, brechen auseinander, verlieren ihre Form und ihre Funktion.

Niemand weiß, wie viele Jahrtausende oder Jahrmillionen es dauert. Doch irgendwann werden die RNS-Moleküle von einem neuen, weitaus stabileren Erbmolekül abgelöst, das bis heute die Prozesse in einer jeden Zelle steuert.

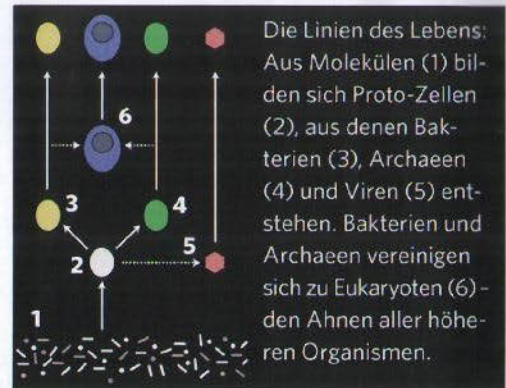
Es besteht aus zwei Nukleotid-Fäden, die sich in einer doppelten Spirale umeinander winden: der DNS (Desoxyribonukleinsäure).

Damit ist aus der Molekülsuppe nach der Definition von Biologen schon fast ein Organismus geworden, eine Proto-Zelle. Denn: Sie wird von einer Hülle umgeben. Sie betreibt Stoffwechsel. Und sie kann bereits Nachkommen zeugen, indem sie Kopien ihres genetischen Codes an Nachbarkammern weitergibt.

Zudem vermag sich die Proto-Zelle durch Veränderungen der DNS weiterzuentwickeln. Denn je nachdem, in welcher Reihenfolge sich die Nukleotide im Erbmolekül zusammenfügen, werden unterschiedliche Eiweiße produziert und so mitunter neue chemische Reaktionsketten vorangetrieben.

Eines allerdings können diese Vorläufer des Lebens noch nicht: sich fortbewegen. Sie sind gefangen in einer mineralischen Hülle. Noch bestehen sie nur zur einen Hälfte aus Leben, also aus Erbsubstanz und Biomolekülen – und zur anderen aus totem Material, das sie wie eine Haut umhüllt.

Diese seltsamen Zwitter sind vorerst noch angewiesen auf das Mineral, das ihnen Form verleiht: Sie brauchen die steinerne Hülle, um ihre Lebensprozesse anzutreiben.



sie winzige Flecken auf der steinernen Schale, doch nach und nach verschmelzen die Flecken miteinander, sodass sie die Bläschen schließlich vollständig auskleiden. Aus der öligen Schicht entwickelt sich also mit der Zeit eine organische Zellmembran (siehe Seite 40), deren Bauplan ebenfalls auf dem Erbmolekül eingeschrieben ist.

Und schließlich beginnen manche der archaischen Zellen, das lebenswichtige Ungleichgewicht zwischen dem sauren Meerwasser und der aus der Tiefe emporquellenden Lauge selbst herzustellen. Wahrscheinlich gelingt dies zunächst in solchen Kammern, die weiter entfernt von der heißen Quelle liegen: Dort ist die Lauge bereits ver-

Noch heute existieren die Urtypen aus der Frühzeit der Evolution

Mitunter aber brechen die porösen Wände der unterseeischen Kamme zusammen. Dann entweicht der Lebenssaft aus den Bläschen und verflüchtigt sich im Meer.

Doch in jenen Tiefseeschloten, die intakt bleiben, stellen die biochemischen Reaktoren bald auch andere Verbindungen her: wasserabweisende Moleküle (Lipide), zu denen unter anderem die Fette gehören. Diese Lipide lagern sich zunächst an der Innenseite des mineralischen Panzers an. Anfangs bilden

dünnt, der Unterschied zur umgebenden Säure nicht mehr so groß.

In dieser Zone, so vermuten Wissenschaftler, entstehen zufällig Eiweißmoleküle, die durch eine sich immer wiederholende Formänderung – wie eine Pumpe – geladene Teilchen durch die Hülle in die Zelle schleusen.

Auf diese Weise baut sie sich die energiereiche Spannung zwischen Außen- und Innenwelt selbst auf, mit der weitere chemische Prozesse vorangetrieben werden können.

Nun sind die Urzellen so weit gereift, dass ein Zusammenbruch der Tiefseeschlote keinem unweigerlichen Todesstoß mehr gleichkommt – sondern vielmehr: einer Befreiung. Denn jetzt können die ersten fertigen Zellen aus ihrem Brutkasten entweichen.

Damit sind frei lebende, nicht mehr in einem Fels gefangene Organismen entstanden. Ausgestattet mit einer eigenen Membran und unabhängig von der heißen Quelle, können sie ihr mineralisches Heim hinter sich lassen. Das Leben hat einen ersten Vorstoß in die

Memo: **DIE GEBURT DES LEBENS**

► **Vor rund vier Milliarden** Jahren fügen sich, womöglich in den Wänden unterseeischer Schlote, Substanzen zu Biomolekülen zusammen.

► **Diese Moleküle** formen lebendige Gebilde, die sich vervielfältigen und mit Membranen schützen – die ersten Zellen.

► **Schon bald trennen** sie sich in zwei Domänen auf: Bakterien und Archaeen.

► **Daneben entwickeln** sich die Viren.

► **Schließlich entsteht** eine weitere Domäne: die der Eukaryoten. Zu ihnen gehören alle Pflanzen, Pilze und Tiere.

Weiten des Ozeans unternommen – und begonnen, seine Umwelt zu besiedeln.

Anfangs treiben diese ersten Urwesen, die primitiver aufgebaut sind als die einfachsten Bakterien, ziellos in der Tiefsee. Einige werden mit Wasserströmungen kilometerweit nach oben gerissen, andere gelangen in den offenen Ozean.

Doch draußen sind sie umgeben von einer lebensfeindlichen Welt: Denn noch immer wirbeln Asteroiden das Meer auf; zudem enthält das offene Wasser kaum freien Wasserstoff, die Energiequelle der ersten fragilen Organismen.

Und so überleben zunächst wohl nur jene Zellen, die über Risse und Spalten kilometertief in die Erdkruste verdriftet werden. Hier leben sie im Dunkeln, nutzen Wasserstoff, der aus der Tiefe emporströmt zur Energiegewinnung.

Doch diese ersten Lebewesen werden nicht für immer dort in der Finsternis verharren. Denn bereits in der Frühzeit der Erde, vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren, entstehen durch zufällige Mutationen von Generation zu Generation neue Varianten, die ein Überleben in der rauen Umwelt gewährleisten.

So bauen die fragilen Geschöpfe mit der Zeit etwa stabilere Zellwände auf, bringen weitere biochemische Kreisläufe hervor und vermögen schließlich, den Naturgewalten des offenen Ozeans immer besser zu trotzen. Einige von ihnen werden Jahrtausende später sogar lernen, eine außerirdische Energiequelle für sich zu nutzen: die Sonne.

SCHON ZUVOR hat sich das Leben – noch geschützt im Kamin einer Quelle – in zwei große Domänen aufgetrennt. Aus jenen zellähnlichen Wesen, die in den kühleren Zonen der Schlote gelebt haben, bilden sich die heutigen Bakterien. Andere Organismen entstehen dagegen aus Proto-Zellen, die in heißen Gefilden gereift sind. Sie begründen den Stammbaum der Archaeen.

Die zwei Domänen der Bakterien und der Archaeen sind die ältesten auf der Erde. Noch heute sind ihre Nachfahren recht simpel aufgebaut: Die Zellen sind nicht durch weitere Membranen unterteilt – die zum Betrieb der Zelle so wichtigen Großmoleküle liegen frei im Inneren. Nicht einmal das Erbgut ist von einer schützenden Membran umhüllt.

Zur gleichen Zeit wie Bakterien und Archaeen entwickeln sich die Viren (siehe Seite 50) – winzige Parasiten, die lediglich aus Erbsubstanz und einer Eiweißhülle bestehen. Viren infizieren damals schon Zellen und vermehren sich in deren Innerem.

Erst 1,5 Milliarden Jahre später wird noch eine weitere Domäne entstehen: die der Eukaryoten – der Lebewesen mit weit komplexeren Zellen (siehe Seite 68). Sie werden die Vorfahren all jener Organismen sein, die auch vielzellige Formen hervorbringen: Pflanzen, Pilze, Tiere.

Und doch sind es bis heute urtümliche Einzeller, die weite Teile der Erde beherrschen. Denn trotz ihres einfachen Aufbaus haben Bakterien und Archaeen eine verblüffende Vielzahl von Überlebensstrategien erlernt – und können daher an unterschiedlichsten Orten gedeihen.

Einige leben tief in der Erdkruste, im eiskalten Wasser der Antarktis oder in Salzseen. Manche Archaeen siedeln – genau wie ihre Urahnen vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren – an heißen unterseeischen Schloten und produzieren dort Methan. Wieder andere erzeugen dieses Gas in einer ganz anderen Umgebung: dem menschlichen Darm. Dort helfen uns die archaischen Einzeller wahrscheinlich bei der Verdauung.

Doch ganz gleich, ob sie in Eingeweiden leben oder in den Tiefen der Weltmeere: Viele dieser Organismen tragen in sich noch immer das Erbe jener Zeit, als ihre Urahnen in unterseeischen Schloten gefangen waren. Denn eingebettet in einige ihrer Eiweiße ist eine merkwürdige Abfolge von Atomen, die so gar nicht in die Welt der Biomoleküle zu passen scheint.

Dieser vermeintliche Fremdkörper ist ein Würfel aus Eisen- und Schwefelatomen: Diese Elemente sind fast genauso angeordnet, wie sie in den mineralischen Membranen der Ur-Bläschen vorkamen. In den Einzellern verbirgt sich also noch immer ein Molekül, das jenen gleicht, aus denen die Wände der Tiefseeschlote bestehen.

Und da aus Bakterien letztlich auch die höheren Zellen entstanden sind, also die Bausteine sämtlicher Pflanzen, Pilze und Tiere, tragen auch diese Organismen ein vier Milliarden Jahre altes Andenken an die Anfangszeit des Lebens in sich. Und wir Menschen auch. □

Martin Paetsch, 38, ist Wissenschaftsjournalist in Hongkong. Mitarbeit: **Susanne Gilges**, Wissenschaftliche Beratung: Dr. William Martin, Institut für Botanik III, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Literaturtipps: Horst Rauchfuß: „Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens“, Springer. Detailreiche und verständliche Zusammenfassung der aktuellen Forschung.



Jetzt im Handel

Wo Ihnen zu jedem Essen eine herrliche Landschaft serviert wird: **Südtirol.**

In dieser Ausgabe

Unterkünfte

Für jeden Geschmack das passende Bett.

Küche

Ein Blick in den Kochtopf Südtirols.

Gletscherklettern

Mit der ganzen Familie hoch hinaus.

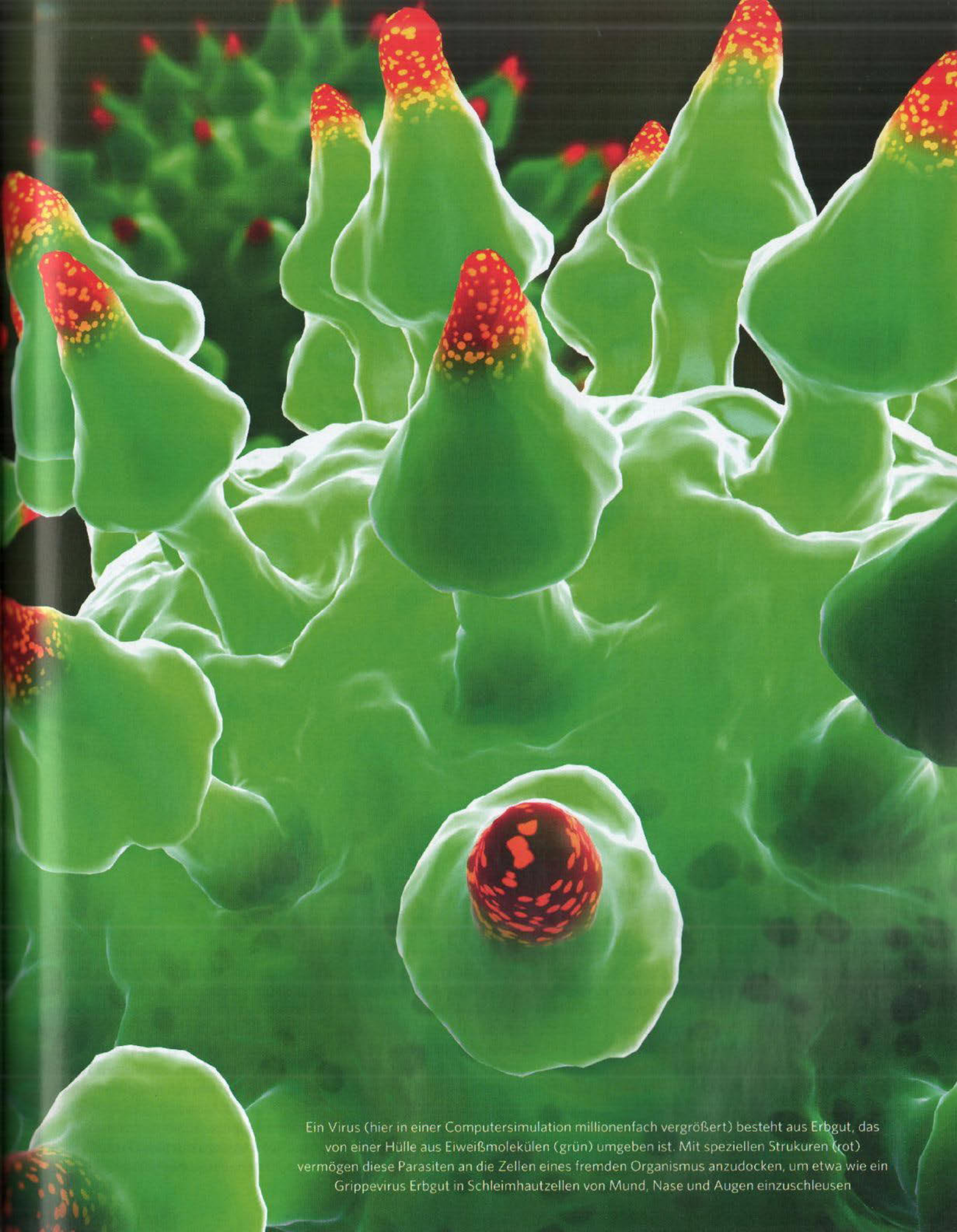




Viren

Die leblosen Lebewesen

Kein anderes Wesen hat das Grundprinzip des Lebens – sich zu vermehren – so radikal verwirklicht wie die Viren. Die winzigen Partikel haben keinen Stoffwechsel, sie bewegen sich nicht, sie fressen nicht. Ihr einziges Ziel ist es, Nachkommen hervorzubringen. Dafür allerdings benötigen sie die Hilfe anderer Organismen – und töten sie oft dabei



Ein Virus (hier in einer Computersimulation millionenfach vergrößert) besteht aus Erbgut, das von einer Hülle aus Eiweißmolekülen (grün) umgeben ist. Mit speziellen Strukturen (rot) vermögen diese Parasiten an die Zellen eines fremden Organismus anzudocken, um etwa wie ein Grippevirus Erbgut in Schleimhautzellen von Mund, Nase und Augen einzuschleusen

W

enn man den Erfolg eines Lebewesens danach bemisst, wie viele Exemplare davon existieren, dann gibt es einen ebenso überraschenden wie eindeutigen Sieger: Es sind die Viren. Von keinem anderen Wesen ist eine derart große Anzahl vorhanden.

Viren sind zehnfach häufiger als Bakterien, und die Menge ihrer Partikel allein in den Ozeanen wird auf 10^{31} geschätzt. Das ist eine Eins mit 31 Nullen – eine Größenordnung, die sich kein Mensch vorstellen kann. Wäre ein Viruspartikel so groß wie ein Sandkorn, dann würden alle Viren die komplette Erdoberfläche mit einer rund 15 Kilometer dicken Sandschicht bedecken.

Dass die Einzeller dennoch nicht auffallen, liegt an ihrer ebenso verblüffenden Winzigkeit. Schon eine normale

Ein Grippevirus etwa misst 0,12 tausendstel Millimeter und ist damit guter Virendurchschnitt.

Ein Lichtmikroskop kann Objekte dieser Größenordnung nicht sichtbar machen. Erst nach der Erfindung des Elektronenmikroskops im Jahr 1932 wurden Abbildungen der Winzlinge möglich.

Sie zeigen Objekte wie von einem anderen Stern: etwa Kugeln mit kleinen Noppen; oder Kapseln in der Gestalt eines perfekten Polyeders mit 20 dreieckigen Oberflächen; oder lange Zylinder; oder Gebilde, die aussehen wie eine „Apollo“-Landefähre mit Kapsel, Rumpf und Beinen.

Bei all diesen Objekten handelt es sich allerdings nur um die äußere Hülle des Virus, um die Verpackung. Darin schlummert das gefährliche Geheimnis der Winzlinge, eine Art trojanisches Pferd: Es ist ein winziges Stück Erbsubstanz.

Gelingt es dem Virus, sich an die Zelle eines anderen Organismus anzulagern und die eigene Erbsubstanz in die Zelle einzuschleusen, reißt diese die Herrschaft über die Zelle an sich.

Wie ein Computerprogramm, das plötzlich die Kontrolle über die Hard-

tisches Programm, das zumeist nur einen Daseinszweck kennt: sich selbst zu vermehren.

Wohl kein anderes Wesen hat das Grundprinzip des Lebens – nämlich: sich zu reproduzieren – derart radikal verwirklicht.

Und da Viren dabei die Hilfe eines Wirtes (die Zelle eines fremden Organismus) in Anspruch nehmen, ohne dafür eine Gegenleistung zu erbringen, sind sie Parasiten.

Die ältesten der Erde.

IHRE ENTWICKLUNG begann vermutlich schon vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren in der Morgenstunde des Lebens – in einer Zeit, als es noch nicht einmal Zellen gab. In jener Epoche existierte eine Vorstufe von Leben, die aus einer besonderen Sorte von Erb-molekülen (RNS) bestand. Diese Moleküle hatten die Fähigkeit, sich durch Anlagerung neuer Molekülbausteine selbst zu verdoppeln.

Wie schnell sie sich vermehren konnten, hing von ihrer räumlichen Form ab. Und die wurde durch die Reihenfolge der Molekülbausteine festgelegt. Daher setzten sich im Laufe der Zeit jene RNS-Moleküle durch, die besonders effizient Kopien von sich selbst herstellen konnten.

Allerdings war die Verdoppelung dieser Moleküle an der Schwelle zum Lebewesen noch sehr unvollkommen. Häufig wurden falsche Bausteine eingefügt – es kam zu Mutationen. Die meisten der entstehenden Mutanten konnten sich nicht mehr vermehren: Sie starben aus.

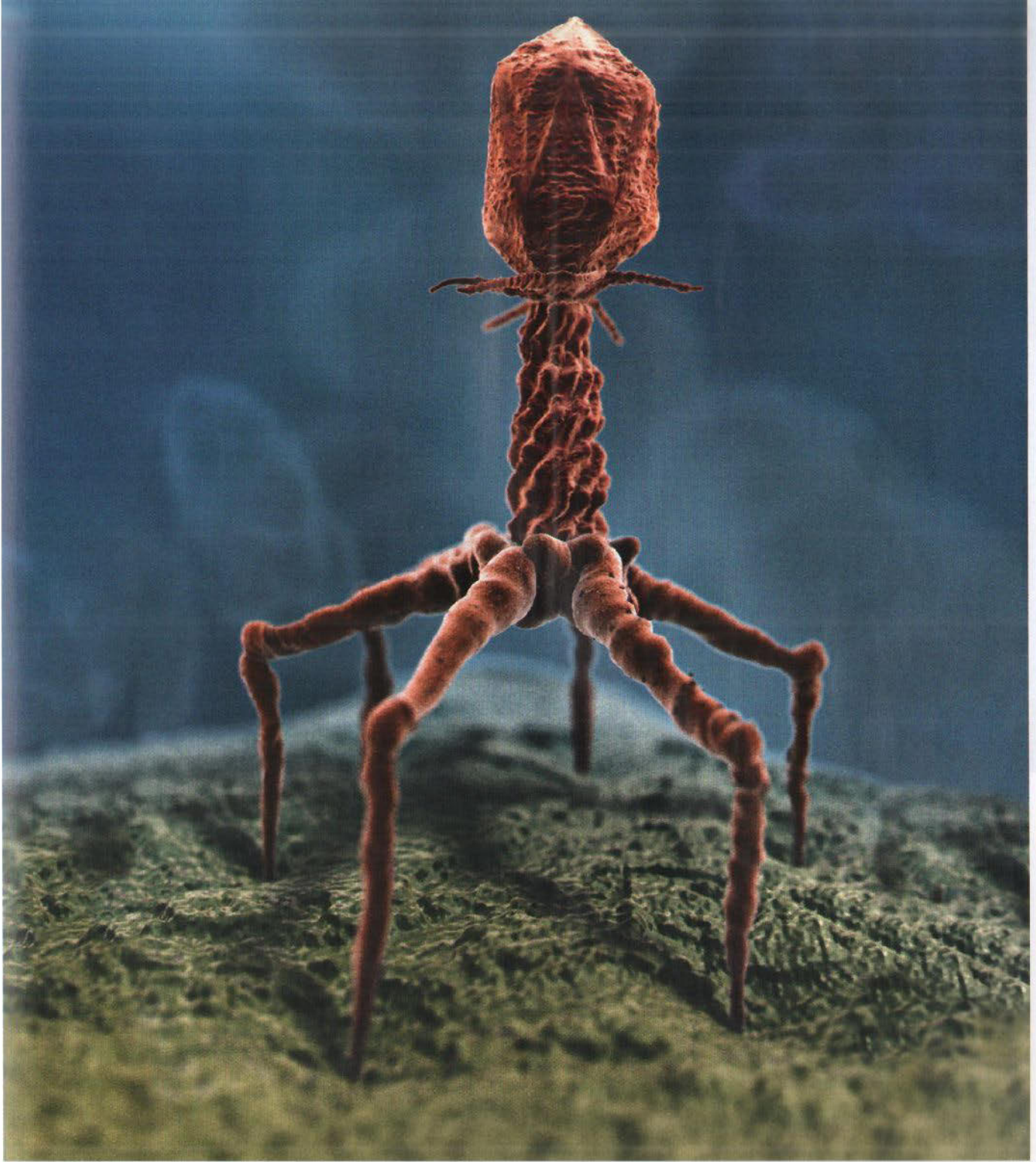
Doch einigen gelang es vermutlich, die Schwäche in einen Vorteil umzumünzen. Sie nahmen die Hilfe fremder Moleküle in Anspruch, um sich selbst zu verdoppeln. So vermehrten sie sich auf Kosten der anderen. Damit waren die ersten Parasiten entstanden, die

Vermutlich gibt es **100 Millionen** Viren-Typen – darunter Grippe-, Pocken- oder Polio-Erreger

menschliche Körperzelle ist weniger als ein Zehntelmillimeter lang und mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen. Noch um den Faktor zehn kleiner sind Bakterien, die in der Regel zwischen einem und zehn tausendstel Millimetern messen. Doch das ist noch riesengroß, verglichen mit den Viren: Die sind fast hundertfach kleiner als Bakterien.

ware eines fremden Rechners übernimmt, beginnt die Virus-Erbsubstanz der Zelle nun zu diktieren, was sie zu tun hat. Und die macht fortan vor allem eines: Sie stellt in ihrem Inneren neue Viren her – oft so lange, bis sie daran zugrunde geht, platzt und Tausende Tochterviren in die Umgebung speit.

Ein Virus ist also ein winziges, in einer Verpackung steckendes gene-



Etliche Virusarten befallen Bakterien – so diese Spezies (T4-Bakteriophage; Simulation), die sich mit beinartigen Fortsätzen auf Darmbakterien niederlässt und ihr Erbgut durch den röhrenförmigen Rumpf in die Wirtszelle injiziert. Die dort gebildeten Tochterviren verlassen den Körper über den Kot und gelangen über verschmutzte Speisen in neue Wirte

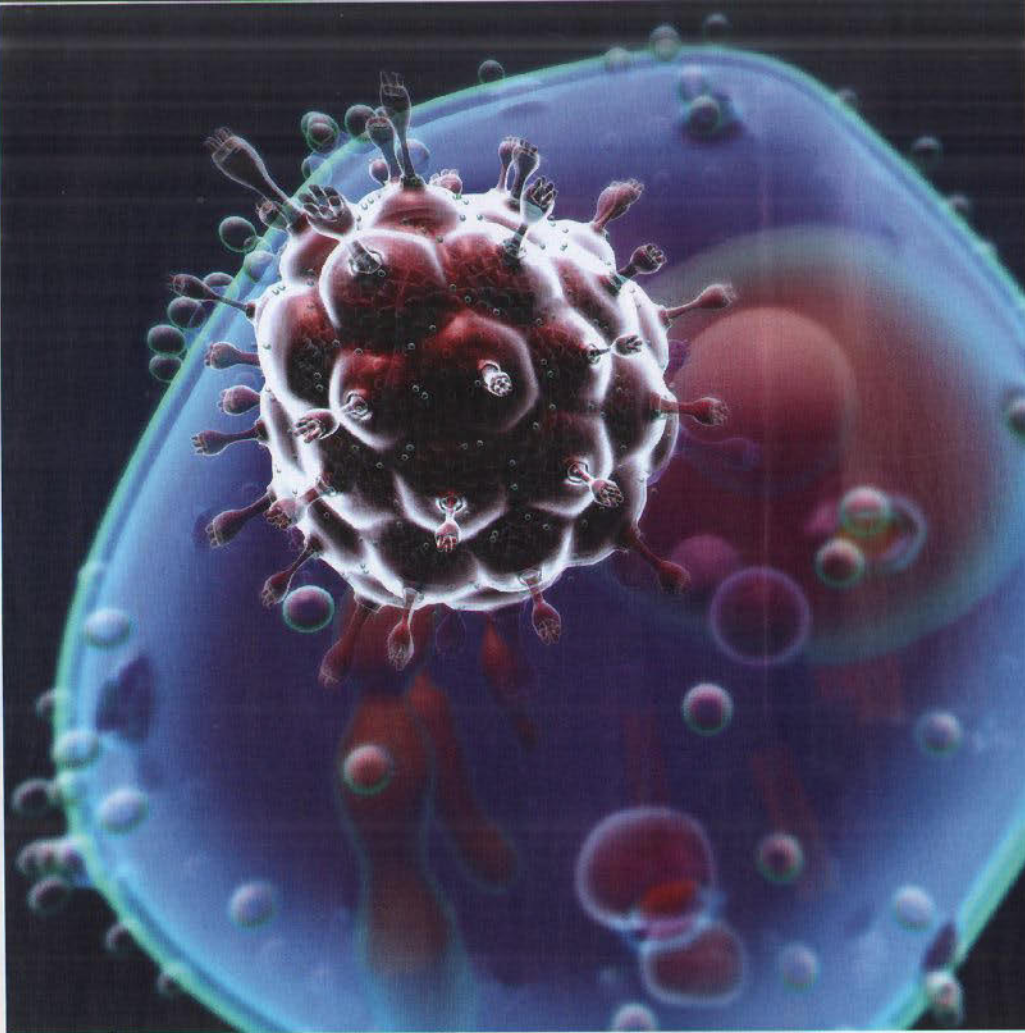
Viren in die Welt gekommen – und das, noch ehe das Leben entstanden war.

Als sich später die erste Zelle formte (siehe Seite 36), passten sich die Viren an die neue Umgebung an. Sie nutzten nun Zellen als Wirte, um sich zu vermehren. Um von einer zur anderen

zu gelangen, umgaben sie sich mit einer schützenden Hülle aus Eiweißen, die ihnen ermöglichte, an einer Zelle anzudocken. So gelangten sie in einen neuen Wirt hinein.

Kurz nachdem die ersten Moleküle des Lebens entstanden waren, brachte

die Evolution mit den Viren also bereits Wesen in die Welt, die darauf aus waren, andere auszunutzen: ein enorm erfolgreiches Prinzip, das seither eine verblüffende Fülle dieser Kleinstparasiten hervorgebracht hat. Heute, so schätzen Forscher, gibt es vermutlich



Das kugelförmige Aids-Virus lagert sich an bestimmte Immunzellen im menschlichen Körper an, vermehrt sich in ihnen und schwächt dadurch die Abwehrkräfte (Simulation)

gut 100 Millionen Virustypen – eine so große Vielfalt existiert bei keiner anderen Gruppe von Lebewesen.

Viren kommen in der Tiefsee vor, in heißen Quellen, in der Sahara, in der arktischen Eiswüste, aber auch 200 Meter unter der Erdoberfläche – kurz: überall, wo es auch Leben gibt.

Und sie befallen alle Organismen, die sich auf der Erde entwickelt haben: Bakterien, Einzeller, Pilze, Pflanzen, Tiere.

In den Sedimenten der Tiefsee beispielsweise sorgen sie vermutlich dafür, dass große Mengen von Mikroorganismen infiziert werden. Die befallenen Zellen platzen schließlich und sterben ab. Durch deren Tod werden wahrscheinlich Jahr für Jahr gut 600 Millionen Tonnen Kohlenstoff ins Wasser freigesetzt und damit wieder in den Kohlenstoffkreislauf zurückgespeist.

Damit steht der Kohlenstoff unter anderem Cyanobakterien, aber auch

anderen Organismen zum Aufbau ihrer Substanz zur Verfügung. Das bedeutet: Die Viren beeinflussen Ökosysteme und Stoffkreisläufe.

Trotz solcher Erkenntnisse glauben Wissenschaftler, dass erst ein winziger

Die winzigen Schmarotzer **borgen sich** **das Leben** von anderen Organismen

Teil der Viren bekannt und ihre Rolle in der Geschichte der Evolution bislang kaum erforscht ist. Ohnehin sind die winzigen Parasiten jene Organismen, von deren Existenz die Menschheit zuletzt erfuhr – vor nicht mal 120 Jahren.

NOCH IM 19. JAHRHUNDERT waren die Erreger einiger infektiöser Krankheiten unbekannt, etwa von Kinder-

lähmung, Tollwut, Maul- und Klauenseuche oder der Mosaikkrankheit bei Tabakpflanzen. Bakterien und andere Einzeller konnten Mediziner und Biologen als Ursache ausschließen: 1892 etwa presste ein russischer Forscher in St. Petersburg Extrakte aus infizierten Tabakpflanzen durch einen Filter, der so winzige Löcher hatte, dass kein Bakterium hindurchpasste. Doch obwohl die Bakterien zurückgehalten wurden, blieb die Flüssigkeit ansteckend.

Die Wissenschaftler vermuteten zunächst, Gifte würden die Seuche übertragen (lat. *virus* = Gift, Schleim). Doch gleichgültig, wie oft sie die infektiösen Extrakte auf neue Pflanzen oder Tiere übertrugen und dabei jeweils verdünnten: Die krank machende Wirkung blieb erhalten. Die „Gifte“ hatten offenbar die Fähigkeit, sich in einem Organismus zu vermehren. Es musste sich also um winzige, bislang unbekannte Lebewesen handeln.

1935 gelang es Forschern in New York, das Tabakmosaik-Virus zu isolieren und davon Kristalle herzustellen. Lebende Zellen jedoch sind aus zu vielen unterschiedlichen Stoffklassen aufgebaut, um einen Kristall – einen Körper aus gleichmäßig in allen drei Raumrichtungen angeordneten Einheiten – zu formen. Viren wurden daraufhin zu unbelebten Molekülkomplexen erklärt.

Weitere Untersuchungen erwiesen, dass die winzigen Erreger im Wesentlichen aus etwas Erbsubstanz sowie einer schützenden Hülle aus Eiweißmolekülen bestehen.

Schließlich wurde klar: Viren sind Wanderer zwischen den Welten. Sie sind quasi tot, solange sie als isolierte Partikel existieren. Dann handelt es sich um Molekülkomplexe, die keine

Nahrung aufnehmen, keine Energie erzeugen und sich nicht von selbst bewegen können.

Wenn sie allerdings in eine Wirtszelle gelangen, werden die Schmarotzer dort höchst lebendig und beginnen sich zu vermehren (Forscher diskutieren deshalb bis heute darüber, ob Viren Lebewesen sind oder nicht). Sie manipulieren den Stoffwechsel der Zelle, benutzen deren Moleküle und verwenden gespeicherte chemische Energie für ihre Zwecke.

Sie borgen sich sozusagen das Leben von den Zellen der anderen Organismen. Und weil sie dabei häufig ihren Wirt schädigen, dessen Körperzellen ausbeuten und zerstören, sind sie vor allem als Krankheitserreger bekannt.

BEVOR VIREN ABER die Zellen eines Körpers – etwa des Menschen – infizieren können, müssen sie erst einmal in ihn hineingelangen. Weil sie über keinerlei Antriebsmechanismus verfügen, sind sie dabei auf etwas Glück angewiesen. Manche, etwa Schnupfenviren, geraten über die Schleimhäute von Mund, Augen und Nase in den Organismus.

Die Gelbfieber- und Dengueviren werden durch die Stiche von Mücken ins Blut des Opfers übertragen, das FSME-Virus, das Gehirn- und Hirnhautentzündungen auslösen kann, von Zecken. Der Tollwuterreger gelangt durch Tierbisse in den Körper, das Aids-Virus durch Geschlechtsverkehr oder Kontakte mit verschiedenen Körperflüssigkeiten – etwa mit dem Blut von Infizierten. Keiner dieser Schmarotzer kann hingegen die gesunde Haut überwinden.

Ist ein Virus in den Körper vorgedrungen, steht es vor dem nächsten Problem: Es muss bereits am Eintrittsort in eine Zelle hineinkommen. Doch so ein winziger Parasit besitzt keinerlei Strukturen, mit denen er sich bewegen könnte, und auch keine Kraft. Deshalb ist er auf die Hilfe seines Wirts angewiesen.

Und die erzwingt er durch einen geradezu heimtückischen Trick.

Jede Zelle besitzt auf ihrer Oberfläche zahlreiche Zucker-Eiweiß-Strukturen, die unter anderem eine chemische Kommunikation mit anderen Zellen ermöglichen oder dazu dienen, Substanzen herein- oder herauszuschleusen. Die Formen dieser Strukturen sind so einzigartig und verschieden wie unterschiedliche Schlösser.

Viren nun tragen auf ihrer Hülle Zucker-Eiweiß-Moleküle, deren Form zu einer solchen Struktur auf der Zelle exakt passt – wie der Schlüssel in ein Schloss. Trifft das Virus auf eine solche Struktur, lagert es sich an. Es führt quasi seinen molekularen Schlüssel in das Schloss ein, schließt es auf – und wird von der Zelle aktiv in ihr Inneres aufgenommen.

Ein Virus ähnelt daher einem Einbrecher, der den Schlüssel für die Tür eines fremden Hauses besitzt. Und da die verschiedenen Zelltypen im Körper jeweils spezifische molekulare Strukturen haben – so wie die Häuser in einer Stadt ganz unterschiedliche Türen mit unterschiedlichen Schlössern aufweisen –, können die Viren nur in jene Zellen eindringen, zu denen ihr Schlüssel passt. Deshalb kann jeder Virustyp nur bestimmte Zellen infizieren; der Aids-Erreger etwa dringt ausschließlich in eine bestimmte Gruppe von Zellen des Immunsystems ein.



Ein Bakterium (o. l.) ist bloß wenige tausendstel Millimeter lang – aber immer noch 100-mal größer als ein Virus (o. r.)

Im Inneren der Wirtszelle verliert das Virus seine Schutzhülle aus Eiweißen, und es bleibt die nackte Erbsubstanz zurück. Um in dem Bild vom Einbrecher zu bleiben: Ein Hausbesitzer wäre intelligent genug, um einen Einbrecher von einem Familienmitglied zu unterscheiden und ihn wieder hinauszuerwerfen – eine Zelle kann das zumeist nicht.

Versagen ihre Abwehrmechanismen, nimmt sie die Anweisungen entgegen, die in der Virus-Erbsubstanz wie in einem Programm gespeichert sind, und führt sie aus.

Und diese Anweisungen besagen: Verwende all deine Ressourcen, deine Materialien und Energien, um Kopien des Eindringlings herzustellen.

DESHALB BEGINNT die Zelle, fortan virale Eiweißmoleküle zu produzieren. Diese Moleküle übernehmen anschließend die Regie in der Zelle, greifen tief in deren Stoffwechsel ein und bringen sie dazu, zum einen massenhaft Kopien der Virus-Erbsubstanz herzustellen, zum anderen jene Eiweiße zu produzieren, welche die Hüllen der Viren bilden. Jeweils ein Satz Viren-Erbsubstanz und Hüllprotein fügen sich dann zu einem neuen Virus zusammen.

Es ist jetzt so, als habe das Virus die Zelle völlig umprogrammiert und zur Herstellung von Tochterviren verdammt.

Haben sich einige Tausend dieser Tochterviren angesammelt, stirbt die Zelle häufig ab, löst sich auf und entlässt ihre Fracht in die Umgebung. Nun können die neuen Partikel weitere Zellen befallen. Ein Schneeballeffekt kommt in Gang.

Ist eine Zelle einmal infiziert, kann sie gegen die Parasiten wenig ausrichten. Der Körper insgesamt hat jedoch vielfältige Abwehrmöglichkeiten. So kann er seine Temperatur erhöhen – Fieber erzeugen – und dadurch die Vermehrung der Erreger bremsen sowie die eigene Abwehraktivität hochfahren.

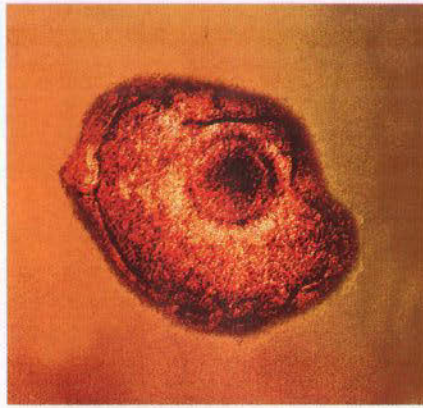
Dazu setzt er bestimmte Eiweißstoffe frei (Interferone), die die Vermehrung der Viren ebenfalls hemmen. Am effektivsten aber ist die Abwehr durch spezielle Zellen des Immunsystems, die die Viren gezielt bekämpfen.

Je nach Erreger kommt es zu mehr oder weniger heftigen Krankheitssymptomen. Schnupfenviren etwa befallen vor allem die Zellen der Nasenschleimhaut, die mit einer Absonderung schleimhaltiger Sekrete reagieren. Hepatitisviren verursachen Leberentzündungen, die Gelbsucht zur Folge haben. Polioviren besiedeln meist Zellen des Magen-Darm-Traktes, können aber auch Nervenzellen im Rückenmark angreifen. Dann kommt es zu Lähmungen.

FÜR DIE Viren ist die massenhafte Vermehrung aber erst der halbe Erfolg. Denn um dauerhaft zu überleben, müssen sie neue Opfer finden.

Daher brauchen sie einen Weg, um den Körper ihres Wirtes zu verlassen. Viele Viren – so die Erreger von Schnupfen, Grippe, Pocken, Röteln, Masern oder Herpes – schwimmen im Speichel, denn das Virus vermehrt sich in den Schleimhautzellen des Rachens und der Nase.

Platzen diese Schleimhautzellen, werden Millionen Erreger freigesetzt, die nun die umliegenden Zellen überschwemmen. So erreichen sie schließlich auch die Speicheldrüsen, werden mit dem Speichel ausgeschieden und



Herpesviren können ihr Erbgut im Kern der Wirtszelle einlagern und so ein Leben lang im Körper des Betroffenen verbleiben

oder Zecken zum nächsten Wirt transportiert. Und wieder andere, etwa Aids-Viren, finden sich in verschiedenen Körperflüssigkeiten, zum Beispiel im Blut oder Sperma.

Eine besonders raffinierte Strategie verfolgt das Tollwutvirus: Der Parasit verbreitet sich zunächst lokal dort im Körper, wo er eingedrungen ist, vermehrt sich dann in den Leitungsfortsätzen von Nervenzellen, dringt durch sie ins Gehirn vor und zerstört darin ausgedehnte Bereiche.

Das wiederum löst verschiedene Symptome aus, unter anderem jene, der die Krankheit ihren Namen verdankt: motorische Unruhe, Angstgefühle, Krämpfe beim Schlucken, extreme Abneigung gegen Wasser. Wildtiere verlieren aufgrund der Defekte im Gehirn ihre Scheu vor Menschen und beißen sie. Da das Virus inzwischen auch im Speichel vorhanden ist, wird es dabei übertragen.

Für etliche Viren ist es **ein Irrtum**, den Menschen zu befallen – und zu töten

durch Kontakte zwischen Menschen leicht übertragen.

Manche Viren gelangen mit der Nahrung in ihre potenziellen Wirte und infizieren Zellen des Darms – sie verlassen den Körper über den Kot. Andere vermehren sich in bestimmten Blutzellen und werden von Mücken

Der Erreger bewirkt also eine Veränderung beim infizierten Wirt, die seine eigene Ausbreitung fördert. Er hat nicht nur die Körperzellen des Wirts umprogrammiert, sondern sogar dessen Verhalten.

Eine rechtzeitige Impfung kann vor Tollwut schützen. Zeigen sich jedoch

erste Krankheitssymptome, droht dem Betroffenen ein qualvolles Schicksal, das fast immer mit dem Tod endet. Auch Marburg- und Ebola-Viren fordern unter den Erkrankten eine sehr hohe Zahl an Todesopfern.

Aus der Perspektive der Evolutionsbiologie ist das ungewöhnlich, denn ein Erreger, der seinen Wirt mit hoher Zuverlässigkeit umbringt, beraubt sich schließlich seiner Lebensgrundlage – schon bald gäbe es keinen Organismus mehr, den der Parasit befallen könnte. Er würde also selbst aussterben.

Weshalb sind manche Viruserkrankungen aber dennoch derart tödlich? Die Erklärung im Fall der Tollwutviren: Sie infizieren nicht nur Füchse, Hunde, Katzen und Menschen, sondern fast alle Warmblüter. Somit steht ihnen eine große Auswahl an Wirten zur Verfügung.

Ebola- und Marburg-Viren hingegen vermehren sich offenbar meist in Flughunden, in denen der Infekt relativ harmlos verläuft (siehe GEOkompakt „Abenteuer Expedition“). Die Fledertiere bilden sozusagen das natürliche Reservoir. Nur selten springt der Erreger auf den Menschen über, dann aber mit meist tödlichen Folgen. Der *Homo sapiens* ist in diesen Fällen als Wirt quasi ein Irrtum.

Es gibt aber noch eine weitere Konstellation, in der sich die winzigen Parasiten besonders verheerend auf ihren Wirt auswirken können: wenn sie neu für ihn sind.

DAS 1983 ENTDECKTE Humane Immundefizienz-Virus, der Erreger von Aids, ist ein solcher Fall. Sein Vorläufer hatte offenbar schon lange in afrikanischen Affen existiert, war dann auf den Menschen überggesprungen und hatte sich dort durch etliche Mutationen zu einer neuen Art entwickelt: Die spezialisierte sich auf den *Homo sapiens* als Wirt und traf ihn, da er sich bislang nicht durch einen Evolutionsprozess daran hatte anpassen können, mit voller Wucht.

Mehr als 30 Millionen Menschen tragen das Virus inzwischen in sich, rund 25 Millionen sind seit 1981 daran gestorben, rund zwei Millionen sterben jährlich daran, und noch mehr stecken sich neu an.

Zwar überleben die Infizierten einige Jahre symptomlos, doch ohne Medikamente stirbt am Ende fast jeder Virenträger; es ist womöglich das verheerendste Virus, das die Menschheit je heimgesucht hat.

Die meisten Viren, mit denen *Homo sapiens* schon lange Kontakt hat, fordern dagegen keine extrem hohen Opferzahlen. Dafür sorgt ein langer evolutionärer Anpassungsprozess. Hochgefährliche Erreger verschaffen sich selbst einen Nachteil, denn tote Menschen können die Viren nicht mehr weitertragen und verbreiten hel-

fen. Die weniger aggressiven Varianten dagegen, die ihren Wirt lange leben lassen, erhöhen ihre Chancen auf Kontakt mit einem neuen Opfer.

Da die Körper der Menschen zudem unterschiedlich sind, überleben vermehrt jene Infizierten, deren Zellen oder Immunsysteme besser mit den Viren fertigwerden. Ihr Anteil wächst im Laufe der Zeit. So kommt es zu einer allmählichen gegenseitigen „Gewöhnung“. Das heißt: Der Wirt wird widerstandsfähiger gegen den Parasiten, und zugleich nimmt die Aggressivität der Viren ab.

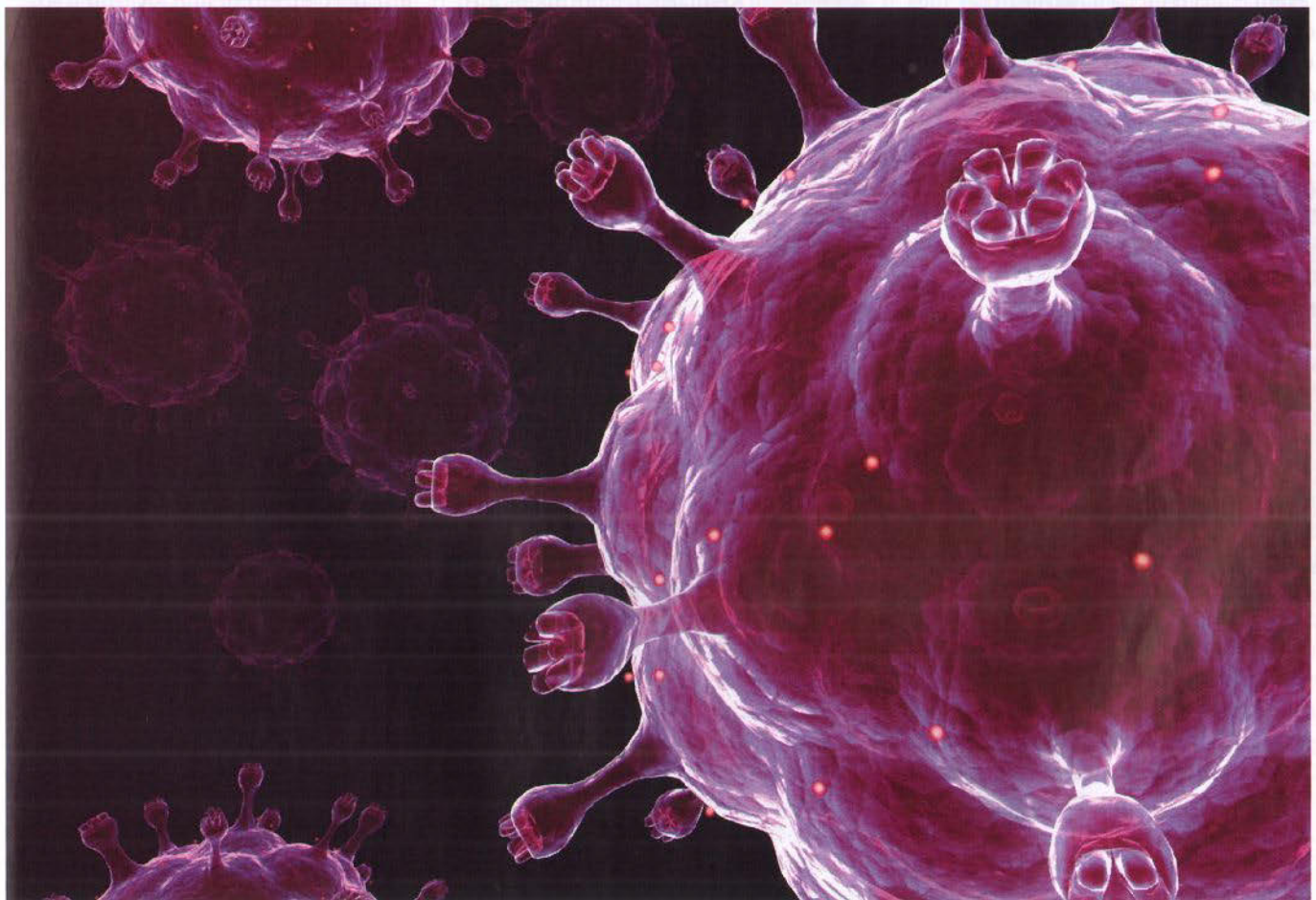
Schnupfenviren etwa sind lästig, aber nicht gefährlich. Masernviren infizieren

Mit keulenförmigen Auswüchsen, sogenannten Spikes, heften sich Asiatische Grippeviren an Zellen der Schleimhaut

jährlich rund 20 Millionen Menschen, 82 von 10 000 Patienten sterben – also weniger als ein Prozent. Und auch bei Epidemien von Grippeviren stirbt nur ein kleiner Teil der Infizierten (vor allem Menschen mit schwächerem Immunsystem, Alte oder Kinder).

Forscher haben zudem festgestellt, dass die meisten bekannten Viren gar keine Krankheiten verursachen, sondern sich im Wirtsorganismus als Untermieter einrichten. Zum Beispiel die Herpesviren beim Menschen.

Herpes simplex Typ 1 etwa verursacht zumeist ungefährliche Bläschen im Mundbereich, die schnell wieder abklingen. Doch die Viren sind danach nicht verschwunden, sondern überdauern mithilfe eines Tricks: Sie haben ihre Erbsubstanz in den Kernen befallener Zellen eingelagert.



Dort ruhen die Viren-Gene unbehelligt. Sie haben sozusagen eine Pause eingelegt und verbleiben ein Leben lang im Körper des Betroffenen. Bestimmte Auslöser allerdings – Stress, UV-Licht, Fieber, Medikamente oder ein geschwächtes Immunsystem – können die Viren-Erbsubstanz in einzelnen Zellen aktivieren.

Dann beginnen diese Zellen, Eiweiße herzustellen, sich selbst zu vermehren und immer neue Viruspartikel zu produzieren. Diese Partikel infizieren weitere Zellen, und es kommt zu Krankheitssymptomen – die Immunabwehr wird hochgefahren, und der Körper versucht, die Herpesviren zu eliminieren.

Doch die können nun an einen anderen Menschen – etwa durch eine kleine Wunde bei einem Kuss (also bei direktem Kontakt) – weitergegeben werden. Zugleich verbleiben im Körper des Trägers latent infizierte Zellen, in denen sich das Virus versteckt, die vom Immunsystem nicht ausgeschaltet werden können.

Memo: **VIREN**

► **Ein Virus ist ein Parasit**, der aus einer Eiweißhülle besteht, die das Erbgut umgibt.

► **Es gibt keinen Organismus**, der nicht von Viren befallen wird.

► **Moleküle auf der Hülle** ermöglichen es den Viren, sich an eine Wirtszelle zu heften. Sind sie in eine Zelle eingedrungen, zwingen sie diese, Tochterviren herzustellen.

► **Viren haben keinen Stoffwechsel** und können sich weder bewegen noch selbstständig Nachkommen hervorbringen.

► **Manche Viren** schleusen ihre Gene in das Erbgut ihres Wirtes ein.

Der evolutionäre Vorteil dieses Vorgangs: Das Virus wird auf diese Weise so alt wie der Mensch, kann jederzeit reaktiviert werden und immer wieder Tochterviren produzieren, die sich ausbreiten können.

Einige Viren, etwa die Aids-Erreger, gehen sogar noch weiter: Sie bauen

Kopien ihrer Gene direkt in das menschliche Erbgut der infizierten Zellen ein. Auf diese Weise verschmilzt das Virus-Erbgut mit dem des Menschen und wird zum Bestandteil der befallenen Körperzellen. Die Viren-Gene bleiben so lange erhalten, wie die jeweilige Zelle lebt, und kein Medikament kann sie entfernen. Erst wenn der Patient stirbt, vergeht mit dessen Körper auch die Erbsubstanz der Parasiten.

DOCH ES GIBT einen denkbaren Fall, bei dem die Viren selbst den Tod des Infizierten überleben können: wenn

Nicht alle Viren **schaden dem Menschen** – mitunter helfen sie ihm im Evolutionsprozess

sie in seine Keimzellen eindringen, also in die Samen- oder Eizellen. Handelt es sich um einen Mann, werden die Viren im Erbgut der Spermien auf ein von ihm gezeugtes Kind übertragen. Bei einer Frau lagern sie in der Eizelle.

Ein so entstehendes Kind trüge schon im Erbgut seiner ersten Zelle die Viren-Gene. Die würden dann mit jeder Zellteilung auf alle weiteren Körperzellen übergehen. Wenn das Kind dann erwachsen wäre und selbst Nachwuchs bekäme, könnte auch die Viruserbsubstanz in die nächste Generation geraten. Sie würde für immer zum Bestandteil des menschlichen Erbguts werden – und wäre damit quasi unsterblich.

Dass genau das tatsächlich bereits geschehen ist – und enorme Folgen für die menschliche Evolution hat –, haben Genetiker vor einiger Zeit herausgefunden.

Im Jahr 2003 gelang es Forschern, erstmals die Buchstabenfolge des kompletten menschlichen Erbguts, des Genoms, zu ermitteln. Anschließend begannen sie, es genauer zu analysieren, und machten dabei mehrere verblüffende Entdeckungen.

Zum einen fanden sich statt der erwarteten 100 000 Gene lediglich rund 20 000. Die beanspruchen nicht mehr als 1,5 Prozent der gesamten Länge des Genoms, also sehr wenig.

Noch seltsamer: Das menschliche Genom enthält Erbsubstanz, die ganz offensichtlich von Viren abstammt. Und dieses Viren-Erbe macht rund neun Prozent des Erbguts aus – erheblich mehr also als die eigentlichen Gene.

Das aber ist noch nicht alles. Weitere mysteriöse Stellen im Erbgut bestehen aus endlosen, sich immer wiederholenden Sequenzen. Auch ihre Struktur

erinnert an Viren, und sie füllen sogar 34 Prozent des Genoms. Insgesamt umfassen virenähnliche Komponenten also rund 40 Prozent des menschlichen Erbguts.

Was haben diese enormen Mengen an Virus-Erbsubstanz im menschlichen Genom zu bedeuten?

Offenbar haben Viren seit grauer Vorzeit immer wieder Keimzellen infiziert und sich in deren DNS integriert. Sie wurden von Generation zu Generation weitergegeben – und so im Wortsinn zum Erbe der Menschheit.

Die Viren haben damit so etwas wie ein „ewiges Leben“ im Körper ihres Wirts erreicht und gleichzeitig einen großen Vorteil erzielt.

Denn sie müssen nicht mehr den mühsamen äußeren Weg zum nächsten Wirt suchen, sich nicht mehr an dessen Körperzellen anlagern, um sie zu infizieren, und sich dabei den Angriffen des Abwehrsystems aussetzen. Stattdessen wird nun die virale Erbsubstanz als Bestandteil des menschlichen Genoms vermehrt und zuverlässig an die Kinder weitergegeben.

Dies ist eine völlig neue Daseinsweise der Parasiten – mit verblüffenden Conse-

quenzen. Denn die eingebauten Viren hatten ja nun keinen Grund mehr, im Körper Zellen zu zerstören und Krankheiten auszulösen.

Im Gegenteil: Virus-Erbsubstanz, die das dennoch tat, dürfte den Wirt geschwächt haben, sodass er weniger lebensfähig war und einen Nachteil im Kampf ums Dasein hatte. Die entsprechenden Menschen vermehrten sich weniger als andere und verschwanden im Laufe der Zeit – und mit ihnen die entsprechende Viruserbsubstanz.

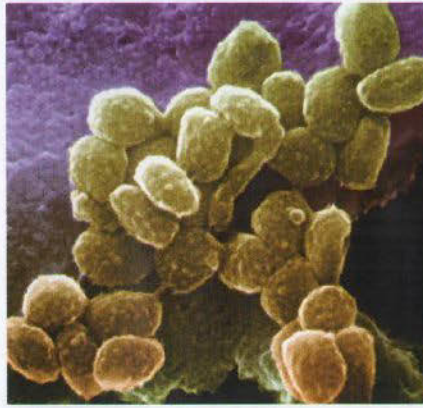
Ins Erbgut eingebaute Viren dagegen, die das Wohlergehen des Wirtes nicht schädigten, hatten sozusagen die Garantie für ein endlos dauerndes, bequemes Dasein. Manche von ihnen vermehrten sich vermutlich sogar innerhalb der Zelle, stellten Kopien von sich selbst her. So erklären die Forscher jene virusähnlichen Sequenzen im menschlichen Genom, die sich extrem häufig wiederholen.

Die Viren sind also in Jahrmillionen vom Krankheitserreger zum Gast im menschlichen Genom mutiert.

Doch damit ist die Geschichte noch nicht zu Ende. Wie Forscher herausfinden konnten, haben sich einige von ihnen sogar als nützlich für den Menschen erwiesen. Sie wurden zu Motoren der Evolution.

UND DAS KAM SO: Die Viren, die ihr Dasein ins Innere der menschlichen Zelle verlegten, benötigten keine Hüllproteine und andere Eiweiße mehr, die ihnen zuvor dazu dienten, in einen neuen Wirtsorganismus zu gelangen und dort Zellen zu infizieren. Die entsprechenden Gene wurden in der Regel stillgelegt, sind aber noch vorhanden.

Durch zufällige Erbänderungen können sie aber jederzeit wieder aktiviert werden und Proteine herstellen. Weitere Mutationen können diese Eiweiße abwandeln – mit etwas Glück zu Substanzen, die der Körper zu verwenden vermag. Es können neue Stoffe hergestellt werden, die eine nützliche Funktion übernehmen. So wird die Erb-



Pockenviren (hier eine kolorierte, raster-elektronenmikroskopische Aufnahme) gelangen über die Atemwege in den menschlichen Körper, wo sie sich vermehren und zu schweren Infektionen führen

substanz der ehemaligen Parasiten zum Spielmaterial für Neuerungen.

Und das konnten Forscher tatsächlich belegen. Vor etwa 40 Millionen Jahren, so ergaben genetische Analysen, drang ein Virus in das Genom der Primaten ein – und damit auch in die Ahnenlinie der Menschen – und begründete eine neue Familie genetischer Elemente.

Gut 650 dieser Genstücke sind beim Menschen heute bekannt. Eines von ihnen liefert die Erbinformation für ein Eiweiß, das entscheidende Bedeutung für die Funktion des Mutterkuchens hat. Ursprünglich diente dieses Eiweiß als Hüllprotein des Virus. Im Menschen erfüllt es nun eine völlig neue Aufgabe. Die Plazenta versorgt das im Mutterleib heranwachsende Kind mit Nährstoffen aus dem mütterlichen Blut, und dazu wachsen kindliche Zellen in die Gebärmutterwand ein. Das ehemalige Virus-Gen sorgt nun dafür, dass Zellen in der sich bildenden Kontaktzone des Mutterkuchens verschmelzen und Blutgefäße aufgelöst werden, sodass Nährstoffe besser aufgenommen werden können.

Andere Relikte von Viren produzieren Eiweiße, die für die Entwicklung des menschlichen Embryos wichtig sind. Wieder andere sind an der normalen Funktion des Gehirns beteiligt. Und etliche regulieren die Aktivität anderer Gene – ein virales Element etwa ist bei der Herstellung eines Bestand-

teils des menschlichen Blutfarbstoffs involviert.

Doch auch jene Viren, die sich nach wie vor von Organismus zu Organismus ausbreiten, können der Evolution neue Schubkraft verleihen. Denn sie nehmen gelegentlich genetisches Material aus einem Wirt mit und übertragen es in einen anderen.

Und das kann sogar zwischen unterschiedlichen Arten geschehen. So identifizierten Forscher mehr als 100 Gene, die sowohl bei Bakterien als auch bei Menschen vorkommen, nicht aber bei anderen, mit dem Menschen näher verwandten Arten.

Offensichtlich gelangten die Genschnipsel mithilfe von Viren aus den Bakterien in den *Homo sapiens*.

IMMER PRÄZISER erkennen die Forscher, dass die winzigen Wesen nicht nur Parasiten sind, sondern auch Boten, die im gesamten Reich des Lebens genetisches Material von einem Organismus zu einem anderen übertragen oder selbst zum Ausgangspunkt neuer Gene werden.


Möglicherweise haben die Viren schon in der Entstehungsphase des Lebens entscheidende Innovationen geliefert. Und sie könnten sowohl bei der Bildung der ersten Zelle als auch bei der Entwicklung des Zellkerns mitgewirkt haben.

Manche Wissenschaftler sehen die gesamte Biosphäre inzwischen als ein ineinander verwobenes Netzwerk aus ständig zirkulierenden Genen, in dem die Mini-Schmarotzer so etwas wie eine Autobahn zum Austausch von Erbsubstanz sind.

„Wo immer man hinschaut, scheinen Viren eine entscheidende Rolle in der Evolution zu spielen“, sagt der kalifornische Virenforscher Luis Villarreal. „Ich behaupte, sie sind die kreativsten genetischen Einheiten, die wir kennen.“ □


Dr. Henning Engeln, 56, ist Redakteur im Team von GEOkompakt.

Literaturtipps: Luis P. Villarreal, „Viruses and the Evolution of Life“, American Society for Microbiology.



Photosynthese

Die **Kraft** des Lichts



Photosynthese betreibende
Cyanobakterien und Kalk versteinern
zu sogenannten Stromatolithen.
An Australiens Westküste haben
Forscher Milliarden Jahre alte
Relikte solcher Gebilde gefunden

**Anfangs beziehen die Einzeller ihre
Energie von chemischen Stoffen aus dem
Erdinneren. Doch dann lernen manche
von ihnen, die Energie der Sonne zu nutzen**

Die Erde ist ein Planet voller Leben – und hinter dieser Vielfalt steckt vor allem eine Kraft: das Sonnenlicht. Würde das Gestirn plötzlich erlöschen, wären die meisten Organismen zum Tode verurteilt. Mitten am Tag träten die Sterne am Himmel hervor. Vögel hörten zu zwitschern auf, Tiere legten sich schlafen. Unaufhaltsam kühlte die Erde ab.

Nach einer Woche wäre die Durchschnittstemperatur an der Oberfläche auf gut minus 18 Grad Celsius gefallen. Ein Jahr später hätte sich der Planet in eine Eiswüste verwandelt.

Nur ein paar Mikrobenarten könnten die Katastrophe überdauern, etwa an heißen Quellen in der Tiefsee, wo das Leben vermutlich einst entstanden ist.

Alle anderen Kreaturen dagegen würden sterben. Denn ohne Sonnenlicht gingen sämtliche Pflanzen ein – und damit auch jene Tiere, die imstande wären, der eisigen Kälte zu trotzen: Sie würden schlicht verhungern.

Sie alle hängen von der wunderbaren Fähigkeit der Gewächse ab, aus Licht Energie zu gewinnen. Auf diesem Prozess beruht nahezu die gesamte Vielfalt des Lebens.

Das aber war keineswegs immer so.

DENN DIE ERSTEN Mikroben, die vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren entstehen, brauchen die Sonne nicht: Sie leben in völliger Finsternis an heißen Tiefseequellen und gewinnen dort Energie aus Wasserstoff, einem Gas, das aus Spalten im Ozeangrund dringt. Mithilfe dieser Energie bauen die frühen Wesen Biomoleküle auf.

Zunächst treiben die fragilen Geschöpfe noch vereinzelt durchs Wasser. Doch nach einiger Zeit ist der Meeresboden rund um die heißen Quellen mit einem fleckigen weißen Belag überzogen – er besteht aus gewaltigen Mengen von Mikroben.

In dem schmierigen Biofilm vollzieht sich die Evolution im Eiltempo. Auf

engstem Raum drängen sich Abermilliarden von Einzellern, die sich ständig vermehren und neue Generationen hervorbringen. Dazu müssen sie ihr Erbgut vervielfältigen, und dabei kommt es immer wieder zu kleinen, aber folgenreichen Fehlern.

Auf dem Erbmolekül ist der gesamte Bauplan einer Mikrobe gespeichert – zum Beispiel, wie sich die hochkomplizierten Eiweißmoleküle zusammensetzen, die sämtliche Abläufe in der Zelle dirigieren. Gerät dieser genetische Code beim Kopieren auch nur leicht durcheinander, treten Mutationen auf. Und die können bewirken, dass plötzlich ganz neue Eiweiße entstehen.

Meist endet das für die Mikroben tödlich. Doch manchmal führen bestimmte Mutationen dazu, dass zufällige Moleküle entstehen, die sich als vorteil-

Lichtempfindliche Farbstoffe fangen die **Energie** der Sonnenstrahlen ein

haft erweisen – und es zum Beispiel Zellen ermöglichen, effektiver Energie zu gewinnen als zuvor. Diese Mikroben besitzen somit mehr Lebenskraft als andere Einzeller in der Umgebung.

Solche nützlichen Innovationen geben die winzigen Organismen an ihre Nachkommen weiter. Denn die erben die Gene der Elterngeneration und damit deren Eigenschaften. So reifen in der Finsternis des Meeres Lebewesen mit völlig neuen Fähigkeiten heran.

Im Laufe von Jahrmillionen entstehen Mikrobenarten, die nicht mehr nur auf jenen Wasserstoff angewiesen sind, der aus der Tiefe emporquillt. Sie schöpfen ihre Energie zum Beispiel auch aus Schwefelwasserstoff, einem nach faulen Eiern riechenden Gas, das ebenfalls im

Quellwasser enthalten ist. Oder sie beziehen Kraft aus den organischen Abfällen anderer Bakterien.

Die genetischen Neuerungen beschränken sich jedoch nicht nur auf den Stoffwechsel. Die Mikroben lernen auch, sich aktiv zu bewegen: Manche sondern Schleim ab, auf dem sie langsam vorangehen. Anderen sind hauchdünne, schraubenförmige Fortsätze gewachsen, mit deren Hilfe sie durchs Wasser schwimmen können.

Und einige Bakterien beginnen vielleicht schon zu dieser Zeit, Moleküle herzustellen, die sensibel auf Wärmestrahlung (Infrarotlicht) reagieren.

Diese Infrarot-Detektoren erlauben es den Zellen, in der unmittelbaren Nähe von heißen Fontänen am Meeresgrund deren Strahlung wahrzunehmen. So vermögen sich die kleinen Wesen gezielt in Richtung des energiereichen Quellwassers zu bewegen.

FÜR JAHRMILLIONEN ist die Tiefsee der einzige Lebensraum dieser urtümlichen Mikroben. Doch nicht alle Kolonien bleiben in der Dunkelheit. Der Ozeanboden ist ja in ständiger Bewegung: Die Erdplatten verschieben sich gegeneinander, unterseeische Vulkane entstehen. Dabei werden Teile des Meeresgrunds immer höher aufgeworfen und nähern sich unaufhaltsam der Wasseroberfläche. Und mit ihnen auch die darauf lebenden Mikroben.

Doch weiter oben sind die Bakterien einer großen Gefahr ausgesetzt: der von der Sonne ausgesandten UV-Strahlung, welche die empfindlichen Erbmoleküle schädigt, die Lebensgrundlage sämtlicher Organismen.

Den Bakterien aber kommt zugute, dass geologische Prozesse wie die Verschiebung des Meeresgrunds äußerst langsam ablaufen, über Jahrmillionen. So bleibt den Organismen genügend

Cyanobakterien (grüne Fäden) bilden Matten, in denen sich Sedimente verfängen, und scheiden Kalk aus. Allmählich entsteht daraus festes, mineralisches Material: ein Stromatolith

Zeit, Abwehrmechanismen gegen die schädliche Strahlung zu entwickeln.

Manche hüllen sich in eine Kruste aus Mineralen, die sie vor dem UV-Licht abschirmt. Andere schützen sich mit speziellen Farbstoffen, die einen Großteil der Strahlung absorbieren, ehe sie die Erbsubstanz schädigen kann.

Und als die einstigen Tiefsee-Mikroben im flachen Wasser dem täglichen Sonnenlicht ausgesetzt sind, geschieht etwas Erstaunliches: Sie überleben die Strahlung nicht nur – sondern machen sich die Kraft der Sonne sogar zunutze.

Wie genau das damals geschieht, ist noch immer ein Rätsel. Möglicherweise wandeln die Bakterien dazu jene Farbstoffe um, mit denen sie sich vormals gegen die Sonne geschützt haben. Vielleicht nutzen sie auch jene infrarot-empfindlichen Stoffe, mit denen schon ihre Vorfahren die Wärmestrahlung der heißen Tiefseequellen registriert haben.

Fest steht: Schon früh, womöglich schon vor 3,5 Milliarden Jahren, fangen die Mikroben das Sonnenlicht mit einer Reihe von Molekülen auf – und gewinnen daraus Energie.

Es ist der Beginn eines Prozesses, der die Welt verändern wird wie kaum ein zweiter: der Photosynthese.

ZUNÄCHST bedienen sich die Bakterien aber einer archaischen Vorform dieser Reaktion: Vermutlich verwerten sie – wie schon ihre Ahnen Jahrmillionen zuvor – immer noch Schwefelwasserstoff, jenes Gas, das in der Nähe von Vulkanen aus dem Boden quillt.

Doch nun spalten sie das Molekül bei der Photosynthese (von griech. *phōs* = Licht und *synthesis* = Zusammensetzung) mithilfe des Sonnenlichts auf und nutzen die Energie der Strahlung, um in einer Kette chemischer Reaktionen Zucker-Verbindungen herzustellen – also Biomoleküle, die die Mikro-

ben zum Leben brauchen. Schnell etablieren sich diese lichtliebenden Organismen am Ufer vulkanischer Inseln. Zwar wirken die zerklüfteten Küsten aus schwarzem Gestein noch völlig unbelebt. Doch im seichten Wasser schimmern grüne und violette Flächen – dort gedeihen Bakterienteppiche.

Im Inneren dieser schleimigen Matten ist die Evolution weiter am Werk. Die Mikroben bilden immer neue Molekülgebilde aus, die ihnen bei der Photosynthese helfen. Bald wächst in manchen Bakterienzellen eine Art winziger Maschinenpark heran – ein Zusammenschluss aus teils mehr als 100 verschiedenen Molekülen, die miteinander kooperieren und gemeinsam immer mehr Energie aus Sonnenlicht gewinnen.

Wichtigster Bestandteil dieses Photosynthese-Apparates sind lichtempfindliche Pigmente – darunter das Chlorophyll: jener Farbstoff, der zum Beispiel heutigen Pflanzen ihren Grünton verleiht.

Es sind Substanzen, die das Sonnenlicht ernten, indem sie dessen Energie über eine hochkomplexe, perfekt abgestimmte Reaktionskette auf andere Stoffe im Inneren der Zelle übertragen. Die molekularen Sonnenkollektoren sind eingebettet in spezialisierte Membranen im Innern der Bakterien. Mehrere Membranschichten durchziehen die Zelle; diese zusätzlichen Lagen vergrößern die lichtempfindliche Oberfläche enorm und damit die Ausbeute an Sonnenlicht.

Der Photosynthese-Apparat der Einzeller ist schließlich so effektiv, dass die Mikroben nicht mehr auf die begrenzten Vorkommen von Schwefelwasserstoff angewiesen sind. Diese neuartigen Organismen, die oft bläulich-grünen Cyanobakterien (von griech. *kyanós* = blau), vermögen mit der Kraft des Lichtes nun einen anderen Ausgangsstoff als Schwefelwasserstoff nutzen.

Eine Substanz, die überall auf der Erde vorkommt: Wasser.

Die Energie des Sonnenlichts versetzt die Bakterien in die Lage, das Wasser in seine Bestandteile aufzuspalten:



Wasserstoff und Sauerstoff. Den Wasserstoff verwerten sie weiter und produzieren daraus in Verbindung mit Kohlendioxid lebenswichtige Zuckermoleküle. Den Sauerstoff hingegen scheiden sie aus.

Dieses farb- und geruchlose Gas wird zum folgenreichsten Abfallprodukt der Evolutionsgeschichte.

DENN WAS die winzigen Organismen von sich geben, hat zu jener Zeit – vor etwa 2,7 Milliarden Jahren – noch Seltenheitswert: Die Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Kohlendioxid und anderen Vulkangasen. Sauerstoff ist dagegen nur in Spuren vorhanden.

Bald jedoch produzieren Cyanobakterien das Gas in Massen. An vielen Küsten der Erde ragen bei Ebbe jetzt seltsame Höcker aus dem Wasser. Es sind gewaltige Kolonien der Mikroben, die auf schichtweise aufgetürmten Ablagerungen ihrer Vorfahren wuchern.

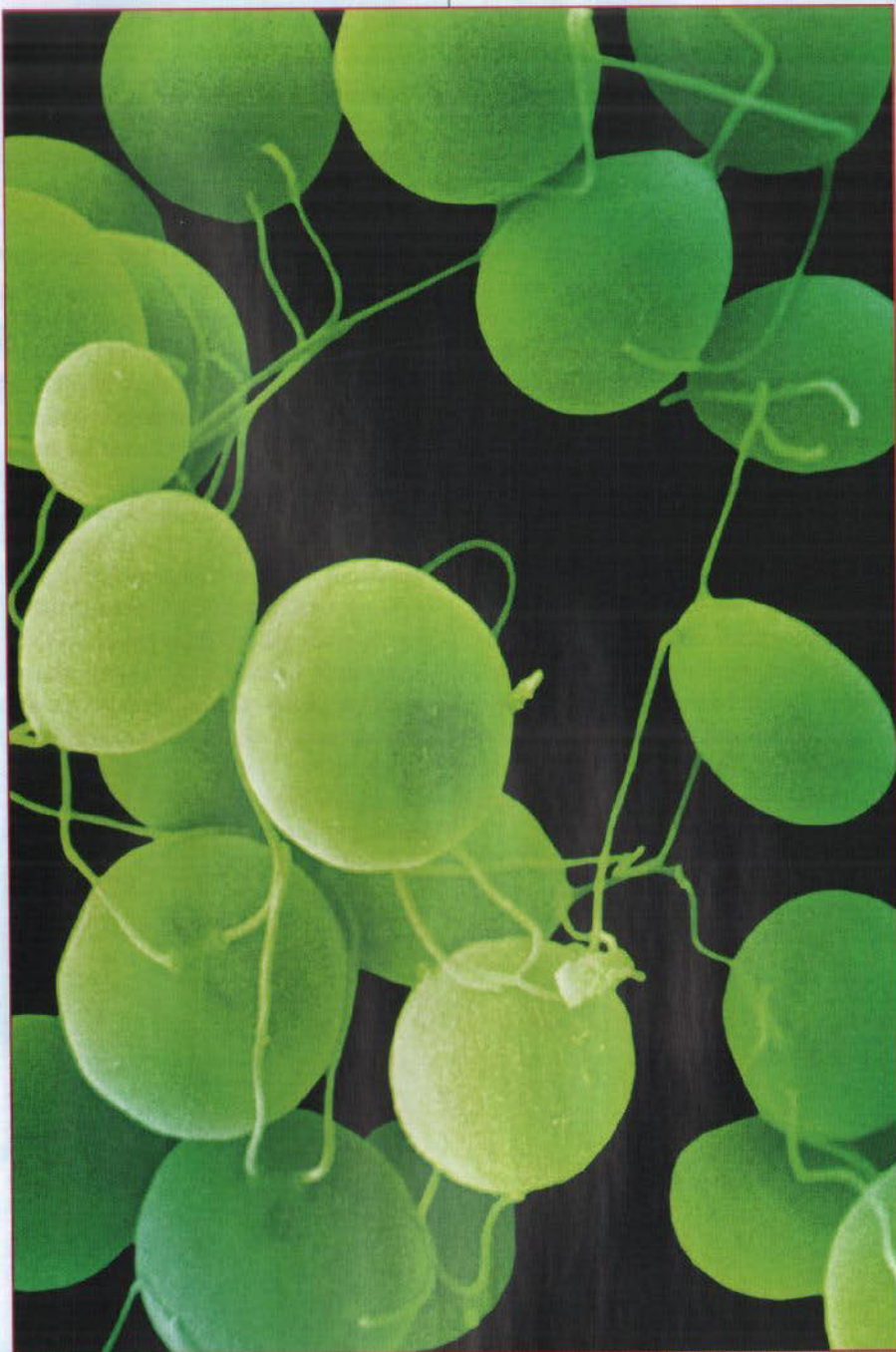
Die oberste Lage dieser Stromatolithen (von griech. *stroma* = Schicht und *lithos* = Stein) besteht aus lebenden Cyanobakterien, der Rest ist versteinert.

Denn durch die Photosynthese verändern die Cyanobakterien in ihrer direkten Umgebung die chemische Beschaffenheit des Meerwassers; als Folge davon setzt sich in den schleimigen Mikroben-Matten Kalk ab. Weil diese Einlagerungen aber das Sonnenlicht blockieren, bilden die Bakterien weiter oben eine neue Schicht, während die alte zu Kalkstein aushärtet.

Lage um Lage wachsen so über Jahrhunderte die steinernen Gebilde heran; im flachen Wasser entstehen urtümliche, von Mikroben geformte Riffe.

Wahrscheinlich besiedeln zugleich andere Cyanobakterien die Küstengewässer. Als Plankton treiben sie in den oberen Schichten des Ozeans. Und auch sie stoßen Sauerstoff aus.

Noch reichert sich das Gas in der Erdatmosphäre aber nicht an. Und das wird sich über Jahrmillionen auch nicht ändern: Denn der Sauerstoff reagiert sofort mit anderen Substanzen; zum Beispiel verbindet er sich mit



Grünalgen, hier der Einzeller *Chlamydomonas*, entwickeln die Photosynthese weiter: Vor 1,8 Milliarden Jahren nehmen ihre Ahnen Cyanobakterien in sich auf. Die wandeln das Sonnenlicht für ihren Wirt zu Energie um – werden zu »Chloroplasten«

dem reichlich im Seewasser gelösten Eisen zu Rost. Der sinkt auf den Meeresgrund nieder und lagert sich dort als Schlamm ab.

Doch schließlich ist das im Ozean gelöste Eisen aufgebraucht; nun steigt der Sauerstoff in die Atmosphäre auf und reichert sich dort immer weiter an.

Zugleich erobern die lichtliebenden Bakterien immer mehr Lebensräume. Denn anders als in der Frühzeit der Erde, als der Ozean nur von einigen Vulkanketten durchbrochen wurde, haben sich seither über etliche Jahrmillionen Kontinente gebildet (siehe auch GEOkompakt „Naturgewalten“). Diese

Landmassen werden von den Mikroben jetzt nach und nach besiedelt.

Auf Tümpeln bilden sich schillernde Filme, auf Flüssen treibt grün-brauner Schaum. Auch diese Ablagerungen bestehen aus Bakterien, die Photosynthese betreiben und Sauerstoff ausscheiden.

Gemeinsam mit ihren Verwandten im Meer verwandeln diese unscheinbaren Geschöpfe in der Ära vor rund 2,4 Milliarden Jahren den Planeten für immer.

Denn mithilfe des Sonnenlichts produzieren sie nun so viel Sauerstoff, dass dessen Konzentration in der Atmosphäre fast sprunghaft ansteigt.

Das Ergebnis der bakteriellen Ausdünstungen ist eine Umweltkatastrophe gewaltigen Ausmaßes, denn für viele Mikroorganismen sind selbst kleinste Sauerstoffmengen tödlich (siehe Seite 72).

Das Gas zerstört ihre Zellen, viele sterben aus, andere ziehen sich in Bereiche ohne Sauerstoff, etwa in tiefe Bodenschichten zurück.

Die Sauerstoff-Revolution verändert nicht nur die Atmosphäre und führt zu einem Massensterben der Mikroben, sondern sie verändert auch das Antlitz der Erde: Das Gas verbindet sich nun mit Eisen im schwarzen Vulkangestein – und bildet rotes Eisenoxid.

Mit anderen Worten: Der gesamte Planet rostet. Bald hat er sich in eine leuchtend rote Welt verwandelt, ähnlich dem heutigen Mars.

Selbst in der oberen Atmosphäre hat das von den Mikroben produzierte Gas weitreichende Folgen. Dort spaltet Sonnenlicht die Sauerstoffmoleküle auf, es entsteht Ozon.

In großer Höhe formt diese unsichtbare Substanz nach und nach eine Schicht, die den Planeten wie eine Hülle umschließt und einen Großteil des schädlichen UV-Lichts herausfiltert. Fortan sind die Lebewesen auf der Erde besser vor dieser tödlichen Strahlung geschützt.

Und schließlich revolutioniert die Photosynthese auch das Leben selbst.

Denn die Bakterien bleiben nicht die einzigen Organismen, die sich das Sonnenlicht zunutze machen – auch wenn es noch rund eine Milliarde Jahre dauert, bis eine neue Klasse lichtliebender Lebewesen entsteht.

DIE ERDE vor etwa 1,8 Milliarden Jahren. Irgendwann kommt es zu einer ungewöhnlichen Kooperation: Ein etwas größerer Einzeller – ein Eukaryot, der bereits einen Zellkern besitzt (siehe Seite 68) – verleiht sich ein Cyanobakterium ein.

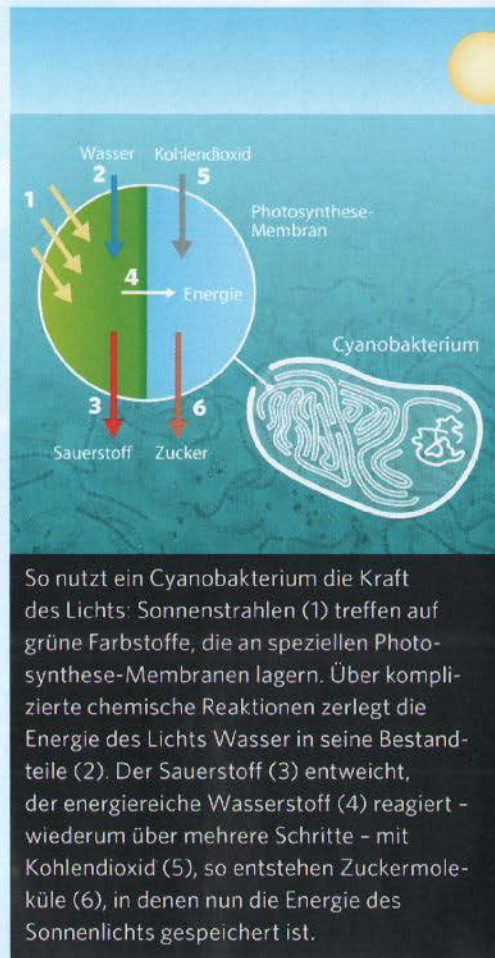
Die Liaison ist ungemein erfolgreich: Im geschützten Inneren der fremden Zelle kann das Bakterium weiter Photosynthese betreiben, während sein Wirt von der gewonnenen Energie profitiert.

Die einverleibten Cyanobakterien, ursprünglich eigenständige Wesen, verwandeln sich mit der Zeit in Zellorgane ihres Wirtes: in Chloroplasten (von griech. *khlōros* = grün und *plastos* = geformt). Dank dieser neuen Organe, in denen die Photosynthese abläuft, können nun auch Eukaryoten die Kraft des Sonnenlichts für sich nutzen.

Auf diese Weise entstehen einzellige Algen, die sich über die Weltmeere ausbreiten – und gewaltige Mengen an Sauerstoff freisetzen.

Der freigesetzte Sauerstoff fördert die Entwicklung neuer Lebensformen

Durch die Algen schnellte die Konzentration des Gases noch weiter nach oben, bis es die Luft ähnlich stark ausfüllt wie auch heute noch – derzeit liegt der Sauerstoffgehalt bei 21 Prozent. Obwohl die Einzeller große Mengen des Gases freisetzen, geht ein Teil des



So nutzt ein Cyanobakterium die Kraft des Lichts: Sonnenstrahlen (1) treffen auf grüne Farbstoffe, die an speziellen Photosynthese-Membranen lagern. Über komplizierte chemische Reaktionen zerlegt die Energie des Lichts Wasser in seine Bestandteile (2). Der Sauerstoff (3) entweicht, der energiereiche Wasserstoff (4) reagiert – wiederum über mehrere Schritte – mit Kohlendioxid (5), so entstehen Zuckermoleküle (6), in denen nun die Energie des Sonnenlichts gespeichert ist.

Sauerstoffs wieder verloren, etwa indem er sich mit frischem, von der Erosion freigelegten Gestein verbindet. So pendeln sich die Ausdünstungen der Algen in der Luft auf beständig hohe Werte ein.

Aus Kolonien der lichtliebenden Winzlinge bilden sich vor etwa 1,2 Milliarden Jahren die ersten mehrzelligen Algen. Und aus ihnen wiederum gehen die Landpflanzen hervor, die vor 460 Millionen Jahren beginnen, die Kontinente zu erobern. Mit deren Siegeszug verwandelt sich der rote Planet in eine grüne Welt.

Vor allem aber: Der von den Cyanobakterien, Algen und Pflanzen produzierte Sauerstoff ermöglicht das Heranreifen völlig neuer Lebensformen.

Denn wie immer in der Evolution entwickeln sich nun Wesen, die mit den veränderten Umweltbedingungen – also

dem für viele andere Organismen giftigen Gas – gut zurechtkommen.

Zu ihnen gehören Wesen, die sich vor 750 Millionen Jahren herausbilden: die Tiere (siehe Seite 72).

Diese neuen Lebensformen vertragen nicht nur die pflanzlichen Ausscheidungen – sie atmen den Sauerstoff sogar ein: Im Laufe der Evolution haben sie gelernt, sich das Gas zunutze zu machen.

Sie ernähren sich von energiereichen Verbindungen wie etwa Zucker, die in dem pflanzlichen Gewebe gespeichert sind. Mithilfe des eingeatmeten Sauerstoffs spalten sie diese Moleküle auf: Aus dieser Reaktion schöpfen sie ihre Lebenskraft.

Memo: **PHOTOSYNTHESE**

- **Anfangs sind** Sonnenstrahlen eine tödliche Bedrohung für das Leben.
- **Die Nutzung des Sonnenlichts** macht das Leben unabhängig von irdischen Energiequellen.
- **Zunächst sind nur Cyanobakterien** zur Photosynthese fähig. Mithilfe von Symbiosen gelingt das später auch höheren Zellen, etwa Algen.
- **Der freigesetzte Sauerstoff** verwandelt die Atmosphäre der Erde.

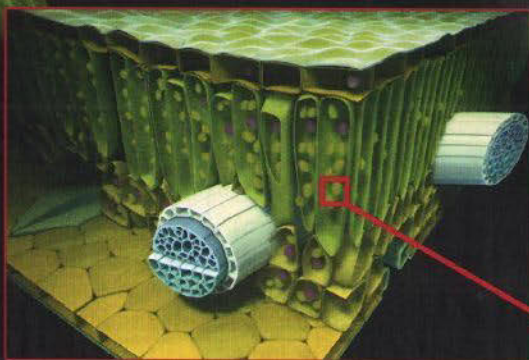
Mit der Kraft des Sauerstoffs vermögen sie nun 18-mal mehr Energie aus ihrer Nahrung zu gewinnen als Organismen, die Zuckermoleküle ohne die Hilfe von Sauerstoff abbauen. Es ist ein gewaltiger evolutionärer Schub für das Leben, das sich jetzt freier als jemals zuvor entfalten kann.

Im Verlauf von einigen Hundert Millionen Jahren – einer kurzen Zeitspanne im Vergleich zum Erdalter von 4,5 Milliarden Jahren – entsteht nun nach und nach eine Welt von enormer Lebensvielfalt. Eine Welt voll üppiger Wälder, weitläufiger Savannen und satter Grasländer. Eine Welt, die Tieren reichlich Nahrung bietet.

Eine Welt, die fast ausschließlich auf einer außerirdischen Energiequelle beruht: der Sonne. □

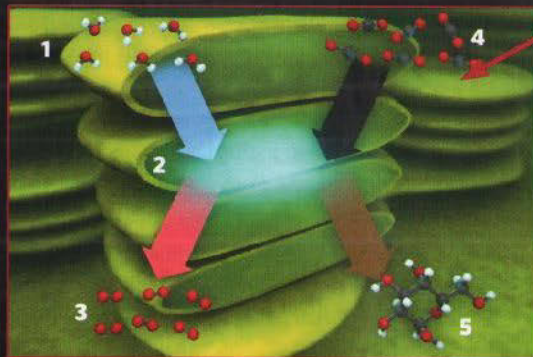
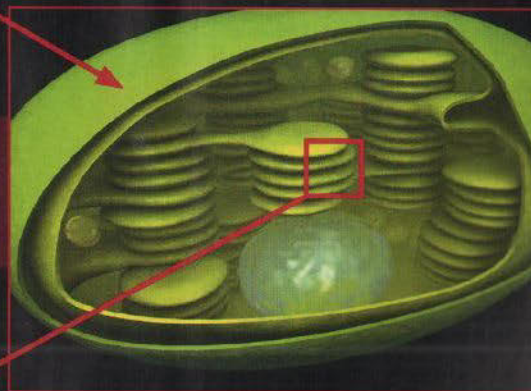
Das grüne Geheimnis

In den modernen Landpflanzen läuft die Photosynthese im Prinzip ähnlich ab wie zu Urzeiten bei den Cyanobakterien. Manche dieser Bakterien wurden einst von den höheren Zellen aufgenommen und leben nun als grünliche Symbionten – »Chloroplasten« genannt – in ihnen. Die Farbstoffe, die die Energie des Sonnenlichts auffangen, sind bei der höheren Pflanze vielfältiger und die biochemischen Reaktionen komplexer. Doch das Resultat der Photosynthese ist ähnlich: Die Pflanze erhält energiereiche Zuckermoleküle. Manche von ihnen dienen dazu, neue organische Moleküle aufzubauen, Zellen zu bilden und zu wachsen. Andere »veratmet« die Pflanze aber auch – unter Sauerstoffverbrauch – und betreibt mit dieser Energie ihre Stoffwechselvorgänge



Sonnenlicht fällt auf die Oberfläche eines Blattes, das aus verschiedenen Zelltypen aufgebaut ist. In den Zellen gibt es spezielle grüne Bestandteile – die Chloroplasten –, die das Licht absorbieren und in denen die Photosynthese stattfindet

In den Chloroplasten liegen eingestülpte Membranen stapelförmig übereinander und vergrößern so die Oberfläche. Sie enthalten den grünen Blattfarbstoff Chlorophyll, der das Sonnenlicht absorbiert und dessen Energie aufnimmt



Mithilfe der Lichtenergie wird Wasser (1) in Wasserstoff (2) und Sauerstoff (3) zerlegt. Danach wird aus dem Wasserstoff und Kohlendioxid (4) Zucker (5) aufgebaut, der nun die Energie enthält. Der Sauerstoff entweicht als Abfall in die Luft

Wie die Zelle zu ihrem **Kern** kam

Wenn ein Lebewesen verschlungen wird, muss das nicht seinen Tod bedeuten. Mehrfach in der Geschichte des Lebens überdauerten Bakterien in der Zelle ihrer Wirte, sie vermehrten sich und spezialisierten sich auf bestimmte Aufgaben. Um die Aktivitäten der Partner zu koordinieren, entwickelte sich eine Steuerzentrale: der Zellkern

Text: Ute Kehse

Nachdem – vor mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren – die ersten Organismen auf der Erde entstanden sind, verfällt die Evolution für Abermillionen Jahre in eine scheinbare Starre.

Das Leben verharrt auf einer Stufe, es entwickelt sich kaum weiter: Die Welt ist bloß bevölkert von Bakterien. Sonst nichts. Zwar vermehren sich die winzigen Einzeller massenhaft, und manche lernen schon bald, die Energie der Sonne zu nutzen, stellen später dabei als Abfallprodukt Sauerstoff her und verwandeln so schließlich die Erdatmosphäre (siehe Seite 60).

Doch sich selbst, ihre Körper verändern sie nicht. Sie bleiben mikroskopisch klein und einfach gebaut: Es sind nichts weiter als stäbchen- oder kugelförmige, mit Flüssigkeit gefüllte Bläschen von wenigen tausendstel Millimeter Länge, in denen Eiweiße und Erbsubstanz herumschwimmen. Rund 1,5 Milliarden Jahre lang.

Dann aber geschieht etwas Revolutionäres: Aus einer einfachen Bakterienzelle entsteht ein neuer, komplexerer Zelltyp. In der Geschichte des Lebens wird damit die nächste Stufe des Seins erklommen.

Während die Bakterienzelle einer kleinen Fabrik gleicht, in der sich sämtliche Prozesse (Energiegewinnung,

Produktion, Verwaltung) in einem einzigen Raum abspielen, ähnelt die neue, komplexe Zelle einem Großbetrieb.

Dort sind die Arbeitsbereiche räumlich voneinander getrennt: Im Zellsaft etwa schwimmen winzige Kraftwerke und produzieren Energie. Und eine Art Blase, der Zellkern, umschließt das Erbgut.

Dieser Kern ist die Steuerzentrale des Betriebs, das Gen-Archiv.

Wissenschaftler nennen den neuen Zelltyp die „eukaryotische“ Zelle (von griech. *eu* = echt und *karyion* = Kern). Es ist diese höhere Zelle mit Kern, die das Prinzip für all jene Organismen schafft, die auch mit bloßem Auge, ohne Mikroskop zu sehen sind: Pflanzen, Pilze, Tiere. Und auch der Mensch.

All diese Lebewesen sind aus eukaryotischen Zellen aufgebaut (Organismen ohne Zellkern – die Bakterien – nennt man „prokaryotisch“).

Die Verwandlung der Bakterienzelle zur komplexen Zelle ist der größte und folgeschwerste Schritt seit

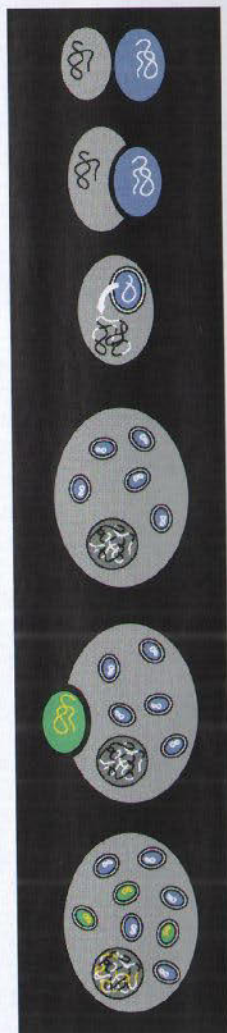
der Geburt des Lebens. In den vergangenen Jahren haben Biologen rekonstruiert, wie sich diese staunenmachende Entwicklung vermutlich abgespielt hat.

WAHRSCHEINLICH BEGINNT jener Aufschwung der Natur vor etwa zwei Milliarden Jahren, als zwei Bakterien, die durch den Urozean schwimmen, aufeinandertreffen.

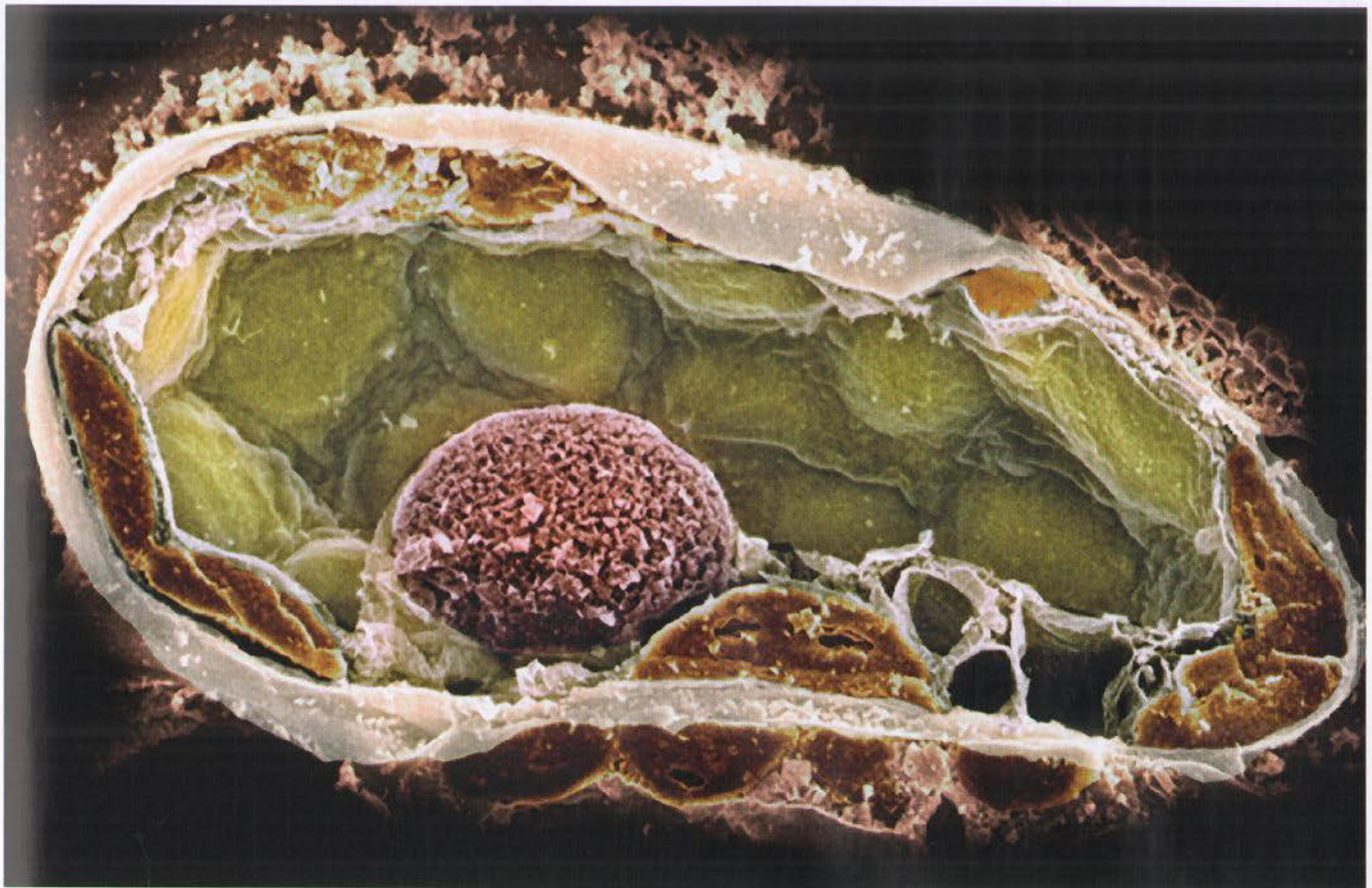
Das eine Bakterium scheidet einen chemischen Stoff aus, den es nicht mehr braucht, ein Abfallprodukt. Das andere wiederum gewinnt genau aus dieser Substanz Energie zum Leben. Und um besonders viel davon aufnehmen zu können, nähert es sich seinem Kraftspender immer weiter an, bis sich die beiden Bakterienzellen berühren.

Vor allem jenes Bakterium, das den Abfall des anderen aufnimmt, zieht einen Vorteil aus der Liaison. Im Laufe vieler Generationen gehen aus ihm Zellen hervor, die ihre Partner immer enger umschlingen – und schließlich schlucken. Diese leben fortan im Inneren der anderen Art: ein Bläschen, das von einem anderen umhüllt wird.

Haben die beiden Zelltypen vorher noch selbstständig leben können, entwickelt sich jetzt mit der Zeit zwischen



So bildete sich einst die höhere Zelle: Ein Bakterium (blau) wurde von einem zweiten (grau) aufgenommen und ein Teil seines Erbguts (weißer Faden) in das des Wirts (schwarzer Faden) eingebaut; ein Zellkern als Steuerzentrale entstand. Das kleinere Bakterium übernahm die Energieversorgung und vervielfältigte sich. Manche dieser nun höheren Zellen nahmen zudem ein Cyanobakterium (grün) auf. Dieses entwickelte sich zu einem weiteren Zellorgan, dem Chloroplasten, der mithilfe des Sonnenlichts organische Moleküle aufzubauen vermochte und die Zelle (aus der sich später Pflanzen entwickelten) damit versorgte



Eine Pflanzenzelle im Elektronenmikroskop: Der Zellkern (purpurfarben) ist die Steuerzentrale, Chloroplasten (braun) nutzen die Energie des Sonnenlichts, eine Wand (hellgrau) stabilisiert die Zelle, die Vakuole (grün) speichert Nutz- oder Abfallstoffe

ihnen eine Symbiose: Die Wirtszelle muss ihren eingeschlossenen Gast versorgen, um selbst überleben zu können.

Nach und nach verliert der Eindringling viele seiner nun überflüssigen Fähigkeiten. Am Ende bleibt nur eine einzige Aufgabe übrig: Er stellt Energie in Form der chemischen Verbindung ATP (Adenosintriphosphat) her, eines universellen Energieträgers, den alle Zellen als Treibstoff für die Vorgänge des Lebens nutzen. Das hergestellte ATP gibt er wiederum an seinen Wirt ab.

Eine wechselseitige Abhängigkeit ist entstanden – und eine Aufgabenteilung: Der Wirt liefert Nahrung, der Gast Energie, er hat sich zu einem kleinen Kraftwerk gewandelt. Zu einem kornförmigen Gebilde, das Wissenschaftler „Mitochondrium“ nennen (von griech. *mítos* = Faden und *chondros* = Korn).

Doch so sehr die Partner mittlerweile miteinander verschmolzen sind, sie vermögen sich noch immer – unabhängig voneinander – zu vermehren. Dafür

schnüren sie sich einfach in der Mitte ein: Zwei Tochterzellen entstehen.

Wieder und wieder teilt sich auf diese Weise das Mitochondrium. Mit der Zeit existiert nicht mehr nur ein Kraftwerk im Inneren des Wirtes, sondern es gibt Dutzende bis Hunderte. Und teilt sich die Wirtszelle, bleiben in jeder ihrer Tochterzellen ein paar Mitochondrien eingeschlossen.

Doch wenn eines der kleinen Kraftwerke stirbt und sich auflöst, ergießt es seinen Inhalt, etwa Eiweißstoffe oder Erb moleküle, in die Wirtszelle.

DAS SETZT einen erstaunlichen Prozess in Gang: Denn manche dieser Erbgut-Schnipsel, die aus den verendeten Mitochondrien ausfließen, dringen in das Erbmaterial der Wirtszelle ein und verschmelzen mit ihm.

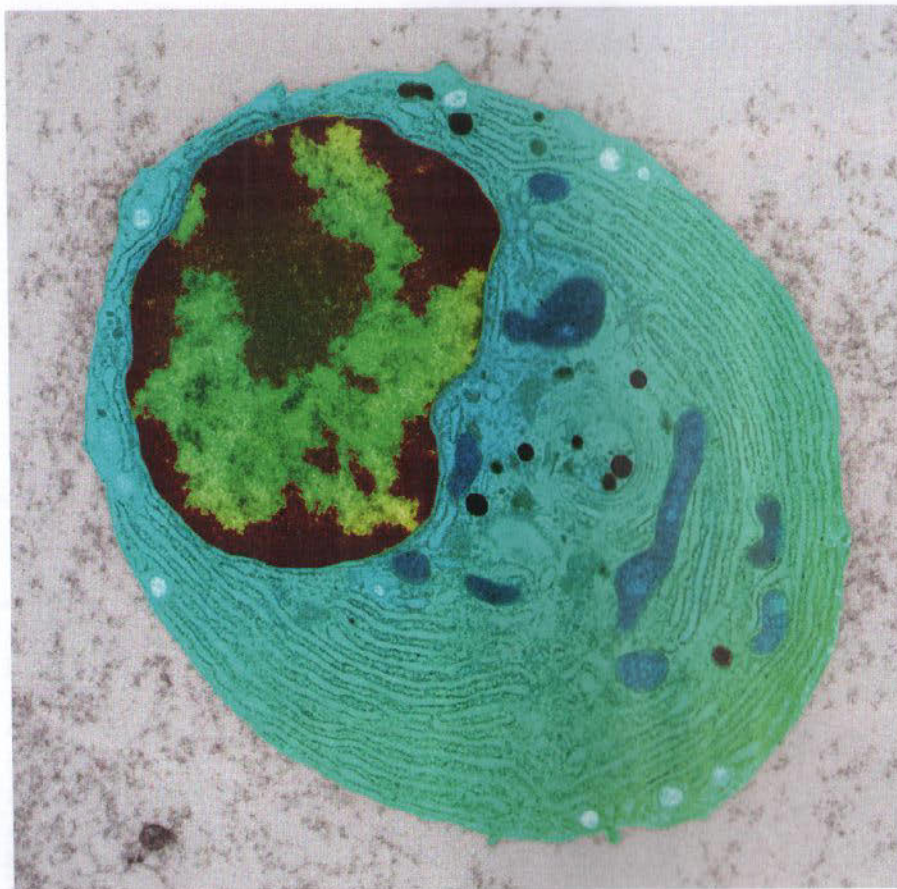
Diese fremden Gene erweitern das Repertoire der Wirtszelle: Fortan vermag auch sie Stoffe herzustellen, die zuvor nur von den Zellkraftwerken

produziert wurden. Dadurch gewinnt sie allmählich die Kontrolle über den Stoffwechsel ihrer Symbionten.

Doch der Gen-Transfer ist nicht ungefährlich: Denn in den Erbinformationen der Mitochondrien befinden sich auch virusähnliche Schnipsel, die sich selbst vervielfältigen. Das Erbgut der Wirtszelle wird von diesem Müll geradezu überschwemmt. Mit dem Resultat, dass andere Gene gestört werden und der Stoffwechsel durcheinander gerät.

Vermutlich ist es dieses biochemische Chaos, das eine entscheidende Neuerung herbeiführt: Die Wirtszelle umhüllt ihr Erbmaterial mit einer schützenden Membran, schottet ihre Gene von allen anderen Bereichen in ihrem Inneren ab – in einer Art Blase, einem neuen Organ. Dem Zellkern.

Der Kern dient der Zelle fortan als Steuerzentrale. Kein Stoff kann sich noch durch Zufall ins Erbgut verirren. Ein Gen-Archiv ist geschaffen. Neben den Energie produzierenden Mitochon-



Diese Zelle des Abwehrsystems enthält einen großen Kern (schwarz) mit Erbsubstanz (dunkelgrün). In einem stark ausgeprägten Membransystem (dunkle Linien) stellt sie massenhaft Eiweiße gegen Krankheitserreger her. Die bakterienähnlichen Mitochondrien (blau) liefern Energie

drien gibt es in dem Betrieb „Zelle“ jetzt also eine weitere Abteilung.

MIT DIESEM SCHRITT beginnt ein neues Kapitel in der Geschichte des Lebens: Die eukaryotische Zelle ist entstanden – mit eigenen Energiekraftwerken, einem enorm umfangreichen Repertoire an Erbinformationen und einer genetischen Steuerzentrale.

Nunmehr sind Verwaltung und Produktion strikt voneinander getrennt: Im Kern werden die Gene verwaltet – und jedes Mal, wenn der Betrieb „Zelle“ eine Erbinformation zum Bau eines Eiweißstoffes braucht, wird diese Information durch winzige Poren in der Kernhülle nach draußen geschleust. Erst dort, im Zellsaft, läuft die Produktion an. Also außerhalb des Kerns.

Wissenschaftler vermuten, dass eben diese räumlich getrennte Arbeitsteilung sowie das verschmolzene Erbgut der zwei ehemaligen Bakterien der höheren

Zelle völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Denn zeitgleich mit der Entstehung der Kernhülle reifen weitere Strukturen im Inneren der Zelle: Ein ganzes Netz aus Membranen wächst heran.

Und die Evolution experimentiert wieder: Aus den Membranen entstehen zusätzliche Zellorgane – darunter solche, die sich um die Beseitigung von Abfallstoffen kümmern, also so etwas wie Zell-Nieren. Oder Stapel von flachgedrückten Membranen, die mit der Herstellung von Sekreten beschäftigt sind, gleichsam Zell-Drüsen (siehe Seite 80).

Zudem wachsen eukaryotische Zellen im Urozean zu immer größeren Wesen heran. Denn manche beherbergen Hunderte, ja Tausende Mitochondrien, die weitaus mehr Energie produzieren als ein einzelnes Bakterium. Zwar bleiben auch die höheren Zellen nur Millimeterbruchteile groß, aber im Verhältnis zu Bakterien sind sie so riesig wie eine Katze im Vergleich zu einer Fliege.

Schon bald nach ihrer Genese entwickeln die noch jungen eukaryotischen Zellen eine neue Ernährungsstrategie, auf die Bakterien nie gekommen sind: Sie stellen anderen Zellen nach, umschließen sie – und fressen sie auf.

Diese Taktik führt wenige Millionen Jahre nach der Erfindung des Zellkerns zu einer weiteren Innovation: Ein Eukaryot verleiht sich ein Cyanobakterium ein – eine jener Mikroben, die Photosynthese betreiben, also die Energie der Sonne nutzen, um körpereigene Substanzen herzustellen (siehe Seite 60). Dieses Bakterium schafft es, im Inneren des Feindes zu überleben.

Und ähnlich wie zuvor die Mitochondrien werden die Cyanobakterien schließlich zu einem Teil der Wirtszelle. Zu neuen Zell-Organen, den grünen Chloroplasten. Mit ihnen sind die Wirtszellen nicht mehr darauf angewiesen, andere Lebewesen oder deren Überreste zu fressen. Sie können nun die Energie des Sonnenlichts nutzen, um ihre Nahrung aus Kohlendioxid und Wasser selbst zusammenzusetzen.

Diese Gruppe der höheren Zellen bildet die Vorfahren der Pflanzen.

Und ohne den Experimentalerfolg der eukaryotischen Zellen wäre der nächste wichtige Evolutionsschritt wohl nicht möglich gewesen: die Entstehung mehrzelliger Organismen (siehe Seite 72). Denn erst die außerordentliche Komplexität der einzelnen Zelle schafft die Grundlage für Wesen aus Abertausenden dieser Bausteine.

Einige Forscher vermuten gar, dass nicht die Entstehung des Lebens selbst das größte Wunder der Evolution war – sondern die Geburt der Zelle mit Kern.

Gut möglich, dass sich Organismen auf vielen anderen Planeten im All entwickelt haben. Die Verwandlung der einfachen in die höhere Zelle aber ist so komplex, ja so unwahrscheinlich, dass außerirdisches Leben – sofern es denn existiert – sich wohl nirgendwo über das Stadium von Bakterienzellen erhoben hat. □

Ute Kehse, 41, ist Wissenschaftsjournalistin in Delmenhorst. Wissenschaftliche Beratung: Dr. William Martin, Institut für Botanik III, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.



GEOkompakt-Sammelbox + »Die 100 wichtigsten Erfindungen«

Diese praktische Sammelbox schützt Ihre wertvolle Sammlung vor Staub und gibt bis zu 7 Hefen einen sicheren Stand. Gratis dazu erhalten Sie die Ausgabe »Die 100 wichtigsten Erfindungen«.



Radio »Cube«

Dieses stilvolle Radio passt mit seiner Retro-Holzoptik in jeden modernen Haushalt. Mit AM-/FM-Tuner und Anschlussmöglichkeit für MP3-Player. Inklusive Batterien. Maße: ca. 11x9x9 cm.

Gratis zur Wahl!



Kamera »Funshooter«

Die kultige Kamera macht mit ihren vier Linsen per Knopfdruck gleich vier Fotos auf einmal, die dann auf einem Abzug als Bilderserie erscheinen. Ideal für spontane Schnappschüsse! Maße ca.: 11 x 7 x 3,5 cm.



Neu!

Grillbesteck

Mit diesem praktischen Grillbesteck haben Sie als Grillmaster immer alles perfekt im Griff: 3-teiliges Grillbesteck, bestehend aus Wender, Grillzange und -gabel. Aus Edelstahl. Lieferung im hochwertigen Aluminiumkoffer.

GEOkompakt – Wissen frei Haus!

Jetzt über 8% sparen + Wunschgeschenk sichern.

Ihre GEOkompakt-Vorteile:

- Ein Geschenk zur Wahl gratis!
- Sie sparen über 8%!
- Lieferung frei Haus!
- Nach 4 Ausgaben jederzeit kündbar!
- Geld-zurück-Garantie für zu viel bezahlte Hefte!

Abonnenten-Service Österreich
Tel.: 0820/00 10 85
Geo-kompakt@abo-service.at
Leser-Service Schweiz
Tel.: 041/329 22 20
Geo-kompakt@leserservice.ch

Bitte Bestellnummer aus dem
Vorteils coupon angeben.

Weitere Angebote unter
www.geokompakt.de/abo

Verlag: Gruner+Jahr AG & Co KG, Dr. Gerd Brüne,
Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, AG Hamburg,
HRA 102257.
Vertrieb: DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH,
Dr. Olaf Conrad, Düsternstr. 1, 20355 Hamburg,
AG Hamburg, HRB 95 752.

14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz,
max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.

GEOkompakt-Vorteils coupon

Ja, ich möchte GEOkompakt selbst lesen oder verschenken für zzt. nur € 7,75 je Ausgabe statt € 8,50 (D)/zzt. € 8,95 statt € 9,80 (A)/zzt. Fr. 16,- statt Fr. 17,60 (CH). Als Dankeschön für meine Bestellung erhalte ich ein Geschenk meiner Wahl nach Zahlungseingang gratis. Nach einem Jahr kann ich jederzeit kündigen. GEOkompakt erscheint zzt. 4x jährlich. Alle Preise inkl. Zustellung und MwSt.

Mein Geschenk: ☐ Sammelbox + Heft ☐ Radio »Cube« ☐ Kamera »Funshooter« oder ☐ Grillbesteck (bitte nur ein Kreuz).

Meine Adresse: Bitte auf jeden Fall ausfüllen!

Name, Vorname

Straße/Nr.

PLZ

Wohnort

E-Mail-Adresse

Geburtsdatum

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner+Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

☐ Ich möchte ein **Studentenabo**, 4 Ausgaben für zzt. jährlich nur € 26,- (D). Ich spare über 23% gegenüber dem Einzelkauf. Bitte Immatrikulationsbescheinigung mitschicken.

Ich zahle bequem per Bankeinzug:

Bankleitzahl

Kontonummer

Geldinstitut

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung beim GEOkompakt Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum

Unterschrift

711067

Anschrift des Geschenkempfängers:

Bitte nur ausfüllen, wenn Sie GEOkompakt verschenken möchten.

Name

Vorname

Straße/Nr.

PLZ Wohnort

Geburtsdatum

711069

711068



Vorteils coupon einsenden an:
GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg



Oder anrufen unter:
01805/861 80 00*



Einfach per E-Mail:
Geo-kompakt-Service@guj.de

Pflanzen und Tiere

Die zweite Schöpfung

Die ersten Vielzeller
der Erdgeschichte ähneln
vermutlich diesen
modernen Volvox-Algen



Es ist eine Revolution
im Ozean. Durch eine Art genetischen Unfall entwickeln sich
vor gut 1,2 Milliarden Jahren aus
Zellen mit Kern primitive
Haufen, aus denen nach und nach
komplexere Geschöpfe reifen –
die ersten Pflanzen und Tiere.
Mit ihnen kommt der Sex in die
Welt. Und der Tod

Die Katastrophe, die vor etwas mehr als zwei Milliarden Jahren über die Erde hereinbricht, ist lautlos. Und absolut tödlich. Schleichend rafft sie die Pioniere des Lebens dahin, die zigmilliardenfach die Ozeane bevölkern: marine Einzeller.

Der Tod steigt aus dem Meer auf als hochgiftiges Gas: Es ist Sauerstoff, der sich nun in der Atmosphäre verteilt und sie nach und nach ebenso verändert wie das Antlitz der Erde.

Der einstmals düstere, heiße, rotbraune Planet, umgeben von einem Gemisch aus Methan, Stickstoff und Kohlendioxid, erscheint nun blau und hell. Denn der Sauerstoff vertreibt Methan und Kohlendioxid und bildet in der Höhe die Ozonschicht, die die Erde fortan gegen die harte UV-Strahlung der Sonne schützt.

Der unsichtbaren Lebensfülle in den Ozeanen aber bringt er den Tod. Nur wenige Organismen überleben diese tiefgreifende Veränderung. Doch zugleich schafft das Gas die Bedingungen für neues Leben – in unvorstellbarer Vielfalt.

Der Sauerstoff wird von Cyanobakterien produziert: Einzellern ohne Zellkern, die Photosynthese betreiben (siehe Seite 60). Wie trübe Schleier schwimmen sie im Wasser oder überziehen als grüne Kolonien knapp unterhalb der Meeresoberfläche die Felsen.

Die Cyanobakterien sind der einzige sichtbare Hinweis darauf, dass es auf diesem öden Himmelskörper noch mehr gibt als nur Wasser und Fels, Staub und Vulkane.

Irgendwann in den 600 Millionen Jahren nach der Sauerstoffkatastrophe beginnt eine Gruppe von Einzellern mit eigenem Zellkern, also Eukaryoten, sich Cyanobakterien einzuverleiben. Fortan liefern ihnen die Einzeller mittels Photosynthese jene Energie, die sie zum Leben brauchen.

Und so treiben im Urmeer schon bald Milliarden Sauerstoff produzierende Mikroorganismen mit Zellkern.

Sie sind die Vorfahren der Pflanzen.

Denn eines Tages kommt es bei einigen zu einer Mutation im Erbgut: Bei dem Versuch, sich durch Zellteilung zu vermehren, spalten sich diese Einzeller nicht wie sonst üblich. Stattdessen bleiben die Tochterzellen miteinander verbunden wie siamesische Zwillinge, ausgestattet mit identischem Erbgut. Sie werden zu *Mehrzellern*.

Die Mutation, einmal im Genom verankert, setzt sich fort – die miteinander verbundenen Zellen sind noch alle gleich und schützen sich nun schon allein durch ihre Größe vor Fressfeinden. Der Schritt zum echten *Vielzeller* aber steht noch aus, denn dafür ist nicht die Zahl der Zellen maßgebend, sondern die Anzahl der verschiedenen Zelltypen, die im Verband unterschiedliche Aufgaben übernehmen.

Dieser entscheidende Schritt findet bei den Zellen, die Photosynthese betreiben, vor vermutlich 1,2 Milliarden Jahren statt: Denn aus diesen losen Verbänden formen sich zum einen winzige Kugeln aus 100, vielleicht 1000 Zellen.

**Winzige Kugeln
treiben im Ozean:
die ersten
vielzelligen Algen
der Geschichte**

Zum anderen entstehen – durch weitere Mutationen – größere und kleinere Zellen.

Im Laufe der Zeit entwickeln sich diese Zellen immer weiter auseinander und teilen die Arbeit auf: Manche etwa besitzen kleine Geißeln, mit denen sie rudern, andere bilden stärkere Zellwände und stützen damit die äußere Hülle.

Auf diese Weise entsteht erstmals eine komplexe Alge, ein echter Vielzeller: der Urahn der Landpflanzen.

Dies ist nach der Entwicklung des Zellkerns ein weiterer großer Sprung des sich entwickelnden Lebens auf dem Planeten Erde.

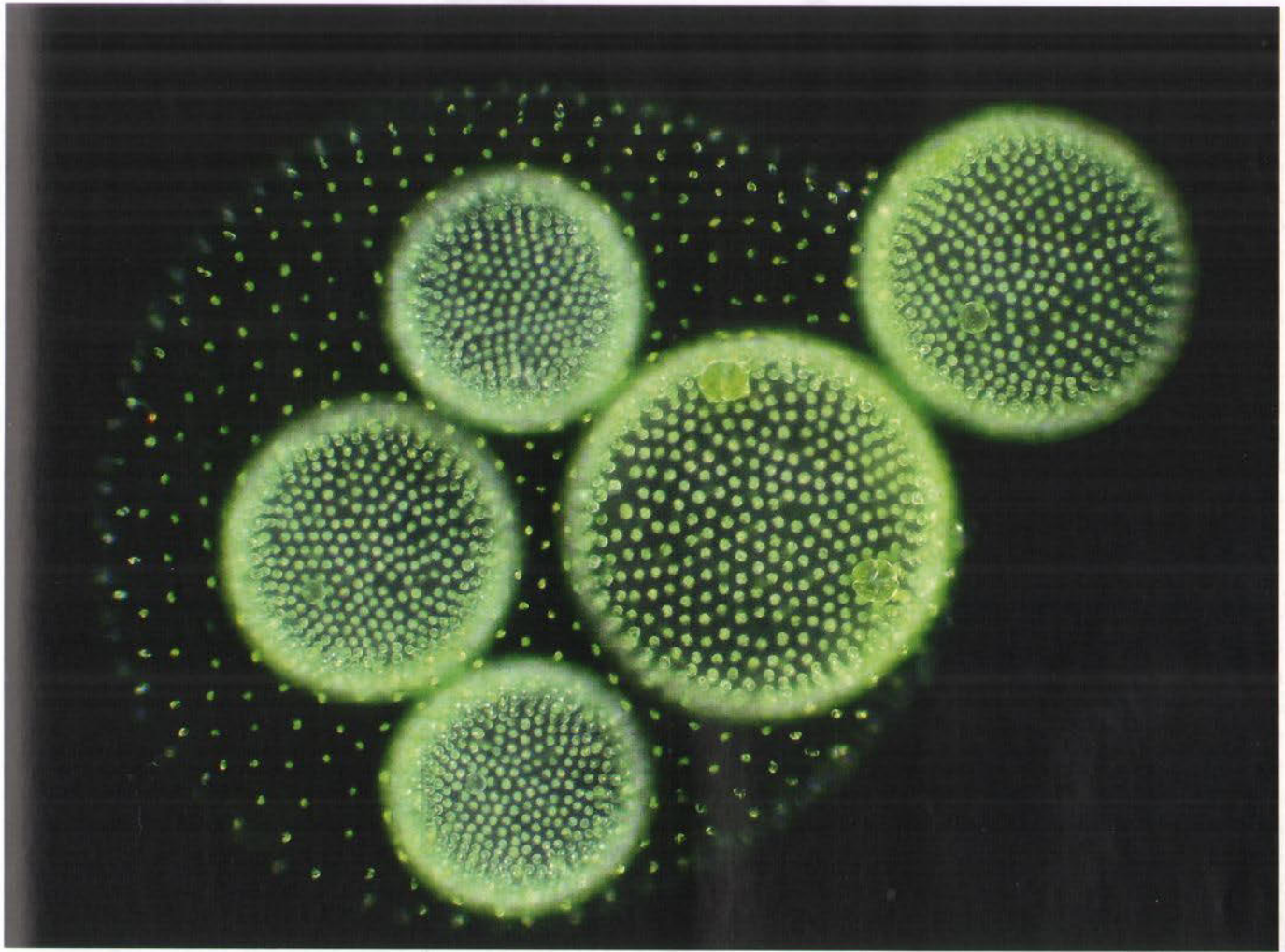
DIE WINZIGEN grünen Organismen betreiben zudem etwas, das ihre Evolution beschleunigt: Sie haben Sex.

Sie bilden Keimzellen (Ei- und Samenzellen), die miteinander verschmelzen und dabei das Erbgut zweier Individuen mischen. Zwar haben bereits zuvor einzellige Organismen genetisches Material untereinander ausgetauscht, also eine Urform von Sex betrieben. Doch anders als diese Einzeller verbinden die Vielzeller den Sex mit Fortpflanzung: Aus der befruchteten Eizelle erwächst eine neue vielzellige Kugel.

Durch den Sex bildet sich eine Fülle genetischer Varianten und Kombinationen. Mitunter kommt es dabei zu Mutationen, die eine Anpassung an sich wandelnde Umweltbedingungen ermöglichen. Im Laufe der Zeit entstehen so neue Arten.

Die Verschmelzung zweier Keimzellen hat neben der Vermischung der Erbanlagen noch einen weiteren Vorteil. Denn die Zusammenkunft von Eizelle und Spermium bedeutet auch: Die Erbanlagen gibt es in der befruchteten Eizelle nun zweimal (eine von der Mutter und eine vom Vater). Jedes Gen also liegt doppelt vor. Eines von ihnen wird gebraucht, während das andere mutieren kann.

Aus evolutionärer Sicht bringen Vielzelligkeit und Sex immense Vorteile



Wie diese millimetergroßen Volvox-Algen sind auch die ersten vielzelligen Organismen aus spezialisierten Zellen aufgebaut, die im Verbund unterschiedliche Aufgaben erfüllen: Manche stabilisieren die äußere Hülle, andere dienen mit ihren winzigen Geißeln der Fortbewegung, wieder andere übernehmen die Verarbeitung von Nahrung oder organisieren die Fortpflanzung. Denn während viele Einzeller Vermehrung und Sex (also das Mischen von Erbgut) trennen, sind beide Vorgänge bei den Vielzellern zumeist gekoppelt: Sie bilden entweder Klone ihrer selbst (in diesem Bild verlassen identische Tochterkolonien die Mutterkugel), oder sie betreiben Sex

für das Überleben einer Art. Aus Sicht des Individuums folgt daraus jedoch etwas, das dem Leben gänzlich entgegensteht: der Tod.

Ein asexuelles Bakterium – ein einzelliges Wesen also – teilt sich in zwei Tochterzellen, und die wiederum bringen ebenfalls Tochterzellen hervor. Alle diese Zellen sind genetisch völlig identisch. Denn das eigene Erbgut wird nicht durch Sex vermischt. Daher kann ein Bakterium im Prinzip ewig leben, sofern es nicht – etwa durch Gift oder Hitze – zugrunde geht.

Ein sich sexuell vermehrender Organismus dagegen muss über kurz oder lang sterben. Denn seine Zellen spe-

zialisieren sich – manche auf die Fortbewegung, andere aufs Fressen, wieder andere bilden Fasern.

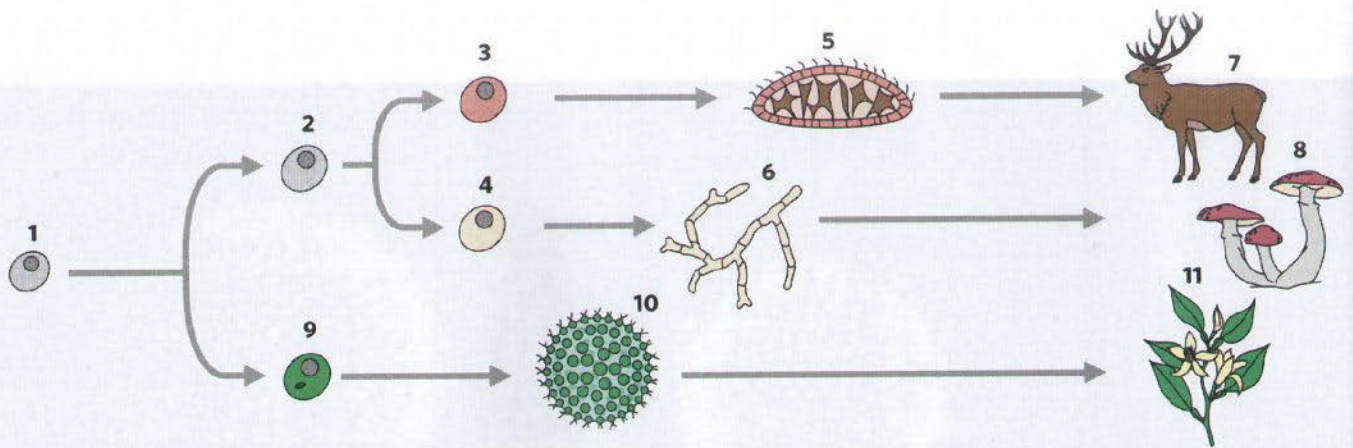
Das ist lebenswichtig für jeden vielzelligen Organismus, der sich von Ort zu Ort bewegt, der eine schützende Hülle braucht und Nahrung aufnehmen muss.

Doch mit der Spezialisierung verliert fast jede seiner Zellen eine entscheidende Fähigkeit: Sie kann sich zwar oftmals noch teilen, aber aus den Tochterzellen kann kein neuer Organismus mehr heranreifen. Die Zellen altern also und sterben schließlich.

Dafür, dass eine Art nicht ausstirbt, sorgen nun deren Geschlechtszellen.

So entwickeln sich also zeitgleich mit den vielzelligen Urahnen der Pflanzen auch jene beiden Merkmale, die bis heute fast alles Leben auf der Erde bestimmen: der zur Fortpflanzung dienende Sex und der unvermeidliche Tod des Individuums.

DIE KLEINEN, kugelförmigen Vielzeller, die vermutlich heutigen Volvox-Algen ähneln, treiben mit den Strömungen der See. Sie bedecken als dichte Matten große Teile des Meeresbodens. Und sie werden an die Küsten gespült, wo sie in den Brandungszonen feste Algentepiche bilden, den Gezeiten, dem Sonnenlicht, trockener Kälte ausgesetzt.



Genese von Tieren, Pilzen und Pflanzen: Aus einzelligen Wesen mit Zellkern (1) entwickeln sich über Zwischenstadien (2-4) die ersten Urtiere (5) und Urpilze (6). Daraus entstehen sämtliche Tiere (7)

und Pilze (8). Die Evolution der Pflanzen verläuft eigenständig über einen einzelligen Vorläufer (9), aus dem kugelige Algenvorfahren hervorgehen (10), die Urhaken sämtlicher Gewächse (11)

Und wo sie sich anpassen müssen und beispielsweise ihre Oberflächen vergrößern, die das Sonnenlicht einfangen. Denn um zu überleben, brauchen die sich entwickelnden Vorfahren der Pflanzen immer mehr Energie – und setzen dabei immer mehr Kohlendioxid in Sauerstoff um.

So schaffen sie gleichsam nebenbei die Voraussetzungen dafür, dass sich alsbald die nächsten Zweige des Lebens bilden können.

Wieder sind es vielzellige Wesen, die sich da entwickeln – praktisch auf dem gleichen Weg wie die Algen. Doch diese Einzeller haben sich keine Cyanobakterien einverleibt. Sie vermögen sich also nicht wie die Pflanzen-Vorfahren allein durch Minerale, Wasser und Licht am Leben zu erhalten. Stattdessen beziehen sie ihre Energie, indem sie sich von an-

deren Lebewesen oder deren Überresten ernähren und sich dabei ihre Nahrung gezielt aussuchen – ein entscheidender Unterschied zu den Gewächsen.

Diese neuen Vielzeller sind: die Vorläufer der Tiere.

DIE GESCHICHTE der Tierahnen beginnt vor etwa 750 Millionen Jahren. Auf der Erde sind fast alle Landmassen im Superkontinent Rodinia konzentriert, der wie eine riesige Brücke zwischen Süd- und Nordpol liegt. Es ist zu jener Zeit sehr kalt auf der Erde, ihr urzeitliches Weltmeer ist überwiegend mit Eis bedeckt.

Doch in diesem eisigen Meer, unter derart unwirtlichen Bedingungen formt sich um diese Zeit aus kleinen Zellhaufen der erste tierische Vielzeller. Er entsteht wahrscheinlich aus Choano-

flagellaten, winzigen Einzellern, die über eine Geißel verfügen, mit deren Hilfe sie sich fortbewegen, festhalten oder Nahrung – Algen und Bakterien – herbeistrudeln.

Die Entwicklung des ersten tierischen Vielzelllers kann man sich etwa so vorstellen: Ein Choanoflagellat teilt sich, aber wie schon bei der Entstehung der Pflanzen-Vorfahren trennen sich auch hier die beiden Tochterzellen nicht.

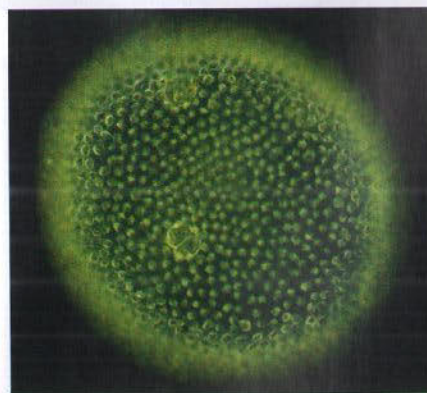
Stattdessen teilen sich die siamesischen Tochterzellen wieder und wieder, so wie ihr biologisches Programm es vorsieht: Es entstehen immer neue Zellen, mit identischem Erbgut.

Aus diesen Zellen bildet sich allmählich ein im Meer treibender Zellhaufen.

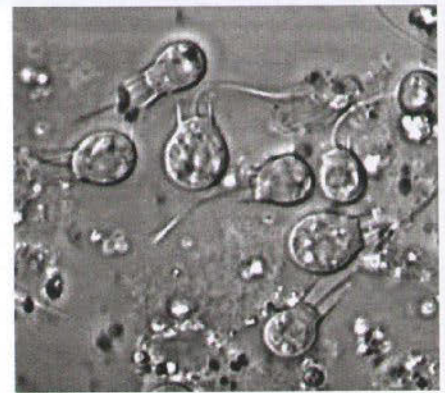
Und irgendwann bleibt diese winzig kleine Einzeller-Kolonie am Ufer hängen. Verklammert sich mit den Geißeln



So wie die Süßwasseralge Chlamydomonas, die energiereiche Zucker per Photosynthese gewinnt, könnten die einzelligen Pflanzenvorläufer ausgesehen haben



Die nächste Entwicklungsstufe in der Pflanzenevolution: Wie diese Volvox-Alge hatten auch die ersten vielzelligen Gewächse spezialisierte Zellen



Die einzelligen Choanoflagellaten existieren bereits seit mehr als 600 Millionen Jahren. Aus ihnen haben sich womöglich die ersten tierischen Vielzeller gebildet

seiner Mitglieder vielleicht in einer nahrhaften Algen- oder Bakterienmatte; bleibt vielleicht an einem Felsen kleben oder an einem urzeitlichen Riff.

Jedenfalls hat sich für diesen Zellverband – so zumindest eine der gängigen Thesen – die Situation jetzt entscheidend verändert: Die eine Schicht seiner Körperzellen ist nach wie vor dem Wasser zugewandt. Die andere aber dem Boden.

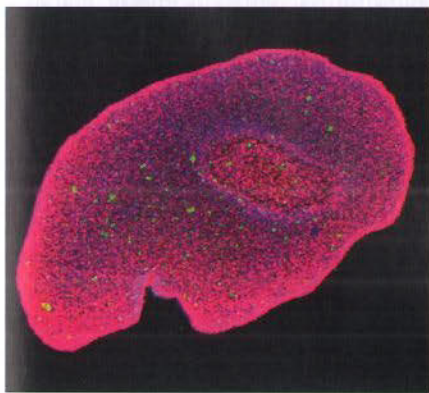
Jene Zellen der Kolonie, die auf dem Untergrund aufliegen, entwickeln sich nun anders als die, die dem Wasser zugekehrt sind. Mit der Zeit modifizieren sie sich, die unteren werden beispielsweise zu Fress- oder Bewegungszellen.

Und da sich die Zellen immer weiter differenzieren und sich die einzelnen Einheiten nun die Arbeit aufteilen, wird aus dieser Ansammlung von Zellen – genau wie im Pflanzenreich – ein echter, komplex gebauter Vielzeller.

Das Urtier.

Wie dieser Organismus genau beschaffen ist, kann niemand sagen, denn er hat keinerlei Spuren hinterlassen. Dieser Urahn der Tiere ist ein kleiner Organismus aus vielleicht ein paar Hundert Zellen, die nur zu zwei, höchstens drei Zelltypen gehören (zum Vergleich: Der Mensch besteht aus geschätzten 100 Billionen Zellen, verteilt auf mehr als 200 Zellarten).

Zudem verfügt er über nichts, auf das die Nachwelt stoßen könnte: keine feste Schale, kein Körpergerüst, schon gar keinen Knochen, der im weichen Sedi-



Scheibentiere, hier der mikroskopisch kleine *Trichoplax adhaerens*, existieren seit 600 Millionen Jahren und könnten die ersten vielzelligen Urtiere gewesen sein

Das Urtier ist quasi unsterblich – solange es auf Sex verzichtet

ment einen Abdruck hinterlassen hätte, um Zigmillionen Jahre später als mikroskopisch kleines Fossil wiedergefunden zu werden (die bislang ältesten mutmaßlichen tierischen Kriechspuren finden sich erst in 565 Millionen Jahre altem, versteinertem Meeresboden).

Manche Zoologen gehen davon aus, dass es sich beim Urahn der Fauna um ein Scheibentier handelt: einen flachen Organismus, der über den Boden kriecht. Von seiner Lebensweise können sich die Biologen inzwischen ein recht gutes Bild machen, denn sein möglicherweise nächster Nachfahr existiert noch heute – ein seltsames Wesen, in fast allen Meeren zu Hause, aber so klein, dass es mit bloßem Auge nur schwer zu erkennen ist. Sein Name: *Trichoplax adhaerens* („klebende, haarige Platte“).

Trichoplax ist der bislang einzige wissenschaftlich ausgiebig erforschte Vertreter aus dem Stamm der Scheibentiere. Molekulargenetische Tests haben ergeben, dass er vor etwa 600 Millionen Jahren entstanden sein muss.

Damit, so Bernd Schierwater von der Tierärztlichen Hochschule Hannover, ist er „vom Bauplan her ein lebendes Fossil, denn es hat sich in 600 Millionen Jahren nicht grundlegend verändert“.

Was bedeuten würde: *Trichoplax* ist das lebende Fossil. Der älteste noch existierende Tierahn der Welt. Der Bio-

loge erforscht das Urtier seit inzwischen mehr als 20 Jahren. „Es ist im Keller“, sagt er, „Sie können es sehen.“

SCHIERWATERS INSTITUT für Tierökologie und Zellbiologie residiert in einer ehemaligen Fabrikantenvilla. In einem Keller stehen Regale mit Hunderten Glasschälchen, allesamt voller Salzwasser. Am Boden kleine, sich langsam bewegende Flecken. So leben sie also, die ältesten Tiere der Erde.

Alle Schälchen beherbergen Scheibentiere, aber nicht nur *Trichoplax adhaerens*: Gemeinsam mit Kollegen und Helfern hat Bernd Schierwater in den vergangenen Jahren 17 genetisch unterschiedliche Spezies gefunden.

„Wir gehen davon aus, dass der Stamm mehr als 100 Tierarten umfasst“, sagt der 51-Jährige. Einige sind so anspruchslos, dass sie in allen warmen Meeren vorkommen, andere reagieren schon auf kleinste Temperaturschwankungen empfindlich. Manche, wie *Trichoplax*, sind Allesfresser, andere bevorzugen Grünalgen.

Aber alle sind nach dem gleichen archaischen Bauplan konstruiert.

So bestehen *Trichoplax* und seine Verwandten aus drei Zellschichten, in denen lediglich fünf Zelltypen vorkommen. Aus zweien ist die Außenhaut des Tieres aufgebaut – jeweils ein Typ für die Ober-, ein anderer für die Unterseite. Sie sind mit Zilien besetzt, die bei der Fortbewegung helfen.

Zwischen den beiden Schichten liegt eine Lage Faserzellen, die dem Scheibentier ermöglichen, sich zusammenzuziehen und seine Form zu verändern. Etwa, wenn es Nahrung aufnimmt, wofür wiederum Fresszellen zuständig sind: der vierte Zelltyp.

Zum Fressen kriecht *Trichoplax* über eine Alge oder schleimigen Bodensatz und macht gleichsam einen Buckel, wobei die Fresszellen an der Unterseite ein Enzym absondern, das die Nahrung zersetzt. So kann sie durch die Zellmembran aufgenommen werden.

Den fünften Zelltyp hat Schierwaters Gruppe erst kürzlich entdeckt. Es ist eine Art Proto-Stammzelle, aus der sich alle anderen Zellen entwickeln können.

Unter dem Mikroskop auf dem Arbeitstisch beginnen die kleinen Placken

in ihren Schalen zu leben. Es ist wie ein Blick zurück in die Zeit vor gut 600 Millionen Jahren.

Ein rosafarbenes Scheibchen macht sich über eine Rotalge her. Ein anderes, nicht weit entfernt, teilt sich gerade.

„Scheibentiere können sich sowohl durch Teilung wie geschlechtlich fortpflanzen“, erzählt Schierwater: „Ich vermute, dass sie zwittrig sind“ – also doppelgeschlechtlich – und so noch keine getrennten Geschlechter ausgebildet haben.

Was dieses Tier jedoch am stärksten von fast allen anderen Lebewesen unterscheidet, ist seine fehlende Symmetrie: Es hat noch keine Körperachse, es kann seine Form verändern.

Gerade das, glaubt Schierwater, macht es zum perfekten Grundbaustein der Evolution: „Trichoplax kann man strecken, stauchen, hochziehen oder einrollen. Wenn etwas noch nichts ist, kann daraus noch alles werden.“

Die Außenzellen zum Beispiel konnten sich sowohl zu Haut- wie zu Gerüstzellen weiterentwickeln. Rund 60 Millionen Jahre später – im Kambrium, als fast alle Baupläne entstanden, nach

sind bereits jene Gene aktiviert, die bei späteren Lebewesen im Zusammenhang mit den Nervenzellen stehen“, erläutert Schierwater: Sie enthalten die Bauleitungen für Rezeptoren, Signalstoffe und Ionenkanäle.

Zudem fanden die Biologen bei den rätselhaften Urtieren aktive Opsin-Gene. Opsin ist ein nahezu in allen Tiergruppen vorhandenes Eiweiß, das etwa in der menschlichen Netzhaut ein Segment der lichtempfindlichen Pigmente bildet. Liegt hier die Antwort auf die Frage, weshalb Scheibentiere auf mechanische und chemische Reize reagieren, ohne Sinneszellen zu besitzen? Und wieso sie sich zum Licht hin bewegen, obwohl sie keine Sehzellen haben?

Überhaupt barg das Genom von Trichoplax und Co. für die Wissenschaftler die allergrößten Überraschungen: Erstaunliche 11 514 Gene konnte Bernd Schierwaters Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit US-Wissenschaftlern im Erbgut der Urtiere identifizieren. „Der Mensch“, sagt der Biologe, „ist unvergleichlich komplexer. Aber er besitzt nur etwa doppelt so viele Gene.“

Bis jetzt haben die Forscher erst 4000 Trichoplax-Gene als aktiv nachgewiesen, doch wie es scheint, sind nicht nur die Bausteine der Nerven- und Sehzellen im Urtiergenom bereits angelegt, sondern auch die Prototypen aller wichtigen Genfamilien der höheren Lebewesen. Auch das Ur-Gen für die Festlegung der Körperachse, also den Sitz von Kopf und Schwanz sowie Rücken und Bauch, fanden die Forscher bereits.

Wenn aber all diese Anlagen vor mehr als 600 Millionen Jahren schon vorhanden waren – warum haben die Urtiere sie dann nicht auch genutzt?

„Das wollen wir herausfinden“, sagt Schierwater, „die Antwort wäre unglaublich spannend. Möglicherweise hatten diese Gene bei den Scheibentieren noch ursprüngliche Aufgaben, die sich erst im Lauf der Evolution veränderten.“ Denn die Komplexität eines Tieres entstehe ja nicht aus der großen Zahl seiner Erbanlagen, sondern aus deren Interaktionen.

Sicher sei jedenfalls: „Mit dem Scheibentier als Grundbaustein waren alle wesentlichen Voraussetzungen geschaf-

fen, um die Bauplanvielfalt geradezu explodieren zu lassen.“

Zu jener Zeit, als die tierischen Vielzeller entstanden, veränderte sich die Erde: Vulkane brannten sich durch das Eis, stießen Kohlendioxid aus. So erwärmte sich die Erdatmosphäre, das Eis taute, dunkler Boden wurde wieder frei.

Die Sonnenstrahlen wurden nun nicht mehr ungenutzt ins All reflektiert, sondern ließen den Planeten weiter auftauern: Wie in einem Treibhaus stieg die Temperatur. Der Großkontinent Rodinia wurde von den Kräften des Erdmantels auseinandergerissen. Im Meerwasser trieben Algen, Bakterien, Flagellaten und kleine Zellhaufen, am Grund weideten die Scheibentiere.

Das Leben hatte nun viel Zeit für genetische Experimente. Und für jede Lebensform, die entstand, fand sich irgendwo eine ökologische Nische, in der sie versuchen konnte, sich festzusetzen.

Und obwohl sich Scheibentiere auch ungeschlechtlich fortpflanzen konnten, kam es wohl auch bei ihnen (wie schon lange zuvor bei den Algen) zu jener Zusammenkunft, die ihre Evolution entscheidend vorantrieb: Sie hatten, so vermutet Schierwater, als erste Tiere Sex. „Wie die geschlechtliche Vermehrung genau vonstatten geht, wissen wir noch nicht“, sagt der Forscher.

Denn die Scheibentiere produzieren männliche und weibliche Keimzellen. Sobald ein Spermium mit einer Eizelle verschmilzt, entsteht – wie bei den Algen auch – ein von Individuum zu Individuum unterschiedlicher Mix aus mütterlichen und väterlichen Anlagen.

Es bilden sich also neue genetische Varianten, die im Laufe der Zeit neue Arten entstehen lassen.

UND NOCH EIN Merkmal in der Entwicklungsgeschichte der Tiere wird sich womöglich mithilfe der kleinen, haarigen Placken im Keller der Hannoveraner Villa erklären lassen: Wieso sich im Verlauf der Evolution im Tierreich höchst komplizierte Organe offenbar mehrfach entwickelt haben.

So ähnelt beispielsweise das Auge des Menschen in seiner Funktionsweise prinzipiell dem des Oktopus, aber beide

Memo: **DIE ERSTEN VIELZELLER**

► **Vor 1,2 Milliarden Jahren** entwickeln sich aus Einzellern durch Mutation die ersten Mehrzeller; es sind die Ahnen der Pflanzen.

► **Manche Zellen** dieser Organismen übernehmen bald unterschiedliche Aufgaben; es entstehen komplexere Wesen: Vielzeller.

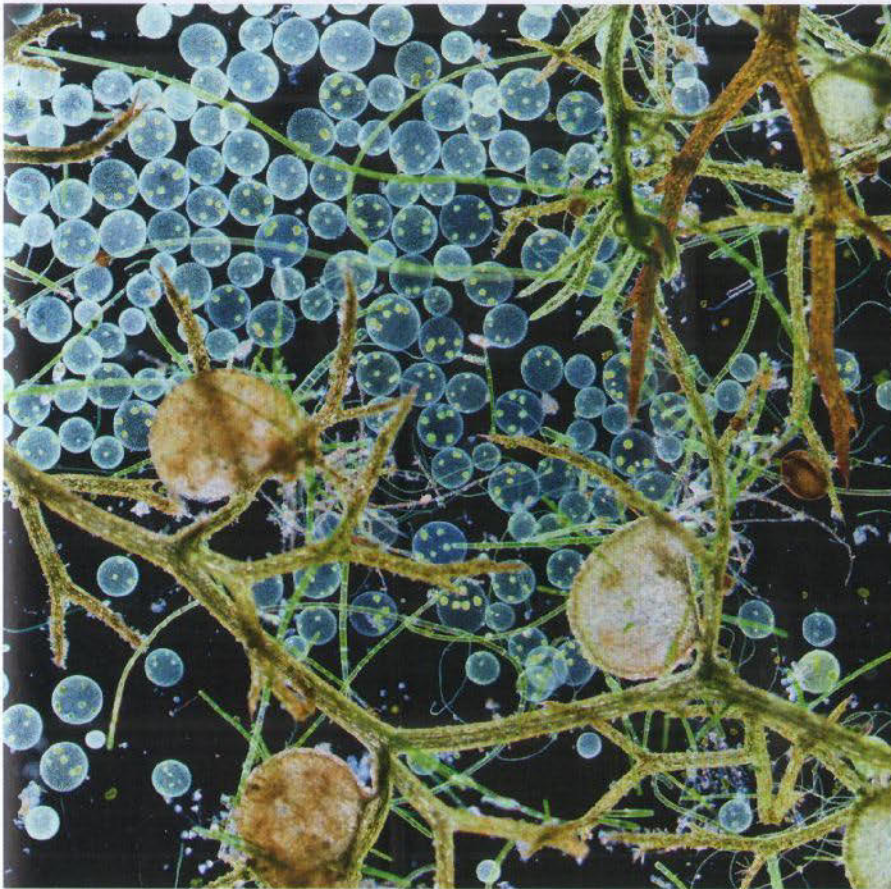
► **Einzeller sind** im Prinzip unsterblich, Vielzeller altern und verenden.

► **Erst dank der Vielzelligkeit** sind unterschiedliche Körperformen möglich.

► **Die ersten Tiere** bestehen aus drei bis fünf verschiedenen Zelltypen, der heutige Mensch aus mehr als 200.

denen das tierische Leben bis heute konstruiert ist – bildeten sich daraus einerseits die harten Chitinschilde der an Bakterienriffen krabbelnden Trilobiten, andererseits die vergleichsweise zarte Haut der Urfische (siehe Seite 84).

Die Faserzellen der Scheibentiere halten die Wissenschaftler wiederum für Vorläufer der Muskel- und der Nervenzellen. „Denn in den Faserzellen



Die ersten komplexen Wesen der Erdgeschichte sind die Ahnen der Pflanzen, Organismen, die Photosynthese betreiben. Ihre Formenfülle hat sich bis heute erhalten – von einfachen Volvox-Algen (blau) bis zu Gewächsen wie dem Wasserschlauch (grünliche Äste), der kleine Wassertiere zu erbeuten vermag

sind unterschiedlich aufgebaut und dazu komplett anders konstruiert als etwa die Augen der Insekten (siehe Seite 120).

Viele Evolutionsbiologen nehmen auch heute noch an, dass aus dem allerersten tierischen Vielzeller erst die Schwämme hervorgegangen sind, aus denen die Scheibentiere, Rippenquallen, dann die Nesseltiere, Kiemenlochter, Stachelhäuter und Skeletttiere – ein Prozess also, bei dem aus dem Einfachen stets das Kompliziertere erwuchs.

Bernd Schierwaters Forschungen hingegen liefern eine neue Sicht auf den Gang der Evolution, die ihre einzelnen Glieder dabei nicht in einer Reihe anordnet. Sondern einige nebeneinander, sodass auch das Komplizierte neben dem Einfachen existieren kann.

Die neue Sicht macht aus dem Stammbaum des Lebens also einen Stammbusch.

Denn wenn wie bei Trichoplax viele unterschiedliche Merkmale im Genom bereits angelegt sind – dann können sich diese Urwesen auch parallel und zeitgleich in alle möglichen Richtungen entwickeln. Und am Ende können auch ein Krake und ein *Homo sapiens* mit funktionsähnlichen Sehorganen herauskommen und die Fliege mit vollkommen anderen, weil das gleiche Gen aus dem Erbgut des gemeinsamen Urahnen lediglich anders genutzt wird.

Woraus folgt: Wenn die Urform der Scheibentiere am Beginn der Entwicklung steht, müssen daraus im Verlauf der tierischen Evolution mindestens zwei Entwicklungslinien entstanden sein. In beiden entwickelten sich Körperformen, Sinneszellen, Verdauungssysteme – allerdings grundverschieden.

Die einen werden in der Gruppe der einfach gebauten niederen Tiere zusam-

mengefasst: Scheibentiere, Schwämme, Rippenquallen, Nesseltiere.

In der anderen Gruppe versammeln sich die höheren Tiere: Insekten, Würmer, Stacheltiere, Skeletttiere.

Zudem ist es gut möglich, dass sich aus diesem Urvielzeller noch weitere Linien des Lebens gebildet haben, die heute verschwunden sind, von deren Existenz nur geheimnisvolle Spuren in Millionen Jahre altem Gestein zeugen.

Zum Beispiel in den Ediacara-Hügeln in Südastralien. Paläontologen haben dort die Abdrücke von großen, aber sehr zarten Organismen entdeckt, die seltsame Formen aufweisen. Viele sehen aus wie Luftmatratzen: Wesen aus zusammenhängenden Hohlkammern. Andere ähneln Federn, die wohl auf dem Meeresboden wuchsen. Wieder andere haben Ähnlichkeit mit Seelilien. Doch waren sie möglicherweise beweglich und hinterließen Schlurfsuren im Sediment. In den unterseeischen Wäldern aus Luftmatratzen, Federn und Seelilien, die sich sanft in der Dünung wiegten, schwammen runde Lebewesen und solche, die eine seltsame 120-Grad-Rotationssymmetrie aufwiesen.

Abdrücke dieser exotischen Fauna finden sich auch an anderen Orten der Erde, die Ozeane der Erd-Urzeit werden voll davon gewesen sein. Doch bis heute wissen die Forscher nicht, ob es sich bei diesen Geschöpfen überhaupt um Tiere handelte. Nirgendwo finden sie Mundöffnungen oder Gliedmaßen. Einige Paläontologen halten diese Wesen für Kolonien aus Einzellern, andere ordnen sie einem eigenen Reich zu, neben Tieren, Pflanzen und Pilzen.

Bernd Schierwater vermutet, dass die geheimnisvollen Ediacara-Wesen aus dem Ur-Vielzeller hervorgegangen sind. Sie wären damit gleichsam die Schwestern der späteren Tiere.

Welche Katastrophe aber einst zu ihrem Verschwinden geführt hat und ob sie plötzlich hereingebrochen ist, das kann selbst Schierwater noch nicht beantworten. □

Der Hamburger Wissenschaftsjournalist **Jürgen Bischoff**, 55, schreibt regelmäßig für GEOkompakt. Mitarbeit: **Susanne Gilges**. Fachliche Beratung: Prof. Dr. Bernd Schierwater, Leiter des Instituts für Tierökologie und Zellbiologie in Hannover.

Die Bausteine des Lebens

Die Zellen von Tieren und Pflanzen sind hochkomplexe Gebilde: In ihnen arbeiten winzige, perfekt aufeinander abgestimmte Organe. Sie halten jede Zelle am Leben und ermöglichen es letztlich, dass Myriaden dieser Bausteine einen Körper bilden können

Illustrationen: Jochen Stuhmann

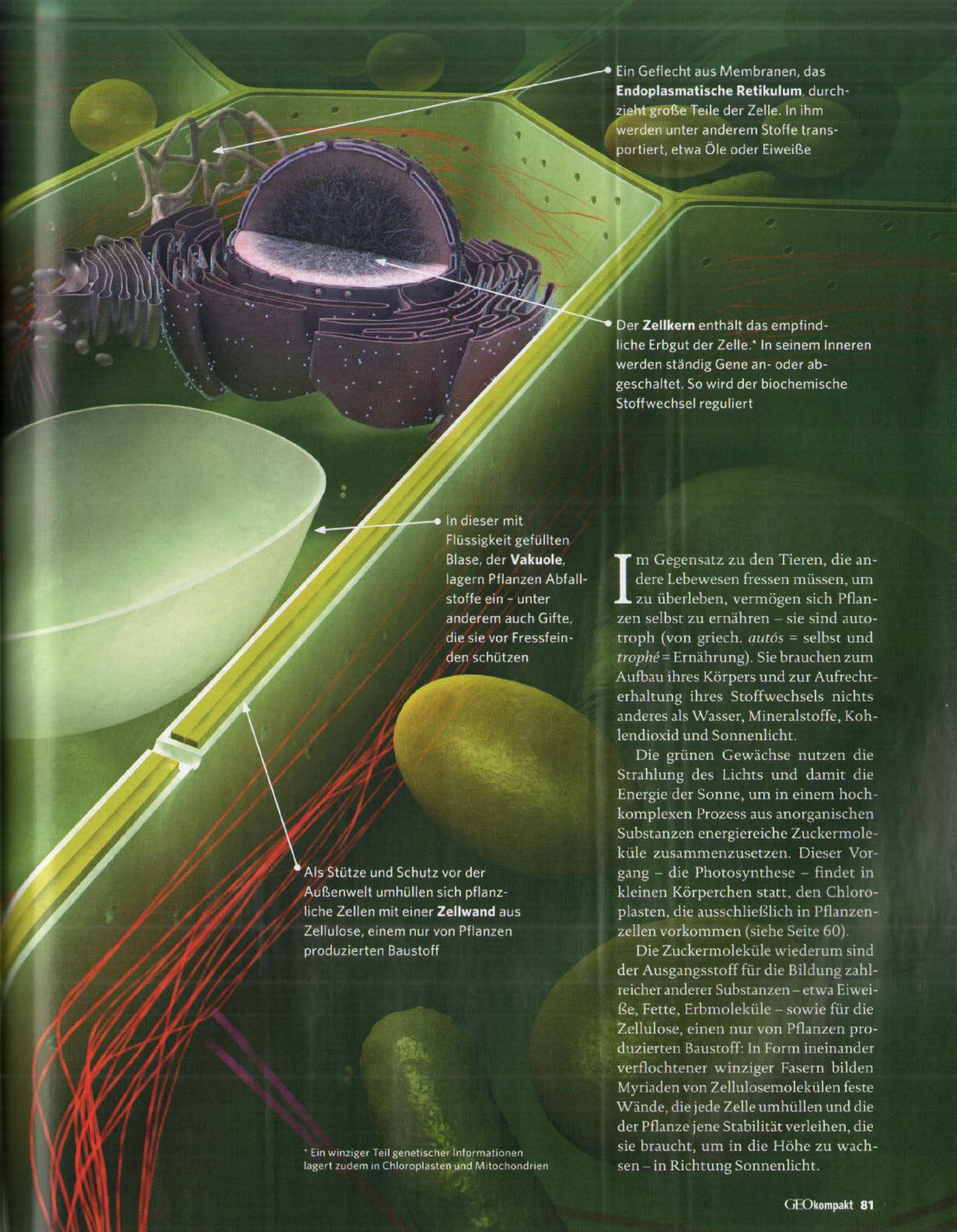
Texte: Rainer Harf

Jede Zelle wird von einem Gerüst aus dünnen Fasern gestützt, dem **Cytoskelett**. An diesen Molekülsträngen gleiten auch Stoffe entlang, die innerhalb der Zelle befördert werden müssen

Nur pflanzliche Zellen besitzen **Chloroplasten**: Organe, in denen Licht, Wasser und Kohlendioxid per Photosynthese in Zucker umgewandelt werden

Die **Mitochondrien** sind gleichsam die Kraftwerke einer Zelle: Hier werden Substanzen wie Zucker aufgespalten. Die gewonnene Energie wird genutzt, um andere Verbindungen aufzubauen

Um einen funktionsfähigen Organismus am Leben zu erhalten, müssen die Zellen der Pflanze Stoffe, Informationen und Signale untereinander austauschen. Dies geschieht über winzige **Poren** in der Zellwand



• Ein Geflecht aus Membranen, das **Endoplasmatische Retikulum**, durchzieht große Teile der Zelle. In ihm werden unter anderem Stoffe transportiert, etwa Öle oder Eiweiße

• Der **Zellkern** enthält das empfindliche Erbgut der Zelle.* In seinem Inneren werden ständig Gene an- oder abgeschaltet. So wird der biochemische Stoffwechsel reguliert

• In dieser mit Flüssigkeit gefüllten Blase, der **Vakuole**, lagern Pflanzen Abfallstoffe ein – unter anderem auch Gifte, die sie vor Fressfeinden schützen

• Als Stütze und Schutz vor der Außenwelt umhüllen sich pflanzliche Zellen mit einer **Zellwand** aus Zellulose, einem nur von Pflanzen produzierten Baustoff

Im Gegensatz zu den Tieren, die andere Lebewesen fressen müssen, um zu überleben, vermögen sich Pflanzen selbst zu ernähren – sie sind autotroph (von griech. *autós* = selbst und *trophé* = Ernährung). Sie brauchen zum Aufbau ihres Körpers und zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels nichts anderes als Wasser, Mineralstoffe, Kohlendioxid und Sonnenlicht.

Die grünen Gewächse nutzen die Strahlung des Lichts und damit die Energie der Sonne, um in einem hochkomplexen Prozess aus anorganischen Substanzen energiereiche Zuckermoleküle zusammenzusetzen. Dieser Vorgang – die Photosynthese – findet in kleinen Körperchen statt, den Chloroplasten, die ausschließlich in Pflanzenzellen vorkommen (siehe Seite 60).

Die Zuckermoleküle wiederum sind der Ausgangsstoff für die Bildung zahlreicher anderer Substanzen – etwa Eiweiße, Fette, Erb moleküle – sowie für die Zellulose, einen nur von Pflanzen produzierten Baustoff: In Form ineinander verflochtener winziger Fasern bilden Myriaden von Zellulosemolekülen feste Wände, die jede Zelle umhüllen und die der Pflanze jene Stabilität verleihen, die sie braucht, um in die Höhe zu wachsen – in Richtung Sonnenlicht.


* Ein winziger Teil genetischer Informationen lagert zudem in Chloroplasten und Mitochondrien

Auch in der tierischen Zelle ist die wichtigste Steuerzentrale der **Kern**, in dem das Erbgut lagert. Von dort gelangen durch winzige Poren genetische Informationen nach draußen

Bei Pflanzen wie bei Tieren sind die Zellen durchzogen vom **Endoplasmatischen Retikulum**, einem Netz miteinander verwobener Membranen, in denen etwa Öle und Hormone hergestellt und Gifte unschädlich gemacht werden

Jede Vermehrung und Zellteilung ist ein komplexer Vorgang: Zwei rechtwinklig zueinander stehende Körper, die **Centriolen**, bilden röhrenförmige Strukturen aus, die bei diesem Prozess helfen

Ein Netz aus Eiweißfasern spannt sich durch den Zellsaft: Dieses **Cytoskelett** verleiht der Zelle Form und dient unter anderem dem Transport von Bläschen des Golgi-Apparates zur Plasmamembran



In diesem Stapel von Membranen, dem nach seinem Entdecker benannten **Golgi-Apparat**, werden in der Zelle gebildete Eiweiße mitunter für den Transport nach außen vorbereitet (um etwa zur Plasmamembran zu gelangen) und in kleine Bläschen verpackt, die auf einer Seite des Stapels abgeschnürt werden

Zahlreiche kleine Bläschen, die **Lysosomen** (von griech. *lysis* = Auflösung), schwimmen in der tierischen Zelle. Sie sind mit Säure und Enzymen gefüllt, die alle möglichen Stoffe abbauen, darunter Eiweiße und Fette, um diese dann verwerten zu können

Kein Tier vermag zu überleben, ohne energiereiche, organische Nahrung – etwa Blätter oder Fleisch – aufzunehmen. Im Gegensatz zu den selbsternährenden Pflanzen sind Tiere folglich heterotroph (von griech. *hēteros* = fremd und *trophē* = Ernährung). Die gefressene Kost verdauen sie meist in Magen und Darm. Dort werden große Biomoleküle wie Zellulose, Stärke oder Fette in kleinere Verbindungen aufgespalten, sodass diese in die Blutbahn gelangen können. Mit dem Blutstrom erreichen die organischen Verbindungen jede einzelne Zelle im Körper des Organismus.

Dort sorgen bestimmte Zellorgane, die Mitochondrien, dafür, dass die Energie aus den aufgenommenen Biomolekülen in den Stoffwechsel der Zelle eingespeist wird – und letztlich für den Aufbau anderer lebenswichtiger Moleküle (darunter Eiweiße oder tierische Öle) zur Verfügung steht. Und nicht nur im Darm, auch innerhalb der Zelle werden Stoffe verdaut: In kleinen Bläschen, den Lysosomen, bauen Enzyme Nahrungspartikel oder beschädigte Zellorgane ab, damit sie anschließend wieder verwertet werden können. □

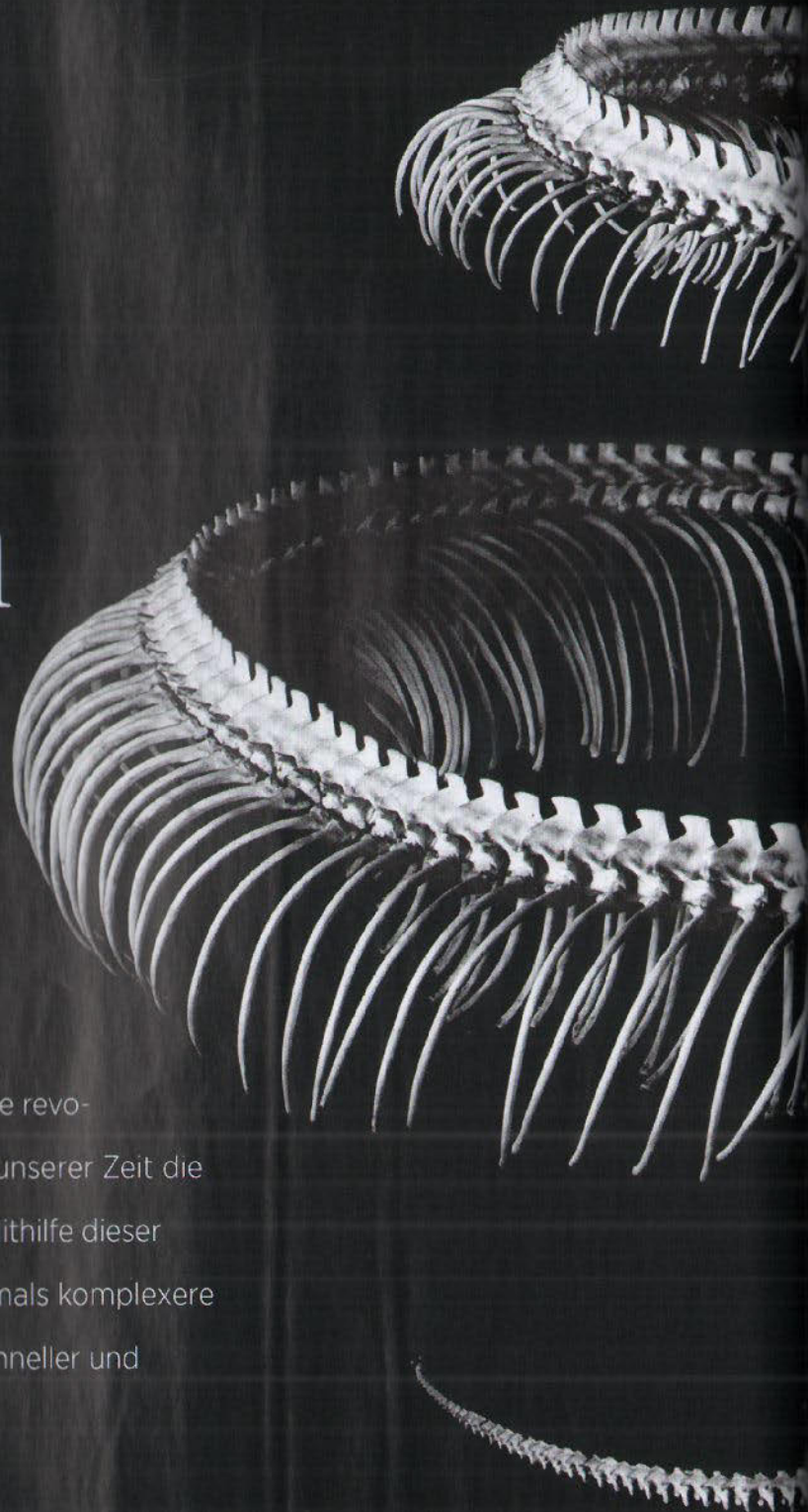
Anders als pflanzliche Zellen besitzen tierische keine Zellwand. Sie sind umhüllt von der flexiblen **Plasmamembran**, die aus fettähnlichen Substanzen (Lipiden) und Eiweißen besteht und durch die nur bestimmte Stoffe hindurchgelangen

Ein Merkmal aller höheren – auch der tierischen – Zellen sind **Mitochondrien** (von griech. *chondros* = Korn). Manche Zellen (unter anderem in Muskeln oder Nerven) besitzen mehr als 1000 der kleinen Kraftwerke

Skelett

Die Stütze der Evolution

Zwei Arten innovativer Körpergerüste revolutionieren 500 Millionen Jahre vor unserer Zeit die Tierwelt: Außen- und Innenskelett. Mithilfe dieser Stützen vermögen Lebewesen erstmals komplexere Körper auszubilden – und größer, schneller und widerstandsfähiger zu werden





Das Rückgrat dieses 2,30 Meter langen Pythons, das aus mehreren Hundert Wirbeln besteht, geht zurück auf einen simplen, kaum drei Zentimeter langen Stab aus Bindegewebe: die *Chorda dorsalis*, die es bereits vor 530 Millionen Jahren einem entfernten Urahn des Reptils ermöglichte, sich durch den Urozean zu schlängeln

S

eit Hunderten von Jahr-
millionen bevölkern Tiere
die Meere, Flüsse, das Land
und den Luftraum der Erde.
Sie haben im Laufe ihrer
Entwicklungsgeschichte
jede Region des Planeten
erobert, sind in die entle-
gsten Winkel vorgedrun-
gen und haben dabei Aber-
millionen höchst unter-
schiedlicher Spezies her-
vorgebracht: Giraffen und
Geier, Hummeln und Haie,

Spinnen und Schlangen, Frösche und Fliegen.

Und doch: So verschiedenartig all diese Wesen
auch aussehen, ihre Baupläne basieren erstaunlicher-
weise auf nur zwei grundlegenden Konzepten von
Körperstützen, die es ihnen ermöglichen, sich fort-
zubewegen.

Es gibt zum einen Tiere mit einem äußeren Skelett,
die also von einer Art Panzer oder Schale umhüllt sind –
etwa Muscheln, Insekten, Spinnen und Skorpione.

Und zum anderen Tiere, deren Körper von einem
inneren Skelett, einem Gerüst aus Knorpel, Kno-
chen oder einer Kombination von beidem gestützt
werden – Fische,
Amphibien, Reptilien,
Vögel und Säugetiere.
(Ausnahme: Nessel-
tiere wie Quallen oder
Gliedertiere wie Re-
genwürmer, die ganz
ohne Körperstütze aus-
kommen.)

Nachdem diese bei-
den grundverschiede-
nen Skelettformen vor
mehr als 500 Millio-
nen Jahren entstan-
den waren – erst das

Außenskelett, dann das Innenskelett –, kam es in den
Urmeeren zu einem der wundersamsten Phänomene in
der Geschichte des Lebens: Innerhalb von nur 20 Millio-
nen Jahren (im evolutionären Maßstab ein sehr kurzer
Zeitraum) entwickelten sich zu Beginn der „Kambrium“
genannten Periode so viele Tiergruppen wie nie zuvor.

Die harten Körperstützen erwiesen sich also als
erstaunlich erfolgreiche Baupläne der Evolution: Un-

abhängig voneinander nutzten zahlreiche unter-
schiedliche Organismen entweder den einen oder den
anderen Skelett-Typ und variierten diese Gerüste zu
immer neuen Formen.

Es war eine Zeit der Innovationen, der Stammbaum
der Tiere fächerte sich auf. Wissenschaftler sprechen
von der „kambrischen Radiation“ (von lat. *radius* =
Strahl). Denn in Gesteinsschichten, die aus jener Zeit
stammen, tauchen Hunderte Fossilien auf, die in älteren
Sedimenten nicht zu finden sind.

Der kambrische Ozean verwandelte sich geradezu
in eine Spielwiese der Evolution; in ihm gediehen einige
der wohl merkwürdigsten Kreaturen, die jemals auf
dem Planeten gelebt haben.

Zwar starben viele von ihnen später wieder aus. Doch
unter denen, die sich behaupten konnten, befanden
sich bereits die Ahnen fast aller Tiere, die auch heute
noch die Erde besiedeln.

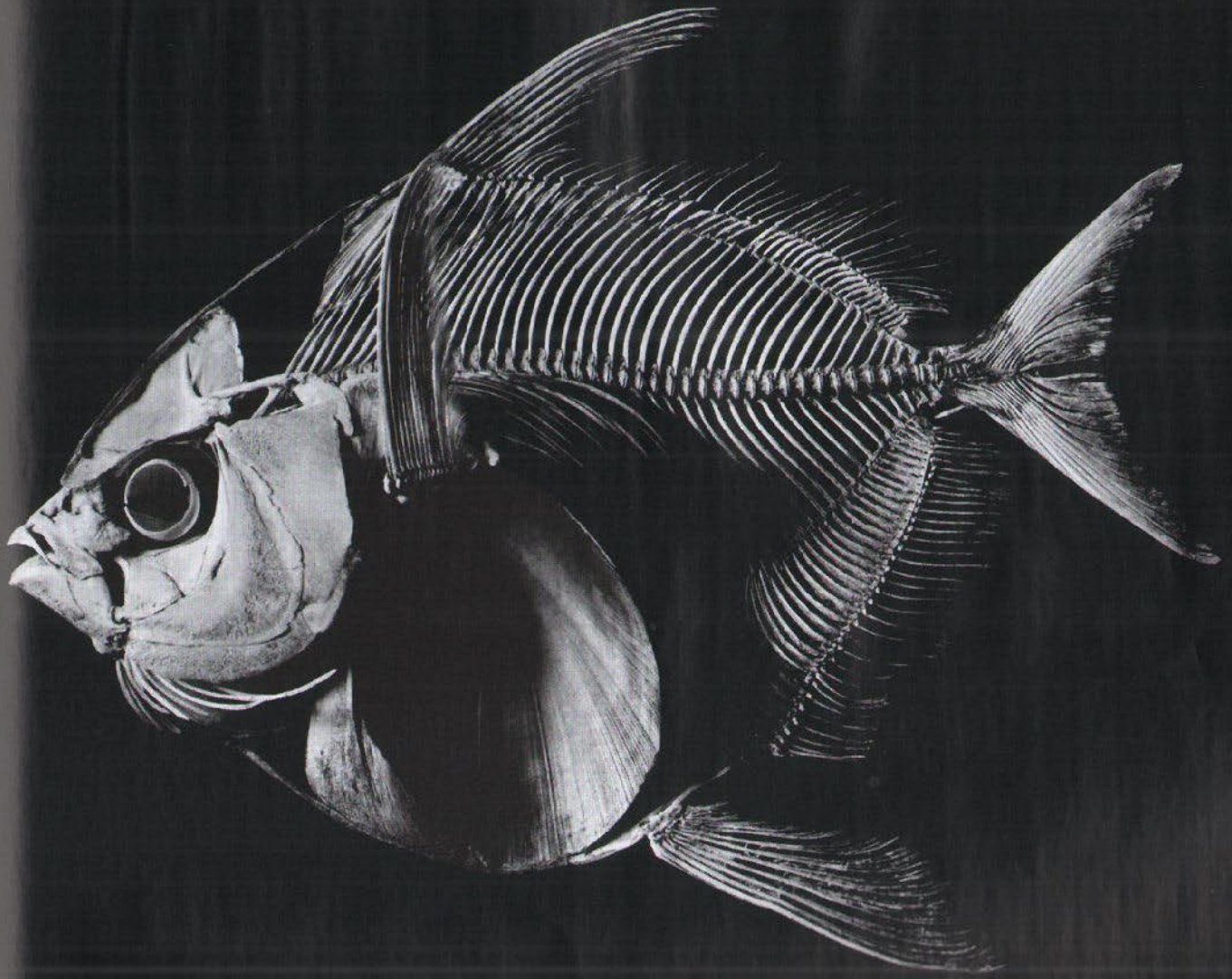
EHE ES ZU DIESER Umwälzung kommt, leben im
Meer nur einfach gebaute Organismen. Die marine
Fauna vor etwa 550 Millionen Jahren – noch lebt kein
Tier an Land – sieht recht eintönig und farblos aus.

An manchen sonnenbeschiedenen Orten wachsen
mehrere Meter hohe graubraune Riffe, die Cyanobakte-
rien in Abermillionen von Generationen aufgetürmt
haben, indem sie Kalk und Sedimentkörner aufeinan-
derschichteten (siehe Seite 60). Im Wasser schwim-
men vereinzelt glasige quallenähnliche Kreaturen, die
ihre gallertigen Körper von der Strömung treiben lassen.
Am Meeresgrund wachsen Charnia – an die heutigen
Seefedern erinnernde Tiere – und wiegen farnartige
Wedel hin und her, mit denen sie winzige Schwebe-
teilchen aus der Umgebung filtern. Und in millimeter-
dünnen Gängen hausen wurmähnliche Wesen, deren
lang gestreckter, mit Flüssigkeit gefüllter Körper von
einem Schlauch aus Muskeln umhüllt wird.

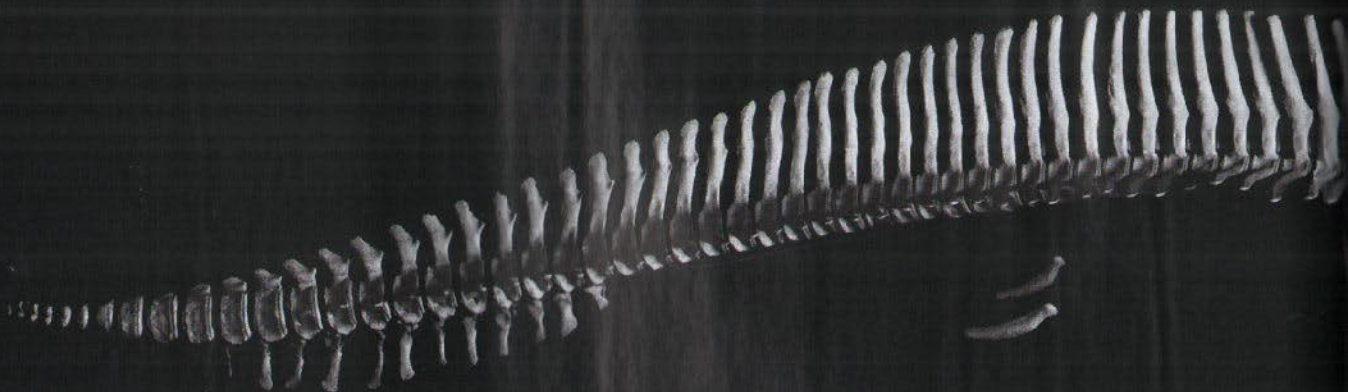
Ziehen sich die Muskeln an einer bestimmten Stelle
zusammen, wird die Flüssigkeit nach vorn oder hin-
ten gepresst. Der Wurm verformt sich gleich einem
schlauchförmigen Ballon, der zusammengedrückt wird.
So können die einfach gebauten Kreaturen durch den
Schlamm kriechen.

Über viele Jahrmillionen wandelt sich das arten-
arme Unterwasser-Szenario kaum. Doch das ändert sich,
als sich vor gut 540 Millionen Jahren das chemische
Gefüge in den Ozeanen drastisch ändert: Einer Theorie
zufolge brechen immer mehr Vulkane und Thermal-
quellen aus dem Meeresboden und speien Unmengen

Erstmals in der Geschichte des Lebens vermögen Tiere harte Substan- zen herzustellen



Fische, hier ein Gotteslachs, gehören zu den ersten Tieren, deren Innenskelett über eine echte Wirbelsäule verfügt



Skelette sind äußerst wandlungsfähige Konstruktionen: Bestimmte Schwimmer wie dieser Delfin etwa stammen von Landsäugetieren ab. Ihre Flossen haben sich aus den Vorder-Extremitäten von Huftieren entwickelt, die Hinterbeine sind im Laufe der Evolution verkümmert

gelöster Minerale ins Wasser. Zugleich wäscht Regen verwitternde Gesteine aus, massenhaft werden Kalzium und Phosphat ins Meer gespült. Vermutlich sind zu Beginn des Kambriums vor 542 Millionen Jahren die Ozeane schließlich dermaßen mit gelösten Mineralen überdüngt, dass alles Leben vergiftet zu werden droht.

Doch die vermeintliche Krise erweist sich als Glücksfall für die Evolution: Denn manche Lebewesen beginnen, die gelösten Stoffe zu nutzen, vielleicht sogar, um ihren Körper vor einer Vergiftung zu bewahren. Sie sind in der Lage, die Minerale in ihren Zellen zu verarbeiten, indem sie diese zunächst in bestimmten Zellregionen sammeln. Anschließend scheiden die Zellen stark kalziumhaltige Substanzen aus, die sie an der Außenseite ihrer Körper anlagern, wo sie langsam und in Schichten kristallisieren.

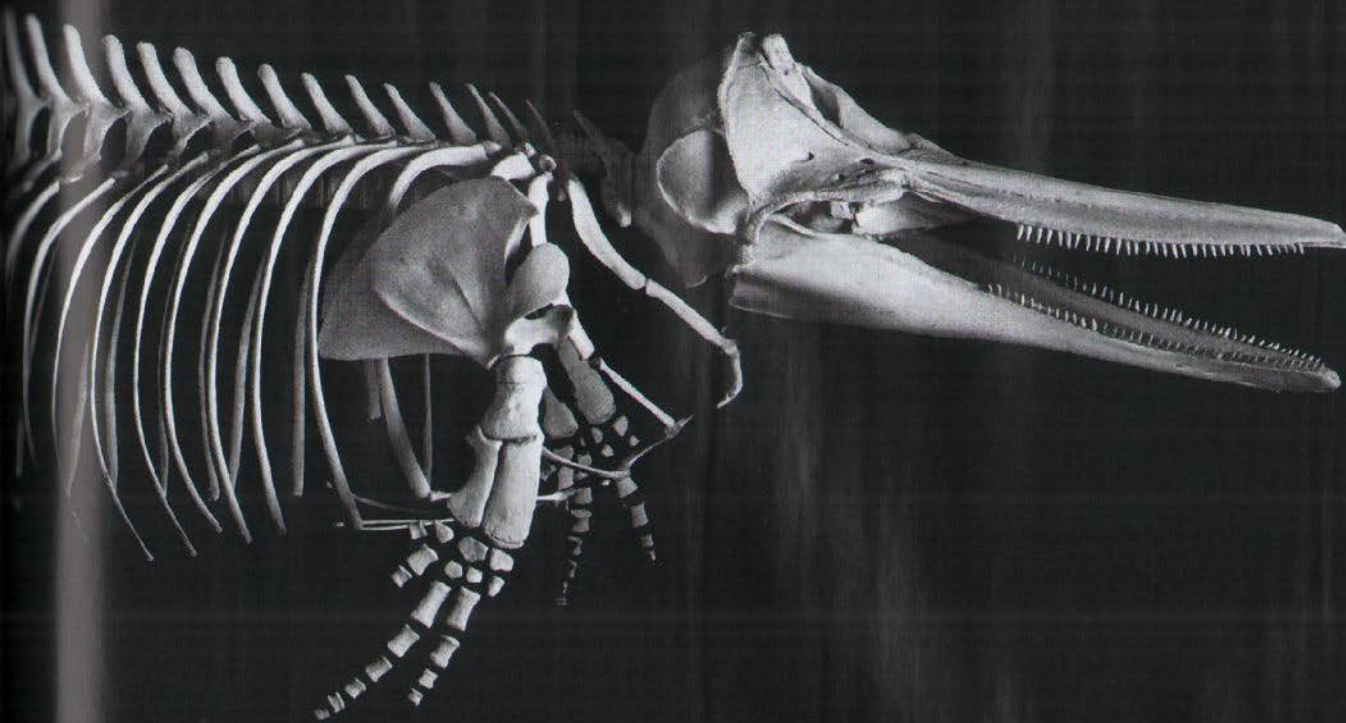
Dies sind die frühesten, wenn auch noch primitiven Außenskelette. Erstmals in der Erdgeschichte vermögen Lebewesen harte Substanzen herzustellen. Die neuartige Fähigkeit markiert den Beginn der kambrischen Radiation, und sie wird das Aussehen der Fauna im Lauf der nächsten Jahrmillionen für immer verändern.

Denn mit der Zeit lernen – unabhängig voneinander – immer mehr Kreaturen, Skelette aufzubauen.

DAS FRÜHESTE bekannte Geschöpf, das die neu gewonnene Fertigkeit nutzt, ist *Cloudina*, ein 1,5 Zentimeter kleines, längliches Wesen. Das Tier errichtet aus ausgeschiedenen Mineralstoffen dicke, steinharte Wohnröhren. *Cloudina* formt das Bauwerk, das einem Turm aus ineinander gestellten Bechern ähnelt, indem es beim Absondern der Kalkteilchen seinen Kopf dreht und so nach und nach einen Tunnel um sich herum aufschichtet. Die Röhre stützt den weichen Körper des Tieres – und sie schützt *Cloudina* vor den meisten Feinden.

Nicht nur diese Wohnröhren prägen den Meeresboden an der Wende zum Kambrium. Bald breitet sich dort insgesamt eine bizarre Architektur aus: Denn selbst einfache Kreaturen wie die Schwämme erschaffen poröse Trichter sowie vasenähnliche Formen aus Siliziumdioxid oder Kalk, die sie im Inneren durch Kammern unterteilen und stabilisieren können. Durch die Poren dieser Bauwerke strömt beständig Meerwasser, aus dem die Schwammzellen, die wie eine Haut ihre Innenseite überziehen, mithilfe von schleimigen Ausläufern mikroskopisch kleine Nahrungspartikel einfangen.

Und mit der Zeit lernen immer mehr Wesen die festen Stoffe zu nutzen, vor allem Kalziumkarbonat, Kalziumphosphat und Siliziumdioxid – ja, sie beginnen



sogar, verschiedene im Wasser gelöste mineralische Substanzen miteinander zu mischen.

Zudem schaffen die Tiere nicht mehr nur Röhren und Trichter. Manche Schnecken etwa, die zu Beginn des Kambriums eine Blütezeit erleben, errichten wahre Skulpturen, die sie auf ihrem Rücken mit sich herumtragen: gewundene Gehäuse, die zum Teil mit Nadeln und Dornen besetzt sind. Ein kräftiger Muskel verbindet die Körper der Schnecken mit deren Außenskelett – dem Gehäuse. Bei Gefahr vermögen sie sich so ins Innere der mobilen Kammern zurückzuziehen. Das harte Kalkgerüst gibt den Muskeln einen festen Ansatz und ermöglicht dem Tier eine gerichtete Bewegung (wenn auch nur ins Innere des Schneckenhauses).

Verwandte der Schnecken, die Muscheln, treiben dieses Prinzip – Muskeln mit dem Außenskelett zu verknüpfen – noch weiter: Ihre Körper sind von zwei harten Schalen umhüllt, die über ein Scharnier miteinander verbunden sind. An der Innenseite der Schalen setzen Muskeln an, mit denen sich das Skelett sowohl öffnen als auch fest verschließen lässt.

Die Schalen bieten aber nicht nur Schutz: Indem die Muscheln die beiden Hälften des Außenskeletts ruckartig auf- und zuklappen, erzeugen sie genügend Schub,

sodass einige der Schalentiere kurze Strecken schwimmend zurücklegen oder sich mehrere Zentimeter tief in den Schlick eingraben können.

Dieser Mechanismus, verschiedene Teile des Skeletts mechanisch miteinander zu verbinden, mag simpel erscheinen. Und doch ist er eine Revolution: Denn über Gelenke lassen sich mehrere feste Elemente miteinander verknüpfen und gegeneinander bewegen.

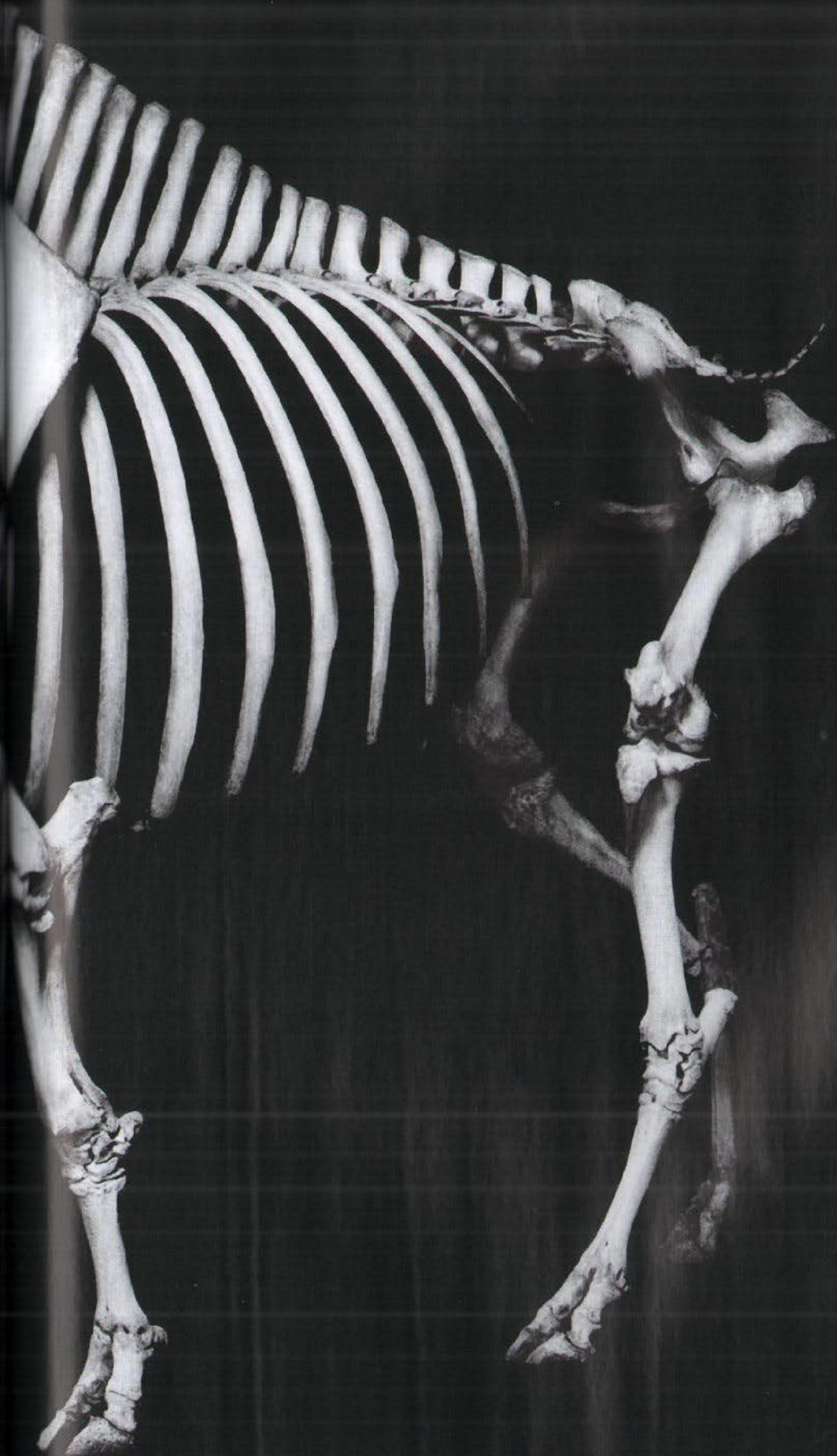
Das führt zu einem wahren Entwicklungsschub, denn es eröffnet der marinen Tierwelt vor rund 540 Millionen Jahren die Möglichkeit, völlig neue Formen zu entwickeln. Anders als etwa Quallen, die mit ihren prallen Körpern nur einfache glocken- oder schlauchförmige Geschöpfe hervorzu-

bringen vermögen, können Tiere nun erstmals komplexere Gestalten annehmen.

Nun entwickeln
manche Lebewesen
auch **Gliedmaßen**,
Panzer und
Fangwerkzeuge



Der Amerikanische Bison kann rund dreieinhalb Meter lang werden und erreicht ein Gewicht von beinahe einer Tonne: eine gewaltige Größe, die kein Tier mit Außenskelett - weder Krebs, noch Insekt - jemals erreicht hat



Das harte Außenskelett zwingt die Tiere in ein festes Korsett – es vermag nicht mitzuwachsen

Innerhalb kurzer Zeit bilden Lebewesen Gliedmaßen aus, konstruieren stabile Panzer, formen harte Borsten und Fangwerkzeuge.

Fortan hinterlassen nicht nur die Ahnen etlicher neuer Wurmstämme ihre Spuren

in den Gesteinsschichten jener Epoche, sondern auch Fossilien von Tiergruppen, die eine Körperstütze entwickelt haben – etwa von Stachelhäutern wie den Seeigeln.

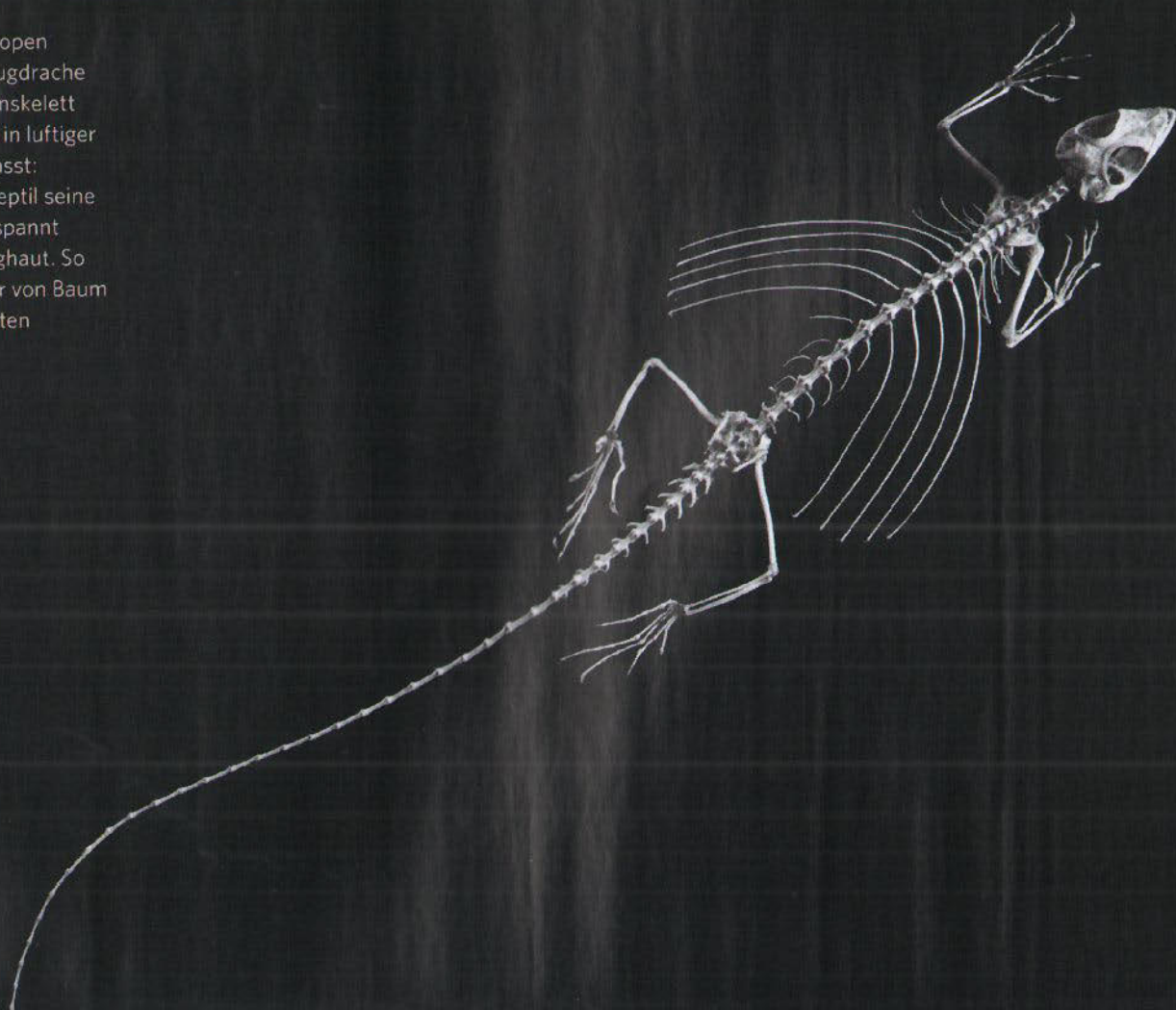
Eine Organismengruppe aber übertrifft mithilfe der innovativen Muskel-Skelett-Systeme alle anderen an Vielfalt: die Gliederfüßer – Tiere mit Extremitäten aus mehreren, röhrenförmigen Gliedern, in deren Innerem sich Muskelstränge spannen. Aus ihnen werden etliche Jahrmillionen später Tausendfüßer, Spinnen, Skorpione sowie sämtliche Insekten entstehen.

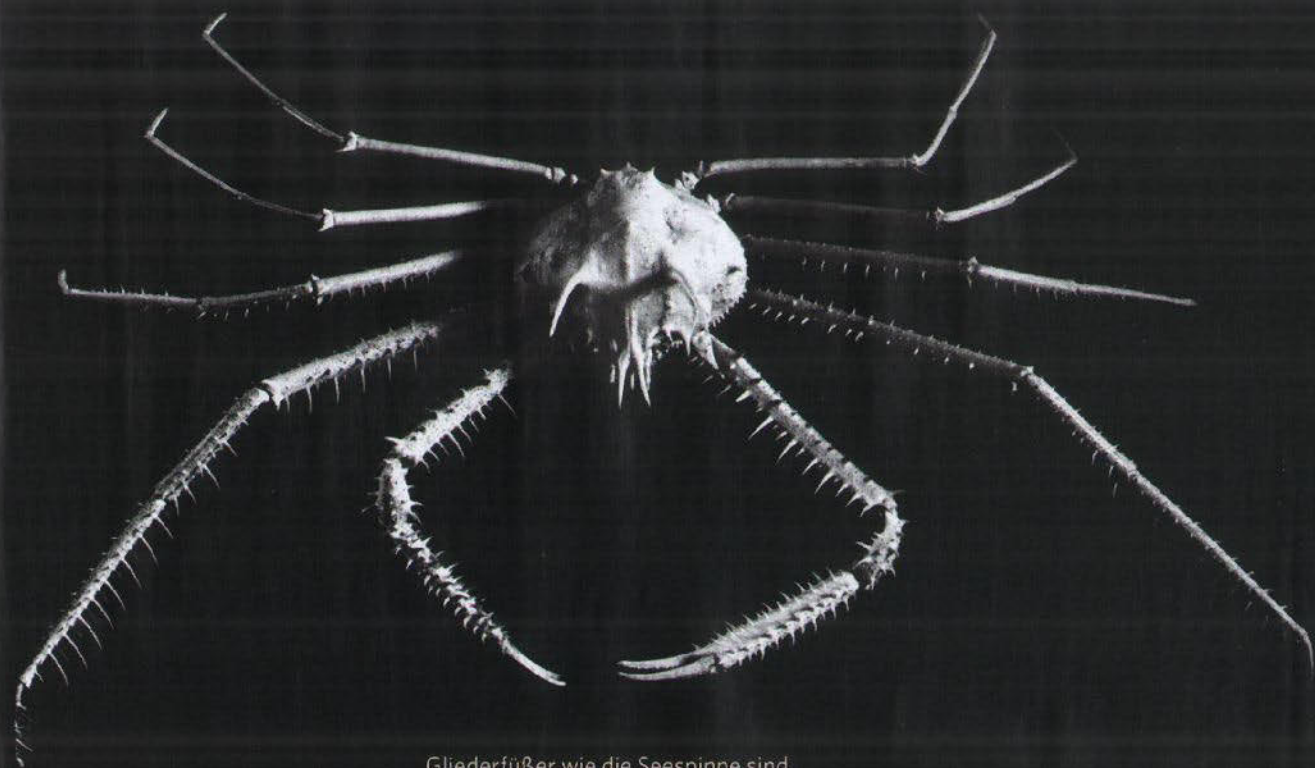
Zwar ist bis heute nicht sicher bekannt, wie genau die Ahnen dieser wirbellosen Kreaturen ausgesehen haben (bislang sind keine Fossilien entdeckt worden). Doch in Gesteinsschichten aus dem anbrechenden Kambrium finden sich wie auf einen Schlag Dutzende Spezies archaischer Gliedertiere.

In ihrem Körper verbinden die damals noch wenige Zentimeter kleinen Tiere Minerale wie Kalk oder Kalziumphosphat sowie Eiweiß mit einem Zuckermolekül namens Chitin und stellen daraus ein hervorragendes Baumaterial für das Außenskelett her: einen knochenharten, widerstandsfähigen Verbundstoff, der vielfältig einsetzbar und zudem recht leicht ist.

Kombiniert mit anderen Stoffen, eignet sich Chitin ausgezeichnet, um stabile Außenskelett-Elemente mit beweglichen Gelenken zu verbinden – und so nicht nur Beine, sondern die unterschiedlichsten Organe zu konstruieren, zum Beispiel Fühler, gegliederte Fangarme, Scheren, Zangen, Kauwerkzeuge.

Der in den Tropen heimische Flugdrache hat sein Innenskelett einem Leben in luftiger Höhe angepasst: Klappt das Reptil seine Rippen aus, spannt sich eine Flughaut. So kann das Tier von Baum zu Baum gleiten





Gliederfüßer wie die Seespinne sind wirbellos – ihre Stabilität erhalten sie durch ein Außenskelett aus Chitin

IN DEN KAMBRISCHEN Meeren sieht es beinahe so aus, als bediene sich die Natur eines Modellbaukastens, um verschiedenartigste, skurrile Wesen zu entwerfen. Und nicht nur der Körperbau der Tiere ist innovativ, sondern auch ihre Lebensweise: Haben sich Kreaturen bisher lediglich von den im Wasser gelösten Stoffen oder Algen ernährt, spezialisieren sich manche der aufkommenden Gliederfüßer nun auf tierisches Eiweiß.

Erstmals in der Geschichte des Lebens teilt sich die Fauna somit in Jäger und Gejagte, in Räuber und Beute.

Ein Ergebnis dieser evolutionären Experimentierfreudigkeit ist auch die acht Zentimeter lange *Opabinia*, die einer fünfäugigen Garnele mit Rüssel ähnelt. Der schlauchförmige Mundfortsatz endet in einer Greifzange, mit der das Tier im Sand wühlt und Würmer erbeutet (siehe auch Seite 13).

Oder *Anomalocaris*, das mit bis zu einem Meter Länge größte Raubtier seiner Zeit: ein gepanzerter Schwimmer, der mit muskulösen und stacheligen Fangklauen kleinere Tiere wie *Opabinia* ergreift und deren Chitinschale zerknackt, um an das nahrhafte Muskelfleisch zu gelangen.

Die wohl erfolgreichsten Gliederfüßer des Kambriums aber sind die Trilobiten. Diese drei Zentimeter kleinen Wesen, die ein wenig an Asseln erinnern, bringen in wenigen Millionen Jahren rund 15 000 verschiedene Arten hervor. Ihr in Kopf, Rumpf und Schwanz gegliederter Leib ist so stark gepanzert, dass er an eine

Rüstung erinnert. Sie schützt die urtümlichen Tiere vor Feinden wie *Anomalocaris*.

Zwei lange, dünne Antennen am Kopfende dienen den Trilobiten als empfindliche Sinnesorgane, mit denen sie ihre Umgebung wahrnehmen. Droht Gefahr, rollen sich manche von ihnen wie Kellersasseln zusammen. Mit einem Dutzend seitlich am Körper platzierter Beinpaare sind sie wendig und vermögen sich auf dem Meeresgrund geschickt fortzubewegen.

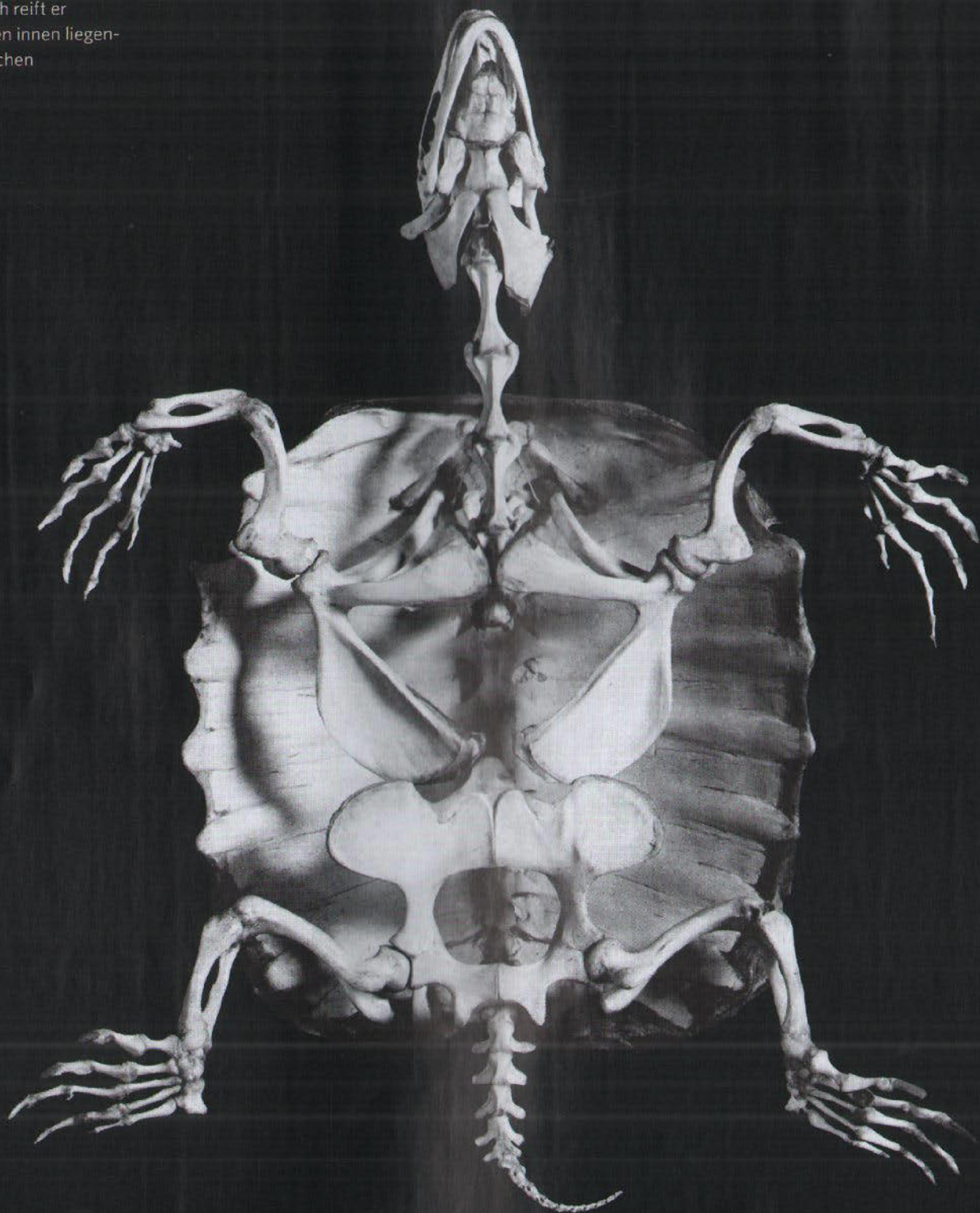
Doch so viele Vorteile das Außenskelett der Gliederfüßer mit sich bringt – es birgt auch Gefahren. Denn ist die harte Hülle erst einmal gebildet, vermag sie nicht mit dem reifenden, größer werdenden Körper zu wachsen. Sie zwingt die Tiere in ein steifes Korsett. Daher müssen sie ihren Panzer von Zeit zu Zeit abstreifen und eine neue, größere Haut aus Chitin bilden.

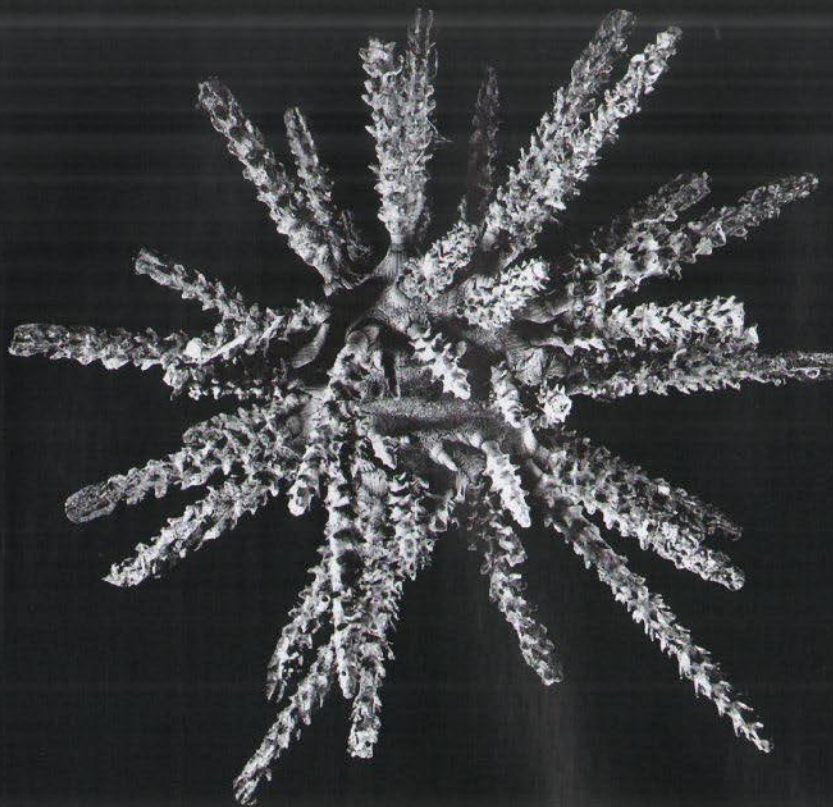
Dieser Vorgang ist nicht nur kräftezehrend: In den Stunden, in denen der neue, zunächst noch weiche Panzer aushärtet, sind die Tiere auch besonders verletzlich. Und offenbar limitiert der derbe Außenpanzer zudem die Größe der Gliedertiere.

WOMÖGLICH FÜHREN dieser mühsame Akt der Häutung sowie das eingeschränkte Wachstum dazu, dass sich in der gefährvollen Unterwasserwelt ein Gegenentwurf zum Außenskelett herausbildet und behauptet.

Es ist jenes Element, das noch heute die Körper sämtlicher Wirbeltiere stützt: das Innenskelett.

Der Panzer einer
Schildkröte mutet an
wie ein Außenskelett.
Und doch reift er
aus Teilen innen liegen-
der Knochen





Der Seeigel scheint nur auf den ersten Blick starr: Seine Skelett-Stacheln kann er einzeln durch Muskeln bewegen

Denn vor 530 Millionen Jahren schlängelt sich zwischen all den Muscheln, Schnecken und Gliederfüßern ein weiteres Geschöpf durchs Meer: ein spindel-förmiges Wesen ohne Panzer, kaum drei Zentimeter lang, einem kleinen Fisch ohne Flossen nicht unähnlich. Es ist Haikouichthys, ein Urahn der Wirbeltiere.

Er selbst ist aus einem wirbellosen Vorgänger entstanden. Bis heute ist nicht bekannt, wie der ausgesehen hat, denn es sind keine Fossilien gefunden worden. Doch eines steht fest: Auch diesem zierlichen Urwesen verhilft die Fähigkeit, harte Substanzen aufzubauen, zum Erfolg.

Vom Kopf bis zum Schwanz zieht sich ein biegsamer Stützstab aus festem Bindegewebe durch den Körper des Tieres. Aus dieser sogenannten *Chorda dorsalis* (von lat. *chorda* = Saite und *dorsum* = Rücken) entsteht nach und nach die Wirbelsäule.

Der Stab schützt eine zentrale Nervenleiste. An jeder Seite knüpfen etliche Muskelpakete an, die das Tier so geschickt – mal vorn, mal hinten – zusammenzuziehen vermag, dass es die Wirbelsäule und damit seinen Körper in eine schlängelnde Bewegung versetzt.

Das macht Haikouichthys zu einem besonders schnellen Schwimmer. Im Vergleich dazu wirken gepanzerte Räuber wie *Anomalocaris* und *Opabinia* fast schwerfällig. So bewährt sich bereits diese einfachste Form des Innenskeletts – ein simpler Stab aus Bindegewebe – hervorragend im Überlebenskampf.

Denn während *Anomalocaris* und *Opabinia* aussterben, werden die Nachfahren von Haikouichthys die Ozeane beherrschen.

Aus dem unscheinbaren Urahn der Wirbeltiere gehen im Laufe der nächsten Jahrtausende die ersten Fische hervor. Es sind äußerst wendige Schwimmer, manche klein wie ein Handteller, andere bis zu einem Meter lang.

Vermutlich gedeihen die Fische zu solch enormer Größe, weil sich im Urmeer eine üppige Fauna entwickelt hat, viel eiweißreiche Kost also, die Energie liefert und so das Wachstum der agilen Flossenträger fördert. Und sie dürften allmählich gelernt haben, die Nahrung besser zu verwerten.

In ihrem Körper hat sich bereits eine echte Wirbelsäule gebildet – anfangs aus Knorpel, ein paar Millionen Jahre später aus Knochen.

DER KNOCHENBAU ist ein hochkomplexer Prozess: Während der Embryonal-Entwicklung des Fisches wickeln sich feinste, kalziumhaltige Gewebe-

Im Körper
urtümlicher Fische
bildet sich die
erste Wirbelsäule
aus Knochen

Memo: SKELETT

► **Vor rund 540 Millionen Jahren** bilden Tiere erstmals Außenskelette – anfangs winzige Kalkröhren.

► **Die Fähigkeit**, Hartsubstanzen herzustellen, führt zu einer Explosion der Artenvielfalt.

► **Zu jener Zeit**, im Kambrium, entstehen auch Muscheln, Schnecken, Gliederfüßer, Seeigel und Korallen.

► **Der Urahn** der Wirbeltiere entwickelt sich vor rund 530 Millionen Jahren.

lagen Schicht für Schicht um die *Chorda dorsalis*. Schließlich schnüren sie diesen Bindegewebsstab so ein, dass einzelne, bewegliche Segmente entstehen: die Rückenwirbel.

An die Wirbel wiederum sind bei den ersten Knochenfischen Gräten angeschlossen, die den Körper – ähnlich wie Rippen – von innen versteifen.

fen und zahlreichen weiteren Muskelsträngen Halt bieten. Die Fische bilden zudem Flossen aus, die von mehreren Skelettstäbchen durchzogen sind und dadurch stabilisiert werden.

So bringen die Schwimmer – wie die Gliederfüßer Jahrmillionen zuvor – eine enorme Formenvielfalt hervor: Einige sehen aus wie Aale, andere ähneln Thunfischen, die mit torpedoförmigen Körpern pfeilschnell durchs offene Meer schießen.

Wieder andere gleichen Schollen, die mit ihren abgeflachten Leibern über den Ozeangrund schwimmen, vermutlich auf der Suche nach Nahrung.



Am porösen Skelett des Gießkannenschwamms strömt Meerwasser mit winzigen Nahrungspartikeln vorbei



Bei Vögeln wie dem Basstölpel bilden die Wirbelsäule, die Rippen und das Becken ein starres Konstrukt

Und ähnlich wie das Außenskelett erfüllt auch das Innenskelett bald schon andere Funktionen als die der Fortbewegung: Einige Knochenbögen im Bereich der Kiemen verändern im Lauf der Entwicklungsgeschichte ihre Gestalt. Sie werden klobiger, verlagern sich in Richtung Maul und treten mit besonders starken Muskelsträngen in Verbindung.

Der erste knöcherne Kiefer entsteht – ein kräftiger, fester Kauapparat also, mit dem Fische ihre Beute ergreifen und zermahlen können. Das Innenskelett der Wirbeltiere dient fortan auch dem Nahrungserwerb.

Rund 100 Millionen Jahre nachdem der unscheinbare Haikouichthys erstmals durchs kambrische Meer geschwommen ist, werden manche Arten dieser kiefertragenden Fische zu den größten Räubern der Ozeane: Es sind zehn Meter lange, tonnenschwere Haie.

Im Laufe der folgenden Jahrmillionen erschließen sich sowohl Fische wie auch Gliederfüßer nach und nach sämtliche aquatischen Lebensräume. Sie dringen in die Tiefsee vor, ins Polarmeer, in flache Küstengewässer, in Flüsse und Seen.

Und schließlich, vor rund 400 Millionen Jahren, ermöglicht das weiterentwickelte Skelett manchen von ihnen sogar, eine völlig neue Welt zu betreten: das Land. □

Dirk Liesemer, 32, ist Wissenschaftsjournalist in Münster.

Der Pariser Fotograf **Patrick Gries** porträtierte für das Projekt „Evolution“ vor allem Exponate aus dem Muséum national d'Histoire naturelle in Paris. Die Körpergerüste mancher Tiere wurden für seine Arbeit so geschickt montiert, dass keine störenden Aufhängungen zu sehen sind.

GEO-Aktion: pro Teilnehmer ein Baum für den Regenwald!



**GEO SCHÜTZT
DEN REGENWALD e.V.**

**Ihr Anruf
zählt!**

Jetzt gratis anrufen: Pro Teilnehmer spendet GEO einen Baum!

Rufen Sie jetzt kostenlos an:

0800/5 92 92 96

Oder nehmen Sie online teil: www.geo.de/baumspende

GEO-Aktion: Baumspende für den Regenwald in Ecuador!

Sie rufen an, wir spenden!

Sie rufen gratis bei uns an und wir spenden in Ihrem Namen einen Baum für das Wassereinzugsgebiet von El Paraíso in der Region Intag in Ecuador.

Lebenswichtig: sauberes Trinkwasser!

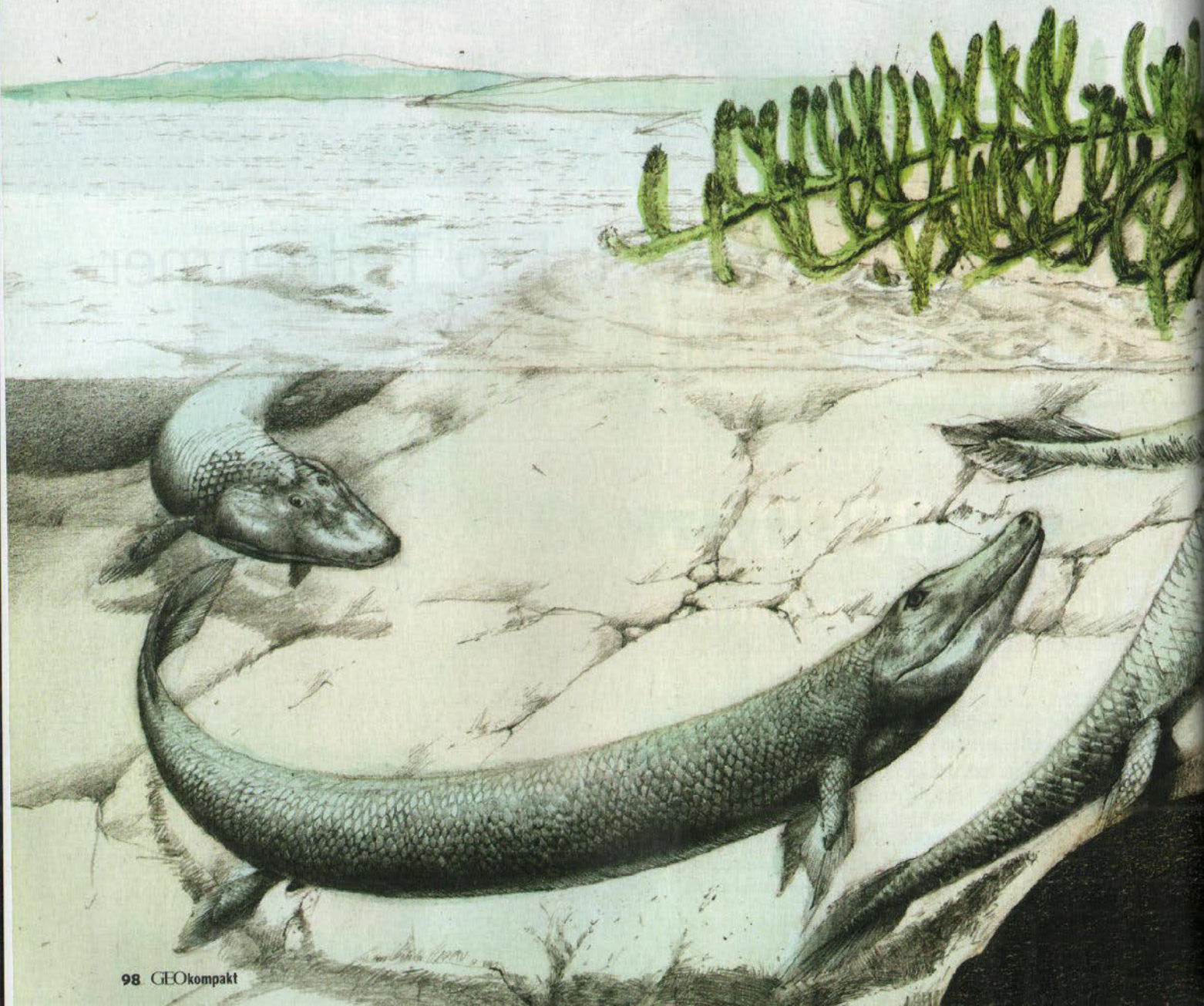
Abholzung und Brandrodung lassen sauberes Trinkwasser knapp werden. Durch Aufforstung will der Verein „GEO schützt den Regenwald e.V.“ die Versorgung der Menschen in Intag mit sauberem Trinkwasser sicherstellen. Um das zu

erreichen, werden in Zusammenarbeit mit einer örtlichen Baumschule Baumsetzlinge gezogen und ausgepflanzt. Die örtliche Bevölkerung beteiligt sich aktiv an der Auspflanzung und Pflege der Setzlinge.

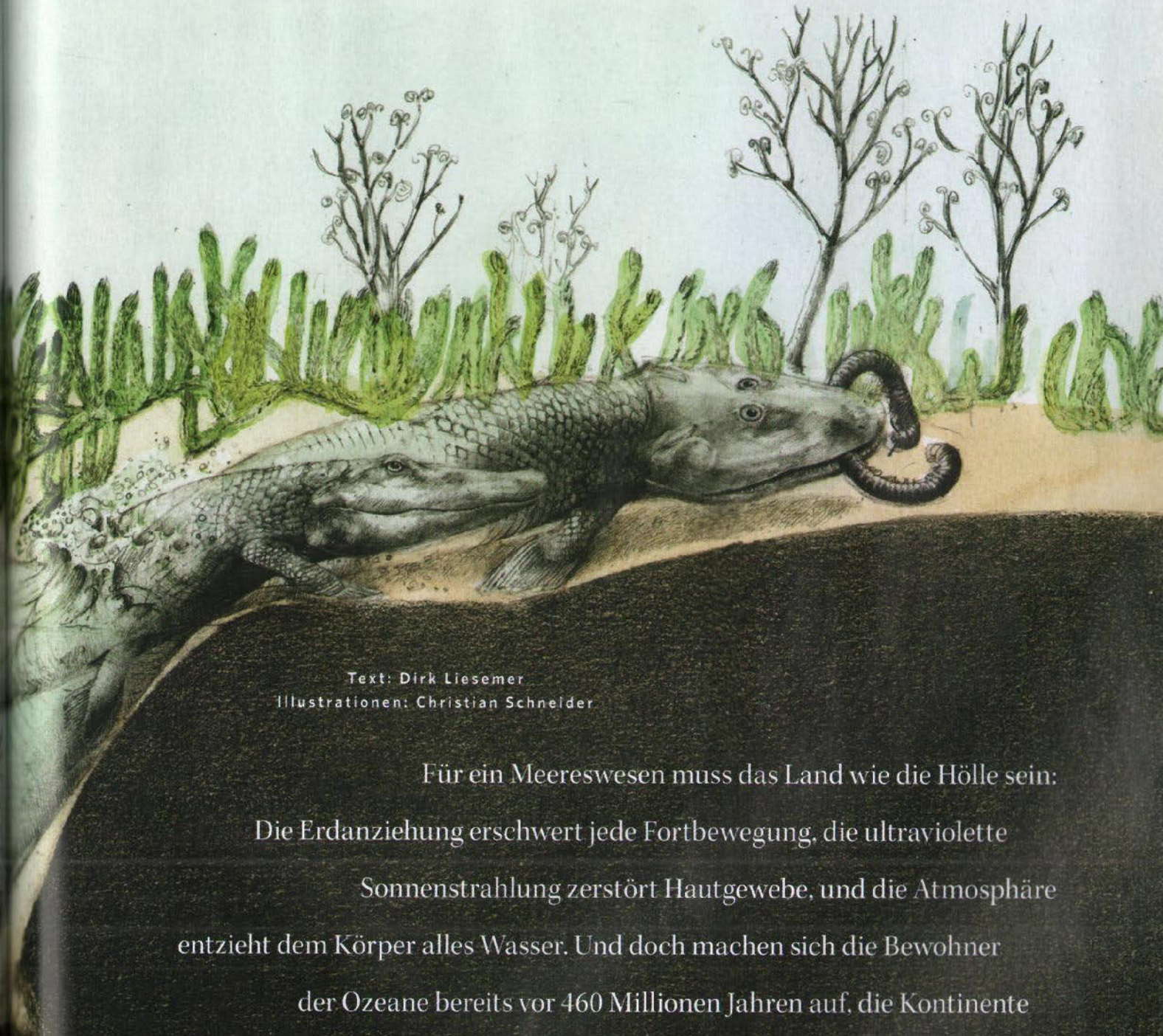
Mo.–Fr. von 9:00–20:00 Uhr, Sa. von 10:00–15:00 Uhr.
Weitere Projektinformationen und Angebote erhalten Sie auf Wunsch gerne am Telefon.

Landgang

Wie der Fisch Beine bekam

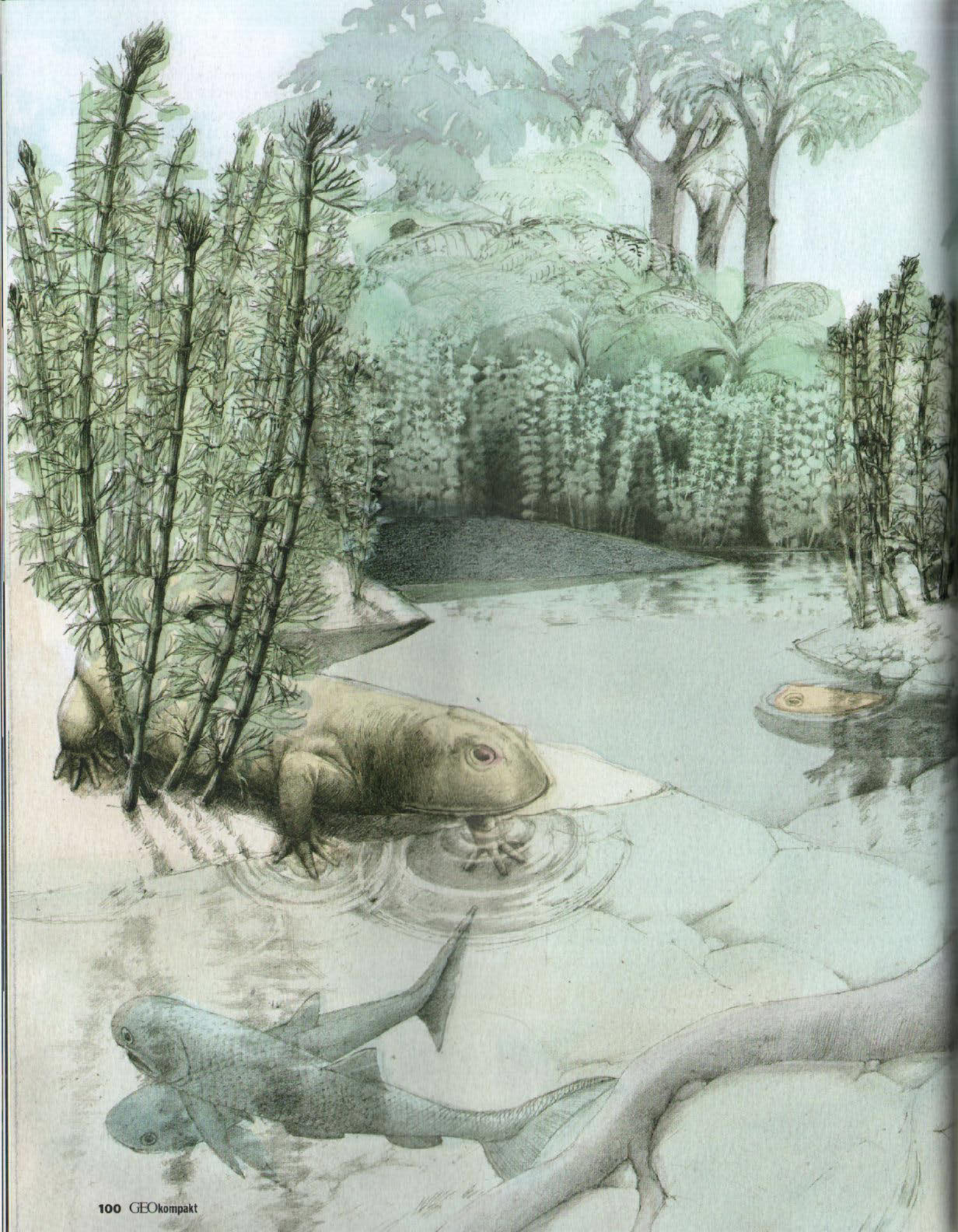


Eine Jagdszene vor 375 Millionen Jahren: Rund 85 Millionen Jahre nach dem Landgang der Pflanzen haben sich Wirbeltiere bereits rudimentär an die Bedingungen des Landes angepasst. Tiktaalik gehört zu den ersten Wesen, die im Wasser und für kurze Zeit auch auf dem Trockenen überleben können – eine einfache Lunge und kräftige Stützflossen erlauben es dem Jäger, der hier einen Tausendfüßer fängt, sich von einem Gewässer zum nächsten zu bewegen

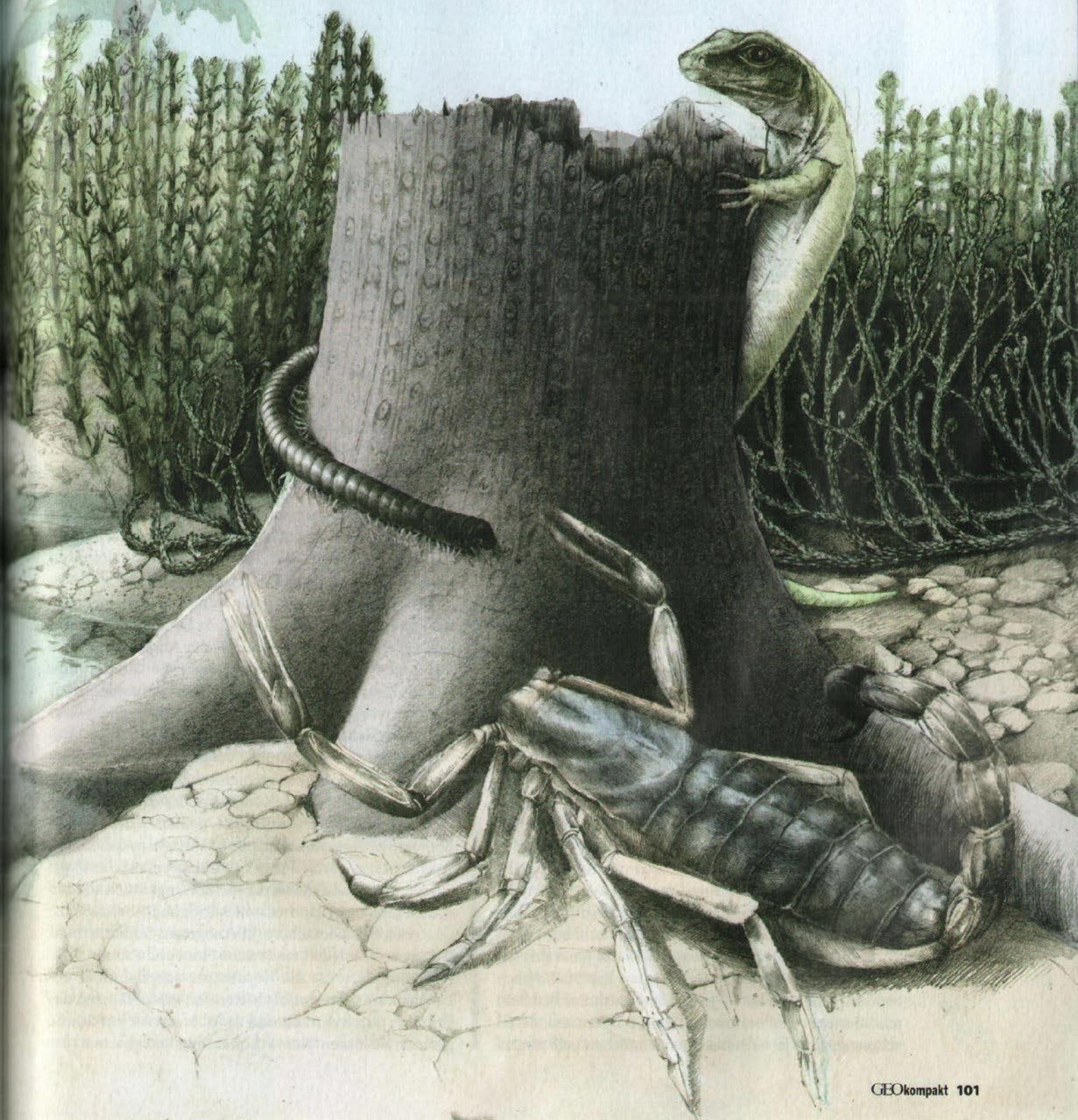


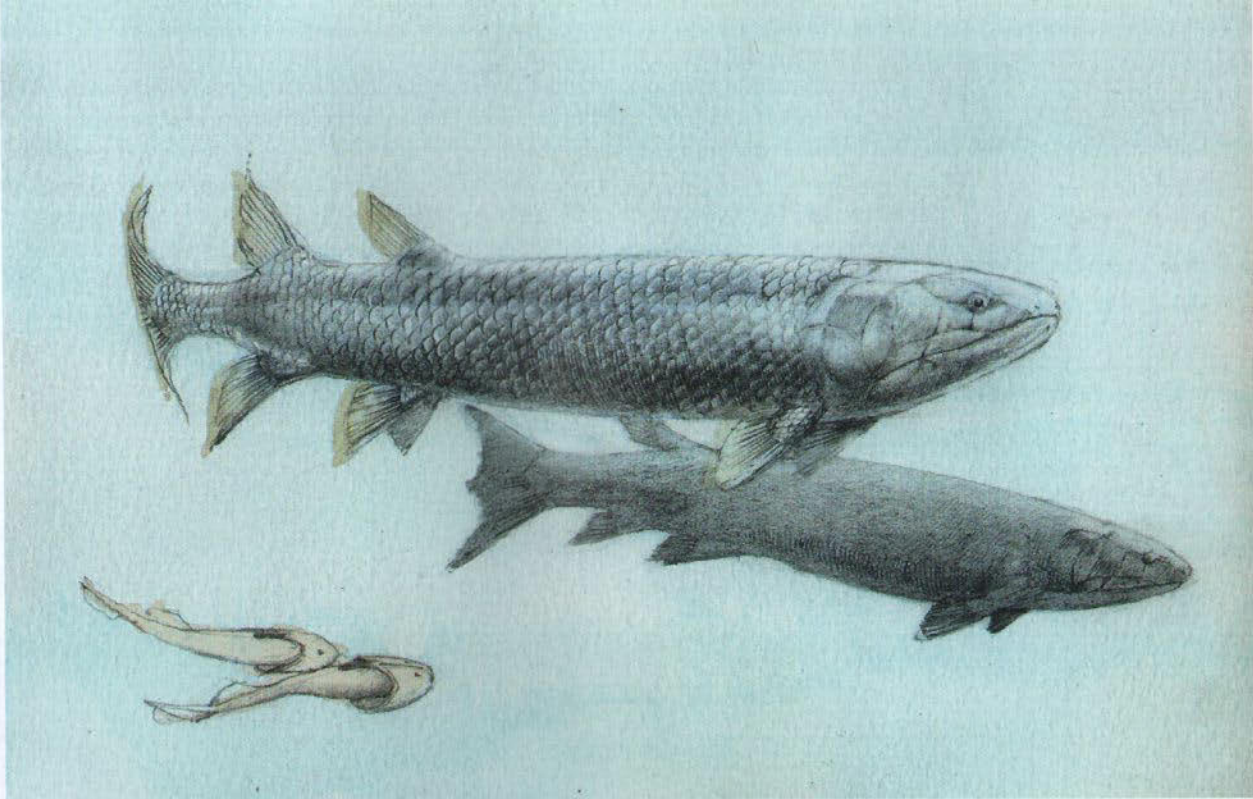
Text: Dirk Liesemer
Illustrationen: Christian Schneider

Für ein Meereswesen muss das Land wie die Hölle sein:
Die Erdanziehung erschwert jede Fortbewegung, die ultraviolette
Sonnenstrahlung zerstört Hautgewebe, und die Atmosphäre
entzieht dem Körper alles Wasser. Und doch machen sich die Bewohner
der Ozeane bereits vor 460 Millionen Jahren auf, die Kontinente
zu besiedeln. Wie sie den Schritt auf die feste Erde bewältigen, ist
eine der erstaunlichsten Episoden in der Geschichte des Lebens



Laurussia, vor 328 Millionen Jahren. Auf diesem gewaltigen Kontinent im Norden des Planeten sind erstmals in der Erdgeschichte ausgedehnte Landschaften entstanden, deren Organismen sich den Bedingungen des Landes auf unterschiedliche Weise angepasst haben: Schuppenbäume (im Hintergrund) und Schachtelhalme (an den Ufern) verfügen über ein stützendes Gewebe und Wurzeln; Gliedertiere wie Tausendfüßer oder die bis zu 80 Zentimeter großen Skorpione (vorn rechts) schützt ein Panzer vor Austrocknung, während sich reptilienähnliche Vierbeiner wie der 30 Zentimeter große Westlothiana (rechts am Baumstumpf) mit derber Haut wappnen. Völlig unabhängig vom Wasser sind die Wirbeltiere noch nicht – so auch das 50 Zentimeter lange urtümliche Amphibium Balanerpeton (vorn links und im Wasser), das seine Eier noch in den Gewässern ablegt





Ein erster Schritt auf dem Weg zum Vierbeiner: Vor 385 Millionen Jahren besitzen diese Eusthenoptérons – etwa ein Meter lange Fische – neben ihren Kiemen auch eine primitive Lunge, mit der sie an der Wasseroberfläche Luft schnappen können. Eine wichtige Voraussetzung für den Vorstoß in sauerstoffarme Gewässer sowie für den späteren Landgang

Es ist tropisch schwül an diesem See, der sich vor 328 Millionen Jahren im Süden des Nordkontinents Laurussia erstreckt. Urtümliche Nadelbäume und mächtige Farne säumen die Ufer, meterhoch ragen sie in die dunstige Luft. Ein Wald aus Schuppenbäumen überzieht die Hänge eines Vulkans, dessen Asche den See vermutlich vom Meer abgetrennt hat. Erstmals in der Geschichte breiten sich auf den Erdteilen – neben Laurussia gibt es noch den Südkontinent Gondwana – üppig bewachsene Landschaften aus. Spuren eines dieser Lebensräume finden sich später unweit des heutigen Edinburg in einem Kalksteinbruch.

Dort liegen versteinerte Pflanzenreste sowie Fossilien von Spinnen, Skorpionen und urtümlichen Reptilien, die einst am Ufer jenes Sees lebten; dessen Überreste haben sich im Lauf der Jahrmillionen aufgrund der Kontinentalverschiebung ins heutige Schottland bewegt.

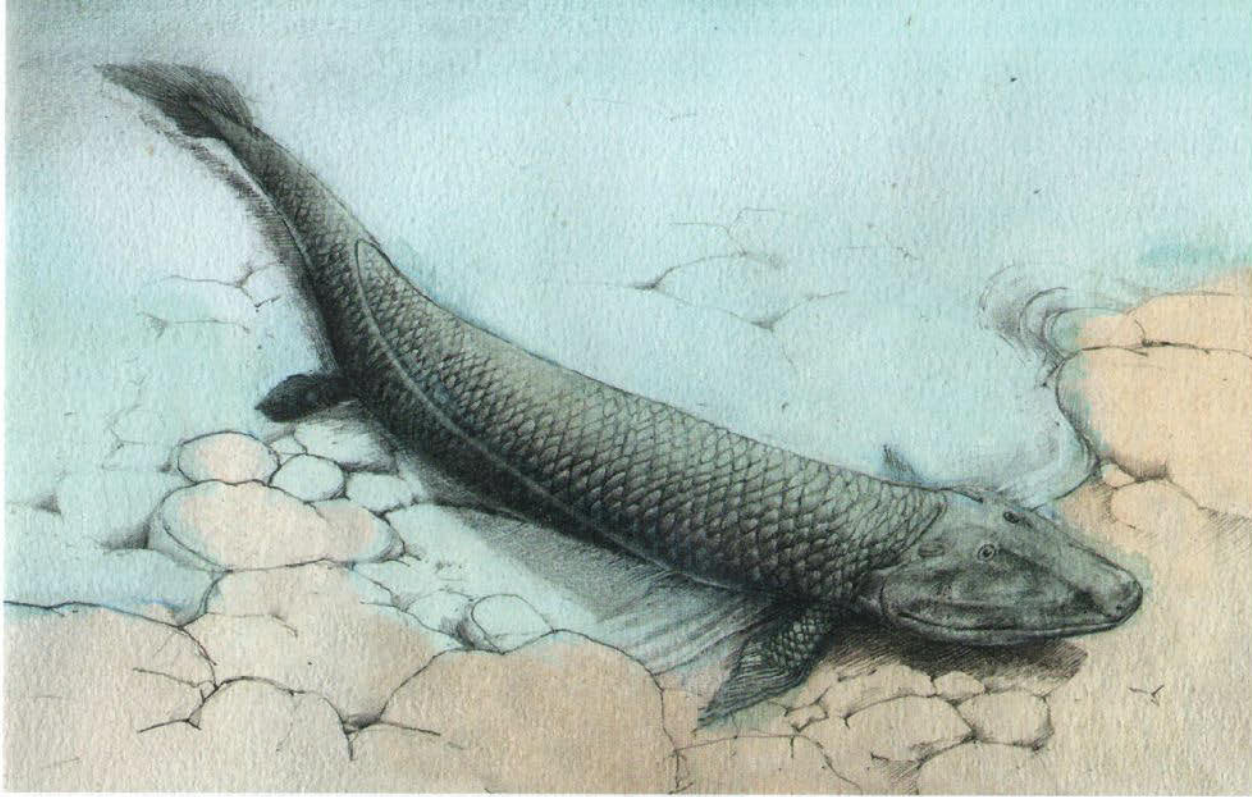
In dem urtümlichen Gewässer ziehen in jener Zeit vor 328 Millionen Jahren Stachelhaie auf der Suche nach Nahrung ihre Runden. Winzige Tausendfüßer krabbeln am Ufer über den Schlamm. Und Spinnentiere, deren acht lange, haarfeine Beine einen länglichen Leib tragen.

Auf abgestorbenen Baumstümpfen sonnen sich Kriechtiere, die an Eidechsen erinnern. Und auf den Felsen rings um den See lauern 50 Zentimeter lange Lurche: plump anmutende Räuber, deren muskulöse Füße sich an feinen Rillen im Kalkstein festkrallen. Bis ein unvorsichtiges Tier vorbeistreift. Dann schnellen die Jäger nach vorn, beißen mit scharfen Zähnen zu und schlingen ihre Opfer hinunter.

Im Schatten des tropischen Waldes pirschen bizarre Kreaturen durch das modrige Laub: Es sind 80 Zentimeter lange Skorpione, die mit sechs Augen durch das Dickicht spähen. Ihre Lunge tragen die Gliederfüßer im Hinterleib, der sich gleich einem Akkordeon aufpumpt und wieder zusammenzieht und so Luft ein- und ausatmet (siehe Seite 101).

Nicht nur hier, im Süden Laurussias, breiten sich zu jener Zeit üppige Lebensgemeinschaften auf dem Land aus. Auf dem gesamten Kontinent, der das heutige Europa und Nordamerika umfasst, gedeihen dichte Wälder, treiben Schachtelhalme ihre Wurzeln in den Boden, streifen Tiere durch Sumpflandschaften, machen Jagd aufeinander – und die Natur sprießt längst auch auf den östlich gelegenen Landmassen Baltica und Siberia. Selbst den teils von Gletschern überzogenen Südkontinent Gondwana besiedelt eine reiche Flora und Fauna.

Es ist, als seien die Kontinente schon immer ein Lebensraum gewesen, als hätten seit jeher Pflanzen das Erdreich durchwurzelt und ihr Blätterwerk zur Sonne gereckt, als hätten Tiere schon immer Luft geatmet.



Zwischen Wasser und Land: Der etwa drei Meter lange Tiktaalik hat muskulöse, bewegliche Vorderflossen, deren Anatomie den Armknochen späterer Landbewohner ähnelt. Zudem verfügt der Jäger über einen Schädel, den er – anders als Fische – auf- und abschwenken kann, sowie über Linsenaugen, die ihm vermutlich eine scharfe Sicht auch über Wasser ermöglichen

Doch das täuscht. Mehr als zwei Milliarden Jahre lang war das Land zuvor für jeden Organismus auf Erden nichts als eine Todeszone.

Denn anders als im Meer, wo das Leben einst entstanden ist und sich entfaltet hat, wirken auf dem Trockenen Kräfte, die denkbar lebensfeindlich sind.

Im Wasser sind Tiere wie Pflanzen förmlich schwerelos, sie werden gleichsam getragen, denn ihr Körper hat ungefähr die gleiche Dichte wie das umgebende Medium. Auf dem Land dagegen zieht die Schwerkraft an jedem Körper.

Eine Qualle etwa verliert auf dem Trockenen ihre Form, sackt in sich zusammen, kann sich nicht mehr fortbewegen und stirbt. Und während im Ozean Wasser ihren Leib umspült, entzieht die Luft der Qualle Flüssigkeit. An Land trocknet sie – wie andere Meerestiere auch – unweigerlich aus.

Zudem brennt die Sonne auf den Kontinenten intensiver, Luft filtert deren Strahlung weit weniger als Wasser. An Land lebende Organismen müssen daher ihre Haut schützen, besonders vor UV-Licht. Denn dessen Energie kann das Erbgut stark schädigen.

Und dennoch: Trotz all dieser Hindernisse haben Tiere und Pflanzen jenen gewaltigen Schritt geschafft. Sie sind dem Meer entstiegen und haben das Land erobert. Sie haben eine graue Ödnis, eine kahle, fremde Welt, in ein lebendiges, grünes Paradies verwandelt.

Dieser Prozess, der Landgang, ist eine der wunderlichsten Episoden in der gesamten Geschichte des

Lebens. Und es ist ein flüchtiges Abfallprodukt, das den Gang auf das feindliche Terrain überhaupt erst möglich macht: Sauerstoff.

VOR MEHR ALS 2,7 Milliarden Jahren beginnen Cyanobakterien, die Energie der Sonne zu nutzen, um körpereigene Substanzen herzustellen (siehe Seite 60). Bei diesem Vorgang, der Photosynthese, setzen die winzigen Einzeller nebenbei auch Sauerstoff frei – ein Gas, das irgendwann aus dem Meer in die Luft aufsteigt.

Im Laufe von Jahrmillionen bilden sich in den Ozeanen riesige Kolonien von Cyanobakterien, dringt immer mehr Sauerstoff in die Atmosphäre. Nach und nach steigt der Gehalt des Gases in der Luft auf zehn Prozent an. Und so verdrängt der Sauerstoff allmählich die bis dahin dominierenden giftigen Ausdünstungen der Erdvulkane – und verändert die Atmosphäre radikal.

Als auch in die obersten Schichten der Lufthülle ausreichend Sauerstoffmoleküle gelangt sind, werden diese Moleküle zudem durch das Sonnenlicht in eine andere Verbindung verwandelt: in Ozon – ein Gas, das den größ-

Für die Pflanzenfresser im Meer ist das ergrünte Land eine Verlockung

Als die Räuber kommen, beginnt das Spiel von Jagen und Verstecken

ten Teil der UV-Strahlung abschirmt und daran hindert, auf die Erde zu dringen. Das geschieht so lange, bis sich schließlich eine weltumspannende Ozonschicht

gebildet hat, die den Planeten fortan wie eine Glocke vor der lebensschädigenden UV-Strahlung schützt.

Vor 1,2 Milliarden Jahren beginnt dann vermutlich ein erster, zaghafter Aufbruch des Lebens aus dem Meer: Auf den Landmassen siedeln sich in einer dünnen Schicht Cyanobakterien an – die Natur erobert jene freien und feuchten Räume an Land, die sich zur Besiedelung eignen.

Die Mikroben breiten sich, womöglich zum Teil in Symbiose mit einfachen Pilzen, an den Rändern der Kontinente aus – jenen Zonen etwa, die bei Ebbe für kurze Zeit trockenfallen, bis die Flut sie wieder überspült. Ins Landesinnere hingegen, dort, wo Wind über die Felsen fegt und Sandstürme wüten, vermögen sie wahrscheinlich nicht vorzudringen. Die Kontinente bleiben weiterhin steinige Welten ohne Leben – Landschaften wie auf einem fremden Planeten.

Etwa 700 Millionen Jahre vergehen, bis – so zumindest ein unter Forschern diskutiertes Szenario – im Süßwasser von Flüssen und Seen in einem langen evolutionären Prozess erste Wasserpflanzen entstehen, die zu den Grünalgen gehören (siehe Seite 72).

Diese tellerförmigen, mikroskopisch kleinen Gewächse sind möglicherweise die Vorläufer aller Landpflanzen. Sie siedeln wohl zuerst in den Flachwasserbereichen von Seen und Flüssen.

Wenn der Wasserspiegel sinkt, trocknen die meisten Grünalgen aus. Ihr grünes Gewebe färbt sich braun und verdorrt in der Sonne. Einige Individuen jedoch entwickeln eine wachsartige äußere Schicht, die sie in die Lage versetzt, Uferregionen zu besiedeln, die für längere Zeit trockenfallen.

Aus diesen Algen gehen im Laufe Abertausender Jahre Gewächse hervor, deren Gewebe eine derbe Haut davor schützt, Flüssigkeit zu verlieren – eine Grundausrüstung, um in Regionen oberhalb des Wasserspiegels zu überleben. Zudem entwickeln sich manche Pflanzenzellen durch Kontakt mit festem Untergrund zu ersten, primitiven Wurzeln. Diese moosähnlichen Pflanzen – sowie einfache Pilze, die oft mit ihnen in Symbiose

leben (siehe Seite 124) – wagen sich vor 460 Millionen Jahren landeinwärts in feuchte Regionen vor. Immer besser passen sich ihre Nachfahren an die Bedingungen an der Luft an.

Sie beginnen aufrecht zu wachsen, der Sonne entgegen. Wurzelähnliche Auswüchse verankern ihre Körper im Erdreich und lassen sie an Feuchtigkeit und mineralische Nährstoffe im Untergrund gelangen.

Vor rund 420 Millionen Jahren schließlich, so belegen Fossilienfunde in Shropshire, England, existiert bereits Cooksonia, eine der ersten höheren Landpflanzen, deren Sprosse sich Stimmgabeln gleich verzweigen, vier Zentimeter weit emporragen können und wie ein grüner Teppich die Uferzonen bedecken (siehe Seite 16).

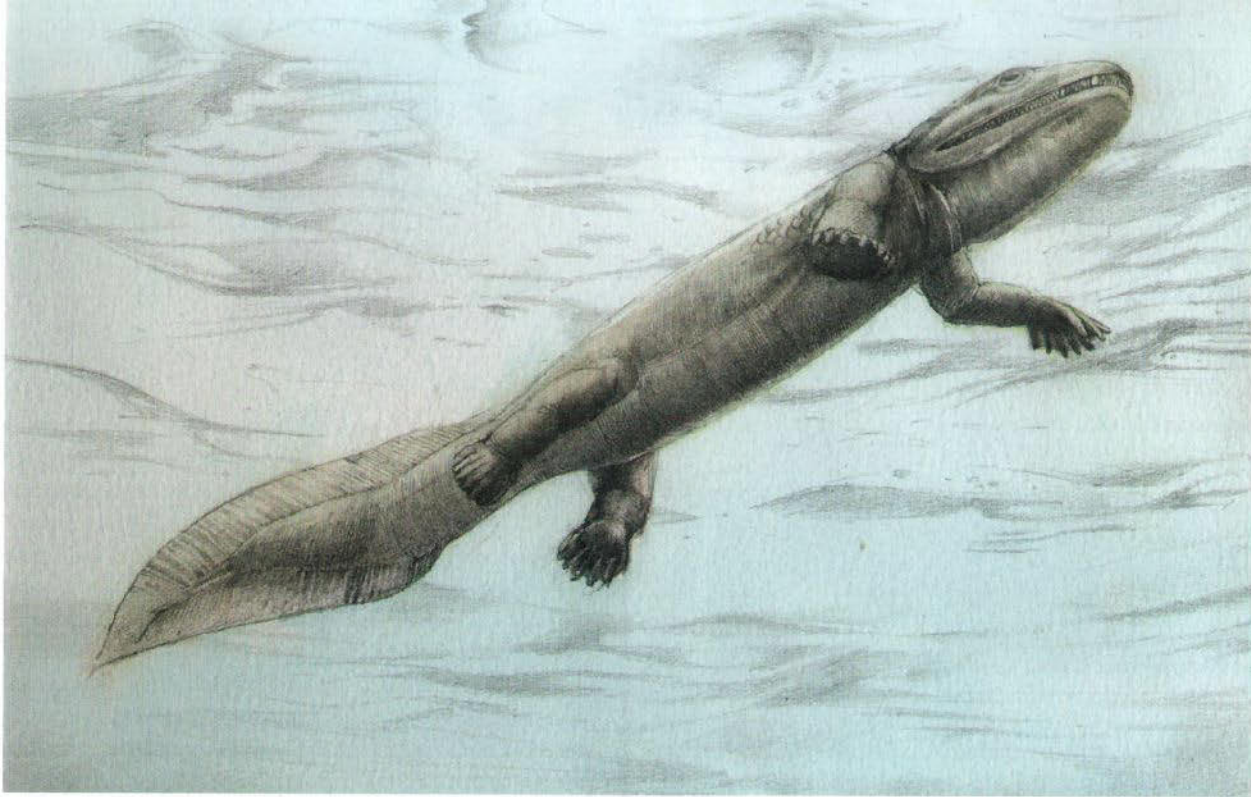
Mehrere Jahrmillionen später bringen Urfarne und Bärlappgewächse – die Abkömmlinge von Cooksonia – eine weitere Innovation hervor: Blätter. Neben kleinen, dornenartigen Ausstülpungen der Stängel bilden sich immer öfter größere, flächige Organe, die aus dem Stängel herausragen und die Körperoberfläche der Pflanze enorm vergrößern. Diese Lichtfänger richten sich zur Sonne aus und ernten große Mengen solarer Energie.

Zudem bilden die Gewächse im Inneren ihrer Sprosse versteifte Leitungen, die Wurzeln und Blätter miteinander verbinden, sodass Wasser und gelöste Stoffe direkt aus dem Erdreich bis in die Spitzen der grünen Triebe transportiert werden können.

Moose, Bärlappgewächse und Urfarne lassen den Fels und die nackten Geröllflächen nach und nach unter grünen Trieben und Blättern verschwinden (und stapeln sich über Jahrtausende zu den ersten Torfmooren auf – was heutigen Wissenschaftlern ihre Arbeit erleichtert; selbst in kieselsäurereichen Tümpeln lagern sich die Ur-Pflanzen ab und überdauern erstaunlich gut).

Mit ihren Neuerungen schaffen es die Pioniere, die ehemalige Todeszone, das Land, in einen geradezu idyllischen Lebensraum zu verwandeln. Denn zu jener Zeit sind die Kontinente ja noch eine Welt ohne Konkurrenz, eine Welt fast ohne Feinde: Keine anderen Gewächse machen den pflanzlichen Pionieren dort, auf dem Trockenen, den Standort streitig.

ALLERDINGS KOMMEN mit den Gewächsen auch die ersten Tiere an Land. Für Pflanzenfresser muss die neue Welt, in der noch keine Räuber lauern, äußerst verlockend sein. Bereits vor etwa 430 Millionen Jahren,



Der 365 Millionen Jahre alte Acanthostega gehört zu den vielen Zwischenstufen in der Evolution der Vierbeiner: Seine Lunge und die primitiven, mit acht Zehen bestückten Extremitäten erlauben ihm vermutlich eine kriechende Fortbewegung an Land. Seine kräftige Schwanzflosse aber beweist: Die meiste Zeit lebt der 50 Zentimeter bis ein Meter lange Räuber noch im Meer

wie Spuren von ihnen bezeugen, krabbeln millimetergroße, krebsartige Tiere an Land.

Diese Gliederfüßer, aus denen später Insekten hervorgehen, sind für die Bedingungen auf dem Trockenen erstaunlich gut gerüstet. Es scheint fast, als hätten sie den Landgang im Ozean vorbereitet: Im Gegensatz zu Fischen, Quallen, Kraken haben sie kräftige Beinpaare entwickelt, mit denen sie auf dem Meeresgrund laufen oder im Wasser Nahrung heranstrudeln können.

An Land vermögen sie ihren Körper mit den muskulösen Extremitäten gegen die Schwerkraft zu bewegen. Zudem umhüllt die aus dem Meer kriechenden Gliederfüßer ein fester Panzer aus Chitin (siehe Seite 84). Diese Schale schützt an der Luft vor Austrocknung und stabilisiert den Leib. Mit ihren Komplexaugen vermögen sie im Wasser wie auch an Land zu sehen.

Manche dieser winzigen Pioniere atmen durch Poren in ihrer Haut. Mit der Zeit entwickeln andere (etwa Insekten) dünne Röhren, die wie ein Netz ihren ganzen Körper durchziehen – den Kopf, die Eingeweide, die Beine und Fühler. Durch winzige Öffnungen in der Haut kann Luft in dieses Leitsystem dringen, sodass sämtliche Zellen mit Sauerstoff versorgt werden.

Noch aber scheuen viele der urtümlichen Landtiere Hitze und trockene Luft: Tausendfüßer etwa bohren unterirdische Gänge im Boden und ernähren sich dort von verrottenden Pflanzenresten. Erst über Jahrtausende gewöhnen sie sich an die ungewohnte Hitze des Tages und die nächtliche Kälte an Land.

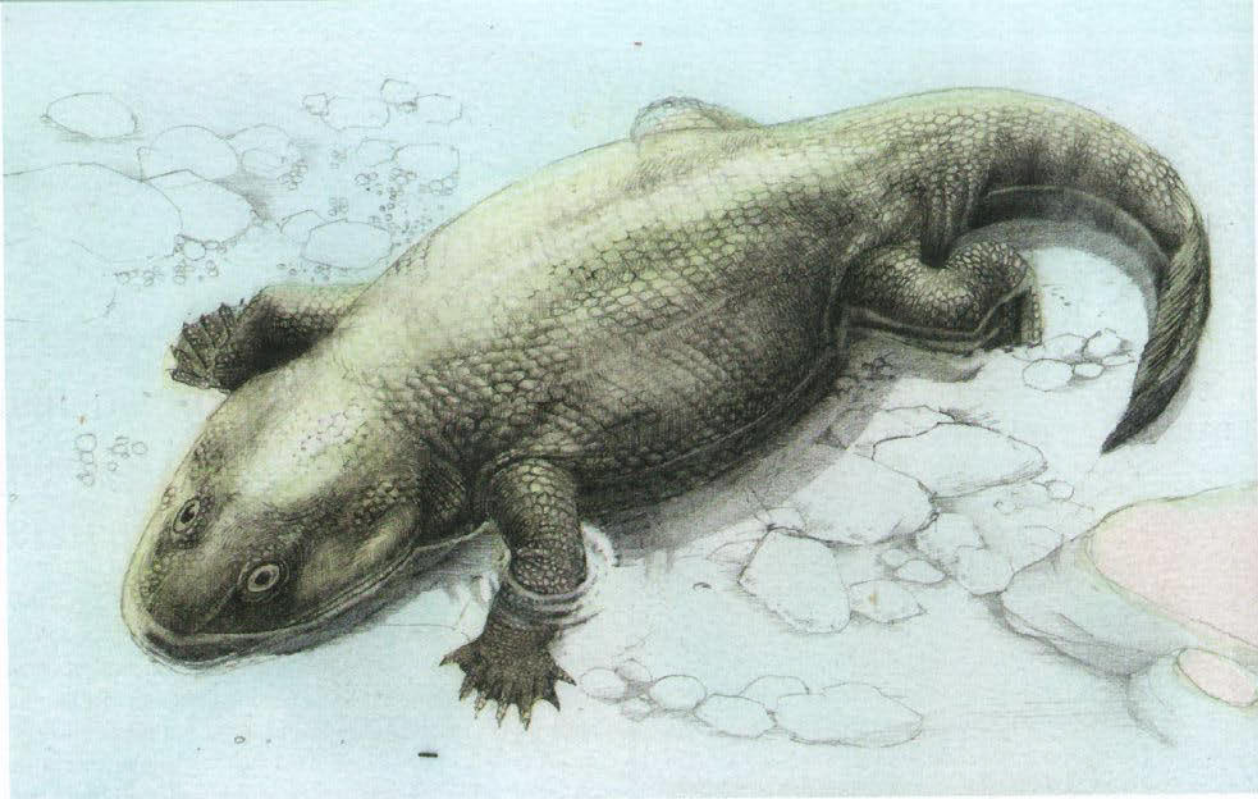
Wohl auf der Suche nach Nahrung und geschützten Brutstätten erkunden in der Zeit vor 410 Millionen Jahren immer neue Wesen das Land: Springschwänze etwa, millimetergroße Insekten, die sich mit ihrem muskulösen Schwanz auf der Flucht in die Luft katapultieren. Und Milben, die ihre Rüssel in die Stängel von Gewächsen stechen, um an deren Saft zu gelangen.

Kurz nach den Pflanzenfressern kommen schließlich auch Räuber an Land. Spinnenartige Tiere krabbeln aus dem Wasser, die ihre klauenförmigen Mundwerkzeuge in ihre Beutetiere bohren und deren Eingeweide aufsaugen. Aus anderen einst marinen Spezies gehen Hundertfüßer hervor, die ihren Opfern Giftkrallen in den Leib schlagen.

Die Wirbellosen haben nun den gewaltigen Schritt geschafft: Pflanzenfresser wie Räuber bevölkern die Kontinente und setzen das Spiel von Jagen und Verstecken an Land fort.

NUR DIE FISCHE, die Vorfahren aller Landwirbeltiere, haben sich noch nicht auf trockenes Terrain gewagt. Einige Spezies leben zwar schon in seichten Schelfmeeren, andere dringen immer weiter in Flachwasser vor, erkunden das Süßwasser der Binnenseen und Flüsse, die die Kontinente durchschneiden.

Doch sie haben weitaus schlechtere Voraussetzungen, die neue Welt zu erobern, als die panzertragenden Gliederfüßer. Ihnen fehlt fast alles für ein Leben an Land: Ein Fisch, der bei Ebbe im Watt strandet, kippt seitlich um,



Besser als alle bekannten Vorgänger oder Zeitgenossen ist der rund ein Meter lange Ichthyostega an das Landleben angepasst. Im Vergleich zum Acanthostega etwa ist die Schwanzflosse schmäler. Dennoch verbringt auch dieses Wesen vor 365 Millionen Jahren noch die größte Zeit im Wasser – seine Hinterbeine sind paddelförmig ausgebildet

windet sich, kann sich nicht vorwärtsbewegen. Seine Augen trocknen ein, seine Kiemen fallen in sich zusammen, vergebens schnappt er nach Luft – und erstickt.

Dennoch: Für manche Spezies muss das Leben an Land (vielleicht wegen der reichen Beute dort) zu verlockend gewesen sein. Und so wird selbst der Fisch irgendwann zum Vierbeiner. Die Verwandlung beginnt vor rund 400 Millionen Jahren. Der Landgang vollzieht sich wahrscheinlich, so zeigen fossile Funde, an den Küsten des Nordkontinents Laurussia.

Am Anfang der Ahnengalerie steht ein unverdächtigster Räuber: Eusthenopteron, ein langgestreckter, etwa

ein Meter langer Fisch, der in Küstengewässern anderen Fischen und Krebsen auflauert. Im Bereich der Schulter und des Beckens besitzt er zwei muskulöse Flossenpaare, mit denen er geschickt durchs Wasser manövriert. Es sind die Vorläufer der späteren Arme und Beine.

An seinem Skelett lässt sich bereits erkennen, dass sich aus diesem Tier einmal die Landwirbeltiere entwickeln werden.

Zudem verfügt Eusthenopteron, wie einige andere Fische seiner Zeit, über eine entscheidende Neuerung:

Er atmet nicht nur durch Kiemen. Sein Verdauungstrakt hat sich vorn im Körper zu einem sackartigen Gebilde ausgestülpt, einer einfachen Lunge. So ist der Raubfisch in der Lage, in sauerstoffarmen Gewässern nach Luft zu schnappen und das Atemgas herunterzuschlucken.

Manche Biologen gehen davon aus, dass aus entfernten Nachfahren dieses Raubfisches ein Wesen hervorgeht, das einige Millionen Jahre später an der Nordküste des Kontinents auftaucht: Tiktaalik, eine Kreatur, deren flache, breite Schnauze mit den spitzen Zähnen an die eines Krokodils erinnert.

Anders als ein Fisch kann Tiktaalik seinen Kopf unabhängig von der Wirbelsäule auf- und abbewegen, auch er atmet mit Kiemen und Lunge. Seine Linsenaugen sitzen oben auf dem Schädel. Mit ihnen kann das Tier sehr wahrscheinlich auch über Wasser gut sehen. Und zudem hat Tiktaalik vier Flossen, die so feingliedrig und beweglich sind, dass er im Schlack nach Schalentieren zu graben vermag; und so kräftig, dass er sich über sumpfige Flussbetten von einem Gewässer zum nächsten schleppen kann.

Manchmal liegt Tiktaalik am Boden von Flussmündungen und lauert auf Beute: Nähert sich ein Fisch, dann stützt sich der Räuber plötzlich auf seine Vorderflossen – und schnappt zu.

VOR MINDESTENS 365 Millionen Jahren lebt dann an der Ostküste Laurussias ein Wesen, dessen Extremitäten bereits eine Zwischenform aus Flosse und Bein

Erst mit der Eierschale aus Kalk gelingt der Abschied vom Meer

sind: Der ein Meter lange Ichthyostega ähnelt einem Alligator, er vermag über den Grund von Flüssen zu laufen und seinen tonnenförmigen Brustkorb mit den Flossenbeinen aus dem Wasser zu stemmen. Es ist das erste Tier (zumindest ist es das bislang älteste bekannte Fossil), das dort, wo zuvor die Flossen endeten, sieben Finger und sieben Zehen ausgebildet hat.

Ichthyostega kriecht über Land, indem er die Vorderbeine ausstreckt, die Brust nach vorn drückt und seinen plumpen Leib mit den Hinterbeinen nachschiebt. Es muss ein mühsames Vorankommen gewesen sein, ein Kraftakt wider die Gravitation. Nach Nahrung jagt der Vierbeiner daher vermutlich noch im Küstenwasser.

Ichthyostega ähnelt mysteriösen Strandgängern, die durch schlickiges Watt an der Südküste Laurussias streifen. Sie können ihre Körper wohl schon über den Boden heben und auf dem Trockenen laufen. Von ihnen sind allerdings bisher keine Skelette gefunden worden. Nur ihre Spuren sind im Gestein erhalten geblieben. Und die bezeugen, dass die unbekannten Wattwanderer versetzten Schrittes durch den Schlamm marschieren (ähnlich wie ein Salamander).*

Vermutlich bewegen sich auch ihre Hüften, sodass die Beine ausschwingen können und somit größere Schritte gelingen. Die Wesen laufen schon so sicher und elegant, dass noch nicht einmal ihr Schwanz hinter ihnen durch den Schlamm streicht: Zwischen den fossilen Fußspuren, die in einem Steinbruch im Südosten des heutigen Polen gefunden wurden, haben die Tiere keine Schleifspuren hinterlassen.

Die Vierbeiner haben Lungen, ihre noch fischartige Haut droht in luftiger Umgebung jedoch leicht auszutrocknen.

Die urtümlichen Landwirbeltiere bleiben noch Millionen Jahre an ihre ursprüngliche Heimat, den Ozean und die Süßgewässer, gebunden. Denn ihr gallertartiger Laich ist nur von einer dünnen Hülle umgeben. Außerhalb des Wassers vertrocknen ihre Eier. Sie sind gleichsam eine letzte Nabelschnur zum Meer, die verhindert, dass die Vierbeiner bis ins Innere der Landmassen vorzustoßen vermögen.

Die Pflanzenwelt hat sich derweil immer spektakulärer entfaltet: Die ehemals kleinen Farne wachsen zu meterhohen Pflanzen heran, Schachtelhalme und Schuppenbäume mit rautenförmig gegliederter Stammoberfläche erobern die Kontinente. Gewaltige Regenwälder breiten sich aus, die so viel Sauerstoff produzieren, dass

dessen Gehalt in der Atmosphäre auf 35 Prozent ansteigt (heute liegt er bei 21 Prozent).

Vielleicht ist es die enorme Menge an Sauerstoff, die einigen wirbellosen Tieren zu monströsem Wachstum verhilft: Aus den einst millimetergroßen Krabblern gehen unter anderem Tausendfüßer hervor, die bis zur Größe eines Menschen heranwachsen.

Auch die Skelette mancher Wirbeltiere werden kräftiger. Ihre plumpen Körper passen sich zunehmend der Welt jenseits des Wassers an, sie bewegen sich immer gewandter. Die seitlich vom Leib abstehenden Beine rücken näher an den Körper, sodass sie dessen Gewicht immer besser tragen können. So leben an jenem Süßwassersee im Süden von Laurussia vor 328 Millionen Jahren auch Vorfahren dieser ersten Reptilien: echsenartige Kreaturen mit schuppiger Haut.

Dann, vor rund 300 Millionen Jahren, beginnt die letzte Verbindung zum Meer zu reißen. Einige Tiere, die Vorgänger der Reptilien, legen Eier, die nicht mehr von einer hauchdünnen, knitrigen Membran umhüllt sind, sondern von einer kalkhaltigen Schale.

Dieses erste hartschalige Ei ist der perfekte Brutkasten für das trockene Terrain. Es schützt den im Inneren schwimmenden Embryo vor Austrocknung, vor Bakterien, vor der Sonnenstrahlung.

Es sind die modernen Eier, die den Wirbeltieren ermöglichen, in den folgenden Jahrtausenden das Landesinnere zu erkunden – die Wüsten, Steppen, Gebirge.

Mehr als drei Milliarden Jahre, nachdem das Leben entstanden ist, haben nun Pflanzen wie Tiere das letzte Drittel der Erdoberfläche erschlossen, das Land. Und dort, auf dem Trockenen, werden sie einen Artenreichtum entwickeln, der den ihrer wässrigen Heimat bei Weitem in den Schatten stellt.

Denn während im Meer heute schätzungsweise eine Million Spezies leben, sind es an Land vermutlich 50-mal mehr. □

Dirk Liesemer, 32, ist Wissenschaftsjournalist in Münster. Mitarbeit: **Bettina Süssemilch**. Für den Illustrator **Christian Schneider**, 31, ist diese Arbeit das Debüt in GEOkompakt. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Stephan Schultka und Dr. Florian Witzmann, Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung an der Humboldt-Universität zu Berlin.

Memo: **EROBERUNG DES LANDES**

- **Vor 460 Millionen Jahren** besiedeln erste moosähnliche Pflanzen die Ufer.
- **Krebsartige Kreaturen** folgen ihnen vor 430 Millionen Jahren.
- **Der erste Vierbeiner** streift vor 395 Millionen Jahren über Land.
- **Vor rund 330 Millionen Jahren** bilden sich auf dem Großkontinent Laurussia erstmals ausgedehnte Landschaften aus mächtigen Farnen und Schuppenbäumen.
- **Aus winzigen Krabblern** werden vor etwa 315 Millionen Jahren menschengroße Tausendfüßer.
- **Reptilien-Ahn** werden vor 300 Millionen Jahren vom Wasser unabhängig.

* Die Funde jener fossilen Fußspuren werden auf eine Zeit vor 395 Millionen Jahren datiert. Da jedoch bislang keine Körperfragmente aus jener Zeit gefunden worden sind, orientiert sich der vorliegende Text an den wenigen erhalten gebliebenen Überresten, die die Entwicklung vom Wasser- zum Landleben nachvollziehen lassen; die aber sind einige Millionen Jahre jünger als die Fußspuren.

Das Prinzip Wachstum

Würde sich die befruchtete Eizelle einfach immer nur teilen, entstünde ein unförmiger Zellhaufen. Doch ein ganzes Ensemble an Genen und Steuersubstanzen sorgt dafür, dass Zellen unterschiedliche Formen und Funktionen annehmen, sich zu Geweben und Organen fügen und schließlich einen komplexen Körper heranwachsen lassen

Text: Christian Heinrich

Das Leben eines jeden größeren, sich sexuell vermehrenden Organismus – sei es ein Elefant, eine Fliege oder eine Eiche – startet immer nach dem gleichen Muster: Eine einzelne Zelle, in der sich mütterliches und väterliches Erbgut vermischt haben, beginnt sich zu teilen.

Und obwohl diese rundliche Zelle keinerlei äußere Form oder Struktur zeigt, wächst aus ihr ein hochkomplexes Lebewesen heran, das – im Falle etwa eines typischen Landwirbeltieres – Kopf und Schwanz besitzt, mit vier Beinen über die Erde huscht, sich dank zweier Augen orientieren kann, mit seiner Lunge atmet und mit dem Magen-Darm-Trakt Nahrung verdaut.

Wie aber kann aus einer einzigen befruchteten Eizelle ein Kolibri entstehen? Oder ein Schimpanse, dessen Gehirn allein aus mehreren Milliarden Nervenzellen besteht und dessen Körper aus rund 200 unterschiedlichen Zelltypen zusammengesetzt ist?

Woher weiß eine Zelle am Fühler einer Ameise oder am Rande eines Ahornblattes, dass hier Schluss ist und sie sich nicht mehr teilen soll? Wie erfährt sie, welche Aufgaben sie übernehmen soll, ob sie zur Haut gehört, zum Darm?

Es ist der Vorgang Wachstum, der diese erstaunliche Entwicklung möglich macht. Ohne diesen könnte es keine komplexen Organismen geben; die Entwicklung wäre vor Milliarden von Jahren stehen geblieben – bei einzelnen, isoliert agierenden Zellen.

Um den Körper eines Vielzellers heranwachsen zu lassen, müssen drei Prozesse zusammenwirken:

- Zellteilung – Zellen vermehren sich durch Teilung und nehmen Nährstoffe auf; Masse und Größe des Organismus nehmen zu;

- Zelldifferenzierung – Zellen verändern ihre Struktur und Funktionen, spezialisieren sich auf Aufgaben;

- Gestaltbildung – Zellen lagern sich zu Geweben und Organen zusammen, der Organismus nimmt Form und Gestalt an.

Und natürlich gehört zum Wachstum auch dessen gezieltes Ende. Zellen müssen wissen, wann sie sich nicht mehr teilen sollen. Geschieht das nicht, kann es zu unkontrolliertem Wachstum kommen. Bösartige Wucherungen, Krebs, sind die Folge.

DER AUSGANGSPUNKT aller Entwicklungsprozesse ist die Eizelle, eine kleine Kugel, aus der alle anderen Zellen entstehen. In vielen Fällen ist an ihr kein oben und unten, kein hinten und vorn, nicht links oder rechts zu erkennen.

Das ändert sich erst, wenn ein Spermium mit der Eizelle verschmilzt. Denn nun breitet sich auf der Außenseite der Zelle von ebenjener Stelle, an der das Spermium andockt, eine Welle elektrischer Impulse aus.

Es werden zahlreiche Moleküle gebildet: Botenstoffe, die wiederum andere Substanzen in Bewegung setzen. Es entsteht eine Art dreidimensionales Koordinatensystem, in dem unter anderem anhand der Eintrittsstelle des Spermiums unabänderlich festgelegt wird, wo oben und unten ist, vorn und hinten.

Danach teilt sich die Eizelle zum ersten Mal. Das Wachstum hat begonnen.

Würden sich die Zellen allerdings einfach immer weiter verdoppeln, entstünde lediglich eine gestaltlose Masse, ein nicht lebensfähiger Zellhaufen.

Doch es kommt anders: Die Zellen beginnen sich zu spezialisieren und Formen zu bilden. Recht früh ordnen sich manche von ihnen – bei den meisten Tieren zumindest – selbstständig so an, dass sie einen Hohlraum umschließen. Er wird später einmal den Darm bilden.

Doch woher wissen die Zellen, dass sie zur Wand des Darms gehören? Woher andere, dass sie Bestandteil eines Knochens, Muskels oder Auges werden sollen? Wer gibt die Anweisung?

Es sind die Erbmoleküle in der Zelle. Die Gene enthalten die entscheidenden Informationen. Sie legen fest, wie das Lebewesen grundsätzlich aufgebaut ist und wie es mit dem Wachstum beginnen muss, um zu einer höheren Ordnung zu finden – von der aus sich dann, fast wie von selbst, immer neue Entwicklungsschritte ergeben.

Und das Prinzip ist überall gleich. Bei der Taufolie Drosophila etwa konnten Forscher eine Handvoll Gene identifizieren, die während der Embryonalphase bestimmen, wo am Körper Fühler, Beine und Flügel gebildet werden.

Zunächst führen diese übergeordneten Gene Regie bei der Entstehung des neuen Lebewesens. Dazu werden sie „abgelesen“, was bedeutet, dass anhand ihrer Informationen bestimmte Eiweißmoleküle hergestellt werden.

Diese Moleküle setzen wiederum eine Flut von Prozessen in Gang. Eine Art Dominoeffekt: In einer strengen Hierarchie dirigieren sie nachgeordnete



Gene, die weitere Spezialisierungen einleiten. In einer Zelle etwa wird ein Schalter umgelegt, der in letzter Konsequenz festlegt: Sie und alle ihre Nachfolger gehören jetzt zur Abteilung „linkes Bein“.

Ebenso läuft das anderswo im Körper ab. Schon früh etwa wird ein genetischer Schalter aktiviert, der eine Zellgruppe beauftragt, das Herz, eine Hand, das Nervensystem oder die Haut zu bilden. Feinste Unterschiede in der Menge von Signalstoffen bestimmen, welche Gene aktiviert und welche für immer stillgelegt werden.

Bald ist eine große Komplexität erreicht. Dabei spezialisieren sich die Zellen immer weiter. Manche werden zum Bestandteil der Haut, dann innerhalb der Haut zu Zellen, die Hornsubstanz und so die schützende Oberfläche des Körpers bilden.

Die Zellen sind mit einem Studenten vergleichbar, der sich immer weiter spezialisiert: der nach dem Medizinstudium Facharzt für Chirurgie wird und sich dann auf Herzoperationen konzentriert.

Während einer solchen Entwicklung steht die Zelle ständig mit anderen in Kontakt. Sie schüttet Botenstoffe aus, hält über Oberflächenmoleküle zu Nachbarzellen Verbindung, tauscht Stoffe aus.

Diese Signalmoleküle können sich über mehrere Zellen ausbreiten, wobei die unmittelbar benachbarten Zellen mehr von dem Signalmolekül empfangen als weiter entfernt liegende Zellen.

Das kann einen großen Einfluss auf ihre weitere Entwicklung haben, da eine hohe Konzentration eines Signalmoleküls oftmals andere Gene anschaltet als eine geringe Konzentration.

Auf diese Weise teilt eine Zelle den anderen mit, wer sie ist. Umgekehrt erhält sie von ihrer Umgebung alle Informationen, um sich zu orientieren, um zu erfahren, was ihre Nachbarn tun und um sich weiterzuentwickeln.

SIND ALLE ORGANE funktionsfähig ausgebildet und ist die Grundgestalt des Körpers vorhanden, beginnt das Größenwachstum. Es geht nun darum, in die Länge und Breite zu wachsen.

Bei Säugetieren steuern Hormone diesen Prozess. Noch in seinem ersten Lebensjahr schüttet das Gehirn des Neugeborenen den wichtigsten dieser Botenstoffe aus: das Wachstumshormon. Es wirkt im ganzen Körper und ist hauptverantwortlich für das Wachstum in den ersten Jahren.

Auch das Größenwachstum richtet sich nach einem festgelegten Programm. Dafür sind bei Säugetieren die langen Röhrenknochen in den Armen oder den

Beim kleinen Chamäleon sind bereits alle Organe, Gewebe und Körperteile angelegt und funktionsfähig. Nun muss es nur noch an Größe zulegen. Dazu schüttet sein Körper Wachstumshormone aus, die bestimmte Zellen zur Teilung anregen

Beinen besonders wichtig. Sie haben eigene Wachstumszonen, in denen ständig neue Substanz für die Knochenbildung produziert wird – wodurch sie in der Länge wachsen.

Schließlich aber stellen diese Zentren ihre Arbeit ein, und der Organismus hört auf zu wachsen.

Womöglich haben die Zellen dort eine bestimmte, festgelegte Zahl von Teilungen hinter sich; vielleicht erfahren sie auf irgendeine Weise, dass ein weiteres Wachstum schädlich sein könnte – die Forscher wissen es nicht genau.

Ein paar Jahre später beginnen Alterungsprozesse einzusetzen.

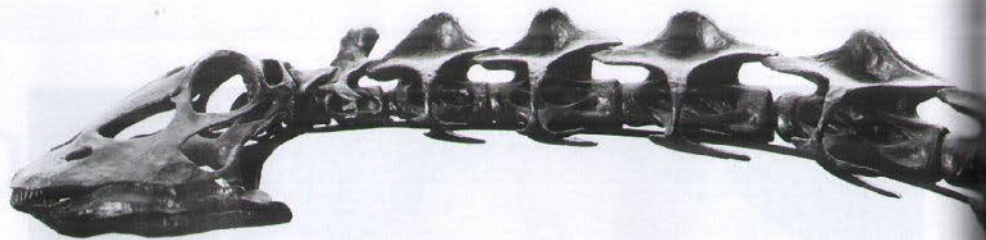
Und irgendwann kann der alternde Körper seine Lebensfunktionen nicht mehr erfüllen oder wird durch eine Krankheit entscheidend geschwächt. Er stirbt – und mit ihm alle seine Zellen.

Das ist der hohe Preis, den die spezialisierten Zellen zahlen müssen: Indem sie sich auf eine Funktion festlegen, geben sie alle Möglichkeiten auf, später noch eine andere Richtung einzuschlagen und sich erneut zu teilen. Sie sind unweigerlich dem Tod geweiht.

Doch es gibt Ausnahmen: Jene Zellen, aus denen bei einem weiblichen Wesen die Eier reifen und beim männlichen die Spermien, behalten lange die Fähigkeit, sich zu teilen.

Und wenn Eizelle und Spermium sich nach einem Geschlechtsakt vereinigen, wenn Nachwuchs gezeugt worden ist, dann beginnt der Kreislauf von vorn. □

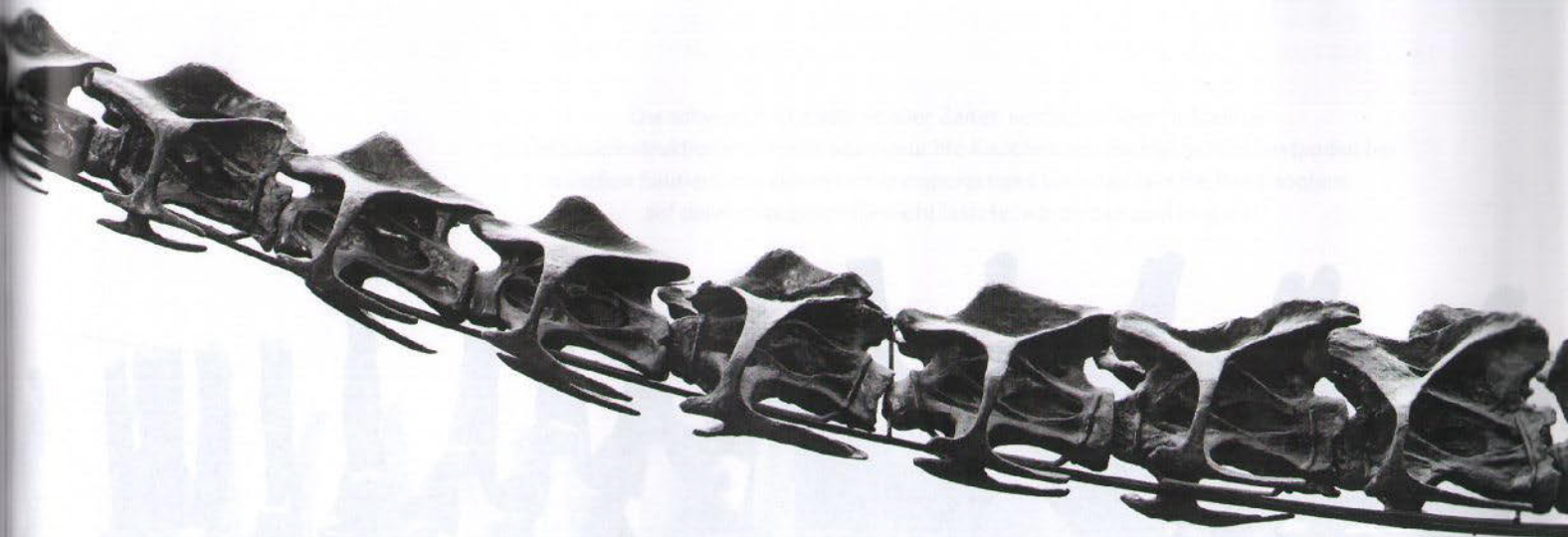
Dr. Christian Heinrich, 30, ist Journalist in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Elisabeth Knust, Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden.



Dinosaurier

Das Geheimnis der Giganten

**Nie gab es auf der Erde so gewaltige Kreaturen:
Manche Dinosaurier waren lang wie ein Tennisplatz
und hoch wie ein mehrstöckiges Haus. Wissen-
schaftler versuchen, das Phänomen des Riesenwuchses
zu verstehen – denn augenscheinlich brachen
die Donnerechsen mit ihrer Größe jede
Regel der Natur**



Bei Langhalssauriern wie diesem 18 Meter langen Exemplar eines *Diplodocus longus*, der vor 150 Millionen Jahren durch Nordamerika wanderte, waren die Lungen wie bei Vögeln mit ausgedehnten Luftsäcken verbunden. Diese Hohlräume wanden sich wie gewaltige, verzweigte Schläuche durch die Wirbelknochen und verminderten das Gewicht der Kolosse mitunter beträchtlich

Text: Alexandra Rigos Foto: Berthold Steinhilber

Er war das vermutlich mächtigste Tier, das je über die Erde schritt. Rund 40 Meter maß *Argentinosaurus huinculensis* vom Kopf bis zur Schwanzspitze, seine Schultern erhoben sich acht Meter über den Boden. Allein sein Oberschenkelknochen hätte mit 2,30 Meter Länge einen ausgewachsenen Mann deutlich überragt.

Experten schätzen das Gewicht des Kolosses auf 70 Tonnen, das entspricht einem Dutzend stattlicher Afrikanischer Elefanten. Als das in Teilen rekonstruierte Skelett Ende 2009 im Bonner Museum Koenig ausgestellt werden

sollte, musste *Argentinosaurus* mit seinem mehrere Meter langen Hals, den kolossalen Beinen und dem weit ausladenden Schwanz ein eigens errichtetes Zelt beziehen – der Gigant passte nicht ins Haus.

Wissenschaftler hielten die Riesensaurier wie den *Argentinosaurus* lange für ein Kuriosum der Natur: für eine Fehlentwicklung unter den Riesenechsen, die sich mit ihren überdimensionierten Leibern zwangsläufig dem Untergang entgegenschleppten.

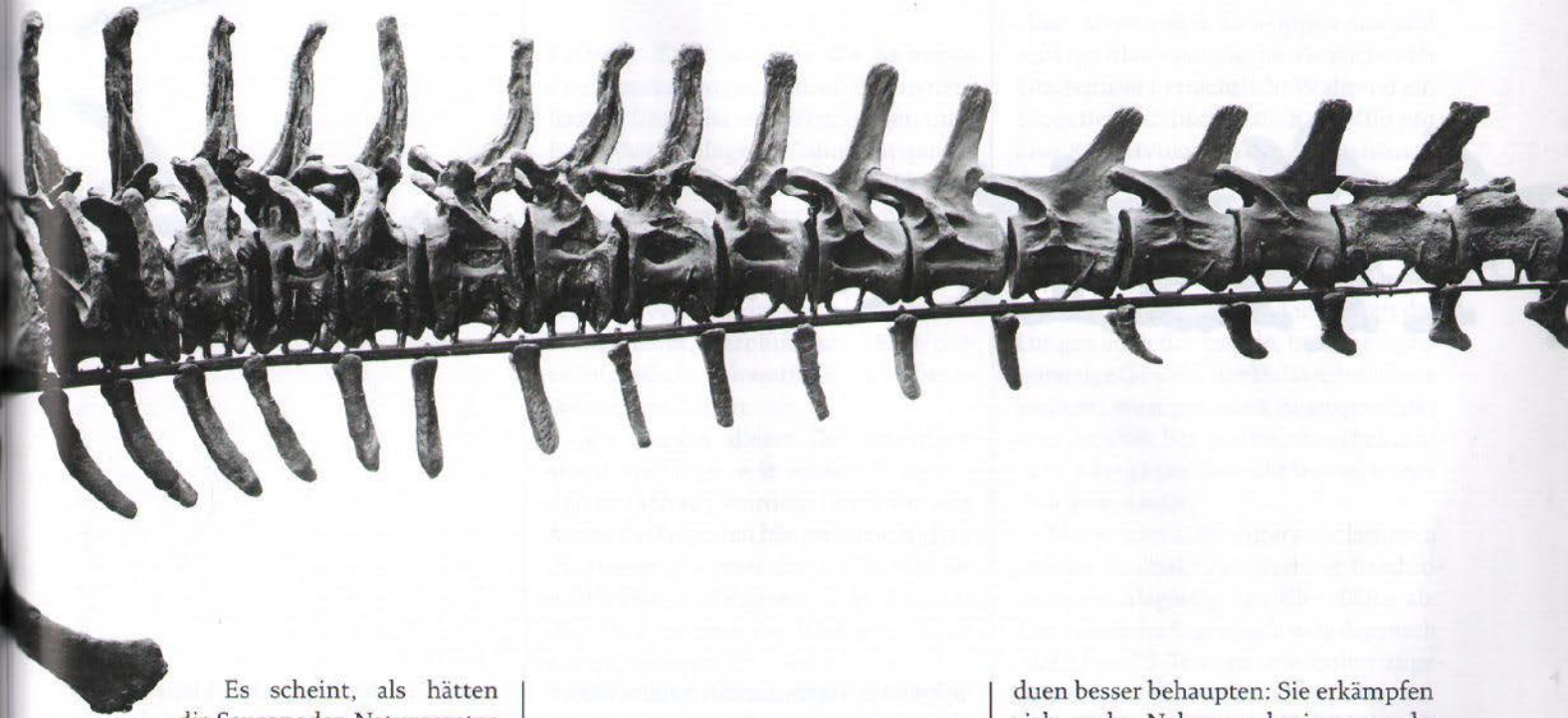
Ein Irrtum. Wie Paläontologen heute wissen, waren die pflanzenfressenden Langhalssaurier (Sauropoden), zu denen *Argentinosaurus* zählt, vielmehr ein Erfolgsmodell der Evolution.

100 Millionen Jahre lang, bis zum Ende der Dinosaurier-Ära vor 65 Millionen Jahren, dominierten sie die Welt der Pflanzenfresser. Nicht alle erreichten das Format von *Argentinosaurus*, doch tauchten immer wieder und in allen Winkeln der Erde solche Riesen auf. Insgesamt kennen Paläontologen bislang etwa 120 Sauropoden-Gattungen, und noch immer graben sie Skelette unbekannter Arten aus.

Aber wie konnten Landtiere, die ja anders als Wale der vollen Last der Schwerkraft ausgesetzt sind, so groß werden? Wie vermochten sich solche Giganten in der Evolution durchzusetzen? Und weshalb erreichten Landlebewesen nie wieder solche Ausmaße?



Die schwersten Landtiere aller Zeiten verfügten über raffinierte Leichtbaukonstruktionen: Wenig beanspruchte Knochen wie die Halswirbel bestanden bei manchen Sauriern aus einem fast styroporartigen Gewebe. Nur die Beinknochen, auf denen das ganze Gewicht lastete, waren dick und massiv



Es scheint, als hätten die Sauropoden Naturgesetze überwunden, an denen alle übrigen Tiere scheiterten. Zwar gab es auch in anderen Entwicklungslinien der Dinosaurier Riesen wie den gehörnten Triceratops, doch der gehörte mit einem Gewicht von zehn Tonnen in eine andere Liga. Ebenso die Rekordhalter unter den Säugetieren: Riesennashörner der Gattung Indricotherium, die vor mehr als 30 Millionen Jahren lebten.

Und so ragen die Sauropoden auch unter ihresgleichen als Ausnahmeerscheinungen heraus – als Anschauungsobjekte für ein Phänomen, das Biologen „Gigantismus“ nennen.

DASS EIN STÄTTLICHER Körper im Konkurrenzkampf der Natur von Vorteil sein kann, liegt auf der Hand. Zum einen bietet Größe einen gewissen Schutz vor Raubtieren, und auch innerhalb ihrer eigenen Art können sich große Indivi-

Der erste Dinosaurier lebte vor 232 Millionen Jahren und wog nur 500 Gramm

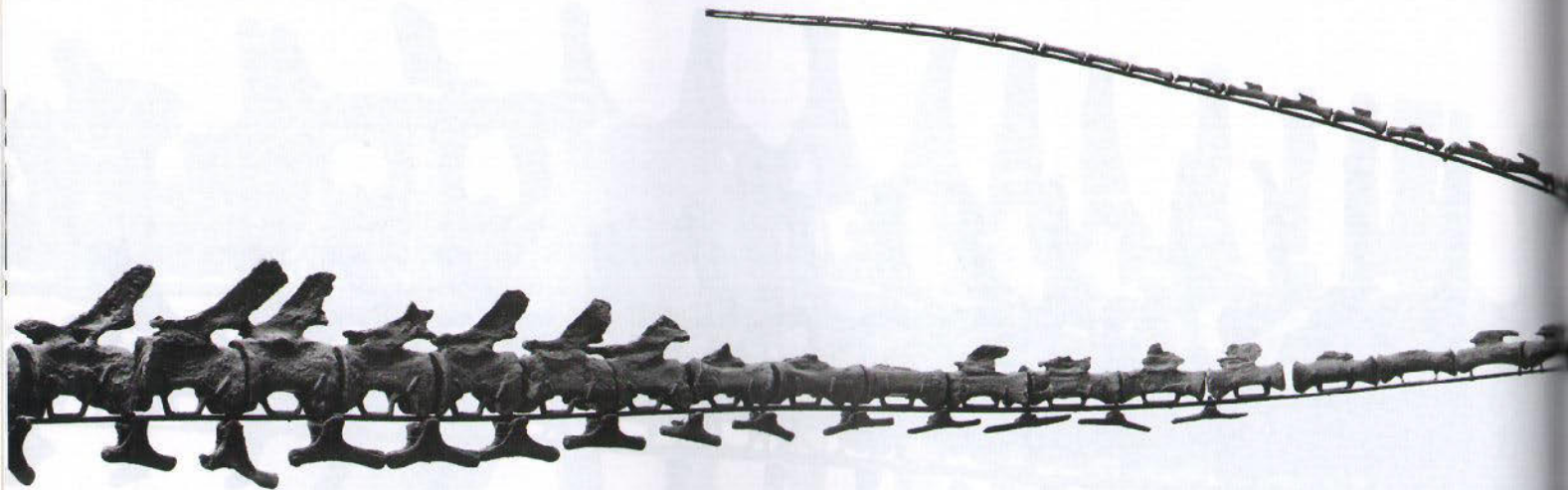
duen besser behaupten: Sie erkämpfen sich mehr Nahrung, besiegen mehr Nebenbuhler in Rivalitätskämpfen und können so leichter Geschlechtspartner für sich gewinnen. Das eröffnet ihnen bessere Fortpflanzungschancen.

Zum anderen vermögen sich größere Tiere oft vollkommen neue Futterquellen zu erschließen. So konnten die Sauropoden hoch oben in den Baumkronen weiden, während andere Dinosaurier mit niedrigerem Gestrüpp vorliebnehmen mussten.

Schon Ende des 19. Jahrhunderts beobachtete der amerikanische Paläontologe Edward Drinker Cope, dass es in Evolutionslinien offenbar einen natürlichen Drang der Arten gibt, immer größer zu werden. So entwickelten sich aus dem fuchsgroßen Urpferd die modernen Wildpferde mit einem Stockmaß von 1,40 Metern.

Diese „Cope'sche Regel“ lässt sich auch bei den Dinosauriern beobach-

Mit seinem peitschenartigen Schwanz wehrte der Diplodocus, dessen Skelett heute im Forschungsinstitut und Naturkundemuseum Senckenberg in Frankfurt am Main ausgestellt ist, womöglich räuberische Angreifer ab



ten – denn die späteren Riesen begannen einst als Zwerge.

Ihr bislang ältester bekannter Vorfahr *Lagosuchus* lebte vor 232 Millionen Jahren; er wog nur 500 Gramm und war 45 Zentimeter lang. Gleichwohl zeigte er schon die wichtigsten Merkmale der ersten Dinosaurier: *Lagosuchus* besaß einen langen Schwanz und lief auf zwei Beinen, die säulenartig unter dem Körper standen – und nicht, wie bei Krokodilen oder Eidechsen, seitlich abgespreizt waren.

Wie alle frühen Saurier war er Fleischfresser. Doch wenige Millionen Jahre später entdeckten manche Dinosaurier die Pflanzenkost – so gruben Paläontologen in Argentinien einen Saurier namens *Panphagia* aus, der vor 228 Millionen Jahren lebte und dessen Zähne darauf schließen lassen, dass er ein Allesfresser war. Auch der gestreckte Hals, die Handknochen und Zähne des etwa zehn Kilogramm

schweren Tieres ähneln bereits denen der späteren Langhalssaurier.

Vor 210 Millionen Jahren trat schließlich der erste echte Langhalssaurier auf. *Isanosaurus*, ein reiner Pflanzenfresser, maß wohl um die 6,5 Meter. Das gefundene Exemplar mit seinen 15 Tonnen Lebendgewicht konnte sich anders als seine zweibeinigen Vorfahren nur noch auf allen vieren fortbewegen.

Bei ihrer Entwicklung vom flinken, zweibeinigen Räuber zum vierbeinigen Pflanzenfresser legten die Sauropoden also rasant an Körpergröße und mehr noch an Gewicht zu.


Doch selbst wenn Leibesfülle Vorteile im Überlebenskampf mit sich bringt (schließlich hatten sich aus *Lagosuchus* und seinesgleichen auch eine Vielzahl aggressiver Raubsaurier entwickelt), so ist sie doch auch ein Handicap: Große Tiere brauchen mehr Nahrung, und da jeder Lebensraum nur begrenzt Ressourcen bietet, bleiben ihre Popula-

tionen in der Regel eher klein. Präriehunde etwa leben mitunter in Kolonien von 100 oder mehr Tieren, Giraffen dagegen bilden Herden von höchstens drei Dutzend Individuen.

Eine ökologische Krise, etwa eine Dürrephase oder eine Seuche, kann daher leicht die ganze Art auslöschen. Berechnungen haben gezeigt, dass es in den vergangenen 65 000 Jahren eine konstante Beziehung gab zwischen dem jeweils größten Wirbeltier und der Fläche des Landes, auf der es lebte.

Doch für die Sauropoden galt diese Beziehung offenbar nicht: Sie waren nahezu zehnmal größer, als sie nach dieser Kalkulation hätten sein dürfen.

Und nicht nur ökologische, auch physiologische Limits scheinen die Riesensaurier gesprengt zu haben: Wie konnten sie überhaupt genug fressen, wenn schon ein maximal sechs Tonnen schwerer Elefant bis zu 18 Stunden am Tag mit der Nahrungsaufnahme beschäf-



Bei manchen Sauriern erreichte allein der Schwanz eine Länge von mehr als 14 Metern

tigt ist? Wie konnten sie hinreichend schnell zur Geschlechtsreife heranwachsen? Wie vermochte ihr Herz Blut in den extrem langen Hals hinaufzupumpen, wie hielten ihre Adern dem dafür notwendigen Blutdruck stand?

LANGE ZEIT stellten die Sauropoden Forscher vor ein Rätsel. Erst in den letzten Jahren ist es Paläontologen und Evolutionsbiologen, Computerspezialisten und Werkstoffforschern, Physiologen und sogar Weltraummedizinern gelungen, das Geheimnis des Gigantismus zumindest ein wenig zu lüften. Die Wissenschaftler zeichnen ein völlig neues, verblüffendes Bild der vermeintlich schwerfälligen, lebensschwachen Riesen.

Am Beginn dieser Detektivarbeit stand die Frage, wie schwer Sauropoden tatsächlich wurden. Denn von der Masse der Giganten hängen viele andere Parameter ab, etwa die nötige Größe und Leistungsfähigkeit ihrer Organe, ihre Wachstumsrate und vor allem ihr Energiebedarf.

Um frühere Schätzungen zu überprüfen, nach denen zum Beispiel der 13 Meter hohe *Brachiosaurus brancai* auf mehr als 74 Tonnen Lebendgewicht kam, tastete der Vermessungsingenieur Stefan Stoinski von der Technischen Universität Berlin etliche Dinosaurierskelette mit einem hochauflösenden Laserscanner ab – darunter das weltgrößte aufgebaute Skelett eines *Brachiosaurus* im Berliner Naturkundemuseum.

Mit einer neuartigen Software modellierte er auf das digitale Gerippe anschließend einen Körper. Um die Weichteile einigermaßen richtig zu dimensionieren, stützte sich der Forscher auf neueste Forschungsergebnisse und auf Daten von heute lebenden Großsäugern wie Nashörnern und Elefanten.

Und er berücksichtigte eine Entdeckung, die Paläontologen erst vor einigen Jahren gemacht haben: Die Sauropoden besaßen ebenso wie die nahe verwandten Raubsaurier (Theropoden)

und deren Nachfahren, die Vögel, Lungen, die mit ausgedehnten Luftsäcken verbunden waren.

Diese Hohlräume wanden sich wie gewaltige, verzweigte Schläuche durch die Wirbelknochen, füllten bei manchen Arten sogar die Rippen aus und senkten das spezifische Gewicht der Dinosaurier beträchtlich: Während ein Säugetier durchschnittlich ein Kilo pro Liter Körpervolumen wiegt, brachten es die Sauropoden vermutlich nur auf 800 Gramm. Damit waren die schwersten Landtiere aller Zeiten paradoxerweise raffinierte Leichtbaukonstruktionen.

Dazu trug neben den Luftsäcken der Lungen auch das poröse, beinahe styroporartige Gewebe der Halswirbel sowie anderer, weniger stark beanspruchter Knochen bei. Nur die Beinknochen, auf denen das ganze Gewicht lastete, waren dick und massiv.

Mit seinen Computersimulationen speckte Stoinski den Berliner *Brachiosaurus* schlagartig um die Hälfte ab: Der haushohe Sauropode wog demnach nicht fast 75 Tonnen wie früher angenommen, sondern nur 38 Tonnen.

Und eine derzeit weitere Neuberechnung, die Veränderungen der Skelettanatomie berücksichtigt – vor allem die Stellung der Rippen –, wird wohl ein noch niedrigeres Gewicht ergeben: „Ich schätze, es wird bei etwa 30 Tonnen liegen“, sagt Stefan Stoinski. Sein Kollege Heinrich Mallison vom Berliner Naturkundemuseum hat die digitalen Saurier sogar laufen lassen. Mithilfe einer speziellen Software konnte er abschätzen, wie sich die Kolosse bewegt haben mochten – und zeigen, dass ein 27 Meter langer *Diplodocus* vermutlich 20 km/h schnell marschiert ist und sich bequem auf die Hinterbeine stellen konnte.

DOCH SELBST wenn die Riesensaurier erheblich leichter und beweglicher waren als gedacht: Das Rätsel des Gigantismus war damit noch nicht gelöst. Schließlich wog *Brachiosaurus* auch nach den neuen Schätzungen noch

doppelt so viel wie der schwerste Säuger, den es je gegeben hat. Und andere Sauropoden wie *Argentinosaurus* waren noch weit massiger.

UMSO ÜBERRASCHENDER ist es, dass die Giganten aus Eiern heranwuchsen, die kaum größer als die von Straußen waren. Wie schnell und in welchen Lebensphasen die Tiere ihr Tonnengewicht zulegen konnten, erforscht derzeit ein Team um den Paläontologen Martin Sander von der Bonner Universität.

Die Wissenschaftler untersuchen fossile Knochen anhand hauchdünner Schliffe. Da die Kustoden paläontologischer Sammlungen ihre Fundstücke nur äußerst ungern zersägen lassen, müssen sich die Wissenschaftler oft mit wenigen Millimeter breiten Bohrkernen



Trotz seiner enormen Länge von bis zu 28 Metern brachte der *Diplodocus* nicht mehr als 10 Tonnen auf die Waage

begnügen. Doch die reichen aus, um zu rekonstruieren, wie der entsprechende Knochen einst gewachsen ist.

Unter dem Mikroskop offenbaren Sauropodenknochen eine hektische Entstehungsgeschichte: Statt dicht gedrängter, paralleler Wachstumsringe, wie sie etwa Amphibienknochen aufweisen, zeigt sich ein schwammartiges, von vielen dunklen Stellen durchsetztes Gewebe – ein Knochen, der hohe Wachstumsraten verrät und heute nur noch bei Warmblütern zu finden ist, beispielsweise bei großen Säugetieren.

Sanders Analysen zeigen, dass ein jugendlicher *Apatosaurus* bis zu

1,6 Tonnen pro Jahr zulegte – das sind jeden Tag mehr als vier Kilo. Mit etwa 20 Jahren wurde das Tier geschlechtsreif; sein Wachstum verlangsamte sich, bis es im Alter von ungefähr 30 seine Endgröße erreicht hatte. Wie lange die Saurier danach noch lebten, können die Forscher derzeit nicht beantworten.

Wie mittlerweile viele Paläontologen geht Martin Sander davon aus, dass Sauropoden – und vermutlich auch andere Dinosaurier – nicht wie die nahe verwandten Krokodile wechselwarme Tiere waren, sondern Warmblüter: „Anders lassen sich diese enormen Wachstumsraten nicht erklären.“

Freilich stellt diese Annahme die Forscher gleich vor neue Probleme: So große Warmblüter müssten an Überhitzung eingegangen sein, denn ihr



Mit einer Länge von knapp 13 Metern zählte der *Dicraeosaurus* zu den Zwergen unter den urtümlichen Giganten

hochtouriger Stoffwechsel hätte sehr viel Wärme erzeugt – und die hätte sich in dem fülligen Leib stauen müssen.

Doch vermutlich ist es auf die raffinierte Lungenkonstruktion der Sauropoden zurückzuführen, dass es nicht zum Hitzetod kam. Denn die Oberfläche des von ihr ausgehenden und in die Knochen reichenden Schlauches mit den Luftsäcken wirkte wie ein gigantischer Wärmetauscher, der ständig überschüssige Hitze über die Atemluft abführte und so verhinderte, dass die Dinosaurier heiß liefen.

Zudem arbeitete die Lunge der Saurier weitaus effizienter als das Atmungs-

organ der Säugetiere. Denn die Luftsäcke in den Knochen wirkten als Zwischenspeicher, während die eigentliche Lunge kontinuierlich von frischer Luft durchströmt wurde. So konnten Dinosaurier mit gleichem Energieeinsatz der Atemluft mehr Sauerstoff entziehen als ein Säuger.

Ähnlich leistungsfähig muss ihr Herz konstruiert gewesen sein. Untersuchungen an Giraffen geben Hinweise darauf, wie es ausgesehen haben könnte: Das Giraffenherz ist keineswegs so groß, wie es der hohe Blutdruck der Tiere erwarten ließe, doch extrem muskulös, sodass es dennoch Blut bis in den mehr als zwei Meter höher liegenden Kopf pumpen kann. Zugleich haben die Blutgefäße verdickte Wände, um dem Blutdruck standzuhalten.



Der *Barosaurus*, der vor 150 Millionen Jahren in Nordamerika und Ostafrika lebte, war 28 Meter lang

Gegenüber den 9,80 Metern Halslänge, die ein *Mamenchisaurus* erreichte, nimmt sich der Giraffenhals freilich bescheiden aus. Doch waren die Sauropodenhäse viel leichter gebaut, da besonders die Halswirbelsäule von einem Netz aus Luftsäcken gepolstert war.

Dieser Konstruktion verdanken die Riesensaurier letztlich ihre Fähigkeit, sich enorme Futtermengen schnell und ohne große Anstrengung einzuverleiben: Sie konnten mit ihren biegsamen Hälsen eine ganze Baumkrone abweiden, ohne dabei ihren massigen Körper bewegen zu müssen. Nach Modellrechnungen von Andreas Christian von der

Universität Flensburg vermochten sie dadurch enorm viel Energie zu sparen.

Voraussetzung für das mühelose Fressen war jedoch, dass ihr Kopf klein blieb. So besaßen die Tiere, die schwerer als ein Sattelschlepper wurden, ein Gehirn, das gerade einmal faustgroß war.

Und sie leisteten sich zudem keine kräftigen Gebisse, denn sie schlangen ihr Futter unzerkaut hinunter. Ihre gewaltigen Leiber wirkten wie Fermentationsbottiche, in denen Blätter und Zweige lange gärten und sich mithilfe von Bakterien auf biochemischem Weg zersetzten.

Diese Fressgewohnheiten sind nach Martin Sanders Einschätzung auch ein wichtiger Grund, weshalb Säugetiere nie das Format der Sauropoden erreicht haben: Sie kauen.



Der 18 Meter lange Camarasaurus ernährte sich von derben Blättern – wie die löffelförmige Form seiner Zähne vermuten lässt

Denn wenn eine Tiergruppe immer größer wird, muss die Kaufläche der Zähne überproportional zunehmen, um mit dem steigenden Futterbedarf Schritt zu halten. Elefanten, Nashörner und Flusspferde verfügen denn auch über eindrucksvolle Zahnkronen und entsprechend schwere Köpfe, die von großen Muskeln gehalten und bewegt werden müssen.

Ein pflanzenfressendes Säugetier verbraucht daher mehr Energie für die erforderliche Muskelbewegung als ein Sauropode – selbst wenn es die gleiche Menge an Futter aufnimmt. Es kann dementsprechend nicht so effizient

Der Körper der Riesenechsen funktionierte nach anderen Regeln als der von Säugetieren

Nahrung aufnehmen – und muss folglich mehr fressen.

WOVON ABER ernährten sich die Urzeitgiganten? Um genauer herauszufinden, welche Pflanzen die Riesensaurier vertilgten und wie dick die Zweige waren, die sie abbeißen konnten, fertigten Wissenschaftler Kunststoffmodelle von Saurierköpfen – und erprobten die Kunstgebisse an Gewächshauspflanzen im botanischen Garten.

Die uns vertraute Vegetation mit ihren Gräsern, Laubbäumen und Blütenpflanzen kam erst nach den Sauriern auf; die Sauropoden mussten noch mit



Der Brachiosaurus war einer der schwersten Saurier. Der 23 Meter lange Sauropode wog 30 bis 40 Tonnen

Farnen, Schachtelhalmen und urzeitlichen Nadelbäumen vorliebnehmen.

Da moderne Pflanzenfresser solche Kost zumeist verschmähen, hielten Wissenschaftler sie bislang für wenig sättigend. Experimente mit künstlichen Dinosauriermägen haben jedoch das Gegenteil erwiesen: Zumindest Schachtelhalme sind ein wahres Kraftfutter und nähren besser als Gras.

Ein Problem allerdings bietet die urzeitliche Kost: Schachtelhalme enthalten Siliziumkristalle in hoher Konzentration – und ruinieren die Zähne kauender Tiere. Da die Sauropoden ihre Futterpflanzen aber abrupften und

sie sofort hinunterschluckten, machte ihnen das wenig aus. Zudem vermochte ein Tier wie *Diplodocus* seine Zähne sehr schnell – ungefähr alle 30 Tage – zu wechseln. So konnte es also die harten Gewächse unbeschadet fressen.

Die Kolosse der Urzeit, die man so lange für primitiv und schwerfällig hielt, waren Säugetieren also nicht nur in ihrer Größe überlegen – sie vermochten Ressourcen auch besser und mit weniger Energieaufwand auszunutzen.

UND DOCH: Die höhere Effizienz reicht noch nicht aus, um den Gigantismus der Sauropoden zu erklären. Ihr Nahrungsbedarf war trotz aller physio-

etwa tragen nur alle vier Jahre. Dinosaurier hingegen legten Eier, die selbst bei den Giganten unter ihnen überraschend klein blieben und deren Erzeugung sie daher kaum Ressourcen kostete.

Die Bonner Paläontologen untersuchten fossile Sauropodeneier von mehreren Fundorten in Spanien und Frankreich – oftmals mit einem Durchmesser von nur 15 Zentimetern, keines maß mehr als 25 Zentimeter.

Es scheint, als hätten die Weibchen stets nicht mehr als acht Eier in ein Nest gelegt. Deshalb gehen die Forscher davon aus, dass jede Sauriermutter pro Saison etliche Gelege baute und sorgfältig mit Sand bedeckte.

Massenhaft müssen also jedes Jahr winzige Sauropoden geschlüpft sein, ähnlich wie heute Schildkröten am Meeresstrand. Zwar landete der Großteil der Jungen im Schlund der Räuber. Dennoch konnte sich der Bestand der Riesen schnell wieder erholen, wenn eine Dürre die älteren Tiere – und damit auch die Räuber – dezimiert hatte.

ES IST, das wissen die Forscher heute, nicht ein einzelner Faktor, der das Rätsel des Gigantismus erklären könnte. Vielmehr war es nach bisherigen Erkenntnissen ein Zusammenspiel mehrerer Gründe, das den Riesenwuchs der Sauropoden ermöglichte:

- der von ihren Vorfahren übernommene Verzicht auf das Kauen;
- die evolutionäre Neueinführung einer effizienten, vogelartigen Lunge;
- das Fortpflanzungsverhalten einfacher Reptilien;
- der Stoffwechsel von Warmblütern, der schnelles Wachstum erlaubte.

Dinosaurier waren eben nicht ins Riesenhafte vergrößerte Echten oder Krokodile. Für sie galten auch nicht die Gesetze, nach denen die Körper großer Säugetiere funktionieren. Ihre Existenz folgte ganz eigenen Regeln.

Möglicherweise gilt dies auch für ihre Intelligenz. Zwar besaßen die meisten Saurier geradezu lächerlich winzige

Hirne, nicht viel voluminöser als ein Tennisball. Doch muss ein größeres Denkorgan nicht zwangsläufig zu höheren geistigen Leistungen befähigen; vielmehr kommt es auf seine Struktur und die Vernetzung der Nervenzellen an. Bei einigen Dinosauriern erreichte das auf die Körpermasse bezogene Hirnvolumen Werte, die mit denen heutiger Vögel vergleichbar sind.

Und die gefiederten Nachfahren der Saurier sind, wie Wissenschaftler erst vor wenigen Jahren herausgefunden haben, mitunter so intelligent wie unsere nächsten Verwandten, die Affen.

Dinosaurier waren also offenbar nicht die plumpen Echten, für die man sie so lange gehalten hat. Mehr als mit den heutigen Reptilien hatten sie mit Vögeln gemein. Doch während die das Artensterben am Ende der Kreidezeit überstanden, verschwanden alle Dinosaurier, auch die gigantischen Sauropoden.

Als vor 65 Millionen Jahren wahrscheinlich ein Asteroid auf die Erde stürzte, umhüllten monatelang dunkle Aschewolken den Globus. Der Mangel an Licht bremste das Pflanzenwachstum auf Jahrzehnte. In dieser Welt nutzte den Riesensauriern weder ihr ausgeklügelter Körperbau noch ihre energiesparende Fresstechnik. Auch ihre Größe, die sie über Jahrmillionen vor Raubsauriern wie *Tyrannosaurus rex* geschützt hatte, bewahrte sie nicht vor diesem Verhängnis.

Vermutlich konnte die kümmernde Vegetation den Hunger der Giganten nicht mehr stillen, und vielleicht dauerte die ökologische Krise zu lang, als dass genug Jungtiere sie überstehen konnten. Mit den Kolossen aber verschwand ein einzigartiges Lebensprinzip: Nie wieder wurden die Kontinente von so gewaltigen Tieren bevölkert.

Alexandra Rigos, 42, ist Wissenschaftsjournalistin in Berlin. □
Wissenschaftliche Beratung: Dr. Martin Sander, Steinmann-Institut für Geologie, Mineralogie und Paläontologie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Literaturtipps: John Tyler Bonner, „Why Size Matters. From Bacteria to Blue Whales“, Princeton University Press: anschauliches und kurzweiliges Buch über die biologische Bedeutung von Größe und Wachstum.

Memo: DINOSAURIER

► **Das erste** saurierähnliche Wesen lebte vor 232 Millionen Jahren.

► **Mehr als 100 Millionen Jahre** lang dominierten die Dinosaurier die Kontinente.

► **Die Größten** unter den Reptilien waren die pflanzenfressenden Langhalsosaurier (Sauropoden).

► **Der vermutlich größte Dinosaurier**, der *Argentinosaurus huinculensis*, erreichte eine Länge von fast 40 Metern.

► **Eine besondere Leichtbauweise** half den Sauropoden, sich trotz ihrer Masse zu haushohen Kolossen zu entwickeln.

logischer Tricks gewaltig. Zu groß durften ihre Populationen deshalb nicht werden. Sie hätten sich ihrer Lebensgrundlage beraubt.

Wie aber konnten so wenige Individuen Krisenzeiten überstehen, ohne gänzlich auszusterben?

Das lag, so vermuten Wissenschaftler, an einer Besonderheit, die Dinosaurier von allen Säugetieren unterscheidet: ihrem Fortpflanzungsverhalten.

Säuger investieren viel Zeit und Energie in ihren Nachwuchs und bringen wenige Jungtiere zur Welt, die aber relativ gute Überlebenschancen haben. Mit steigender Körpergröße sinkt die Reproduktionsrate – Elefantenkühe

Von der Skizze zum 3-D-Modell

Die Veranschaulichung der Wissenschaft

An jeder ihrer realistischen Illustrationen in dieser Ausgabe haben Tim Wehrmann, 35, und Jochen Stuhmann, 34, mehrere Wochen gearbeitet. Von der ersten Skizze bis zum fertigen Bild am Computer war es ein langer Weg: Jedes noch so kleine Detail – etwa die Zange eines Tausendfüßers – musste einerseits in die Komposition der Szene passen, andererseits dem neuesten Stand der Forschung entsprechen. Die Herausforderung bestand darin, nüchterne wissenschaftliche Zeichnungen mithilfe von Computerprogrammen in eindrucksvolle Szenen aus der Urzeit der Erde zu verwandeln.

Ihre ersten Aufträge für GEOkompakt erhielten die beiden Illustratoren bereits während ihres Studiums an der Hamburger Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Wehrmann rekon-

struierte die von einem Eispanzer umhüllte Erdkugel und stellte die komplizierte Anatomie des menschlichen Hirns dar, Stuhmann veranschaulichte das Netz aus Kanälen, Rohren und Kabeln, das unter einer Straße in Hamburg verläuft.

Ihre bislang größte Herausforderung war die Darstellung der zwölf erdzeitlichen Epochen in diesem Heft: „Noch nie haben wir so viele Kreaturen in so detailreichen Landschaften verbildlicht“, sagt Stuhmann. Sie mussten Lebensräume so natürlich wie möglich darstellen, obwohl nur noch Fossilien von ihnen zeugen.

Nur weil die beiden künstlerisches Gespür für Lebendiges mit wissenschaftlicher Sorgfalt verbinden können, vermochten sie die längst versunkenen Welten auferstehen zu lassen.



Tim Wehrmann und Jochen Stuhmann

BILDNACHWEIS/COPYRIGHT-VERMERKE

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

Titel: Andrew Zuckerman: u. l. u. r.; DKimages/SPL/Ag. Focus; Charles Krebs/Science Faction/Corbis; obr/Alimdi.net; Josh Westrich/Alag; Photoshot/Vision; bilwissediton.com/imagebroker; Okapia; vario images; Craig Lovell/ McPHOTO; Chase Studio/ Photo Researchers

Editorial: Werner Bartsch für GEOkompakt: 3 o.; Andrew J. Szabados: 3 u.

Inhalt: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: Rainer Harf; Mack/SPL/Ag. Focus; Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: Eye of Science/SPL/Ag. Focus; Patrick Gries, mit freundlicher Genehmigung Editions Xavier Barral, Paris; Visuals Unlimited/Corbis; Christian Schneider f. GEOkompakt: 4 v. l. o. n. r. u.; Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 9 o.; Berthold Steinhilber f. GEOkompakt: 9 m.; Andrew Zuckerman: 9 u.

Stammbaum: Eric Tscherner f. GEOkompakt: 5-8

Die Geschichte des Lebens: Jochen und Franziska Stuhmann f. GEOkompakt: 10/11, 14/15, 18/19, 20/21, 26/27, 30/31; Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 12/13, 16/17, 22/23, 24/25, 28/29, 32/33

Das Wunder in der Finsternis: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 36-45; Rainer Harf f. GEOkompakt: 47; Roger Ressmeyer/Corbis: 46

Die leblosen Lebewesen: Mack/SPL/Ag. Focus: 50/51; Mike Smith: 53; Medical RF/doc-stock: 54; Dr. Philippa Umins/Whistler Research PK/SPL/Ag. Focus: 55; AMI Images/SPL/Ag. Focus: 56; Medical RF/SPL/Ag. Focus: 57; G. Wanner/Science Photo/Gettyimages: 59

Die Kraft des Lichts: Fred Bavendam/Minden Pictures/Picture Press: 60/61; Eye of Science/SPL/Ag. Focus: 63; Dr. Richard Kessel/Visuals Unlimited/Corbis: 64; Eric Tscherner f. GEOkompakt: 65; Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 66/67

Wie die Zelle zu ihrem Kern kam: Rainer Harf f. GEOkompakt: 68; Dr. David Furness/SPL/Ag. Focus: 69; Steve Gschmeissner/SPL/Ag. Focus: 70

Die zweite Schöpfung: Visuals Unlimited/Corbis: 72/73 + 76 u. r.; Charles Krebs/Science Faction/Corbis: 75; Nicole King/UM: 76 u. l.; Microfield Scientific/LPD/SPL: 76 u. m.; 2009-Schierwater Labs.: 77; Kim Taylor/NPL: 79

Die Stütze der Evolution: Patrick Gries, mit freundlicher Genehmigung Editions Xavier Barral, Paris: 84-96

Wie der Fisch Beine bekam: Christian Schneider f. GEOkompakt: 98-106

Das Prinzip Wachstum: Ingo Arndt: 109

Das Geheimnis der Giganten: Berthold Steinhilber

f. GEOkompakt: 110-115; DKimages: 116/117

Illustratoren-Porträt: Lars Lindemann: 119

Von echten und vermeintlichen Verwandten: Andrew Zuckerman: 120-122

Weder Tier noch Pflanze: Rainer Harf: 124-138

Die Macht der Katastrophe: NASA: 141

Der Triumph der Säuger: Andrew Zuckerman: 142-144, 147-149 + 151-153; Thomas Ernsting/laif: 145-146 + 150

Die Eroberung der Welt: Kennis & Kennis: 154/155

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.
© GEO 2010, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

GEOkompakt

Gruner + Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg, Telefon 040/37 03-0, Telefax 040/37 03 56 47, Telex 21 95 20. Internet: www.GEOkompakt.de

HERAUSGEBER

Peter-Matthias Gaede

CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

HEFTKONZEPT

Rainer Harf

ART DIRECTOR

Torsten Laaker

TEXTREDAKTION

Jörn Auf dem Kampe, Dr. Henning Engels

BILDREDAKTION

Lars Lindemann

Freie Mitarbeit: Katrin Kaldenberg

VERIFIKATION

Susanne Gilges, Bettina Süsselmich

Freie Mitarbeit: Dr. Eva Danulat, Tobias Hamelmann, Dr. Arno Nehlsen

TEXTE

Freie Mitarbeit: Jürgen Bischoff, Katrin Blawat,

Dr. Christian Heinrich, Ute Kehse, Dirk Liesemer, Martin Paetsch,

Alexandra Rigos, Johannes Schneider, Bertram Weiß, Sebastian Witte

ILLUSTRATION

Freie Mitarbeit: Franziska Lorenz, Christian Schneider,

Jochen Stuhmann, Eric Tscherner, Tim Wehrmann

CHEFS VOM DIENST

Dirk Krömer

Rainer Droste (Technik)

SCHLUSSREDAKTION

Ralf Schulte

Freie Mitarbeit: Sebastian Schulz

GESAMTANZEIGENLEITUNG

Martin Meister, Claus Peter Simon

REDAKTIONSASSISTENZ: Ursula Arens, Sabine Stünkel

HONORARE: Angelika Györfy

BILDADMINISTRATION UND -TECHNIK: Stefan Bruhn

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Thomas Lindner

GESAMTANZEIGENLEITUNG: Heiko Hager

VERTRIEBSLEITUNG: Ulrike Klemmer, Deutscher Pressevertrieb

MARKETING: Antje Schlöder (Lg.), Patricia Korrell

HERSTELLUNG: Oliver Fehling

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: G+J Media Sales/Direct Sales:

Sabine Plath, Tel. 040/37 03 38 89, Fax: 040/37 03 53 02; Anzeigen-

disposition: Anja Mordhorst, Tel. 040/37 03 23 38, Fax: 040/37 03 58 87

Es gilt die GEO-Sonderhefte-Anzeigenpreisliste Nr. 6/2010

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland

sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur

mit Genehmigung des Verlages in Leserkreisen geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,

Konto 0322800, BLZ 200 700 00

Heft-Preis: 8,50 Euro (mit DVD: 15,90 Euro)

ISBN 978-3-570-19926-8; (978-3-570-19982-4)

© 2010 Gruner + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: 4mat Media, Hamburg

Druck: Mohn Media Mohndruck GmbH, Gütersloh

Printed in Germany

GEO-LESERSERVICE

FRAGEN AN DIE REDAKTION

Telefon: 040/37 03 20 73, Telefax: 040/37 03 56 48, E-Mail: briefe@geode

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

ABONNEMENT DEUTSCHLAND Jahres-Abonnement: 31 €

24-Std.-Online-Kundenservice: www.MeinAbo.de/service

BESTELLUNGEN: DPV Deutscher Pressevertrieb GEO-Kundenservice 20080 Hamburg

Telefon: 01805/861 80 03*

KUNDENSERVICE ALLGEMEIN (PERS. ERREICHB.) Mo-Fr 7.30 bis 20.00 Uhr

Sa 9.00 bis 14.00 Uhr Telefon: 01805/861 80 03* Telefax: 01805/861 80 02*

E-Mail: geo-service@guj.de

ABONNEMENT ÖSTERREICH

GEO-Kundenservice Postfach 5, 6960 Wolfurt Telefon: 0820/00 10 85

Telefax: 0820/00 10 86 E-Mail: geo@abo-service.at

ABONNEMENT SCHWEIZ

GEO-Kundenservice Postfach, 6002 Luzern Telefon: 041/329 22 20

Telefax: 041/329 22 04 E-Mail: geo@leserservice.ch

ABONNEMENT ÜBRIGES AUSLAND

GEO-Kundenservice, Postfach, CH-6002 Luzern; Telefon: 0041-41/329 22 20,

Telefax: 0041-41/329 22 04; E-Mail: geo@leserservice.ch

BESTELLDRESS FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

DEUTSCHLAND

GEO-Versand-Service, Werner-Haas-Straße 5, 74172 Neckarsulm

Telefon: 01805/06 20 00*, Telefax: 01805/08 20 00*,

E-Mail: service@guj.com

SCHWEIZ

GEO-Versand-Service 500/001, Postfach 1002, CH-1240 Genf 42

ÖSTERREICH

GEO-Versand-Service 500/001, Postfach 5000, A-1150 Wien

BESTELLUNGEN PER TELEFON UND FAX FÜR ALLE LÄNDER

Telefon: 0049-1805/06 20 00, Telefax: 0049-1805/08 20 00,

E-Mail: service.guj.com

*14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreis max. 0,42 €/Min.

Von echten und vermeintlichen Verwandten

Viele Tierarten haben unabhängig voneinander die gleichen Organe hervorgebracht. So besitzen Quallen, Ringelwürmer, Kraken und Fische allesamt Linsenaugen. Dahinter verbirgt sich ein Grundprinzip der Natur: die Konvergenz. Ihr steht ein zweites Phänomen gegenüber, die Homologie, die dafür sorgt, dass von der Verwandtschaft mancher Arten wie Delfin und Frosch nicht mehr viel zu erkennen ist

Text: Katrin Blawat


Unter den mehreren Hundert Arten von Buntbarschen, die am Rand des Tanganjikasees in Zentralafrika leben, gibt es manche wundersame Gestalt. Etwa die Wulstlippenbuntbarsche, deren Lippen zu einer Art Schmollmund vergrößert sind. Der schützt vermutlich vor Verletzungen, wenn die Fische ihre Beute aus Steinritzen ziehen.

Blau gesprenkelt sind die Algenrasp-ler, die mit ihren Zähnchen Pflanzen von den Felsen meißeln. Leuchtend gelbe Schneckenknacker pulen mit spitzen Fresswerkzeugen die Weichtiere aus ihren Gehäusen, und schlanke, türkisch schimmernde Schuppenfresser knabbern an den Flanken von Artgenossen.

Wulstlippenbuntbarsche, Algenrasp-ler und Schneckenknacker gibt es auch im 300 Kilometer entfernten Malawisee. Und auch im Viktoriasee, weitere 300 Kilometer nordöstlich. Möglicherweise, so vermuteten manche Forscher jahrzehntelang, sind einige Exemplare jeder Art irgendwann über Flüsse von einem See in die beiden anderen geschwommen. Die Spezies hätten sich dort zwar weiterentwickelt, die jeweilige Anpassung – etwa eine spitze Schnauze – sei aber nur einmal entstanden.

Doch als Wissenschaftler um den Konstanzer Evolutionsbiologen Axel Meyer vor einigen Jahren das Erbgut der Fische analysierten, staunten sie: Die verschiedenen Buntbarsche in den drei Seen ähneln sich zwar – aber sie stammen nicht direkt voneinander ab.

Vielmehr verdanken die Fische ihr übereinstimmendes Aussehen einem grundlegenden Prinzip der Evolution:



Prinzip Konvergenz: Gleiche Bedingungen bringen gleiche Formen hervor. Als Anpassung an ein Leben in der Luft entwickelten Flughund und Vogel unabhängig voneinander Flügel

der Konvergenz. So nennen es Biologen, wenn Arten verblüffend ähnliche Merkmale entwickeln, obwohl sie nicht oder nur weit entfernt miteinander verwandt sind.

Die dicken Lippen der Buntbarsche zum Beispiel hat die Evolution in allen drei Seen jeweils getrennt voneinander hervorgebracht – weil ihre Form einen Überlebensvorteil bietet: Sie sind offenbar eine gute Anpassung für jene Fische, die ihre Beute zwischen spitzen Steinen herausaugen und ihre Schnauze dabei vor Verletzungen schützen.

Über alle Kontinente verteilt leben Tiere und Pflanzen, die sich auf erstaunliche Weise ähneln, weil sie sich konvergent entwickelt haben. Die Übereinstimmungen entstehen, wenn sich unterschiedliche Lebewesen an gleiche Umweltbedingungen anpassen müssen – an heißes Klima, an schwer zugängliche Beute oder an besondere Lebensräume – und die Evolution dann die gleichen Lösungen findet.

DER EUROPÄISCHE Maulwurf etwa kommt in seinem Lebensraum gut zu recht, denn seine Vorderbeine sind zu mächtigen Grabschaufeln umgestaltet. So kann er sich durch das Erdreich wühlen. Die gleiche Fähigkeit benötigt der ebenfalls unterirdisch lebende Beutelmull in Australien. Obwohl Beutelmull und Maulwurf von unterschiedlichen Vorfahren abstammen und ihre Lebensräume 13 000 Kilometer voneinander entfernt sind, sehen sich die Grabschaufeln der beiden Arten recht ähnlich – weil ihre Form darauf optimiert ist, Boden beiseitezuschieben.

Vögel (hier ein Schwarzköpfchen) haben sich rund 100 Millionen Jahre vor den Fledertieren entwickelt. Dennoch benutzen beide das gleiche Flugprinzip: leichte Knochen und große Tragflächen

Der Kolibrischwärmer, ein Schmetterling, steht scheinbar still in der Luft, wenn er mit seinem langen Rüssel Nektar aus einer Blüte saugt. Mehr als 70 Mal pro Sekunde schlägt er dabei mit den Flügeln. Außerdem kann er rückwärts fliegen.

Die gleiche Kunst beherrscht der Kolibri – ein Vogel, der mit bis zu 80 Flügelschlägen je Sekunde in der Luft still stehen kann und mit seiner extrem langen Zunge Nektar aus tiefen Blüten saugt. Es ist eine sehr ähnliche Flugtechnik – doch das eine Mal mit einem Insektenflügel aus Chitin verwirklicht, das andere Mal mit dem gefiederten Arm des Vogels.

Auch die harten Lebensbedingungen von Wüstenpflanzen haben zu ähnlichen Entwicklungen geführt: Bestimmte Kakteen in Mexiko etwa haben Sprossachsen hervorgebracht, deren Zellen Flüssigkeit speichern und die ihre Oberfläche in Dürrezeiten vermindern können, um so weniger Wasser verdunsten zu lassen. Zudem lagern sie rote Pigmente in ihrem Stamm ein, die sie wie tot erscheinen lassen, und tragen kurze Dornen, die vor Fressfeinden schützen.

In afrikanischen Wüsten wachsen scheinbare Verwandte – stachelige Pflanzen, die den mittelamerikanischen Kakteen täuschend ähnlich sehen. Doch es sind Wolfsmilchgewächse, die ent-



wicklungsgeschichtlich nur wenig mit ihnen gemein haben.

Auch wenn es darum geht, toxische Substanzen zu injizieren, haben Lebewesen unterschiedlichster Herkunft – Quallen, Skorpione, Insekten, Schnecken, Fische – alle die gleiche Waffe entwickelt: den Giftstachel. Und das Auge ist quer durchs Tierreich sogar mehr als 50 Mal entstanden.

Eine besonders leistungsfähige Form des Sehorgans ist das Linsenauge. Die Linse fängt das Licht ein, bündelt es und liefert ein Abbild der Außenwelt. Sie erlaubt es, nah wie fern scharf zu stellen und Bewegungen zu verfolgen.

Obwohl dieses Auge ungemein komplex ist, haben es gleich mehrere Tiergruppen hervorgebracht, darunter Tintenfische, Wirbeltiere, einige Quallen und sogar Ringelwürmer. Und zwar aus ganz unterschiedlichen Komponenten.

So wächst die Netzhaut, also der lichtempfindliche Teil des Auges, beim Menschen aus Zellen des Nervensystems. Das geschieht, indem sich beim menschlichen Embryo ein Teil des Gehirns ausstülpt und zum Augenbecher wird. Bei den Tintenfischen dagegen

Die glatte Vorderflosse eines Delfins beispielsweise ist zum Schwimmen optimal geeignet, der ledrige, ausladende Flügel einer Fledermaus zum Fliegen und der menschliche Arm mit seiner Greifhand zum Hantieren. Ihre Formen und Funktionen sind also sehr unterschiedlich – dennoch findet sich in ihrem Inneren stets ein großer Knochen, der mit zwei weiteren sowie mit mehreren kleinen Knöchelchen verbunden ist, an die sich Finger anschließen.

Hinter dieser Entwicklung steckt ein weiteres elementares Prinzip der Evolution: die Homologie, das Gegenstück zur Konvergenz.

Homologie bedeutet, dass Körperteile, obwohl sie sich in Form und Funktion stark unterscheiden, den gleichen Grundbauplan aufweisen, weil die betreffenden Arten vom selben Vorfahr abstammen.

Die Flossen einiger urzeitlicher Fische etwa haben sich zu vier Gliedmaßen gewandelt, als sich einige von ihnen an ein Leben außerhalb des Wassers anpassten. Von ihnen stammen alle Landwirbeltiere ab – und die erben den gemeinsamen Grundbauplan. Dar-

Schuppen auf der Haut von Haien: Beide bestehen aus Zahnschmelz, und in ihrem Inneren findet sich eine Markhöhle. Aus den Schuppen eines gemeinsamen Vorfahren haben sich die Zähne jener Fische entwickelt, die später das Land eroberten und unter anderem zu den Urahnen des Menschen wurden.

Fischembryonen tragen auf jeder Seite des Kopfes vier Verdickungen und Furchen, die Kiemenbögen. Wächst der Fisch heran, öffnen sich die Vertiefungen, sodass Wasser hindurchströmen kann – der Fisch hat Lücken zwischen den Kiemen gebildet.

Auch der menschliche Embryo verfügt über solche Furchen, bei ihm bleiben sie jedoch geschlossen. Stattdessen bilden sich aus den ersten beiden Verdickungen die Kiefer, Gehörknöchelchen, Muskeln und Nerven.

Die Kieferknochen sind also homolog zu den Kiemenbögen.

So verhält es sich auch mit der menschlichen Lunge. Sie ist homolog zur Schwimmblase, die vielen Fischen den nötigen Auftrieb verleiht. Beide Organe entstanden aus einer Ausstülpung des Vorderdarms. Bei denjenigen Tieren,



Prinzip Homologie: Zwei Tiere sind nahe verwandt, sehen aber unterschiedlich aus – etwa Rattennatter und Alligator. Anders als Schlangen haben Alligatoren die Beine ihrer Vorfahren behalten. Und: Die einen erwürgen ihre Beute, die anderen beißen zu

entsteht die lichtempfindliche Schicht aus der äußeren Zellschicht, die sich becherförmig zur Augengrube einsenkt.

Organe, die durch konvergente Entwicklungen entstehen, können sich also – wie die Augen – äußerlich stark ähneln, sich jedoch im Detail und von der Entwicklung her sehr unterscheiden.

DOCH ES GIBT AUCH den umgekehrten Fall: Körperteile sehen völlig ungleich aus und haben unterschiedliche Funktionen – sind aber entwicklungs-geschichtlich verwandt.

aus hat sich dann im Laufe von Jahrmillionen eine erstaunliche Vielfalt an Gliedmaßen entwickelt.

Die Armknochen bei der Fledermaus wurden kürzer, ihre Finger verlängerten sich stark, sodass dazwischen Platz für die Flughäute entstand. Beim Frosch hingegen verlängerten sich die Bein-knochen, verschmolzen zum Teil miteinander und ermöglichten ihm, sich in weiten Sprüngen fortzubewegen.

Homologien beschränken sich aber nicht nur auf Extremitäten. So ist ein menschlicher Zahn homolog zu den

die irgendwann das Wasser verließen, entwickelte sich daraus eine komplex aufgebaute Lunge. Bei anderen Fischen dagegen wandelte sich die Ausstülpung später zur Schwimmblase.

Wer einen Fisch betrachtet, sieht also immer auch ein Stück von sich selbst. Und umgekehrt: In fast jedem seiner Körperteile kann der Mensch Erinnerungen an die Urzeit erkennen. Er trägt die Geschichte des Lebendigen in sich. □

Katrin Blawat, 28, ist Wissenschaftsjournalistin in München. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Axel Meyer, Lehrstuhl für Zoologie/Evolutionsbiologie, Universität Konstanz.

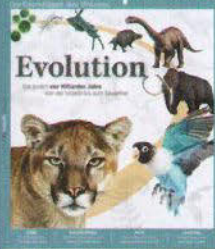
Gratis



Umhängetasche »Nature«

Diese praktische Tasche im zeitlosen Look ist ein wahres Baumwunder: großes Hauptfach, extra Handytasche mit Schnellverschluss, Reißverschluss-Vortasche auf dem Über-
schlag. Gurt verstellbar. Aus Baumwolle, Farbe: braun.
Maße: ca. 33x26x11 cm.

GEOkompakt 23



GEOkompakt ist monothematisch und widmet sich den großen Fragen der Allgemeinbildung in außergewöhnlicher visueller Opulenz. 4x im Jahr.

GEO-Familien-Vorteilscoupon

Ja, ich bestelle die unten angekreuzten Zeitschriften und nutze alle meine Vorteile:

- Ich spare bis zu 13%!
- Ich erhalte alle Hefte und mein Geschenk frei Haus!
- Nach einem Jahr kann ich jederzeit kündigen!
- Geld-zurück-Garantie für zu viel bezahlte Hefte!

Ja, ich bestelle die angekreuzten Zeitschriften. Zum Dank für meine Bestellung erhalte ich die Umhängetasche »Nature« nach Zahlungseingang gratis. Die Lieferung aller Hefte erfolgt frei Haus. Ich gehe kein Risiko ein, denn ich kann nach einem Jahr jederzeit kündigen. Das Geld für bezahlte, aber nicht gelieferte Ausgaben erhalte ich zurück.

GEOkompakt (4 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697964, als Geschenk ☐ 697965
Erscheint 4x jährlich zum Preis von zzt. € 7,75 (D)/€ 8,95 (A)/Fr. 16.00 (CH) pro Heft.

GEO (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697966, als Geschenk ☐ 697967
Erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 5,65 (D)/€ 6,40 (A)/Fr. 11.60 (CH) pro Heft.

GEO mit DVD für mich, Best.-Nr. ☐ 697968, als Geschenk ☐ 697969
Erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 10,65 (D)/€ 12,20 (A)/Fr. 22.00 (CH) pro Heft.

GEO Special (6 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697970, als Geschenk ☐ 697971
Erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 6,95 (D)/€ 8,10 (A)/Fr. 13.60 (CH) pro Heft.

GEOSAISON (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697972, als Geschenk ☐ 697973
Erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 4,40 (D)/€ 5,10 (A)/Fr. 9.00 (CH) pro Heft.

GEO EPOCHE (6 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697974, als Geschenk ☐ 697975
Erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 8,00 (D)/€ 8,95 (A)/Fr. 16.50 (CH) pro Heft.

GEO EPOCHE mit DVD für mich, Best.-Nr. ☐ 697976, als Geschenk ☐ 697977
Erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 14,25 (D)/€ 15,70 (A)/Fr. 29.10 (CH) pro Heft.

GEOmini (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697978, als Geschenk ☐ 697979
Erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 2,60 (D)/€ 2,80 (A)/Fr. 4.80 (CH) pro Heft.

GEOlino (12 Hefte) für mich, Best.-Nr. ☐ 697980, als Geschenk ☐ 697981
Erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 3,05 (D)/€ 3,25 (A)/Fr. 5.70 (CH) pro Heft.

Die Preise gelten in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Meine Adresse: (Bitte auf jeden Fall ausfüllen.)

Name, Vorname _____

Straße/Nr. _____ Geburtsdatum 19 _____

PLZ _____ Wohnort _____

Telefon-Nr. _____ E-Mail-Adresse _____

Ich zahle bequem per Bankkreditkarte: _____

Bankleitzahl _____ Kontonummer _____

Anschrift des Geschenkeempfängers: (Nur ausfüllen, wenn Sie einen GEO-Titel verschenken möchten.)

Name, Vorname _____

Straße/Nr. _____ Geburtsdatum 19 _____

PLZ _____ Wohnort _____

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner+Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung bei GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.*

Datum _____ Unterschrift X _____

GEO-Familien-Vorteilscoupon einsenden an:
GEOkompakt, Kunden-Service, 20080 Hamburg

Oder anrufen unter: 01805/861 80 00*

Einfach per E-Mail: Geokompakt-Service@guj.de

Abonnenten-Service Österreich
Tel.: 0820/00 10 85 Geo-kompakt@abo-service.at

Leser-Service Schweiz
Tel.: 041/329 22 20 Geo-kompakt@leserservice.ch

Verlag: Gruner+Jahr AG & Co KG, Dr. Gerd Brune, Am Baumwall 11,
20459 Hamburg, AG Hamburg, HRA 102257.
Vertrieb: DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH, Dr. Olaf Conrad,
Düsterstr. 1, 20355 Hamburg, AG Hamburg, HRB 95 752.

*14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.



GEO bietet aufwändige Reportagen über die wichtigsten Themen unserer Zeit. Jetzt auch mit DVD. 12x im Jahr.



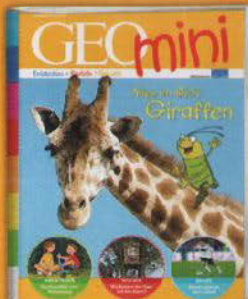
GEO Special berichtet jeweils über ein Land, eine Region oder eine Stadt. 6x im Jahr.



GEOSAISON zeigt die schönsten Reiseziele rund um den Globus. 12x im Jahr.



GEO EPOCHE ist das illustrierte Magazin von GEO. Jetzt auch mit DVD. 6x im Jahr.



GEOmini bietet Rätsel, Bastelspaß und Spiele für Kinder von 5 bis 7 Jahren. 12x im Jahr.



GEOlino ist das Erlebnisheft für Kinder von 8 bis 14 Jahren. 12x im Jahr.

Die rote Farbe des Fliegenpilzes soll vermutlich vor seinen Giften warnen. Die weißen Tupfer sind Reste einer Schutzhaut, die den jungen Pilz umhüllte. Der Ständer mit dem Hut ist aber nur der Fruchtkörper, die Fortpflanzungsform des Pilzes. Sein eigentlicher Körper besteht aus einem unscheinbaren Geflecht winziger Fäden, die unterirdisch an den Wurzeln vor allem von Fichten und Birken leben

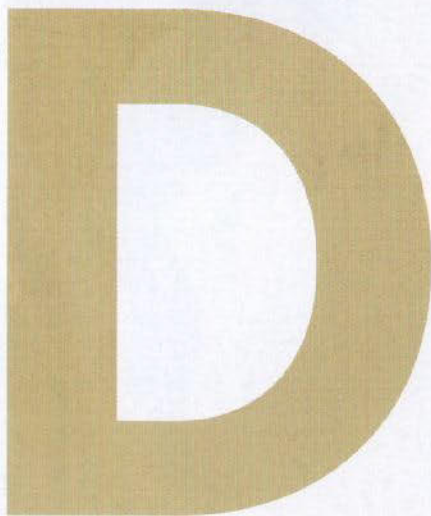


Weder **Tier** noch **Pflanze**

Text: Henning Engeln; Fotos: Rainer Harf

Obwohl sie den Pflanzen ähneln, gehören Pilze nicht zur Botanik, sondern sind neben Flora und Fauna eine eigene, dritte Lebensform. Diese Organismen, von denen meist nur ihre Vermehrungsorgane sichtbar sind, die Pilzhüte, haben eine derart große ökologische Bedeutung, dass das Leben, so wie wir es kennen, ohne sie nicht existieren würde





Das größte Lebewesen der Erde ist derzeit weder ein 30 Meter langer, rund 200 Tonnen schwerer Blauwal noch ein Riesenmammutbaum mit mehr als 100 Meter Höhe – sondern ein Geschöpf im Verborgenen: ein Pilz, dessen unterirdisches Geflecht sich über eine Fläche von 965 Hektar erstreckt.

Schätzungsweise rund 600 Tonnen schwer ist der Gigant, ein Dunkler Halimasch, der den Boden des US-Bundesstaats Oregon durchwuchert und wohl mehr als 2000 Jahre alt ist.

Dass es sich bei dem Pilz um ein und denselben Organismus handelt, haben Tests ergeben: Alle Proben des Giganten aus dem Gebiet sind genetisch identisch – stammen also von einem einzigen Individuum.

Eine Wolke aus Zigtausenden winziger Sporen entlässt dieser Bovist in die Luft, um sich zu vermehren. Pilzsporen kommen in bis zu 160 Kilometer Höhe vor

Ein solcher Riesenwuchs, der sich dazu noch unsichtbar im Boden abspielt, passt so gar nicht zu dem Bild, das die meisten Menschen von Pilzen haben. Sie halten die Organismen zumeist für Pflanzen – und die essbaren, aus dem Boden sprießenden Pilzköpfe (seien es Champignons, Pfifferlinge oder Steinpilze) für das eigentliche Geschöpf.

Beides ist falsch. Pilze sind äußerst seltsame und zugleich unterschätzte Wesen. Sie sind weder Pflanzen noch Tiere, sondern gehören einem eigenen Reich von Organismen an.

Das bedeutet: Sie haben sich als eigenständiger Haupt-Ast am Stammbaum des Lebens entwickelt – als eigene Linie, die sich bereits vor weit mehr als einer Milliarde Jahren von allen anderen Lebewesen getrennt und seither eine eigene Evolution durchgemacht hat.

Die über der Erde wachsenden Formen bilden dabei nur einen kleinen Teil der kompletten Kreatur. Es sind Strukturen, die der Pilz ausschließlich für seine Vermehrung entwickelt – ähnlich den Blüten einer Pflanze. Der große Rest dagegen, der eigentliche Pilz, befindet sich im Boden.

Um bei dem Vergleich zu bleiben: Es ist, als wachse ein Apfelbaum unsichtbar in der Erde und strecke nur seine Blüten über deren Oberfläche hin aus.

Sicherlich ist dieses Wirken im Verborgenen ein Grund dafür, weshalb Pilze oft verkannt werden. Viele Menschen etwa mögen annehmen, wenn es keine Pilze gäbe, müssten sie nur auf eine kulinarische Delikatesse verzichten. Doch das ist ein gewaltiger Irrtum.

Ohne Pilze hätte die Menschheit weder lernen können, Bier in der gewohnten Weise zu brauen noch Wein zu keltern. Sie hätte viele Antibiotika nicht gefunden und auf manche berauschende Substanz verzichten müssen.

Aber die Pilze haben noch weitaus mehr bewirkt: Sie haben etliche Kapitel der Evolutionsgeschichte geprägt. Denn sie trugen entscheidend dazu bei, dass sich Pflanzen auf den Kontinenten ausbrei-

ten konnten. Hätten sie gefehlt, gäbe es keine Wälder, wie wir sie kennen, vermutlich auch nicht deren Bewohner – und sicher keine Menschen.

Was aber sind das für Lebewesen, die eine derartige Bedeutung haben und die man dennoch so wenig wahrnimmt?

WEIL PILZE unbeweglich an Ort und Stelle verharren, weil sie weder Augen noch Ohren, Beine oder sonstige Organe besitzen, die an Tiere erinnern, wurden sie lange Zeit der Flora zugeschlagen. Griechischen Gelehrten der Antike etwa galten sie als „entartete“ Pflanzen, die unterirdisch wachsen oder Auswüchse von Baumwurzeln sind.

Andererseits fehlt Pilzen etwas typisch Pflanzliches: das Blattgrün, mit dessen Hilfe die meisten Gewächse die Energie des Sonnenlichts für ihren Stoffwechsel und den Aufbau ihrer Körpersubstanz nutzen (siehe Seite 60). Pilze können das nicht, sondern müssen, wie Tiere, energiereiche organische Stoffe, also Nahrung aufnehmen.

Als Forscher im 17. Jahrhundert erstmals in feine Scheiben geschnittenes Gewebe von Pilzen und grünen Pflanzen unter das Mikroskop legten, erkannten sie etliche Unterschiede zwischen Pilzen und Pflanzen im Bau von Zellen und Feinstrukturen.

Zudem sind, wie sich später herausstellte, die Zellwände aus unterschied-

lichen Substanzen aufgebaut. Bei Pflanzen bestehen sie aus Zellulose, bei Pilzen dagegen aus Chitin – jenem Stoff also, den unter anderem Krabbeltiere wie Spinnen,

Pilze verstärken
ihre Zellwände mit
Chitin – auch Insektenpanzer sind
daraus gebaut

Auf morschem Holz wächst der gallertartige, korallenförmige Klebrige Hörnling. Pilze wie dieser sind für Ökosysteme und Stoffkreisläufe extrem wichtig, weil sie schwer zersetzbare Holz abbauen können





Der Ohrloeffelstachling besiedelt
ausschließlich abgefallene Kiefernzapfen.
Viele Pilze sind auf ganz bestimmte
Nahrungsstoffe spezialisiert, die sie
äußerst effizient abbauen

Krebse und Insekten nutzen, um ihre Körperpanzer zu konstruieren.

Das alles erschien verwirrend; die oftmals bleichen Organismen waren offenbar weder Tiere noch Pflanzen, sondern etwas ganz anderes.

Und deshalb entschieden Biologen im Jahr 1969, ihnen ein eigenes Reich zuzubilligen. Es wurde gleichberechtigt neben das der Tiere und das der Pflanzen gestellt. Körperbau, Stoffwechsel und Lebensweise der Pilze sind so eigen, dass sie sich völlig unabhängig von der Fauna und der Flora entwickelt haben müssen.

Mit modernen molekulargenetischen Methoden fanden die Forscher noch Genaueres über die Verwandtschaftsbeziehungen der seltsamen Wesen heraus, und das erwies sich als eine absolute Sensation. Denn als sie die Erbsubstanzen verschiedenster Arten verglichen, mussten sie erkennen: Pilze stehen den Tieren näher als den Pflanzen.

Inzwischen können Biologen die erstaunliche Geschichte dieser Organismen recht gut rekonstruieren. Dazu müssen sie weit in die Vergangenheit zurückgehen: in eine Epoche vor mehr als einer Milliarde Jahren.

ZU JENER ZEIT lebt in den Urmeeren ein Einzeller, der sich mithilfe einer Geißel, einer Art winzigem Propeller, vorwärtsbewegt. Er ist größer als ein Bakterium und besitzt einen Zellkern (ist also ein Eukaryot, siehe Seite 68).

Da er nicht, wie grüne Pflanzen oder Cyanobakterien, über den grünen Blattfarbstoff Chlorophyll verfügt, muss er Nahrung aufnehmen: sich also energiereiche Moleküle einverleiben, die andere Organismen hergestellt haben.



Nur wenige Zentimeter groß wird die Holzkeule. Sie lebt auf abgestorbenem Holz und vermehrt sich mit winzigen Sporen, die aus Vertiefungen in dem keulenförmigen Fruchtkörper in die Luft entlassen werden

Irgendwann in dieser Zeit aber spalten sich die Nachfahren dieses Einzellers in zwei Linien auf. Beide bilden offensichtlich unabhängig voneinander erste Vielzeller (siehe Seite 72). Nach und nach beginnen sie, ihre Körperstrukturen, Gewebe und Organe aus unterschiedlichen Zelltypen aufzubauen.

Doch sie wählen jeweils andere Lebensstrategien: Die einen bilden immer komplexere Körper, die aus mehreren Geweben bestehen. Sie entwickeln Mund und Magen, um Nahrung aufzunehmen und zu verdauen, prägen Muskeln aus, die ihnen erlauben, sich zu bewegen, und gestalten Sinnesorgane, mit denen sie sich in ihrer Umwelt orientieren können. Kurz: Sie werden zu Tieren.

Die zweite Linie verfolgt eine andere Strategie des Überlebens – eine schlichtere und dennoch ebenso erfolgreiche: Ihre Vertreter verzichten auf einen komplizierten Körperbau, auf Verdauungs- oder Sinnesorgane sowie auf die Fähigkeit, sich fortzubewegen.

Im Laufe der Zeit bilden sie eine Zellwand aus, die ihnen eine stabile Struktur verleiht (im Gegensatz dazu sind die Zellen der Tiere meist weich und flexibel). Manche leben als Einzeller, andere reihen irgendwann mehrere Zellen zu langen, fadenförmigen Gebilden aneinander.

So sehen die einfach gebauten Strukturen der ersten vielzelligen Pilze aus.

Sie konzentrierten sich ganz darauf, vorhandene organische Substanz zu verwerten – also all jenes für ihren Stoffwechsel zu nutzen, was andere für sie produzieren, übrig lassen, oder was von ihnen bleibt, wenn sie zugrunde gehen.

Während die Tiere überwiegend zu Fressmaschinen werden, die Pflanzliches vertilgen oder andere Tiere verspeisen, wählen viele Pilze vor allem die Option des Resteverwerter und Abfallentsorgers. Manche leben auch als

Parasiten, viele gehen Symbiosen ein, tun sich also mit einem anderen Organismus zum gegenseitigen Nutzen zusammen.

Ihre große Stunde schlägt, als das Leben sich aufmacht, das

Als das Leben
beginnt, **das Land**
zu erobern,
schlägt die große
Stunde der Pilze



Land zu erobern. Wahrscheinlich gehören Pilze zu den Pionieren und besiedeln die noch kargen Küstenbereiche lange vor den ersten Landpflanzen.*

Vermutlich gelingt ihnen das anfangs nur in Kooperation mit Cyanobakterien, die in den feuchten Übergängen zwischen Wasser und Land gute Bedingungen finden.

Diese Bakterien sind zur Photosynthese fähig, können also mittels Sonnenlicht aus Wasser und dem Kohlendioxid in der Atmosphäre energiereiche organische Verbindungen wie Zucker aufbauen (siehe Seite 60). Wahrscheinlich stülpen die Pilze für diese Kooperation ihre Zellmembran über die Cyanobakterien und formen kleine Bläschen. Und nehmen so die Bakterien auf.

Sie geben ihnen quasi ein „Zuhause“ und versorgen sie mit mineralischen Substanzen. Im Gegenzug produzieren die Cyanobakterien chemische Energie in Form von Kohlenstoffverbindungen und geben einen Teil davon als Zucker an die Pilzzellen ab.

Andere Pilzgruppen verschmelzen in jener Zeit mit Grünalgen zu Lebensgemeinschaften und erobern das neue Terrain außerhalb des Wassers. Beide Symbiosen – sowohl mit Cyanobakte-

Vor allem auf abgestorbenen Birken, Weiden oder Traubenkirschen wächst die Rötende Tramete. Der ledrige Pilz stellt in der labyrinthartigen Struktur auf der Unterseite Sporen her, um sich zu verbreiten

rien als auch mit Grünalgen – bringen einen völlig neuen Typ von Lebewesen hervor: die Flechten.

Von Weitem ähneln diese Organismen heutigen Moosen oder einfachen Pflanzen. Sie prägen blatt-, strauch- oder scheibenförmige Gestalten aus.

Es gelingt ihnen, extreme Lebensräume zu besiedeln, in denen keiner der Partner allein überleben würde. Die einen (Grünalgen oder Cyanobakterien) gewinnen mithilfe der Photosynthese die Energie, die anderen (die Pilze) lösen Minerale aus dem Gestein und besorgen so lebenswichtige Nährstoffe.

Die Pilze machen bei diesem Joint Venture den größten Teil der Masse aus und geben der Flechte sowohl Form als auch Struktur.

Noch heute gibt es Flechten, 16 000 bis 20 000 Arten sogar, schätzen die Biologen. Die meisten enthalten Grünalgen, nur rund zehn Prozent Cyanobakterien.

Flechten sind so robust und anspruchslos, dass sie selbst unter kargsten Bedingungen überleben und dort wachsen, wo kaum andere Lebewesen gedeihen – etwa in Wüsten oder in den Polarregionen, an Baumstämmen oder nackten Felsen im Hochgebirge.

Flechten sind noch bei minus 20 Grad Celsius aktiv und können monatelange Trockenheit schadlos überstehen. Dabei schrumpft ihr Wassergehalt auf bis zu zwei Prozent ihres Trockengewichts und kann dann innerhalb von nur 30 Sekunden auf das 150-Fache anwachsen.

Einige von ihnen sind die Nachfahren jener Organismen, die vermutlich als Pioniere erstmals die Kontinente besiedelten, andere haben sich dagegen erst später als neue Lebensgemeinschaften zwischen Pilzen und Algen entwickelt.


ALS SICH VOR rund 460 Millionen Jahren auch die Grünalgen auf das Festland vorwagten, viele Millionen Jahre nach den Pilzen, gelingt ihnen das vermutlich nur in einer Symbiose mit Pilzen. Ob sich diese Kooperation vielleicht schon im Wasser ausgebildet hat oder erst beim Versuch, das Trockene zu erobern, ist noch unbekannt.

Die ersten Landpflanzen, die sich aus den Grünalgen entwickeln und in Symbiose mit Pilzen leben, sind einfach und moosartig: Sie bilden weder Wurzeln noch einen Stängel oder echte Blätter aus.

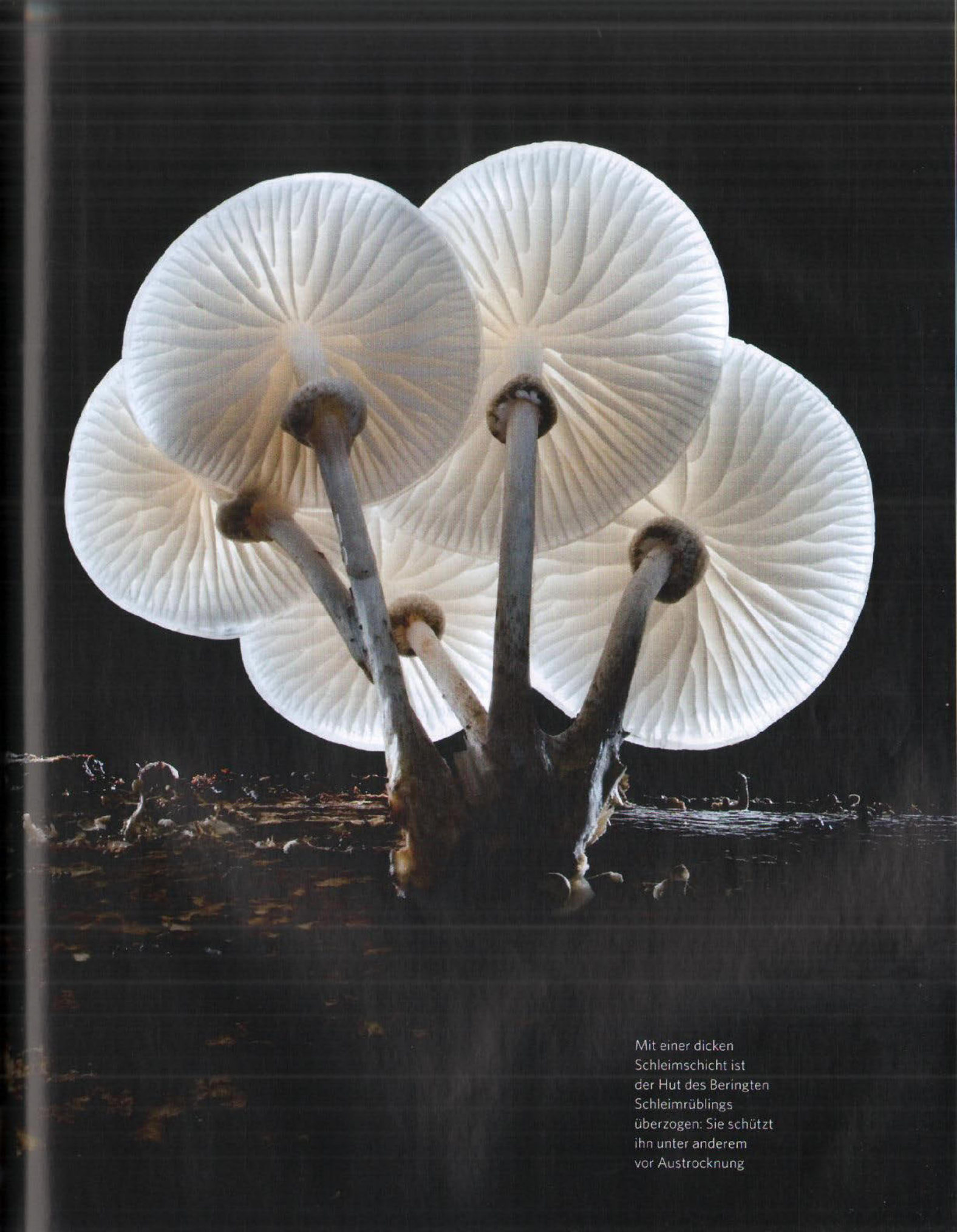
Die Lebensgemeinschaft hilft beiden, denn die Bodenpilze sind widerstandsfähig sowohl gegen Austrocknung als auch gegen die aggressive Sonnenstrahlung und zudem in der Lage, lebensnotwendige Nährsalze aus dem Gestein zu lösen, von denen die Pflanze profitiert. Umgekehrt ernähren sich die Pilze von den organischen Substanzen, die die ersten Moose herstellen.

Vor rund 420 Millionen Jahren beginnen sich aus den Moosen dann

* Die ersten freilebenden Pilze lassen sich erst aus einer Zeit vor 460 Millionen Jahren nachweisen.

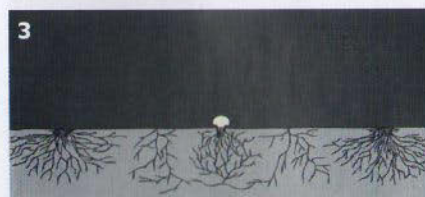
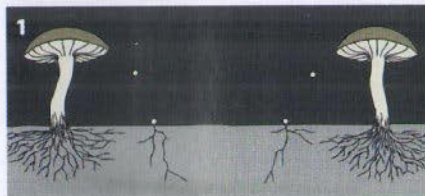
A photograph of two purple mushrooms growing from a forest floor. The mushroom on the left is large with a wide, slightly flattened, funnel-shaped cap and a thick, textured stem. The mushroom on the right is smaller with a more rounded cap and a thinner stem. Both have a vibrant purple color. They are surrounded by dry, brown leaves and forest debris. The background is dark and out of focus.

Gut zu erkennen am
Violetten Lacktrichterling
ist sein hutförmiger
Fruchtkörper. Diese Art
Fortpflanzungsorgan
ist typisch für die Stän-
derpilze, zu denen
die meisten Speise-
pilze gehören



Mit einer dicken
Schleimschicht ist
der Hut des Beringten
Schleimröhlings
überzogen: Sie schützt
ihn unter anderem
vor Austrocknung

Sex bei Pilzen: Zwei ausgereifte Exemplare entlassen aus ihren Fruchtkörpern Sporen (1), die im Boden zu neuen Geflechten auskeimen. Die Fäden bewegen sich aufeinander zu und verschmelzen (2); die alten Fruchtkörper sterben ab. Aus den vereinten Fäden erwächst ein neuer Fruchtkörper (3). Er bildet Sporen mit dem vermischten Erbgut der Elternpilze (4)



die ersten Gefäßpflanzen zu entwickeln – die Farngewächse, darunter auch die Bärlappe. Diese Gefäßpflanzen bringen nach und nach drei entscheidende Neuerungen hervor:

- ein Gefäßsystem, das Stoffe zwischen Blättern und Wurzeln hin- und hertransportiert;
- Blätter, die eine große Oberfläche für die Photosynthese haben;
- Wurzeln, die Wasser und Minerale effektiv aus dem Boden aufnehmen.

Die Zusammenarbeit mit den Pilzen ist erhalten geblieben – hat sich bei weiter entwickelten Pflanzen aber ganz auf die Wurzeln konzentriert.

Dort besiedeln die winzigen Pilzgeflechte sogar das Innere der Pflanzenzellen und lassen ihre Fäden durch deren Zellwände in den umgebenden Boden hinauswachsen.

Auf diese Weise vergrößert sich die Oberfläche, mit der die Wurzel Nährsalze und Wasser aufnehmen kann; die Versorgung der Pflanze wird optimiert.

Es entsteht eine Pilzwurzel (Mykorrhiza). Und die steht für eine der fruchtbarsten und folgenreichsten Symbiosen der Erdgeschichte.

Denn die Kooperation wird auch von den Samenpflanzen übernommen, die gut 115 Millionen Jahre später entstehen, und dauert noch immer an: Mehr als 95 Prozent aller heutigen Landpflanzen bilden eine Mykorrhiza aus.

Fast alle höheren Pflanzen existieren also in einer Lebensgemeinschaft mit einem Pilz. Ohne ihren symbiotischen Partner wären viele nicht in der Lage, in ihrer jetzigen Umwelt zu überleben.

MITHILFE DER PILZE erschließen die Landpflanzen neue Terrains, in denen sie sich ansiedeln, vermehren, über die Zeit verändern und somit letztendlich neue Arten bilden können. So tragen die Pilze entscheidend dazu bei, dass die höheren Pflanzen nach dem Landgang eine riesige Vielfalt an Formen und Arten ausbilden können. Umgekehrt profitieren auch die Pilze von der neuen terrestrischen Lebensweise.

Da nach der Besiedelung des Landes immer häufiger auch abgestorbene Pflanzenteile zurückbleiben und sich so größere Mengen an organischer Masse anhäufen, besteht nun für die Pilze die Möglichkeit, ebenso außerhalb der Symbiosen Nahrung zu finden.

Seit 450 Millionen Jahren wachsen Pilze an Land auch als eigenständige Organismen.

Schon in der Frühzeit entsteht die Grundlage für all jene Typen, die wir heute kennen und die alle Ökosysteme dieser Erde in einer riesigen Vielfalt an Formen und Lebensweisen besiedeln.

Die Biologen ordnen sie gegenwärtig in fünf Abteilungen ein. Es gibt:

- Ständerpilze, zu denen etwa viele heutige Speisepilze zählen. Sie bilden häufig einen Fruchtkörper aus – den typischen Pilzhut. Viele von ihnen bauen Holz und anderes pflanzliches Material ab. Sie umfassen rund 30 000 bekannte Arten.

- Schlauchpilze, deren Spektrum von Trüffeln, Becherlingen, Morcheln und einigen Schimmelpilzen bis zur einzelligen Bäckerhefe reicht. Sie leben im Meer, im Süßwasser sowie auf dem Land (viele auch in Flechten-Symbiosen) und sind mit 65 000 Arten die vielfältigste Gruppe.

- Endomykorrhiza-Pilze, die vor allem Pilzwurzeln in Symbiose mit vielen Pflanzen ausbilden. Rund 220 Arten.

- Jochpilze, deren bekannteste Vertreter etwa Brot, Pfirsiche, Erdbeeren oder Kartoffeln verschimmeln lassen. Rund 1000 Arten.

- Flagellatenpilze, die als Einzeller leben und zum Teil kugelförmige Fruchtkörper ausbilden. Sie stellen die älteste, von den übrigen Pilzen abgespaltene Gruppe dar. Etwa 1000 Arten.

Heute sind also rund 100 000 Pilzarten bekannt, doch rechnen Experten mit 1,5 bis 3,5 Millionen Spezies (zum Vergleich: Bislang sind 260 000 Gefäßpflanzenarten beschrieben).

Dass Pilze eine derart große Vielfalt hervorbringen konnten und so erfolgreich als Lebewesen sind, liegt unter an-

derem im Aufbau ihres Organismus begründet. Diese Konstruktion mutet im Vergleich zu den hochkomplexen Organen eines Tieres oder dem Aufbau einer höheren Pflanze ausgesprochen simpel an.

Wenn ein Pilz nicht als Einzeller existiert, wie etwa eine Hefe, dann bildet er in der Regel ein Geflecht von winzigen Pilzfäden („Hyphen“) aus. Das ist der ganze Körper dieses wundersamen Wesens. Das Geflecht, das den Boden durchwuchert, bildet eine große Kontaktfläche zur Umgebung aus, über die der Pilz energiereiche organische Moleküle als Nahrung sowie Minerale und Wasser aufnimmt.

Ein vier mal vier Zentimeter großer Würfel Boden kann Pilzfäden von insgesamt zwei Kilometer Gesamtlänge enthalten, die eine Oberfläche von 600 Quadratzentimetern haben – etwa die Größe eines DIN-A4-Blatts.

Und das Geflecht wächst in einem atemraubenden Tempo: Bis zu 1000 Meter neue Fäden kann ein Pilz jeden Tag bilden – und so seine mangelnde Beweglichkeit ausgleichen. Denn die Hyphen schieben sich schnell in neue Lebensräume vor.

Die Wuchskraft der Fäden hilft dem Pilz auch bei einem Vorgang, der bei diesem Lebewesen genauso fremdartig anmutet, wie alles andere an ihm: dem Sex.

Zwar breiten sich viele Pilze ungeschlechtlich aus, indem sie Millionen von genetisch identischen Sporen bilden – also Klone ihrer selbst. Doch bei jenen Arten, die sich geschlechtlich fortpflanzen, müssen sich die Hyphen zweier Exemplare finden und vereinen.

Dazu senden die Fäden einen Sexuallockstoff aus. Dem Ruf dieses chemischen Duftes folgen die Fäden eines anderen Pilzes der gleichen Art und wachsen darauf zu – allerdings nur, sofern sie einem anderen „Paarungstyp“ angehören.

Die Biologen sprechen bei Pilzen von „plus“ und „minus“. Sie sind nur biochemisch verschieden, gleichen sich jedoch äußerlich vollkommen, und so sucht man Begriffe wie „männlich“ oder „weiblich“ im seltsamen Reich der Pilze vergebens.

Wenn der andere Paarungstyp der richtige ist, verschmelzen die Fäden beider Pilze zu einem neuen Individuum. Handelt es sich um einen Ständerpilz, durchstoßen sie die Bodenoberfläche und bilden dort einen Fruchtkörper – eben jenen Pilz, den Menschen gern einsammeln und als Delikatesse zubereiten.

An der Unterseite des Pilzhutes befinden sich Bereiche, in denen nun das geschieht, was der eigentliche biologische Sinn des geschlechtlichen Aktes ist: Das Erbgut der beiden Elternpilze wird gemischt, indem ihre Zellkerne verschmelzen, und neu auf die sich bildenden Sporen verteilt. Ähnliches geschieht auch beim Menschen, wenn zunächst Ei- und Samenzellen entstehen und sich dann mit der Zeugung eines neuen Kindes das Erbgut von Mutter und Vater mischt.

Auf diese Weise erhöht sich die genetische Vielfalt und Anpassungsfähigkeit der Pilze. Es bilden sich Sporen, die nun davonfliegen, um andere Lebensräume zu erreichen und dort wieder zu Pilzfäden auszukeimen.

Die Sporen sind mikroskopisch klein und unglaublich zahlreich: Ein einziger Bovist kann mehrere Billionen Sporen ausstoßen. Sie fliegen bis in 160 Kilometer Höhe und können Ozeane überqueren.

Ein weiterer Teil des Erfolges der Pilze liegt vermutlich in der Fülle von höchst potenten Wirkstoffen und auch

Giften, die sie herstellen können. Ein solches Arsenal von chemischen Waffen und Werkzeugen benötigen die seltsamen Kreaturen, um zu überleben.

Schließlich besitzen sie keinerlei Panzer oder mechanische Abwehrwaffen, auch keine Beine, um Feinden zu entfliehen. Ihnen fehlen zudem Zähne, Magen und Darm, um ihre Nahrung zu erschließen.

Viele Pilze produzieren daher hochwirksame Eiweißstoffe (Enzyme), die sie ausscheiden und mit deren Hilfe sie komplexe organische Verbindungen in kleinere Moleküle aufspalten. Dank dieser biochemischen Katalysatoren können sie die Nahrung quasi außerhalb ihres Körpers zerlegen – und benötigen anders als Tiere keine Verdauungsorgane wie Magen und Darm.

Die Bruchstücke vermag die Pilzzelle direkt in sich aufzunehmen und zu nutzen, um biochemisch Energie zu gewinnen oder eigene Körpersubstanz aufzubauen.

Als Parasiten lebende Pilze wiederum verfügen über Enzyme, mit denen sie die Zellwände von Pflanzen, die sie befallen, auflösen können. Anschließend dringen

sie mit ihren Fäden in die Pflanzenzellen ein und profitieren von deren Nährstoffen.

Manche Pilze besitzen Enzyme, mit denen sie sogar das extrem gegen Zersetzung resistente Holz abzubauen vermögen. Etwa der Echte Hausschwamm, der manchem Eigenheim-

Pilze sind
deutlich näher mit
den Tieren als
mit den Pflanzen
verwandt

Die nur ein Zentimeter hohen, becherförmigen Fruchtkörper des Tiegeltäublings enthalten kleine Kapseln, die mit Sporen gefüllt sind. Regentropfen schleudern die Kapseln hinaus - und so vermehrt sich der Pilz



Bei Verletzung sondert der Große Bluthelmling einen roten Saft ab. Er enthält antibiotisch wirksame Stoffe. Vermutlich helfen sie dem Helmling im Kampf gegen Parasiten. Da Pilze nicht fliehen können, sind sie auf chemische Verteidigung angewiesen



Memo: **PILZE**

► **Der gemeinsame Vorfahr** von Pilzen und Tieren, ein Einzeller, lebte vor mehr als einer Milliarde Jahren im Meer.

► **Vor rund 460 Millionen Jahren** besiedelten Pilze und höhere Pflanzen das Land.

► **Der Körper der Pilze** besteht aus dünnen Fäden, die oft unterirdisch wachsen.

► **Pilze unterscheiden sich** von Pflanzen, weil sie u. a. kein Blattgrün besitzen; sie müssen energiereiche Nahrung aufnehmen.

► **Ihr chemisches Arsenal** gestattet Pilzen, fast alle Stoffe, sogar Holz, abzubauen.

besitzer Kummer bereitet und schon ganze Holz- oder Fachwerkhäuser hat einstürzen lassen.

Die meisten Menschen indes verbinden mit dem Begriff Pilz etwas Angenehmes und Essbares, nämlich Speisepilze, wie etwa den Pfifferling.

Tatsächlich aber spielt eine Gruppe viel kleinerer, einzelliger Arten eine wesentlich größere Rolle für die menschliche Ernährung: die Hefen.

Denn sobald diese Pilze unter Mangel an sauerstoffreicher Luft leiden, bauen sie in einem chemischen Prozess Zucker zu Alkohol und Kohlendioxid ab. So können die Pilze auch ohne Sauerstoff Energie gewinnen – und der Mensch erhält Alkohol.

Schon vor mehr als 6000 Jahren sollen die Sumerer die kleinen Pilze genutzt haben, um Bier zu brauen. Vor 5500 Jahren haben die Assyrer süßen Traubensaft zu Wein vergoren. Und auch beim Backen helfen Hefen, wenn das von ihnen abgegebene Gas Kohlendioxid den Teig aufbläht.

Viele Stoffe aus dem chemischen Arsenal der Pilze haben sich zudem als höchst nützlich für den Menschen er-

wiesen. Es war reiner Zufall, dass der Arzt und Bakteriologe Alexander Fleming im Jahr 1928 beim Züchten von Eiterbakterien bemerkte: An einigen Stellen wuchsen keine Bakterien, irgend etwas hemmte deren Wachstum.

Die Ursache war ein Pilz (*Penicillium notatum*), der als Verunreinigung in die Bakterienkultur geraten war und nun dort wuchs. Er schied eine Substanz in die Umgebung aus, um Bakterien abzutöten und sich vermutlich dadurch vor einem Befall mit ihnen zu schützen. Fleming nannte die Substanz nach ihrem Produzenten Penicillin – er hatte das erste Antibiotikum entdeckt.

Ein anderes, heute aus Schimmelpilzen gewonnenes Medikament heißt Cyclosporin. Es bremst das Immunsystem eines Menschen und verhindert so die Abstoßung von transplantierten Organen.

DIE THERAPEUTISCHE WIRKUNG von Pilzen wurde schon sehr früh erkannt. In der Antike galt der Lärchenporling als Allheilmittel, in der asiatischen Naturheilkunde waren verschiedene Pilze bekannt, und bereits vor 5200 Jahren hatte der als „Ötzi“ bekannte Gletschermann, dessen Mumie vom Eis der Alpen konserviert wurde, einen Birkenporling dabei – vermutlich als Therapeutikum.

Und selbstverständlich nutzten die Menschen das große chemische Arsenal der Pilze auch, um sich zu berauschen: So half der Fliegenpilz schon vor mehr als 6000 Jahren sibirischen Schamanen, sich in Trance und Ekstase zu versetzen.

Der mexikanische Pilz *Psilocybe mexicana* wiederum enthält Inhaltsstoffe, die einem Botenstoff des Gehirns – dem „Glückshormon“ Serotonin – chemisch ähneln und starke Halluzinationen hervorrufen. Als „Zauberpilz“ wurde er seit den 1960er Jahren zunächst von Hippies und später von anderen Drogenkonsumenten genutzt.

Und auf Getreideähren wächst als dunkelpurpurfarbener Parasit das sogenannte Mutterkorn – ein Pilz, der mehrere zum Teil giftige und medizinisch wirksame Substanzen produziert (die unter anderem in der Geburtshilfe ver-

wendet werden). Die chemisch abgewandelte Form eines seiner Wirkstoffe wurde als LSD berühmt.

Das Mutterkorn zeigt aber auch, wie eng die Grenze zwischen berauschenden, medizinisch wirksamen und giftigen Substanzen ist. Wurde früher aus Mehl, das mit diesem Pilz verunreinigt war, Brot gebacken und verzehrt, konnten die Betroffenen schreckliche Symptome erleiden: Manche bekamen schmerzhafte Muskelkrämpfe und epileptische Anfälle, andere erlebten Delirien, Halluzinationen und ein brennendes Gefühl in Händen und Füßen, bis schließlich Körperteile wie Finger, Zehen, Ohrläppchen oder Nase schwarz wurden und ganze Gliedmaßen abstarben.

Antoniusfeuer nannten die Menschen die gefürchtete Krankheit. Nach Schätzungen starben in Europa in der Zeit zwischen dem 11. und dem 15. Jahrhundert daran mehr als 100 000 Menschen. Möglicherweise hat kein anderer Pilz jemals so viele Opfer gefordert.

Einen anderen Typ von Pilzgiften mit verheerenden Auswirkungen identifizierten Forscher erst 1960. Sie erkannten, dass Schimmelpilze etwa der Art *Aspergillus flavus* stark wirksame krebserregende Substanzen produzieren, die Mykotoxine. Schon ein bis zehn Milligramm des Stoffes pro Kilogramm Körpergewicht sind für einen Menschen tödlich.

Aspergillus flavus wächst bevorzugt auf fetthaltigen Früchten wie Nüssen oder Erdnüssen, schädigt die Leber und löst Leberkrebs aus – allerdings meist so langsam, dass die Menschen den Zusammenhang zwischen dem Pilz

und den Krankheitssymptomen lange übersehen haben.

WÄHREND VIELE Pilzarten von toter organischer Substanz leben, bevorzugen manche Spezies die Existenz als Parasiten: Beim *Homo sapiens* können sie unter anderem die Haut (etwa als Fußpilz), Schleimhäute, Haare oder Nägel befallen und in manchen Fällen – vor allem bei immungeschwächten Menschen – sogar Organe wie die Lunge infizieren. Hautpilze befallen unter anderem die oberen Haut- und Hornschichten und ernähren sich von Schweiß, abgestorbenen Hautzellen und der Hornsubstanz Keratin.

Tiere werden ebenfalls von ihnen heimgesucht – vor allem aber Pflanzen. Für die Flora sind Pilze die mit Abstand bedeutendsten Parasiten; sie lösen die

meisten und oft auch schlimmsten Pflanzenkrankheiten aus. Bei den Nutzpflanzen Mitteleuropas etwa sind sie in 80 Prozent der Fälle die Erreger (den Rest verursachen Bakterien und Viren) und vernichten schätzungsweise zehn bis 20 Prozent der Erträge.

Auch der Riesenhallimasch aus Oregon lebt auf Kosten anderer Organismen. Seine Pilzfäden wachsen bevorzugt entlang der Wurzeln von Nadelbäumen und dringen darin ein, wenn sie können.

Dann zerstören seine Fäden die Wurzeln des jeweiligen Baumes, töten ihn schließlich ab, zersetzen sein Holz und ernähren sich davon. So gesehen ist der Riesenpilz nicht nur das mächtigste Lebewesen der Erde, sondern gleichzeitig der größte Parasit.

Doch das hat auch seine guten Seiten: Der Pilz befällt hauptsächlich geschwächte Bäume und fördert so die Auslese der gesunden. Ohnehin ist die Rolle der Pilze als Zersetzer nicht zu unterschätzen. Holz und die von Pflanzen gebildete Zellulose zum Beispiel sind langlebige Substanzen, die vor

allem von Pilzen zersetzt werden. Es gibt praktisch keine Kohlenstoffverbindung, die nicht von irgendeiner Pilzart abgebaut werden kann.

Ohne die Zersetzer – die sogenannten Destruenten, zu denen neben den Pilzen unter anderem auch Bakterien gehören – würden bald lebenswichtige Mineralien in unseren Ökosystemen fehlen, würden Kohlenstoff, Stickstoff und andere Elemente in organischen Stoffen für immer gebunden bleiben. Die Erde würde in riesigen Lagen aus organischer Substanz ersticken.

Kurz: Ohne das Reich der Pilze würde es das Leben, wie wir es heute kennen, nicht geben. □

Fachliche Beratung: Dr. Arthur Schöbber, Biozentrum Martinsried, Ludwig-Maximilians-Universität München

Literaturtip: Georg Schön, „Pilze – Lebewesen zwischen Pflanze und Tier“, C. H. Beck.

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.*

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



Tebonin®

*** Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit
infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.**

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe

Stand: Januar 2010 1/12/09/01

Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.*

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



**Mit der Natur.
Für die Menschen.**

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

www.tebonin.de

Die Macht der Katastrophe

Lange glaubten Forscher, stabile Umweltbedingungen seien die Voraussetzung dafür, dass sich das Leben entfaltet. Doch inzwischen haben sie erkannt: Erst verheerende Naturereignisse wie etwa Asteroideneinschläge geben der Evolution genügend Schub, um komplexere Wesen hervorzubringen

Text: Sebastian Witte

Es war die größte Katastrophe aller Zeiten: Vor rund 250 Millionen Jahren explodierte im heutigen Sibirien ein gigantischer Vulkan und stieß Millionen Kubikkilometer Magma aus. Aschewolken verdunkelten den Himmel, giftiger Regen verseuchte den Planeten; die Luft heizte sich auf, der Sauerstoffgehalt fiel von 30 auf 16 Prozent.

Wissenschaftler gehen davon aus, dass diese Kettenreaktion die größte Aussterbewelle der Erdgeschichte auslöste. In den Meeren erstickten Milliarden Korallen, Seelilien und Schwämme. Auf dem Land, wo vormals Urwälder gediehen, trieben schon bald heiße Winde riesige Sanddünen vor sich her. Der Urkontinent Pangaea verwandelte sich zunehmend in eine Wüste.

Es war, als sei das höhere Leben für immer ausgelöscht worden. Und tatsächlich haben Paläontologen in Gesteinsschichten aus jener Zeit kaum Fossilien oder Spuren tierischer Aktivität wie Tunnel und Fraßgänge entdeckt.

Doch in Sedimenten, die einige Jahrmillionen jünger sind, offenbarte sich Erstaunliches: Dort sind zahlreiche versteinerte Skelette eingebettet.

Und mehr noch, die Fossilien belegen, dass die Erde nach dem Inferno von weitaus vielfältigeren und komplexeren Lebensformen bevölkert wurde.

Das Muster im Gestein verblüffte die Wissenschaftler zunächst – denn jahrzehntelang gingen Evolutionsbiologen davon aus, dass Organismen sich vor allem dann zu höheren Wesen entwickeln, wenn die Umweltbedingungen einigermaßen stabil sind.

Mittlerweile aber haben sie erkannt, dass eher das Gegenteil der Fall ist: dass Katastrophen gleichsam die Motoren der Evolution sind.

ZWAR UNTERLIEGEN die Ökosysteme der Erde und damit Flora und Fauna auch ohne desaströse Wendezeiten einem permanenten Wandel – der aber erfolgt nur ganz allmählich: Über Jahrmillionen etwa falten sich Gebirge auf; die polaren Eiskappen dehnen sich aus oder schmelzen; Urwälder verschwinden, wenn im Laufe der Zeit das Klima immer trockener wird.

So verlieren auch hier Spezies ihren Lebensraum, gehen unter und geben neuen Arten Raum, sich zu entfalten. Doch halten sich in diesen erdgeschichtlichen Phasen aussterbende und neu entstehende Arten mehr oder minder die Waage.

Fossilfunde lassen darauf schließen, dass die Artenvielfalt in solchen Zeiten annähernd unverändert bleibt.

Erst Katastrophen mit weltweiten Folgen vernichten auf einen Schlag ganze Gruppen von Organismen, schneiden damit Entwicklungsstränge ab und stellen die Weichen des Lebens neu.

Das lässt sich nicht nur aus den Folgen jenes Vulkandramas vor 250 Millionen Jahren schließen. Rund um unseren Globus haben Forscher vier weitere fossilienarme Gesteinsschichten gefunden, die auf globale Katastrophen schließen lassen. Sie müssen sich vor 440, 365, 210 und 65 Millionen Jahren abgespielt haben.

Bei keiner dieser verheerenden Aussterbewellen ist die genaue Ursache

bekannt. Doch ganz gleich, ob es Vulkanausbrüche waren, die das jeweilige Massenaussterben ausgelöst haben, oder Asteroideneinschläge oder gewaltige Eiszeiten – immer zeigt sich ein ähnliches Bild im Gestein: Über Schichten, die frei von versteinerten Lebewesen sind, liegen solche, in denen extrem viele Fossilien gefunden werden.

Jedes Mal also hat sich die Natur nach der Katastrophe erholt – und stets haben die wenigen Überlebenden vielfältige Nachkommen hervorgebracht.

Globale Katastrophen sind folglich nur auf den ersten Blick vernichtende Ereignisse: Im Nachhinein können sie sich als außerordentlich fruchtbar erweisen. Sie markieren gleichsam einen Neubeginn.

Bei der Katastrophe vor 440 Millionen Jahren etwa verschwanden im Ozean Tausende unbeweglicher Kreaturen, darunter Korallenarten und sesshafte Armfüßer. In den Jahrmillionen darauf aber vermehrte sich umgekehrt die Artenzahl der Fische, und sie bildeten fortan einen wichtigen Bestandteil der Meeresfauna.

Und bei dem Massenaussterben vor 365 Millionen Jahren traf es unter anderem gepanzerte Meerestiere wie die Trilobiten. Danach brach das Zeitalter der Amphibien an.

Zwar können Paläontologen stets nur spekulieren, weshalb bestimmte Spezies, ja ganze Organismengruppen die jeweiligen Katastrophen nicht überlebt haben, andere dagegen fortdauernten. Denn letztlich haben Tiere wie Pflanzen ihre Spuren (wenn überhaupt) nur im Gestein hinterlassen.



Doch als nahezu sicher gilt, dass vor allem jene Spezies den Verheerungen trotzen konnten, die durch Zufall bessere Voraussetzungen mitbrachten. Erstaunlicherweise sind dies – so zeigen die Fossilfunde – oft solche Tiergruppen, die vor einer Katastrophe eher im Schatten anderer Arten standen.

MUSCHELN ETWA lebten vor 250 Millionen Jahren eher in küstenfernen und schlechter durchlüfteten Gewässern. Als der Sauerstoffgehalt in den Meeren nach dem verheerenden Vulkanausbruch auf die Hälfte fiel, waren sie durch ihre Anpassungen zufällig auf diesen radikalen Wandel bereits vorbereitet – anders als die vielen urtümlichen Schalentiere, die zuvor in sauerstoffreichen Gewässern gesiedelt hatten und nun in Massen ausstarben.

Diese ausgelöschten Arten hinterließen ökologische Nischen, die fortan von Muscheln besetzt wurden: Sie fanden neue Lebensräume, breiteten sich nun auch in den Flachmeeren und in Landnähe aus. Und brachten dort zahlreiche neue Arten hervor.

Auch an Land begann nach der Katastrophe von Sibirien für manche Spezies

eine überaus günstige Zeit: In den Schichten australischer und chinesischer Kohlensümpfe etwa, die aus jener Zeit stammen, haben Forscher einen explosionsartigen Anstieg fossiler Pilzsporen ausgemacht. Massenhaft verrottende Pflanzen hatten den Pilzen ein derart reichhaltiges Nahrungsangebot beschert, dass sie sich extrem rasch vermehren konnten.

Als Profiteure der Krise erwiesen sich damals auch die Vorfahren jener Tiere, die bald schon den gesamten Planeten beherrschen sollten: Archosaurier – jene Reptiliengruppe, aus der später unter anderem die Vögel hervorgingen.

Sie kamen bestens zurecht mit der schwülen Hitze, die in jener Zeit selbst an den Polen herrschte. Und dank eines genialen Tricks, der es ihnen erlaubte, Sauerstoff hocheffizient in ihr Blut aufzunehmen, konnten sie trotz seines geringen Gehaltes in der Atmosphäre überleben.

Und wie die Muscheln im Meer fanden auch diese Urechsen Lebensräume ohne Konkurrenz vor, auch ihnen verlieh also das schlagartige Auslöschen von unzähligen Arten einen evolutionären Schub.

Immer wieder finden Forscher in Fossilienlagerstätten Hinweise auf gewaltige Massensterben. So verschwanden Tausende Lebensformen, als vor 65 Millionen Jahren ein Asteroid auf die Erde stürzte

Denn in den Jahrtausenden darauf brachten ihre Nachkommen völlig neue Entwicklungslinien hervor: Krokodile entstanden und später auch die ersten Dinosaurier.

ALS VOR 65 MILLIONEN Jahren ein gewaltiger Asteroid in der Nähe der heutigen mexikanischen Halbinsel Yucatán einschlug, was vermutlich zum Ende der Dinosaurier führte, traten schon bald darauf die Säuger ihren Siegeszug an (siehe Seite 142).

Den meist fülltragenden Tieren, die Jahrtausenden im Schatten der Donnerschlangen gestanden hatten, verhalf die Katastrophe zu unverhoffter Blüte. Erst danach konnten sie, unbedrängt von den Dinosauriern, eine Vielzahl völlig neuer Formen entwickeln; es entstanden Elefanten und Wale, Pferde und Schweine, Katzen und Bären. Und schließlich auch der Mensch.


Für den Aufschwung der Natur zu höher organisierten Lebensformen – das offenbart die Erdgeschichte – scheinen Katastrophen ein derart wichtiges Prinzip zu sein, dass Wissenschaftler dies heutzutage gar bei ihrer Suche nach außerirdischem Leben berücksichtigen: NASA-Forscher etwa untersuchen vor allem solche Planeten, die von heftigen Störungen gezeichnet sind.

Denn vor allem dort, wo massenhaft Arten aussterben, so nehmen sie an, vermögen sich neue, komplexere Spezies zu entwickeln. □

Sebastian Witte, 26, ist Wissenschaftshistoriker in Hamburg.

Literaturtip: József Pálffy. „Katastrophen der Erdgeschichte“, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.



A detailed close-up photograph of a puma's face, showing its golden-brown fur, a sharp yellow-green eye, and long whiskers. The puma is looking slightly to the left.

Säugetiere wie dieser Puma schützen sich mit einem Fell und halten ihre Körpertemperatur konstant. Sie bringen ihre Jungen lebend zur Welt und ernähren sie mit Milch. Die Kombination dieser Eigenschaften ist einzigartig im Tierreich – und macht die Säuger zu einem Erfolgsmodell der Evolution

Warmblüter

DER TRIUMPH DER SÄUGER

Mehr als 100 Millionen Jahre leben sie im Schatten der Dinosaurier und sind kaum größer als Ratten. Doch als die Riesenechsen aussterben, bricht die Zeit der Säugetiere an. In einem beispiellosen Siegeszug erobern die Fellträger alle Kontinente

Säugetiere, hier ein Mandrill,
vermögen ihre Körpertemperatur
zu regulieren. So bleiben sie
auch nachts oder in kälteren Jahres-
zeiten kraftvoll und beweglich



Kein Windhauch bewegt die warme Luft, als die Kreatur den Schutz des Waldes verlässt. Schritt um Schritt nähert sie sich dem See, der still vor ihr ruht. Das scheue Huftier erinnert ein wenig an eine mit feinen Haaren bedeckte Antilope. Vier Zehen an den Vorderläufen und drei an den Hinterläufen verhindern, dass das Geschöpf in den weichen Boden einsinkt.

Schließlich senkt es seinen langen Kopf herab, um zu trinken. Doch plötzlich knicken seine dünnen, sehnigen Beine ein. Jäh sackt es in sich zusammen und stürzt leblos ins Wasser.

Nur das ferne Summen und Kreischen in den Farnen und Sauergräsern, Bäumen, Lianen und Ranken ringsum erklingt. Auf der Oberfläche des Gewäs-

sers treiben kleine Blasen. Sie blubbern aus dem vulkanischen Untergrund herauf, zerplatzen und setzen lebensfeindliche Gase frei.

Diese tödlichen Schwaden sind schwerer als Luft. Und wenn es windstill ist, legen sie sich in einer unsichtbaren Schicht über die Wellen und

wässer für einige Zeit wieder zu einem ungefährlichen Ort: Kranichvögel staksen am sumpfigen Ufer entlang. In den Böschungen krabbeln und schwirren Myriaden von Wespen und Wanzen, Käfern, Heuschrecken und Fliegen. Schillernde Libellen fliegen über die Wellen, eine Ameisenkönigin

Säuger entwickeln eine besondere Form der Fortpflanzung: die Lebendgeburt

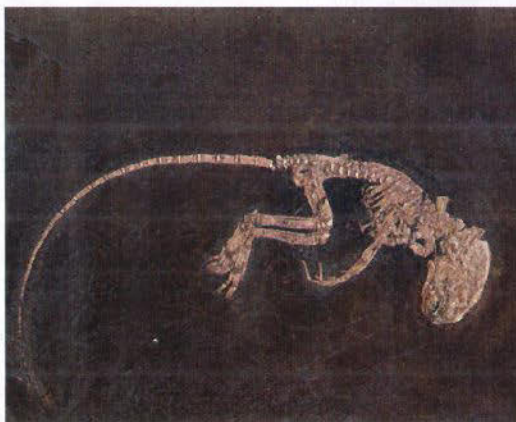
kriechen über das Ufer. Wie der kleine Vierbeiner sind schon Tausende Tiere erstickt, als sie sich dem See näherten.*

Irgendwann verwirbelt ein Windstoß den gefährlichen Dunst und treibt ihn in die Höhe. Dann wird das Ge-

von der Größe eines Zaunkönigs geht auf Hochzeitsflug.

Das tote Huftier driftet derweil wie die vielen anderen Geschöpfe, die am Seeufer verendet sind, mit sanfter Strömung hinaus auf das offene Wasser. Dort

* Dies ist die derzeit plausibelste Theorie.



Dieses kleine Säugetier mit kräftigen Zähnen, gefunden in der Fossilienlagerstätte von Messel bei Darmstadt, kletterte einst in Bäumen umher



Zu den berühmtesten Säugerfunden in Messel zählt dieses 50 Millionen Jahre alte Urpferd, das kaum größer war als ein Foxterrier

sinkt der Kadaver zum schlammigen, sauerstoffarmen Grund des Sees herab.

Schon bald bedecken ihn Fragmente abgestorbener Algen sowie winzige Tonpartikel. Über Jahrtausende, Jahrhunderttausende, ja sogar Jahrmillionen lagert sich Schicht auf Schicht. Der schützende Mantel wird schwerer und fester – und verwandelt sich allmählich zu Gestein, das die Knochen luftdicht konserviert. Der See trocknet aus, und schließlich verbergen Bäume, Büsche und Gräser das steinerne Grab.

Rund 50 Millionen Jahre später entdecken Forscher im fein geschichteten Ölschiefer der Bergbaugrube von Messel die Überreste des Urtieres. Nur 22 Kilometer Luftlinie liegen zwischen dem Zentrum von Frankfurt am Main und

der Welt jener Zeit, in der die erfolgreichsten heute noch lebenden Wesen antraten, die Erde zu erobern: die Säugetiere.

Im Laufe ihrer Evolution bevölkern diese Kreaturen nahezu jede Region des Planeten, von den tropischen Wäldern am Äquator bis zu den frostigen Eiswüsten an den Polen, von der Höhe der Lüfte bis zu den Tiefen der Flüsse, Seen und Meere. Doch der Siegeszug der Säuger beginnt zögerlich. Ihr Aufstieg gleicht einem verschlungenen Weg mit ungewissem Ziel.

ES IST WOHL mehr als 200 Millionen Jahre her, da rascheln kleine Geschöpfe, kaum größer als Ratten, durch üppige Regenwälder. Es sind die ersten Lebe-

Um den Riesenechsen zu entgehen, wagen sich die zierlichen Kreaturen nur im Schutz der Dunkelheit aus ihren Verstecken. Den Dinosauriern nützen dann ihre hoch entwickelten, auf die Jagd am Tage spezialisierten Augen wenig. Überdies macht die Kälte der Nacht die Räuber träge.

Denn wie heutige Kröten und Eidechsen sind die Saurier unfähig, die Wärme ihres Körpers von innen zu beeinflussen. Sie sind der Temperatur ihrer Umwelt ausgeliefert. Fehlt die Wärme des Tages, verlieren sie an Kraft und Ausdauer. Bei einem Sonnenbad müssen sie viel Zeit darauf verwenden, neue Energie für Fortpflanzung, Flucht und Futtersuche zu tanken.

Die nachtaktiven Säugetiere dagegen entwickeln eine Eigenschaft, mit der sie auch niedrigen Temperaturen trotzen: die Warmblütigkeit. Wird es draußen kühler, vermögen sie mit biochemischen Prozessen ihre Körperwärme auf einem konstanten Niveau zu halten. Die Energie dafür gewinnen sie aus ihrer Nahrung.

Diese innere Heizung ermöglicht es den Warmblütern, auch in der Nacht und bei jeder Jahreszeit beweglich und kraftvoll zu sein (manche Forscher nehmen allerdings an, dass auch einige Dinosaurier bereits eigene Körperwärme erzeugen können; siehe Seite 110).

Außerdem wappnen sich die Säuger mit einer weiteren Innovation gegen nächtliche Kühle: Sie umgeben ihren Körper mit einer speziellen Isolierung – dem Fell. Aus dem Eiweiß Keratin pro-

Aus dem Eiweiß Keratin produzieren »Mammalia« ein schützendes Fell

dem ehemaligen Lebensraum der hundegroßen Kreatur.

Es ist ein bedeutender Fund. Denn das Fossil zeigt, wie ein stammesgeschichtlicher Vorfahr der Pferde aussah. Und: Das frühe Ross ist nur ein Fundstück von Tausenden aus der Grube – seit Jahren fördern Urzeitforscher dort außergewöhnlich gut erhaltene Fossilien von immenser Vielfalt zutage.

Die Versteinerungen offenbaren eine einzigartige Momentaufnahme

wesen, die sich eindeutig den Säugtieren zuordnen lassen. Die Vierbeiner stammen von sogenannten Therapsiden ab (von griech. *thērion* = Tier und *apsis* = Bogen; nach einem anatomischen Detail im Schädelaufbau), einer Gruppe von Reptilien, und sie führen ein unauffälliges Leben. Mit einem äußerst feinen Riechsinn erkunden sie ihre Umgebung – und erschnuppert so womöglich auch ihre gefährlichsten Feinde, die Dinosaurier.



Auf der Suche nach Fossilien zerlegt ein Forscher in Messel behutsam blättrige Ölschieferplatten



Vor etwa 50 Millionen Jahren erstreckte sich im Vulkanbecken von Messel ein exotischer See

Die Nagetiere haben rund 2000 Arten hervorgebracht, so viele wie keine andere Säugergruppe. Einige entfernte Vorfahren dieses Grauhörnchens erreichten die Größe von Büffeln



duzieren sie Haare, die aus der Haut sprießen und einen dichten, schützenden Pelz bilden.

Auch ein außergewöhnlich gutes Gehör erleichtert den Ursäufern das Leben im Dunkeln: Aus bestimmten Partien der Kiefer erwachsen ihnen im Mittelohr die Gehörknöchelchen Hammer und Amboss. Damit nehmen sie höhere Frequenzen und leisere Töne wahr als Reptilien – ein entscheidender Trumpf, um sich gegen die Übermacht der Dinosaurier zu wehren.

Schließlich vervollkommen die meisten Säugetiere auch eine neue Form der Fortpflanzung. Anders als die Dinosaurier, deren Brut in der Regel unter einer harten Eierschale heranwächst, entwickelt sich der Säugernachwuchs

im Mutterleib. Hier ist er besser geschützt als ein Ei, das leicht zur Beute von Nestdieben wird.

Ihren Namen verdanken die Säuger einer weiteren, neuartigen Fähigkeit: Diese Tiere versorgen ihre Jungen mit einer besonderen Flüssigkeit, der Muttermilch. Aus Hautdrüsen sondern sie ein Sekret ab, das vor allem Antikörper und andere Immunstoffe enthält.

Anfangs schützt der zähe Schleim vermutlich noch von außen die zarte Haut des Nachwuchses vor Infektionen und Parasiten. Eines Tages aber beginnen die Neugeborenen, das Sekret aufzulecken und schließlich direkt aus den Drüsen zu saugen.

Deshalb nennen Wissenschaftler diese Tiere auch „Mammalia“ (von lat.

mamma = Brust). Der Drüsensaft wird für sie schon bald unerlässlich, denn er versorgt ihren Körper mit nützlichen Abwehrstoffen und macht sie stark und lebensstüchtig.

Mit ihren neuen Eigenschaften gelingt es den Säugern bereits in ihrer Frühzeit, eine beachtliche Vielfalt zu entwickeln und sich agil in unterschiedlichsten Lebensräumen zu behaupten.

Schon vor mehr als 100 Millionen Jahren durchstöbern Tiere das Unterholz, die Igel und Spitzmäusen ähneln.

Flussufer werden vom „Biber-schwanz“ bewohnt – einer Kombination aus Fischotter, Robbe und Biber.

Und durch die Wälder pirscht ein Fleischfresser namens *Repenomamus* mit einem kräftigen Körper, das Maul

mit spitzen Vorderzähnen bewehrt. Aber selbst dieser stämmige Räuber ist kaum größer als eine Katze. Denn solange die Dinosaurier das Leben am Tage beherrschen, bleiben die Warmblüter eine bescheidene Randerscheinung der Evolution.

Erst am Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren erhalten die Säuger plötzlich eine Chance: Ein gewaltiger

Asteroid stürzt auf die Erde, so mutmaßen Forscher heute, und verändert schlagartig die Bedingungen auf dem Planeten (siehe Seite 140). Bis zu drei Viertel aller Tier- und Pflanzenarten sterben bald nach dem verheerenden Ereignis aus.

Auch die Dinosaurier finden auf die Dauer nicht mehr genügend Nahrung und verschwinden. Nicht eine der Ech-

senarten, die mehr als 100 Millionen Jahre die Kontinente dominierten, überlebt den Übergang zur Erdneuzeit.

Anders die Säuger: Die kleinen Felltiere kommen mit den neuen Bedingungen besser zurecht. Nun vermögen sie auch am Tag aktiv zu sein, denn jetzt bedrohen sie nur wenige gefährliche Feinde. Den Mammalia eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten: Sie ent-

Viele Säugetiere verfügen über ein feines Gehör und einen guten Riechsinn

Bei manchen Säugern wie diesem Wildschwein, das heute in mitteleuropäischen Wäldern lebt, hat sich das schützende Haarkleid zu derben Borsten entwickelt





decken Nahrungsangebote und Lebensräume, von denen die Dinosaurier sie zuvor ferngehalten haben.

Für die Aufsteiger beginnt eine Zeit der Experimente, in der sie immer neue Varianten ausprobieren – und die Vorteile von Warmblütigkeit, Behaarung und feinen Sinnen ausspielen können.

Geradezu sprunghaft steigt allorten die Zahl der Säugerfamilien und -spezies an. Vor allem kleine Arten verbreiten sich rasch über den Planeten. Denn dichte Wälder, deren Dickicht kaum Platz für größere Tiere bietet, bedecken nun viele Regionen.

Nur wenige Millionen Jahre vergehen, bis die ersten Vertreter vieler noch

auf Knochenreste und Überbleibsel urtümlicher Pflanzen. Wertvoll erscheint ihnen einzig das Rohöl, das sie aus dem einstigen Seeboden gewinnen. Irgendwann rentiert sich der Tagebau jedoch nicht mehr, und er wird eingestellt.

Doch im Laufe der Zeit spricht sich herum, welche ganz anderen Funde man in Messel machen kann. Daher beginnen Paläontologen und Privatsammler von 1966 an, die etwa 700 Meter breite und 1000 Meter lange Senke systematisch zu erforschen.

Seither legen Wissenschaftler hier Schicht für Schicht die Urgeschichte frei: Mit Hämmern und Meißeln spalten sie bräunliche Gesteinsplatten; mit

Federkleider urtümlicher Vögel. Und Säugetiere: Allein von etwa 100 Urpferden ruhen heute Skelettteile in den Sammlungen der Messel-Menagerie bei Darmstadt, 57 Gerippe sind sogar weitgehend vollständig.

Mehr als 45 verschiedene Spezies von Säugern haben die Forscher bislang zu unterscheiden vermocht – so viele wie an kaum einer anderen Fossilienlagerstätte der Welt. Auch deshalb gilt die Grube seit 1995 als „Weltnaturerbe der Menschheit“.

Oftmals sind die Ursäuger-Skelette von der Nasen- bis zur Schwanzspitze völlig unversehrt. Zwar hat das Gewicht der Steinmassen sie platt gedrückt, aber alle Gliedmaßen und noch die kleinsten Knöchelchen haben die Zeit überdauert.

Selbst der Inhalt von Magen und Darm ist vielfach im Schlamm des längst verschwundenen Sees erhalten geblieben.

Die Messel-Funde offenbaren den Forschern eine Vielzahl anatomischer Einzelheiten, die dabei helfen, die Verästelungen des Säugerstammbaums zu verstehen. Und sie zeigen ihnen, welche biologischen Strategien der Fortbewegung und Ernährung, der Verteidigung und Orientierung die Säuger entwickeln, als sie sich als Erfolgsmodelle der Evolution erweisen.

So vielfältige Fossilien wie Messel birgt kaum eine Lagerstätte der Welt

heute verbreiteter Gruppen auftauchen: Fledertiere, Nager, Huftiere und andere nehmen jene Plätze ein, die zuvor die Dinosaurier beansprucht haben.

KAUM EIN anderer Ort auf der Welt veranschaulicht die Fülle jenes archaischen Zoos so wie Messel.

Bereits im 19. Jahrhundert stoßen Bergarbeiter im Untergrund von Messel

Bürsten, Kratznadeln und Pinseln exhumieren sie immer neue Versteinerungen aus dem blättrigen Material.

Anders als die meisten Grabungsplätze birgt Messel Abertausende Fossilien aus dem gesamten Spektrum der Natur: Blüten, Blätter und Früchte urzeitlicher Gewächse, metallisch glänzende Käfer und zarte Libellenflügel, Ketten winziger Schlangenvirbel,



Der Messeler Ölschiefer konservierte selbst die feinen Flügelknochen dieser Fledermaus

In Messel fanden
Forscher Vorfahren der
Paarhufer, zu denen
heute neben rund 190
anderen Arten auch
die Giraffe zählt



Das Antlitz der Erde gleicht damals, in der Zeit vor 50 Millionen Jahren, schon weitgehend dem heutigen. Die Ära des letzten Superkontinents, der alle Landmassen in sich vereinte, liegt schon Jahrmillionen zurück, und die Kontinente formen zusehends das uns heute vertraute Bild des Planeten.

Das Klima ist vor allem zu Beginn dieser Epoche weitaus wärmer als heute; die durchschnittliche Temperatur liegt um vermutlich rund zehn Grad Celsius höher.

Selbst in Sibirien gedeihen deshalb Regenwälder. Und auch in Messel ist die Luft feucht und heiß. Der Ort befindet sich zu jener Zeit noch im heutigen Mittelmeerraum. Erst in

den folgenden Jahrmillionen wird er rund 1300 Kilometer gen Norden driften.

Gewaltige Farne, Lorbeerbäume und Walnussgewächse, aber auch Buchen und Kiefern umgeben den See. Wie ein blaugrünes Auge liegt er inmitten des wuchernden Waldes. Barsche, Aale und Knochenhechte schwimmen unter der Oberfläche; Krokodile und Frösche lauern am Ufer auf Beute.

Sie alle hinterlassen Spuren im Gestein, die Paläontologen Jahrmillionen später finden.

Wenn es dämmt, erobern leise Flieger die Lüfte: Fledermäuse. Mindestens sieben verschiedene Arten der zartgliedrigen Flugsäuger ziehen umher, manche

nahe am Boden, andere hoch über den Baumkronen. Eine dieser Spezies ist sogar unmittelbar mit heute noch lebenden verwandt. Wie ihre Nachfahren setzt sie bereits Ultraschall ein, um sich bei der Jagd auf Nachschmetterlinge zu orientieren.

Nach Insekten ist auch Heterohyus auf der Suche, ein Tier, das den heutigen Lemuren gleicht. Mit starken Schneidezähnen bricht die Kreatur die Borke von Bäumen und angelt mit ihren auffällig verlängerten Fingern nahrhafte Larven.

Ähnlich geht das etwa 90 Zentimeter lange Eurotamandua vor, ein möglicher Verwandter der Ameisenbären. Mit seiner langen Schnauze und seinen spitzen Krallen stochert es nach Ameisen und Termiten.

Daneben streunt in Messel auch Ailuravus umher, der von der Nase bis zum buschigen Schwanzende einen Meter misst. Das Tier, das ein wenig einem riesigen Grauhörnchen ähnelt, ist ein Urahn der heutigen Nagetiere.

Diese Säugergruppe spezialisiert sich darauf, robuste Pflanzenfasern sowie Samen und Nüsse mit meißelförmigen, ständig nachwachsenden Schneidezähnen zu zerkleinern. Und verbreitet sich so vielfältig wie keine andere über die Erde: Heute stellen die Nager rund 40 Prozent aller Säugerarten.

Auch die Urahnen der heutigen Paarhufer – der Giraffen, Kamele, Wildschweine, Hirsche und Rinder also – traben bereits durch das Gestrüpp des Messeler Urwalds und fressen Pilze, Früchte und Flechten. Es sind wohl scheue, seltene Einzelgänger, kaum größer als Hunde.

Wie die ersten Säugtiere vor gut 200 Millionen Jahren ist der Zwergplumplori im asiatischen Regenwald ausschließlich in der Nacht aktiv



Es ähnelt einem Bären und ist doch ein Huftier. Allein sein Schädel misst fast einen Meter; dem kräftigen Gebiss hält kein Schildkrötenpanzer stand.

zweieinhalb Metern so groß wie ein Elefant.

Und selbst die Nager bringen großwüchsige Sonderlinge hervor. Der mächtigste unter ihnen lebt in Südamerika, ist drei Meter lang und gleicht aus der Ferne eher einem Büffel als einem Verwandten der Meerschweinchen.

Immer wieder, so zeigen Fossilienfunde, entwickeln sich bestimmte Gruppen von Säugetieren zu solchen Titanen, die neue Nahrungsquellen erschließen oder Angreifer besser abwehren können – und sterben irgendwann doch wieder aus.

Denn wie einst viele Dinosaurier werden die Riesen mit zunehmender

Durch die Gegend von Messel streiften bereits Primaten – die Vorfahren des Menschen

In anderen Regionen der Welt entwickeln sich derweil weitaus größere Säuger, die vor allem offene Landschaften beherrschen. Im Gebiet der Mongolei zum Beispiel lebt Andrewsarchus, das größte aller bekannten Landraubtiere.

Über die Ebenen Nordamerikas und Asiens ziehen Herden von pflanzenfressenden Brontotherien: Die tonnenschweren Dickhäuter tragen schaufelförmige Hörner auf der Nase, und sie sind mit einer Schulterhöhe von



Größe anfälliger für Veränderungen der Umwelt. Um überhaupt so groß zu werden, spezialisieren sie sich auf bestimmte Pflanzen oder Beutetiere. Vermindert sich deren Zahl, so haben sie keine Chance mehr zu überleben.

Als beständiger erweisen sich Säuger von kleinerem Wuchs – wie jene im Messel-Wald.

EIN BESONDERES Wesen, das vor rund 50 Millionen Jahren durch den hessischen Urwald krabbelt, wiegt beispielsweise nur einige Hundert Gramm. Das rund neun Monate alte Jungtier gleicht ein wenig einem Lemur: Es hat große, nach vorn gerichtete Augen, klei-

ne, haarige Ohren, filigrane Finger und einen langen, buschigen Schwanz.

Die vorderen Gliedmaßen des gerade erst von der Mutter entwöhnten Weibchens sind etwas kürzer als die Hinterbeine, sodass es eigentlich flink Bäume erklimmen kann. Doch seine rechte Vorderpfote ist verküppelt, vermutlich nach einem Sturz, .

Deshalb schwingt das Felltier nicht wie seine Artgenossen durch das Geäst, sondern hinkt am Boden zwischen Teesträuchern, wildem Wein und Ingwergräsern umher.

Auf der Suche nach essbaren Früchten und Samen gerät es irgendwann wie die Urpferde und Tausende ande-

re Tiere in die tödlichen Ausdehnungen des Messel-Sees und fällt in die Wellen.

Der Schlamm des Gewässers konserviert auch die Leiche dieses kleinen Vierbeiners. Und bewahrt seine Knochen und Spuren seiner Gedärme, Haut und Haare für Jahrtausende.

Die Forscher, die das Skelett im Jahr 2006 untersuchen, nennen das kurzschnauzige Geschöpf „Darwinius“, zu Ehren von Charles Darwin, dem legendären Mitbegründer der Evolutionstheorie.

Memo: **SÄUGETIERE**

- **Die ersten Säuger** vor gut 200 Millionen Jahren ähnelten Spitzmäusen.
- **Die Warmblüter** lebten mehr als 100 Millionen Jahre im Schatten der Dinosaurier.
- **Erst nach dem Aussterben** der Riesenechsen stiegen sie zu den Herrschern des Tierreichs auf.
- **Rund 5000 Spezies** von Säugern bevölkern heute die Erde – mehr als ein Drittel davon sind Nagetiere.
- **Anders als Reptilien** und Amphibien vermögen sie ihre Körpertemperatur selbst zu regulieren. So ertragen sie auch Kälte.

Denn das nahezu vollständig erhaltene Fossil ist ein urtümliches „Herrentier“: ein Primate – wie etwa heute der Mandrill oder der Zwergplumplori.

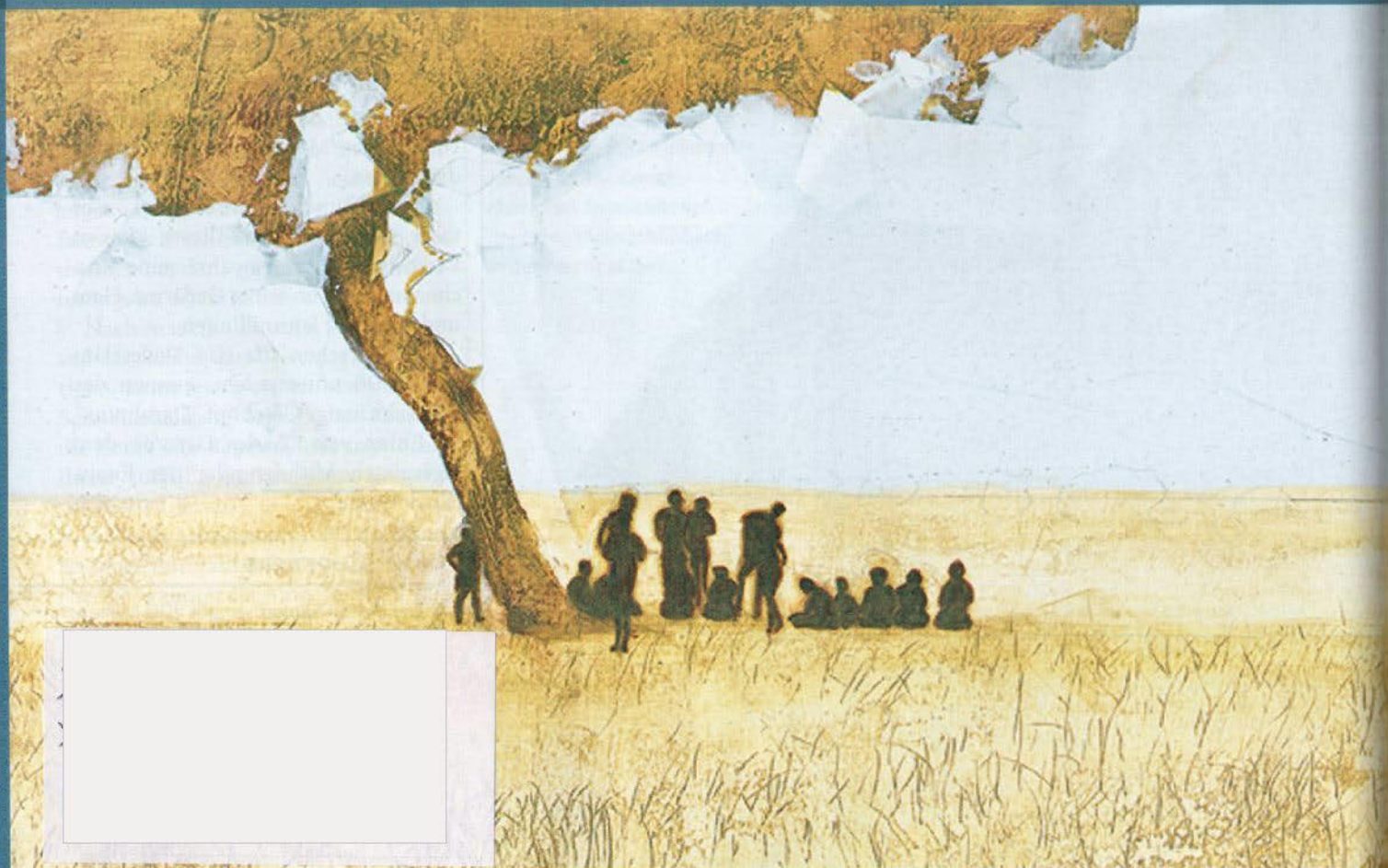
Und somit ist Darwinius aus Messel ein Vertreter jenes verästelten Ahnenbaums, aus dem sich vor rund 55 Millionen Jahren die Affen entwickelt haben, die nächsten Verwandten des erfolgreichsten aller Säugetiere: des Menschen.

Ausgestattet mit den Errungenschaften der Säuger-Evolution, erobert der Homo Millionen Jahre später im aufrechten Gang die Erde und macht sich alle anderen Kreaturen untertan.

Aber das ist ein anderes Kapitel in der Geschichte des Lebens. □

Bertram Weiß, 26, schreibt regelmäßig für GEOkompakt. Für die Fotostudie „Creature“ porträtierte der vielfach preisgekrönte New Yorker Künstler **Andrew Zuckerman**, 32, Dutzende Tiere vor weißem Hintergrund.

Literaturtipps: Thomas Stainforth Kemp, „The Origin and Evolution of Mammals“, Oxford University Press; ein umfassendes Fachbuch über die Entstehungsgeschichte der Säugetiere.



Vorschau

GEOkompakt Nr. 24 erscheint am 8. September 2010

Die Eroberung der Erde

Wie es dem Menschen gelang, den gesamten Planeten zu besiedeln und schließlich zu beherrschen

Zu Urzeiten entwickelt sich ein Lebewesen in den Savannen Afrikas, das sich von allen anderen unterscheidet und das die Erde verändern wird, wie kein zweites: der Mensch.

Ausgestattet mit einem Gehirn, das ihn befähigt, Werkzeuge zu konstruieren, getrieben von seiner Neugier und gerüstet mit einem Sozialverhalten, das ihn in der Zusammenarbeit erfolgreicher macht als jedes Tier, zieht er aus seiner Urheimat aus, die Welt zu erkunden. Weder Wüsten noch Gebirge, weder Flüsse noch Meerengen halten ihn auf.

Durch die Zähmung des Feuers sowie durch neuartige Kleidung aus Fellen

Weitere THEMEN

- **Der erste Exodus:** Vor 1,8 Millionen Jahren erreicht *Homo erectus* die Insel Java.
- **Höhlen:** Magische Orte, die die Geschichte der Menschheit konservieren.
- **Homo sapiens:** Weshalb er erfolgreicher ist als alle seine Vorgänger.
- **Die Macht der Gruppe:** Kein Tier kooperiert so perfekt wie der Mensch.
- **Neandertaler:** Wie sie der Kälte trotzen – und auf den *Homo sapiens* treffen.
- **Der Zwerg aus Indonesien:** Wer war *Homo floresiensis*?
- **Der Tod:** Wie das Wissen um die eigene Sterblichkeit den Menschen vorantreibt.

gelingt es ihm, auch längere Kälteperioden zu überleben. Dank raffinierter Waffen jagt er selbst die mächtigsten Tiere wie Mammuts und Bisons, mit immer ausgefeilteren Werkzeugen beginnt er, seine Umwelt zu gestalten.

Mythen und Visionen geben ihm die Kraft, Grenzen zu überschreiten. Die Fähigkeit, vorzusorgen, lässt ihn auch karge Jahreszeiten überstehen – und macht den Jäger und Sammler schließlich zum sesshaften Bauern.

GEOkompakt erzählt die Geschichte des Menschen: von seiner Entstehung in Afrika über seine Ausbreitung in fast alle Winkel der Erde bis zu jener landwirtschaftlichen Revolution, die ihn sesshaft machte.

Frühe Menschenformen,
hier *Homo ergaster*, verlassen
bereits vor 1,8 Millionen Jahren
ihre Urheimat Afrika. Doch
erst dem *Homo sapiens* gelingt es,
alle Kontinente zu beherrschen



Ihr **Bauch** entscheidet über mehr,
als Ihr **Kopf** gedacht hätte.



GEO WISSEN Nr. 45 ENTSCHEIDUNG UND INTUITION

GROSSES DOSSIER
Was für ein
Entscheidungstyp
sind Sie?

INTUITION
Die Erforschung des
sechsten Sinns

PARTNERSUCHE
Von der Qual mit
der Wahl

WENDEPUNKTE
Das Leben in neue
Bahnen lenken