

Deutschland 7,50 € • Österreich 8,40 € • Schweiz 14,80 sfr • Benelux 9,- € • Finnland 11,50 € • Frankreich 9,80 € • Griechenland 9,80 € • Italien 9,80 € • Portugal 9,80 € • Spanien 9,80 €

GEO kompakt

Nr. 1

Die Grundlagen des Wissens



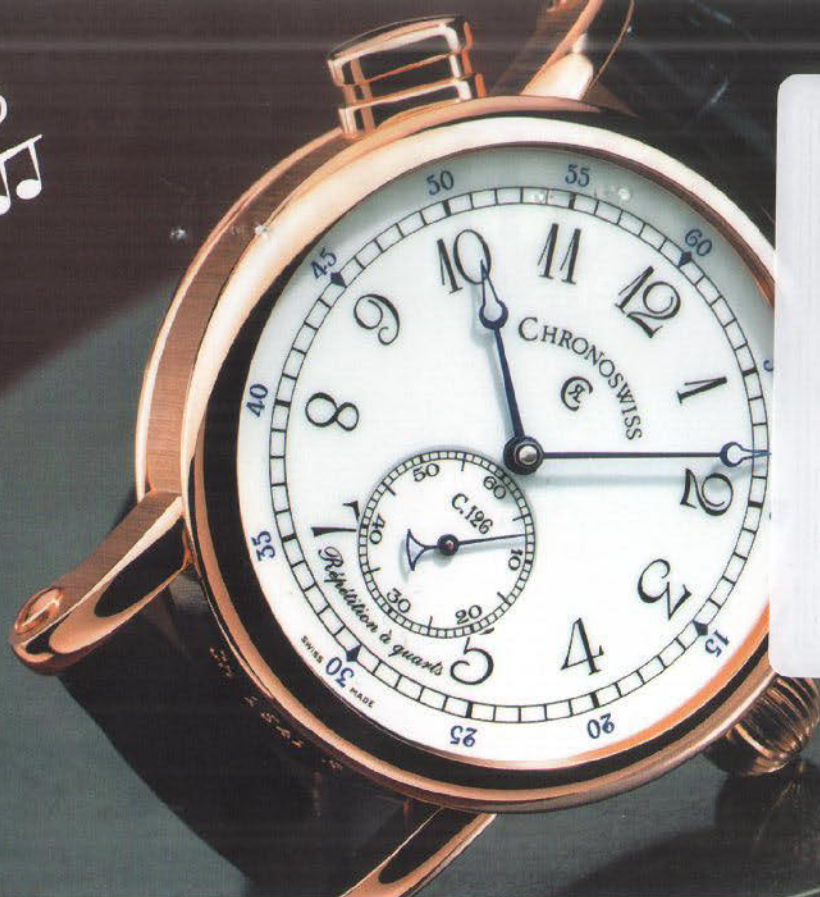
Die Geburt der Erde

Und die Entstehung des Lebens: Wie aus einem glühenden
Plasmahaufen der Blaue Planet wurde



www.GEOkompakt.de

GEO kompakt Die Geburt der Erde



(Einzige Armbanduhr mit Viertelstundenrepetition)



Gerd-R. Lang, Uhrmachermeister
und Gründer der Chronoswiss



CHRONOSWISS

Faszination der Mechanik

„Manche Uhren machen viel von sich reden - von dieser hier werden Sie auch noch einiges hören.“ Schenken Sie der Zeit ruhig einmal etwas Gehör. Denn sie hat jetzt einen wunderschönen Klang. Zwei winzig kleine Hämmerchen bringen auf Knopfdruck Tonfedern zum Schwingen und lassen für Stunden und Viertelstunden jeweils eine Melodie erklingen. Und wer nicht hören will, der kann immer noch fühlen. Oder sich am Anblick des Zifferblatts aus massivem Sterling-Silber erfreuen. Mehr über meine neue Klangskulptu(h)r und Chronoswiss finden Sie im „Buch mit dem Tick“, das ich Ihnen auf Wunsch gerne zusende.

Gruner + Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus,
Am Baumwall 11, 20459 Hamburg. Postanschrift
für Verlag und Redaktion: 20444 Hamburg.
Telefon 040 / 37 03-0, Telefax 040 / 37 03 56 48, Telex 21 95 20.
Internet: www.GEOkompakt.de

HERAUSGEBER

Peter-Matthias Gaede

CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURE

Martin Meister (Konzeption), Claus Peter Simon (Konzeption),
Ruth Eichhorn (Bild), Daniel Müller-Grote (Art Director)

ART DIRECTION

Torsten Laaker (freie Mitarbeit)

TEXTREDAKTION

Jörn Auf dem Kampe (freie Mitarbeit)

BILDREDAKTION

Freie Mitarbeit: Heidrun Günther, Marita Kankowski

DOKUMENTATION

Freie Mitarbeit: Susanne Gilges, Christine Heidemann,
Kirsten Milhahn, Andreas Sedlmair, Jörg Melander, Dr. Arno Nehlsen

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Dr. Ulf Borgeest, Anja Jacobi, PD Dr. Martin Kerner, Dr. Carsten Riedel

MITARBEITER DIESER AUSGABE

Freie Mitarbeit: Ernst Artur Albaum, Dr. Tilman Althaus,
Jürgen Bischoff, Julia Bonstein, Andreas Bock,
Chris Butler, Ute Eberle, Dr. Henning Engeln, Hindeja Farah,
Prof. Dr. Gerd Geyer, Antje Helms, Helmut Horch,
Prof. Dr. Heinrich Hühnerfuß, Nahne Ingwersen, Ute Kehm,
Jens Kiefey, Dr. Erwin Lausch, Prof. Dr. Gregor Markl,
Harald Martenstein, Martin Paetsch, David Pierce, Thomas Pletzingner,
Daniel Portmann, Horst Rademacher, Carolin Schmitt,
Tobias Schnettler, Reinhard Schulz-Schaeffer, Claus-Peter Sesin,
Dr. Michael Steiner, Prof. Dr. Harald Strauß,
Anselm Waldermann, Tim Wehrmann, Hark Weidling,
Kirsten Bertrand, Susanne Krieg, Cay Rademacher

REDAKTIONSSASSISTENZ: Doris Paulini

HONORARE: Angelika Györfy

SCHLUSSREDAKTION: Dirk Krömer; Assistent: Hannelore Koehl

BILDARCHIV: Bettina Behrens, Gunda Lerche,
Gudrun Lüdemann, Peter Müller

REDAKTIONSBÜRO NEW YORK: Brigitte Barkley;

Nadja Masri (Leitung), Wilma Simon, Anuschka Tomat (Sekretariat);
375 Lexington Avenue, New York, NY 10017-55 14, Tel. 001-212-499-81
00, Fax 001-212-499-81 05, E-Mail: geogeo-ny.com

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Ove Saffe

ANZEIGENLEITUNG: Anke Wiegell

VERTRIEBSLEITER: Markus Böhrer

MARKETINGLEITER: Florian Wagner

HERSTELLER: Peter Grimm

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: Thorsten Treppe,

Tel. 040 / 37 03 29 34, Fax: 040 / 37 03 57 73; Anzeigendisposition:
Wolfgang Rüders, Tel. 040 / 37 03 38 24, Fax: 040 / 37 03 57 73
Es gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 1/2005

Der Export der Zeitschrift GEO kompakt und deren Vertrieb im Ausland
sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEO kompakt darf nur
mit Genehmigung des Verlages in Leserkreisen geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,

Konto 0322800, BLZ 200 700 00

Hcft-Preis: 7,50 Euro • ISBN-Nr. 3-570-19570-8

© 2004 Gruner + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Repro: Peter Becker GmbH, Würzburg

Offsetdruckerei: APPL Druck, Weimding

Printed in Germany

GEO-LESERSERVICE

FRAGEN AN DIE REDAKTION

Telefon: 040 / 37 03 20 73, Telefax: 040 / 37 03 56 48
E-Mail: briefe@geo.de

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

ABONNEMENT DEUTSCHLAND

Jahres-Abonnement: 26 €

BESTELLUNGEN:

Gruner + Jahr AG & Co KG
GEO-Kundenservice
20080 Hamburg
Telefon: 01805 / 861 80 03
(12 Cent / Min.)

KUNDENSERVICE ALLGEMEIN:

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
(12 Cent / Min.)
E-Mail: geo-service@guj.de

ABONNEMENT ÖSTERREICH

GEO-Kundenservice
Postfach 5, A-6960 Wolfurt
Telefon: 0820 / 00 10 85
Telefax: 0820 / 00 10 86
E-Mail: geo@abo-service.at

ABONNEMENT SCHWEIZ

GEO-Kundenservice
Postfach, CH-6002 Luzern
Telefon: 0041-41 / 329 22 20
Telefax: 0041-41 / 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

BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

DEUTSCHLAND

GEO-Versand-Service
Werner-Haas-Straße 5
74172 Neckarsulm
Telefon: 01805 / 06 20 00
(12 Cent / Min.)
Telefax: 01805 / 08 20 00
(12 Cent / Min.)
E-Mail: service@guj.com

SCHWEIZ

GEO-Versand-Service 50/001
Postfach 1002,
CH-1240 Genf 42

ÖSTERREICH

GEO-Versand-Service 50/001
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



Liebe Leserin, lieber Leser,

es gibt Fragen, die sind ganz leicht aufzuwerfen – und ganz schwer zu beantworten. Zum Beispiel: Wie ist die Erde entstanden? Wann kam das Wasser auf unseren Planeten? Wo hat sich das Leben entwickelt?

Das sind Fragen, wie sie so ähnlich auch schon Kinder stellen und die uns oft ins Schleudern bringen. Weil wir die Antworten vergessen oder nie gelernt haben. Oder weil wir ahnen, dass unser Wissen längst überholt ist.

Abhilfe bietet nun das vorliegende Heft. Mit GEO kompakt beginnt eine neue Reihe über die großen Themen der Allgemeinbildung – nach und nach soll daraus eine Bibliothek des Wissens heranwachsen.

In GEO kompakt werden selbst komplexe Zusammenhänge in kurzen Texten so wiedergegeben, dass sie leicht verständlich sind – und mit aufwendigen Illustrationen so präsentiert, dass sich niemand an die spröden Daten, Fakten und Zahlenkolonnen seiner Schulzeit erinnern fühlen muss. Erfahrene Journalisten, kompetente wissenschaftliche Berater und die GEO-typische Mehrfachprüfung aller Fakten garantieren eine hohe Verlässlichkeit der Inhalte. Zudem ist jede Ausgabe auch als Nachschlagewerk zu nutzen: Fachbegriffe werden typographisch hervorgehoben und in einem Glossar erklärt, ein Register macht wichtige Stichworte schnell auffindbar, Zeitleisten verdeutlichen die Abfolge der Ereignisse.

Von nun an werden wir alle drei Monate versuchen, Ihnen ein wenig genauer zu erklären, wie die Welt funktioniert – die da draußen und die in uns. Demnächst bei einer „Expedition in den menschlichen Körper“ und anschließend mit einem Heft über die „Technik, die unser Leben bestimmt“. Mehr über unsere Pläne erfahren Sie unter www.GEOkompakt.de.

In dieser Ausgabe laden wir Sie ein, mit uns über das Wunder Erde zu staunen. Und nachzuvollziehen, was alles geschehen musste, damit sich aus einem glühenden Feuerball der Planet des Lebens entwickeln konnte. Es ist eine Reise zurück in die Flegeljahre des Sonnensystems – und sie ist aufregend, das kann ich Ihnen versprechen.

Herzlich Ihr

Michael Schaper
Michael Schaper



Eine Sonne, geboren aus Sternenasche

Aus dem Staub und Gas explodierter Sterne formt sich vor 4,6 Milliarden Jahren unsere Sonne. **Seite 30**



Unser Planetensystem entsteht

Gesteinsbrocken, die um die frühe Sonne kreisen, verdichten sich nach und nach zu Himmelskörpern. So bildet sich auch die Erde. Zehn Panoramen illustrieren die wichtigsten Stationen ihrer Geschichte. **Seite 8**



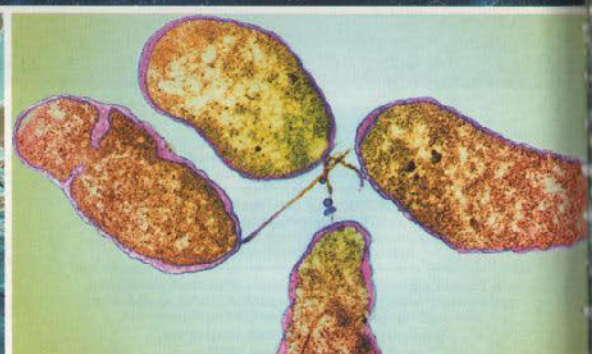
Die Glut der Unterwelt

Wie die Erdhitze unseren Planeten formt. **Seite 62**



Wenn Kontinente wandern

Bewegliche Krustenplatten bilden die Erdoberfläche – und formen irgendwann das Mittelmeer. **Seite 76**



Der erste Sex

Vor 1,5 Mrd. Jahren entwickelt sich die Sexualität – eine Überlebensstrategie. **Seite 126**

Zeitleiste 4,6 Milliarden Jahre Erdgeschichte im Überblick **6**

Bildessay Vom Sternengas zur Lebensentstehung **8**

Textessay Nur erstaunliche Zufälle machten unsere Erde bewohnbar **28**

Sonnensystem Aus Gas und Asche bildet sich ein neuer Stern mit seinen Planeten **30**

Erdentstehung Staub und Steine ballen sich zusammen und vereinigen sich zur Proto-Erde **42**

Mond Ein galaktischer Zusammenstoß lässt den Trabanten entstehen **46**

Martensteins wundersame Welt (1) Das Universum, die Bibel und das Staubwischen **50**

Schalenstruktur Anatomie einer Glutkugel **52**

Seismologie Die Entdeckung der Inge Lehmann **60**

Erdwärme Das Feuer aus der Tiefe **62**

Urozean Die erste Sintflut **72**

Plattentektonik Warum es Vulkanausbrüche, Erdbeben und Gebirge gibt **76**

Kontinentaldrift Das Gedankenexperiment des Alfred Wegener **86**

Gesteinskreislauf Hitze, Druck und Bewegung formen seit Jahrmilliarden die Erdkruste ständig um **88**

Magnetismus Wie der Geodynamo im Erdinneren funktioniert **98**

Martensteins wundersame Welt (2) Marmor, Stein und Eisen bricht **104**

Lebensentstehung Das Wunder in der Tiefsee **108**

Biochemie Die Ursuppe des Stanley Miller **118**

GEO kompakt online

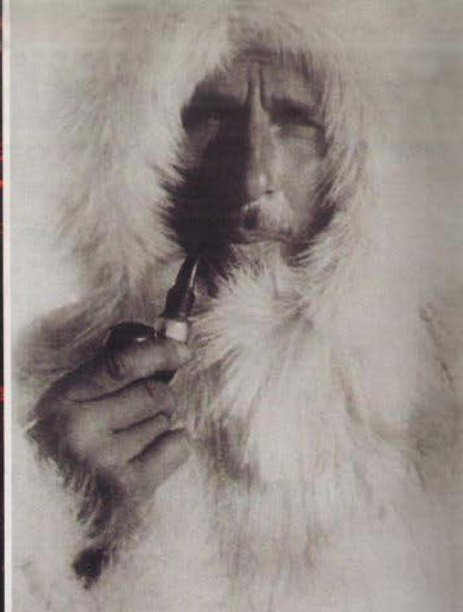
Erleben Sie die Geburt der Erde und die Entstehung des Lebens im Internet: mit Videos, Animationen und weiteren Wissenstexten. Dazu: eine große Umfrage zur ersten Ausgabe von GEO kompakt. Unter **www.GEOkompakt.de**



Ein Feuerplanet namens Erde

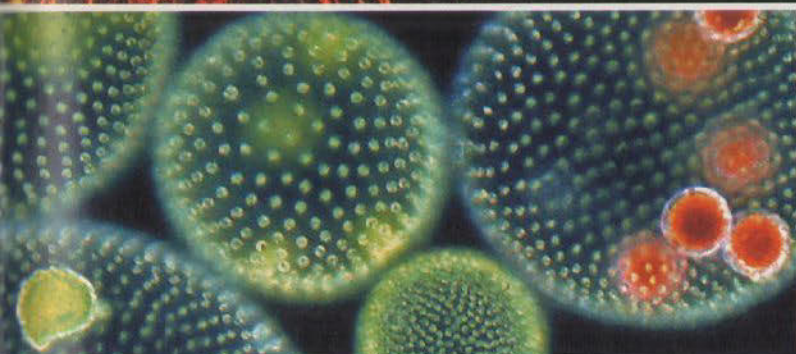
Vor ca. 4,4 Milliarden Jahren ist unser Heimatplanet noch ein glühender Magmahaufen. **Seite 42**

Auch der Mond hat gerade erst eine dünne Kruste ausgebildet. **Seite 46**



Revolutionär der Geologie

Als Alfred Wegener 1912 behauptet, die Kontinente würden sich bewegen, glaubt ihm niemand. Denn seine Gedanken stellen die Geophysik auf den Kopf. **Seite 86**



Wie der Tod in die Welt kam

Vielzeller entstehen, wie die Alge Volvox. Das hat seinen Preis: Jedes Individuum ist nun sterblich. **Seite 130**



Der Auftritt der Tiere

Wie aus dem Nichts bevölkern vor 542 Millionen Jahren tierische Wesen in überraschender Vielfalt die Meere der Welt. **Seite 142**

Photosynthese Der Sauerstoff ermöglicht das höhere Leben	120
Sexualität Welche Vorteile seit 1,5 Milliarden Jahren der Austausch des Erbguts hat	126
Vielzeller Die ersten komplexen Organismen entstehen	130
Eisplanet Als das Klima kippt, friert die Erde für Jahrtausende ein	134
Paläontologie Die Fossilien des Charles D. Walcott	140
Evolution Wie die Urahnen der heutigen Tiere die Meere erobern	142
Martensteins wundersame Welt (3) Netzer, Beckenbauer und die Kambrische Radiation	158
Glossar/Register Fachbegriffe – kurz erklärt	160
Zukunft Das Schicksal des Blauen Planeten	168

Vorschau	170
Impressum	3
Bildnachweis	170

ÜBER DIESES HEFT:

- Die wichtigsten Fachbegriffe werden im Glossar ab Seite 160 kurz erklärt. Wo diese Begriffe in den Beiträgen erstmals erwähnt werden (oder wo sie zum Verständnis einer Textpassage besonders wichtig sind), sind sie **blau** hervorgehoben. Zu dem Glossar gehört ein Register, das wiedergibt, auf welchen Seiten die Begriffe vorkommen.
- Die Spanne der behandelten Themen reicht über einen Zeitraum von knapp 13 Milliarden Jahren: beginnend mit den ersten Sternexplosionen vor 13,4 Milliarden Jahren, endend vor rund 500 Millionen Jahren, als sich die Vielfalt der Tierwelt ausbildete. Zwei Zeitleisten (Seite 6 und 160) sowie das Poster führen durch die Chronologie der Ereignisse und der Beiträge. Der kleine Zeitstrahl links oben auf den Aufmacherseiten soll bei der Orientierung helfen (dessen Maßstab ändert sich, wo es nicht mehr um unser Sonnensystem, sondern um die Erdentwicklung geht).

Planet im Wandel

Eine Reise durch die Erdgeschichte in den 16 großen Kapiteln dieses Heftes



13,4 Mrd. Jahre Sternentod bringt neues Leben

Alternde Riesensterne explodieren erstmals und schleudern Gase und Staub ins All – Baustoff auch für unser Sonnensystem



ca. 5 Mrd. Jahre Das Sonnensystem formiert sich

In einer Wolke aus der Asche explodierter Sterne verdichten sich Gas und Staub und erglühen schließlich im atomaren Feuer – unsere Sonne ist geboren



Die Oberfläche gerät in Bewegung > 4 Mrd. Jahre

Die Erdkruste zerbricht in bewegliche Platten. Magma aus der Tiefe schiebt ozeanische Platten auseinander und Kontinente umher



Der stärkste Regen aller Zeiten 4,2 Mrd. Jahre

Sintflutartige Regenfälle aus der wasserreichen Atmosphäre sammeln sich zum Urozean. Aus Sedimenten, Erdkruste und Granit werden Kontinente



4 Mrd. Jahre Das große Recycling beginnt

Erodierte Gesteine lagern sich als Sedimente ab, etwa im Meer, und sinken in die Tiefe. Dort wandeln Hitze und Druck sie in neues Gestein um



> 3,5 Mrd. Jahre Die Erde bekommt ein Magnetfeld

Weil flüssiges Eisen im Erdkern kreist, entsteht schon früh ein Magnetfeld, das die Erde vor Strahlung aus dem All schützt



Plötzlich sind die Tiere da 542 Mio. Jahre

An der Wende zum Kambrium nimmt die Zahl der Arten in kurzer Zeit enorm zu. Es entwickeln sich die Stämme fast aller heutigen Tiere



Der Planet im Kälteschlaf 750 Mio. Jahre

Dramatische Eiszeiten lassen die Erde mehrfach für Jahrmillionen einfrieren. Erst Treibhausgase bringen die Klimamaschine wieder in Schwung

13,7 Mrd. Jahre
Urknall

488 Mio. Jahre
Ende des Kambriums

Die Erde ist ein besonderer Planet: Sie hat einen riesigen Mond, eine dichte Gashölle, Ozeane, einen Kern, der ein Magnetfeld erzeugt, und die ideale Entfernung zur Sonne – alles Voraussetzungen, um etwas Einzigartiges hervorzubringen: Leben



4,6 Mrd. Jahre **Die Proto-Erde wächst heran**
Staubkörner im All ballen sich zu kleinen Gesteinsflocken zusammen, die sich wiederum zu großen Körpern vereinen. Einer davon ist die Proto-Erde



4,5 Mrd. Jahre **Geburt aus einer Katastrophe**
Ein etwa marsgroßer Himmelskörper kollidiert mit der Proto-Erde. Riesige Massen werden ins All geschleudert. Aus ihnen formt sich der Erdenmond



Vulkane brechen aus **4,45 Mrd. Jahre**
Magma aus dem mehrere tausend Grad heißen Inneren des Planeten durchbricht die dünne Erdkruste und bildet die ersten Feuerberge



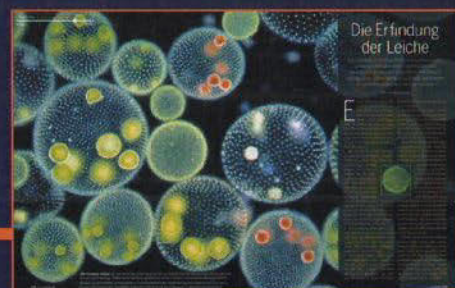
Eine Schalenstruktur entsteht **4,45 Mrd. Jahre**
Eisen und Nickel sammeln sich im Erdkern, die leichteren Silikate steigen auf, bilden den Erdmantel und erstarren an der Oberfläche zur Kruste



>3,5 Mrd. Jahre **Das Leben entsteht**
Aus einfachen Substanzen bildet sich immer komplexeres organisches Material und endlich Leben – möglicherweise an heißen Tiefseequellen



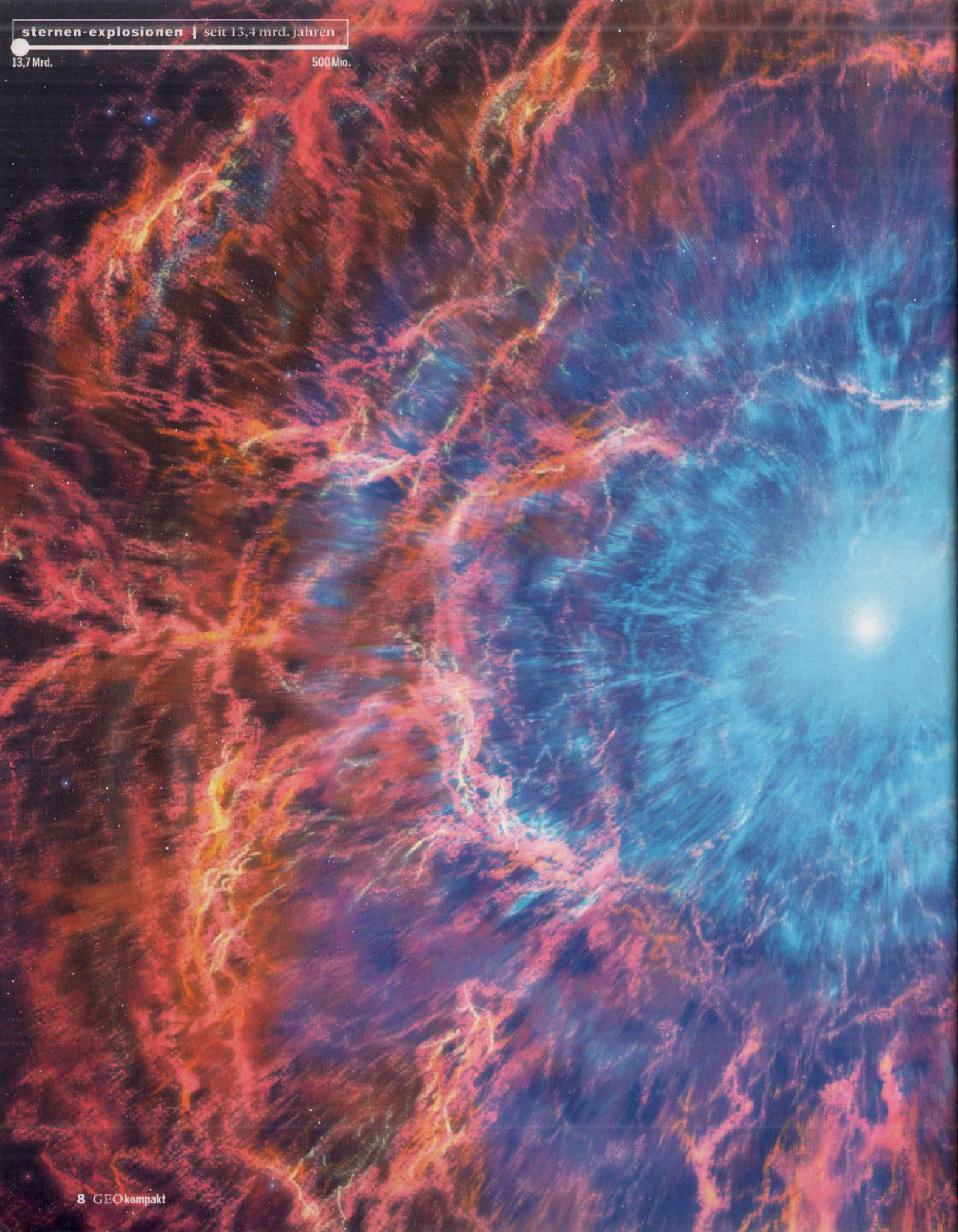
>2,5 Mrd. Jahre **Sauerstoff steigt in die Atmosphäre**
Die Photosynthese entwickelt sich, mit der Bakterien Sonnenenergie chemisch speichern: einer der bedeutendsten Prozesse in der Natur



Vielzeller entwickeln sich **1,5 Mrd. Jahre**
Erstmals formen viele Zellen einen gemeinsamen Organismus und spezialisieren sich nach und nach zu unterschiedlichen Körper- und Keimzellen



Der erste Sex **1,5 Mrd. Jahre**
Ein neues Fortpflanzungsprinzip fördert die genetische Vielfalt und die Anpassung an die Umwelt: die Mischung und der Austausch von Erbgut





Tod eines Sterns

Plötzlich flammt ein Gestirn auf und strahlt innerhalb weniger Wochen oder Monate so viel Energie ab wie unsere Sonne in Jahrillionen. Sein Kern fällt in sich zusammen, die äußeren Schichten werden ins All geschleudert. Auf diese Weise enden Sterne seit 13,4 Milliarden Jahren in so genannten Supernovae. Vermischt mit interstellarem Gas, treiben die Überreste durch den Raum – bis sich aus ihnen neue Sterne und Planeten bilden

Vom Staub der Sterne zur Heimat des Lebens

Illustrationen: Chris Butler

Vor 13,7 Milliarden Jahren beginnt das Universum zu existieren. Als die Erde entsteht, ist es bereits uralt. Unzählige Sterne sind schon erloschen, die massereichsten werden in gewaltigen Explosionen zerrissen und pulverisiert: zum Baustoff für neue Gestirne. Zum Baustoff auch für unsere Sonne und die Erde – einen Planeten, auf dem überaus günstige Voraussetzungen die Entfaltung des Lebens möglich machen

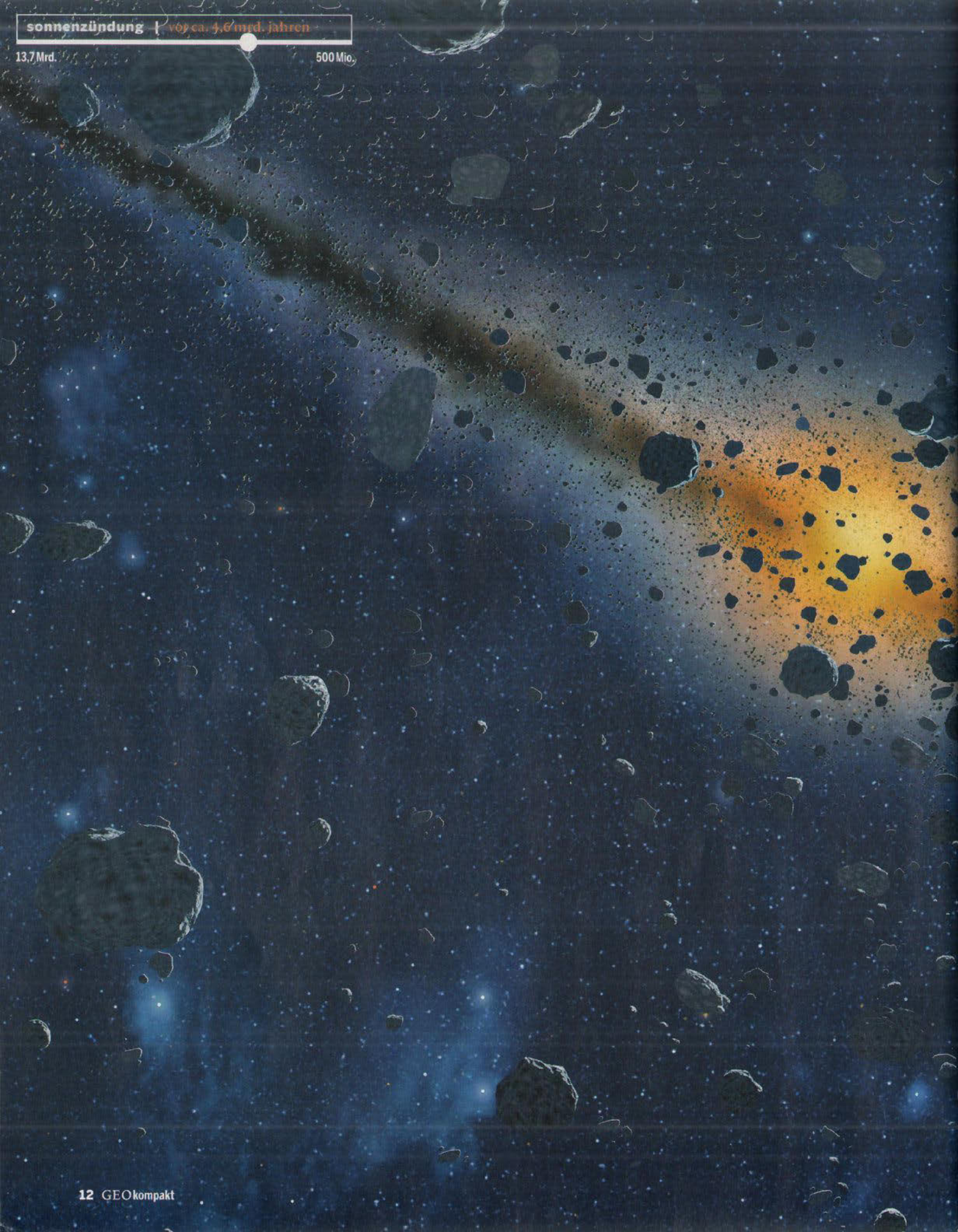
Sternengeburt im Spiralarm


Vor etwa fünf Milliarden Jahren gerät unsere Milchstraße unter den Schwere-Einfluss einer anderen Galaxie (oben). Durch die Wechselwirkungen zwischen beiden schießen aus dem Zentrum der Milchstraße Gasfontänen ins All. Zugleich führen Gravitationseffekte dazu, dass sich in einem Spiralarm (vorn rechts) eine »Dunkelwolke« bildet: Gas, Eis und Sternenstaub ballen sich darin zu Molekülwolken, die oft unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Tausendfach entstehen dadurch neue Sterne, die diese Region des Universums in rotes Licht tauchen. Aus einem von ihnen entwickelt sich nach und nach unsere Sonne



13,7Mrd.

500 Mio.





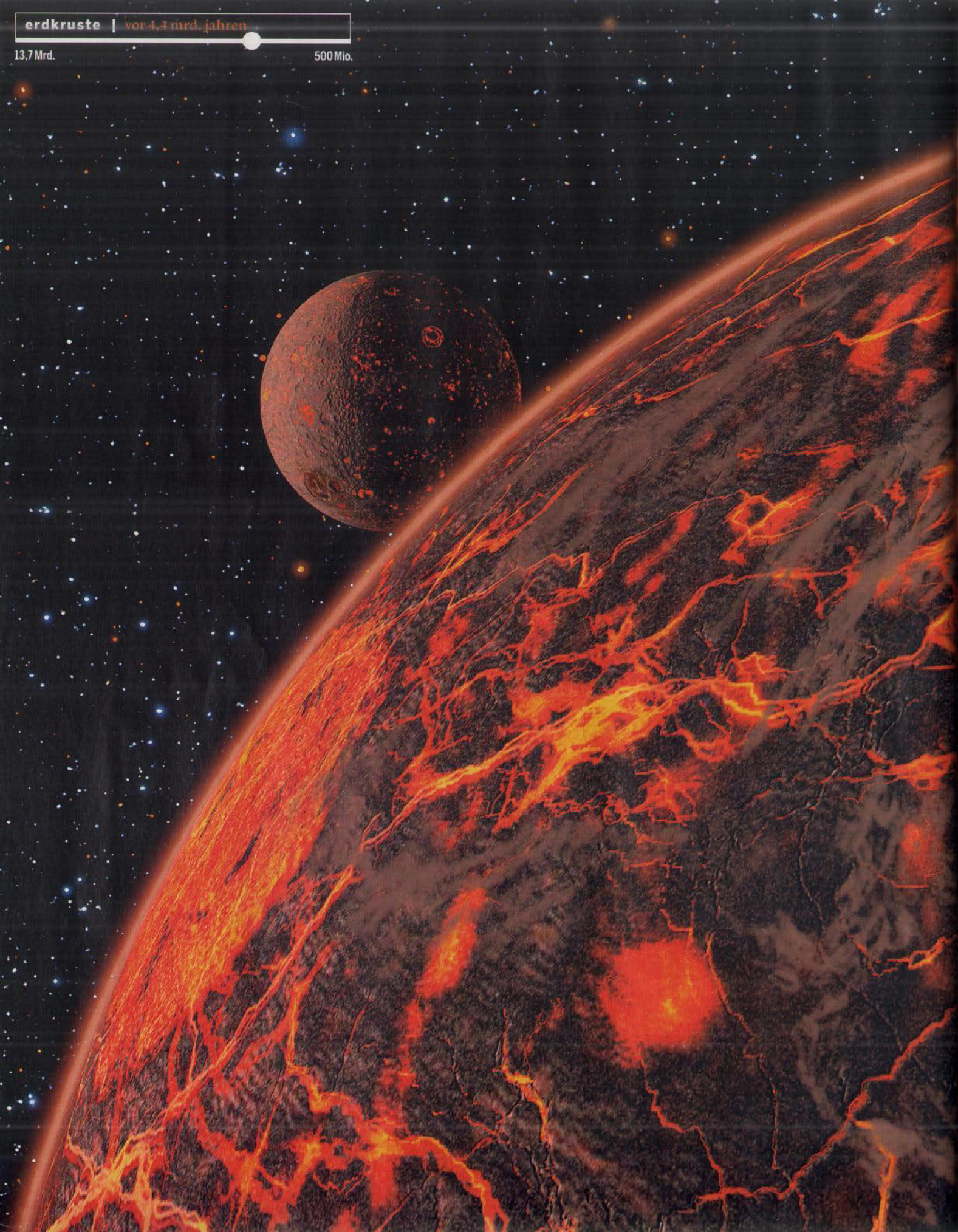
Der Stoff, aus dem Planeten werden


Vor knapp 4,6 Milliarden Jahren entzündet sich das Material eines jungen Sterns: Unsere Sonne leuchtet erstmals auf. Eine Wolke aus Gas und Staub, die zuvor um sie rotierte, kondensiert zu einer wirbelnden Scheibe. Zunächst verschmelzen darin winzige Staubkörnchen, dann bilden sich durch weitere Zusammenschlüsse – meist Folge heftiger Kollisionen – Körper mit Durchmessern von manchmal schon mehreren hundert Kilometern. Diese »Planetesimale« sind das Rohmaterial, aus dem sich die Planeten formen. Durch immer neue Karambolagen und Vereinigungen leuchtet sich allmählich das Feld der um die Sonne jagenden Brocken – bis am Ende die neun Planeten mit ihren insgesamt über 100 Monden sowie die Asteroiden unseres Sonnensystems übrig bleiben

Trabant aus dem Crash

Aus zahlreichen Planetesimalen ist rund 70 Millionen Jahre nach der Sonnenzündung ein Erdvorläufer herangewachsen. Noch ist er kleiner, als unsere Erde schließlich sein wird. Auf diese Proto-Erde prallt vor 4,5 Milliarden Jahren ein marsgroßer Himmelskörper und reißt große Teile des Erdmantels heraus. Sie verdampfen durch die dabei frei werdende Energie ebenso wie Bruchstücke des Einschlagkörpers. Das so entstandene Gas sammelt sich in einer Wolke, die die Erde umkreist. Doch schon bald klumpt das lockere Material zu einem einzigen feurigen Körper zusammen: dem Mond. Er umrundet die Erde anfangs in nur rund 20 000 Kilometer Höhe. Nach und nach aber setzt er sich immer weiter von ihr ab. Zurzeit ist er im Mittel 384 400 Kilometer entfernt





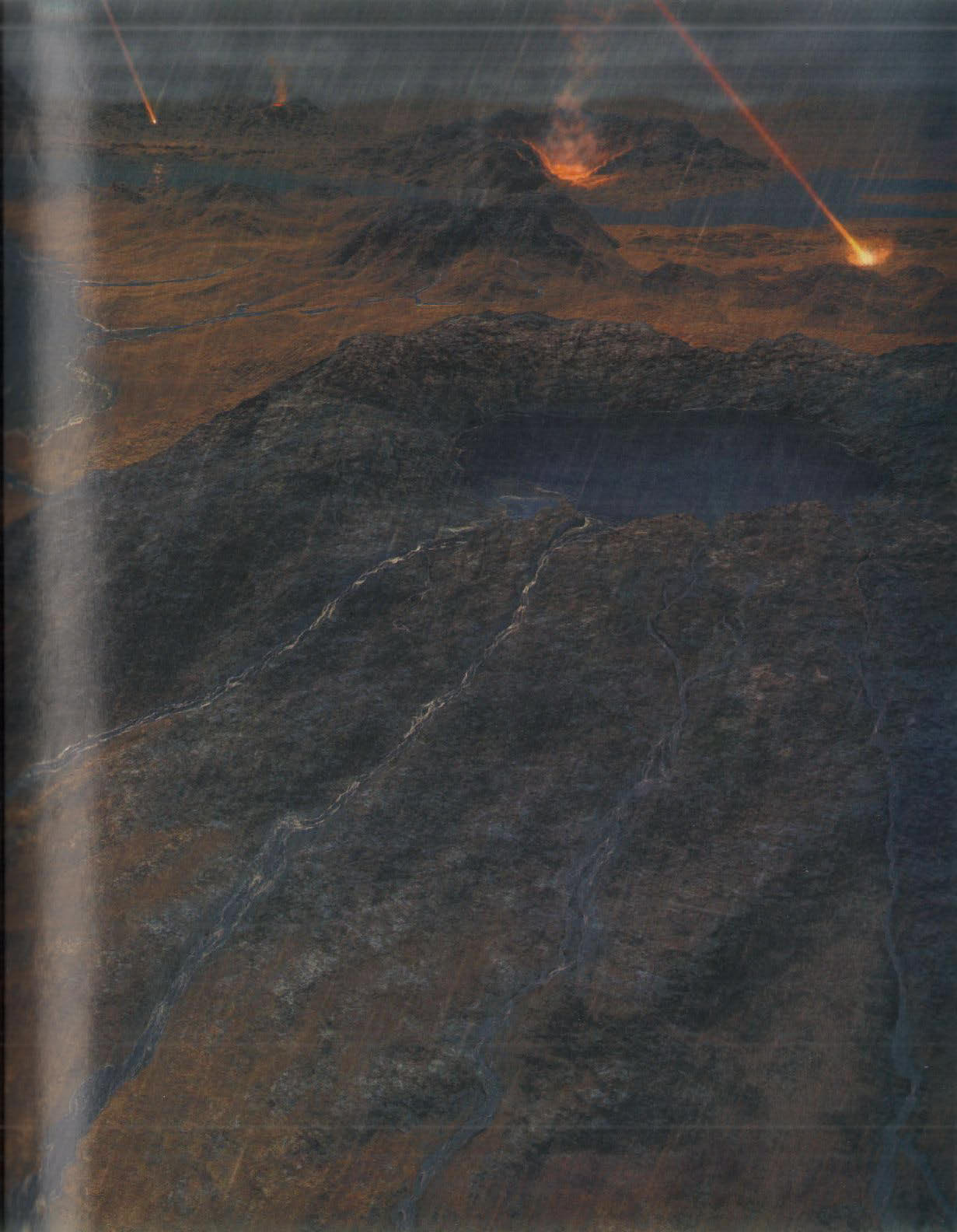


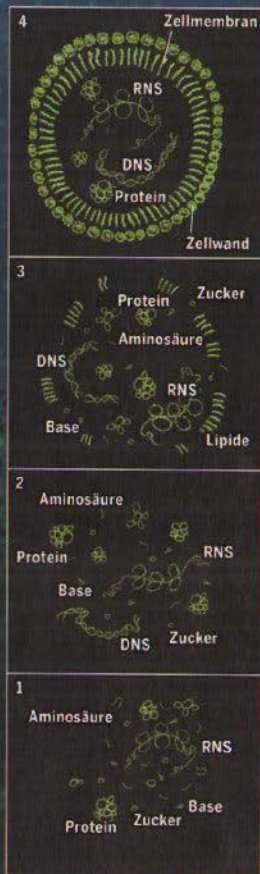
Steinerne Flöße über vulkanischer Glut

Durch den gewaltigen Einschlag, der zur Entstehung des Mondes geführt hat, schmilzt die Erde erneut bis in große Tiefen auf. Als die Oberfläche allmählich abkühlt, kristallisiert dort die Schmelze zu einer beständigen steinernen Kruste. Von Feuerströmen und Asteroideneinschlägen stets aufs neue zerrissen, schwimmen Krustenteile anfangs als wieder und wieder eintauchende Flöße auf der wallenden Glut. Mit der Lava quellen vulkanische Gase heraus – hauptsächlich Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff – und bilden um den Planeten eine dünne Atmosphäre. Auch die Kruste des Mondes ist noch fragil, aber eine Atmosphäre entwickelt sich dort nicht: Die Schwerkraft des Erdbegleiters ist nicht groß genug, um eine Gashölle halten zu können.

Ein Ozean fällt vom Himmel

Die Oberfläche der Erde hat sich auf weniger als 100 Grad Celsius abgekühlt. Am Erdboden schlägt sich der von Vulkanen ausgestoßene Wasserdampf als Wasser nieder und sammelt sich in Senken. Auch zahlreiche auf die Erde stürzende Kometen mit ihrem hohen Anteil von Eis tragen zur Bildung von Seen bei. Schließlich entsteht ein Ozean: das Urmeer. Der Wasserkreislauf kommt in Gang. Niederschläge, Wind und Temperaturwechsel lassen das jetzt feste Gestein erodieren. Zerbröselt und gelöst, wird es von Wind und Wasser mehr oder weniger weit transportiert und abgelagert. Daraus entstehen wiederum neue Gesteine – und schließlich auch die Kontinente





In kleinen Hohlräumen aus Eisensulfid innerhalb der **Black-Smoker**-Wände entstehen – einem Erklärungsversuch zufolge – aus einfachen organischen und anorganischen Substanzen zunächst **Kohlenhydrate** (Zucker) sowie **Aminosäuren** und **Nukleinsäurebasen**: die Bausteine des Lebens. Daraus gehen **Proteine** (Eiweiße) hervor und die Ribonukleinsäure (**RNS**): ein Molekülstrang, der die Struktur neuer Proteine vorgibt (beides Bild 1). Neben der RNS bildet sich die **DNS** – ein stabileres Molekül, das nun den Aufbau der RNS und damit die geordnete Bildung von Proteinen bestimmt (2). Schließlich bauen Lipide – fettähnliche Stoffe, die sich nunmehr ausgebildet haben – eine doppelschichtige **Zellmembran** auf (3). Zuletzt formt sich eine weitere schützende Hülle: die **Zellwand** (4). Die Zelle ist komplett – das irdische Leben kann beginnen



Schöpfungsakt in der Tiefsee?

Wie und wann genau das Leben auf die Erde kam, ist ungewiss – Schätzungen gehen von über 3,5 Milliarden Jahren aus. Schauplatz der Entwicklung von toter zu lebender Materie waren möglicherweise »Black Smoker« (»Schwarze Raucher«) – schornsteinartige Gebilde, wie sie noch heute in der Tiefsee zu finden sind. Dort dringen heiße Wässer aus dem vulkanischen Boden, die Verbindungen von Metallen mit Schwefel gelöst enthalten. Beim Austritt und der plötzlichen Abkühlung werden diese Sulfide ausgefällt – schlagen sich also in der Umgebung der Quelle nieder. Eisensulfid ist ein guter Katalysator für die Bildung kompliziert gebauter organischer Verbindungen aus einfachen chemischen Substanzen. Diese formieren sich im Schutz der Black-Smoker-Wände nach und nach zu komplexen Molekülketten, die sich irgendwann selbst kopieren können und schließlich schützende Hüllen entwickeln: die Zellmembran und die Zellwand. Damit ist die erste Zelle entstanden – Ursprung allen Lebens auf Erden

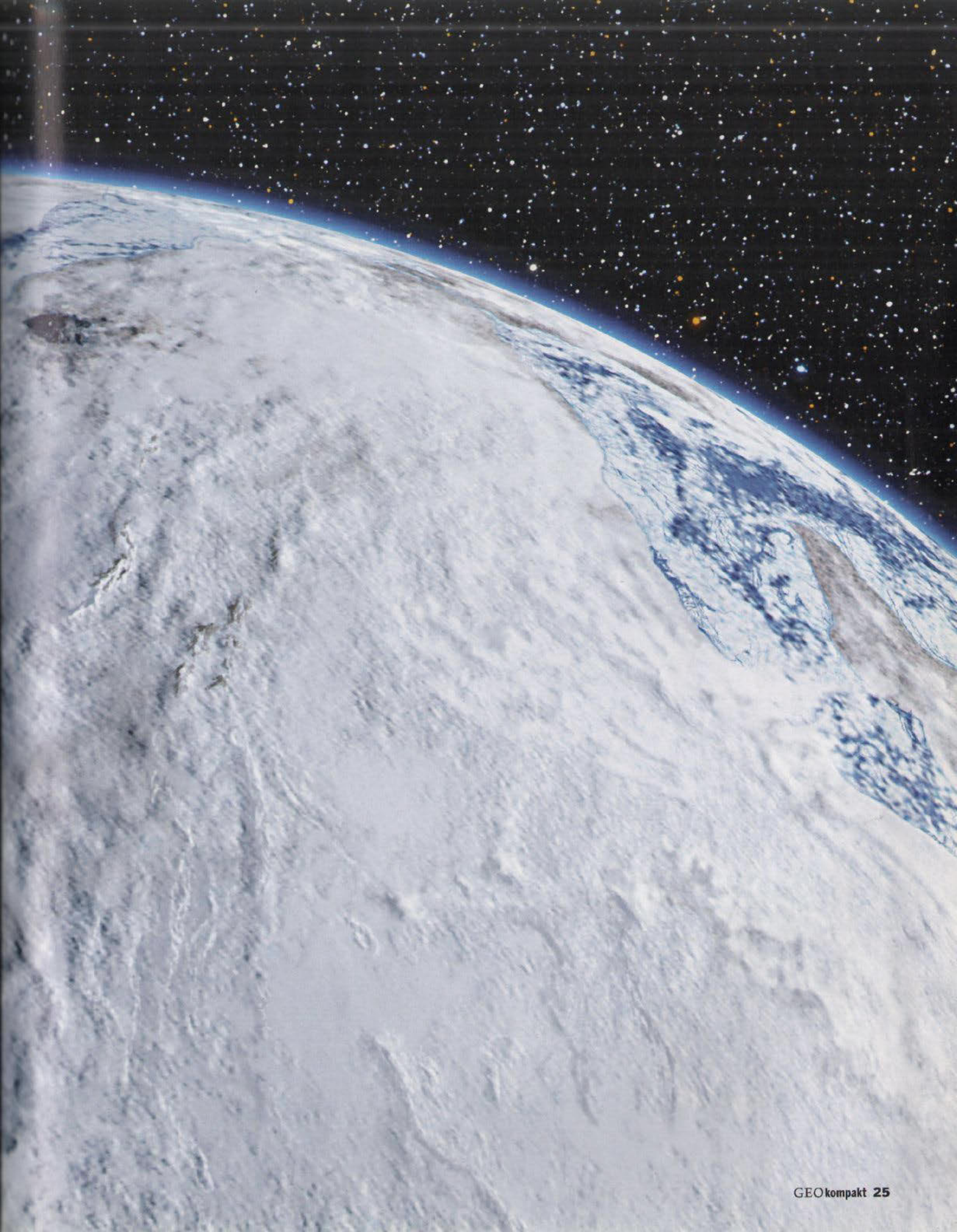
Bakterien ermöglichen höheres Leben

Vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren vollzieht das Leben auf der Erde einen entscheidenden Schritt: Bisher beziehen die Einzeller ihre Lebensenergie aus einer Vielzahl chemischer, lichtunabhängiger Prozesse (wie auch heute noch). Nun entwickeln sie zudem die Photosynthese, durch die sie – wie später die Pflanzen – mithilfe der Lichtenergie aus Kohlendioxid und Wasser Zucker bilden können. Zur Photosynthese fähige Cyanobakterien bauen allmählich in flachem Wasser »Stromatolithen« (»Deckensteine«) auf, die vorwiegend aus Kolonien von Cyanobakterien und Kalkablagerungen bestehen. Als Abfallprodukt der Photosynthese entsteht Sauerstoff. Über lange Zeit verbindet sich der Sauerstoff unverzüglich mit dem im Wasser gelösten Eisen wie auch mit Schwefelverbindungen. Schließlich aber steigt er als Gas aus dem Meer in die bis dahin sauerstofflose Atmosphäre auf: Voraussetzung für die Entwicklung des uns vertrauten höheren Lebens an Land



Die Erde als Schneeball

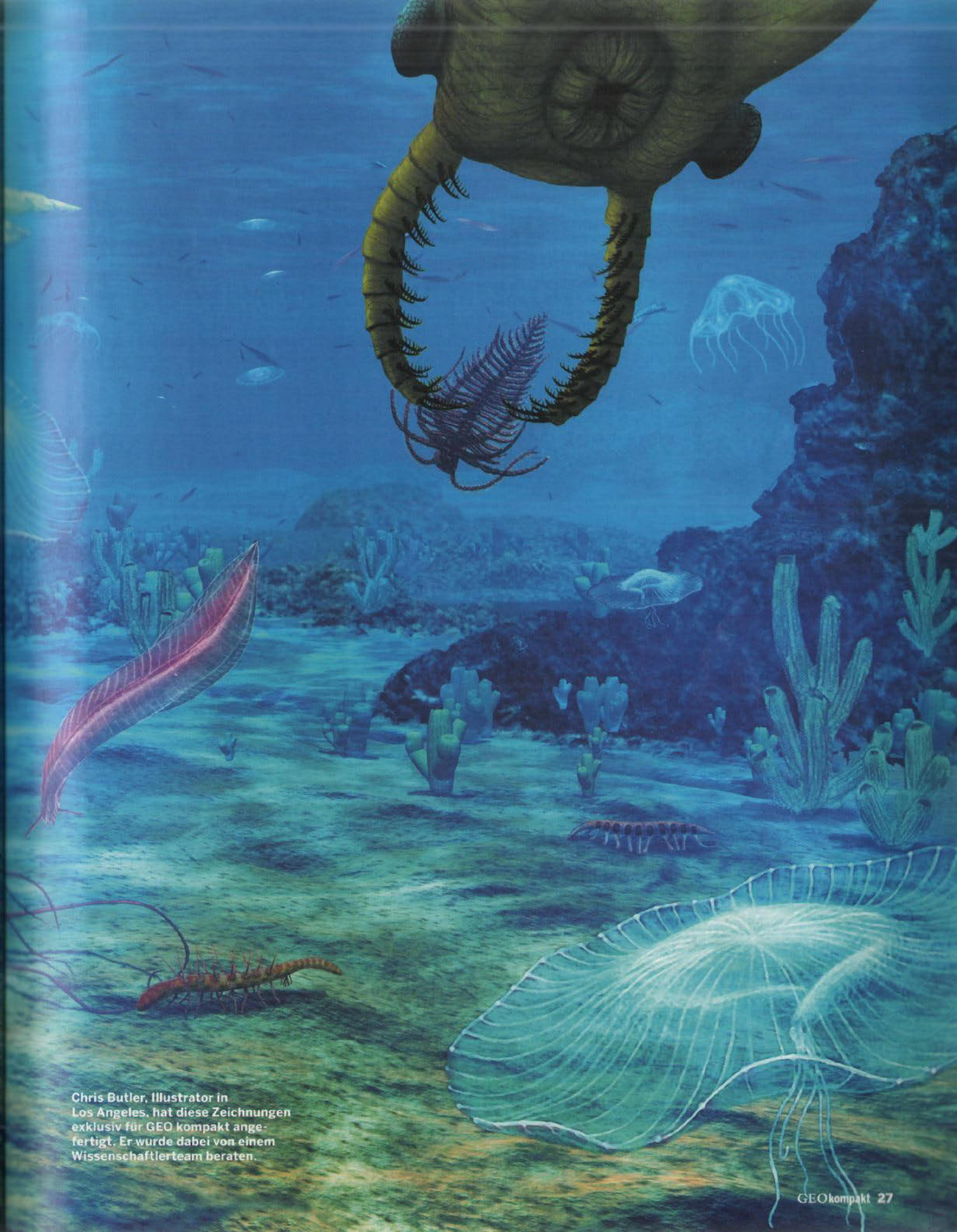
Das irdische Klima ist unbeständig. Im Laufe der Erdgeschichte ist es mal sehr viel wärmer als heute und mal bitterkalt. In einer der unwirtlichsten Perioden, die vor etwa 750 Millionen Jahren beginnt und insgesamt 170 Millionen Jahre andauert, vereist der Planet mehrfach bis auf wenige Wasserflächen in Äquatornähe und zieht wie ein gleißender Schneeball durchs All. Doch Vulkane brennen sich als Glutpunkte durch das kilometerdicke Eis und blasen Asche und Gase in die Luft. Allmählich erhöht sich dabei der Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid. Infolge des dadurch ausgelösten Treibhauseffekts schmilzt das Eis jeweils innerhalb weniger Jahrhunderte vollständig ab – die Erde wird dadurch zuletzt vor 580 Millionen Jahren vorübergehend zum heißen Planeten



Das tierische Leben entfaltet sich

Nach dem Blitzstart der Bakterien kommt das Leben über Milliarden Jahre nur langsam voran. Plötzlich jedoch – zumindest in geologischen Zeiträumen gesehen – beginnt es sich stürmisch zu entfalten. Besonders zu Beginn der erdgeschichtlichen Epoche Kambrium tritt eine Vielzahl relativ hoch entwickelter, vor allem hartschaliger Tiere auf. Wissenschaftler sprechen von der »Kambrischen Radiation«, in der sich das tierische Leben in alle möglichen Richtungen aufspaltet. Neben seltsamen Wesen, die sich der modernen Fauna schwer zuordnen lassen, werden die Meere von Vertretern aller Tierstämme bevölkert, die noch heute anzutreffen sind □





Chris Butler, Illustrator in Los Angeles, hat diese Zeichnungen exklusiv für GEO kompakt angefertigt. Er wurde dabei von einem Wissenschaftlerteam beraten.

Das Wunder Erde

Richtige Größe, optimale Entfernung zur Sonne und eine günstige chemische Zusammensetzung der Atmosphäre – eine kaum glaubliche Verkettung von Zufällen hat dazu geführt, dass sich ein einst wüster Himmelskörper zur Heimat des Lebens entwickeln konnte

Text: Gregor Markl

Unsere Erde ist nicht mehr als ein Staubkorn im Weltall, denn jede einzelne der vielen Milliarden Galaxien im Universum enthält wiederum Milliarden von Sonnen – und viele dieser Sonnen werden von Planeten umkreist. Aus diesen einfachen Überlegungen folgt, dass es Billionen von Planeten geben muss. Rein statistisch ist es sehr wahrscheinlich, dass es neben der Erde noch einige Dutzend oder sogar einige tausend Himmelskörper gibt, die ebenfalls Leben hervorgebracht haben. Andererseits sind derart viele Bedingungen für die Entstehung höheren Lebens notwendig, dass das, was da auf unserem Heimatplaneten in den vergangenen gut 4,5 Milliarden Jahren vor sich gegangen ist, einem Wunder gleichkommt.

Diese Voraussetzungen des Lebens sind sowohl geologischer als auch astronomischer Natur, und sie sind eng miteinander verknüpft. Bevor sich unser Sonnensystem aus einer Gas- und Staubwolke zu formen begann, fanden sich dort durchschnittlich nur ein paar Atome pro Kubikzentimeter Raum, also praktisch nichts. Wir wissen aber, dass es damals schon mineralische „Atomcluster“ gab, welche die Struktur von Diamanten hatten, einige hundert bis tausend Atome groß waren und noch heute als winzige Einschlüsse in Meteoriten nachgewiesen werden können – präsolare Diamanten, die älteste strukturierte Materie unseres Sonnensystems. Durch ihre Anziehungskraft konnten sich diese Atomcluster nach und nach zu größeren Materieteilchen zusammenfinden, zu Staub, der sich schließlich zu Himmelskörpern ballte.

Selbst in unserem vergleichsweise winzigen Sonnensystem ist die Erde nur ein verschwindend kleiner Massekörper. Rund 99 Prozent der Materie des Sonnensystems stecken in der Sonne selbst, und auch die Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn sind um ein Vielfaches größer als die Erde. Doch allein unser ehemals unscheinbarer Planet besaß offenbar Qualitäten, die zur Entstehung höheren Lebens notwendig waren: Die Erde hat die richtige Größe, eine optimale Entfernung zur Sonne, und ihre Atmosphäre hat die geeignete chemische Zusammensetzung.

Die Größe und der Sonnenabstand sind entscheidend für die Energiebilanz der Erde. Die Sonne versorgt uns täglich mit Licht und Wärme – nicht zu viel, aber auch nicht zu wenig. Wäre die Erde nur etwa fünf Prozent näher an der Sonne, würde alles Wasser verdampfen, alles Leben vergehen. So aber hat die Sonne einst die Photosynthese in Gang gesetzt, Sauerstoff konnte sich in der Atmosphäre anreichern, und schließlich sind komplexe Lebensformen entstanden.

Die Erde ihrerseits gibt auch Energie ab, schon seit ihrer Entstehung. Anfangs war sie heiß und aufgeschmolzen, doch im Laufe von Jahrmillionen kühlte sie äußerlich ab und entwickelte einen Vorläufer jener Kruste, auf der wir heute leben. Noch immer aber ist es im Erdinneren einige tausend Grad Celsius heiß. Letztlich bringt dieses Zusammenspiel zwischen der von der Sonne abgestrahlten Wärme und der Wärme aus dem Erdinneren jene Temperaturen hervor, die den größten Teil des Wassers flüssig erhalten.

Ohne die stetige Wärmeabgabe aus dem Erdinneren – sichtbar etwa am Vulkanismus – gäbe es keine Kontinentalverschiebung und damit auch keine Gebirge; jede Erhebung würde durch die unablässige Erosion schnell abgetragen, die gesamte Oberfläche wäre topfieb. Wie es dann auf der Erde aussähe, ist zwar unklar – aber eines ist gewiss: Klima, Vegetation und damit auch die Voraussetzungen für tierisches und menschliches Leben wären völlig andere.

Wäre die Erde kleiner geraten, so wäre auch sie inzwischen völlig erkaltet, wie der nur etwa ein Siebtel so große Mars, dessen Vulkanismus heute erloschen ist. Wäre sie hingegen deutlich größer, so würde wahrscheinlich ein heftigerer Vulkanismus höheres Leben unmöglich machen.

Die Größe eines Planeten hat noch einen weiteren Effekt: Die Erde kann aufgrund ihrer Schwerkraft eine Atmosphäre um sich halten. Bei kleineren Körpern mit geringerer Gravitation würden die Bestandteile der Lufthülle – die unsrige enthält die so lebenswichtigen Gase Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid – schlicht in den Weltraum entweichen.

Zudem wirkt die Atmosphäre gleichzeitig als Schutzschild gegen die lebensfeindlichen Anteile der Sonnenstrahlung, und sie hält die Temperaturen auf der Erdoberfläche relativ stabil. Auf Himmelskörpern ohne Atmosphäre schwanken Tages- und Nachttemperatur wesentlich stärker als auf der Erde, was wiederum das Entstehen höheren Lebens erschwert. Die Mondtemperatur beispielsweise schwankt jeden Tag zwischen minus 160 Grad und plus 130 Grad.

Dass die Atmosphäre der Erde sich im Laufe von Jahrtausenden derart mit Sauerstoff angereichert hat, ist auf die Wechselwirkung zwischen Biologie und Geologie zurückzuführen: Die Photosynthese der Cyanobakterien hat ermöglicht, dass Sauerstoff aus dem Meer in die Atmosphäre aufsteigen konnte, gleichzeitig reduzierte sich deren Gehalt an Kohlendioxid und Methan. Das Leben schuf sich also selbst einen Teil jener Bedingungen, die es brauchte, um sich ausbreiten

und komplexer werden zu können: Denn erst die Sauerstoff-Atmosphäre erlaubte höheres tierisches Leben an Land.

Zu Anfang des Jahres 2004 wurden die Nachrichten von der Schlagzeile „Eis auf dem Mars“ beherrscht. Mit riesigem Aufwand wird erforscht, ob es auf jenem Planeten überhaupt Wasser gibt (was bewiesen zu sein scheint), und wenn ja, ob es nicht nur in gefrorener, sondern auch in flüssiger Form existiert hat oder sogar noch existiert. Hinter dieser Suche steht die Erkenntnis, dass flüssiges Wasser die unverzichtbare Grundlage für biologische Stoffwechselprozesse ist, also für Leben nach irdischem Muster. Das gilt auch für die ältesten Lebensformen, die Archaeobakterien an heißen Tiefseequellen, die erst bei über 85 Grad anfangen, sich gut zu vermehren. Das gilt selbst für heutige Wüstenpflanzen wie die namibischen Köcherbäume, die zumindest alle paar Jahre Wasser brauchen, und für den Menschen gilt es sowieso.

Es lässt sich natürlich darüber philosophieren, wie dies manche Forscher tun, ob höheres Leben beispielsweise auf Basis des Stoffes Ammoniak hätte entstehen und sich damit ähnlich komplexe biologische Organismen hätten entwickeln können. Doch das ist reine Spekulation – wir kennen nur den auf der Erde verwirklichten Lebenstyp.

Wie und wo genau die erste Zusammenballung von Molekülen dazu geführt hat, dass ein fortpflanzungsfähiger Organismus mit einem Stoffwechsel – also Leben – entstand, ist bis heute nicht mit letzter Sicherheit zu sagen. Manche Wissenschaftler vermuten, dass es in den heißen Quellen der Urmeere dazu gekommen ist, wo ununterbrochen mit allen möglichen Elementen angereicherte wässrige Lösungen zirkulierten. Andere Forscher glauben, dass die entscheidenden Grundbausteine des Lebens von Meteoriten auf die Erde gebracht worden sind – was allerdings nicht erklärt, wie und wo diese Substanzen dann entstanden sind. Eines ist jedoch offensichtlich: Neben dem Wasser bedurfte es auch ausreichender Mengen der Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel sowie unter anderem Kalzium und Phosphor.

Die Geschichte der Erde ist die Geschichte einer stetigen Entwicklung. Aus Sicht der Spezies Mensch wirkt der Gang der Dinge fast so, als ob sich alles zu immer besseren Voraussetzungen für komplexes Leben hinentwickelt hätte, bis zum

Auftritt des *Homo sapiens*. Allerdings gab es auch Rückschläge und Katastrophen, die zu einem Massensterben von Tier- und Pflanzenarten geführt haben, vor allem im Erd-Altertum und -Mittelalter. Die zerstörerischsten waren vermutlich die Folge von Einschlägen von Meteoriten.

Zum gewaltigsten Zusammenprall dieser Art kam es etwa 70 Millionen Jahre nach der ersten Sonnennzündung. Damals kollidierte ein Himmelskörper von der Größe des Mars mit dem Vorläufer der Erde – und zwar in solch einem Winkel, dass die Proto-Erde nicht zerschmettert wurde und sich die durch den Zusammenprall abgespaltene Materie zu einem Körper formen konnte, den wir heute Mond nennen. Seither umkreist er die Erde, ist Ursache der Gezeiten und wirkt stabilisierend auf den Planeten, indem er die Schwingungen der Erdachse dämpft. Beides aber, die Gezeiten und eine halbwegs stabile Erdachse, war ebenfalls Bedingung für die Entstehung von Leben und für ein recht gleichmäßiges Klima.

Unsere Erde ist zweifellos eine Welt voller Wunder. Und dazu zählt nicht zuletzt auch die erstaunliche Tatsache, dass Forscher die Lebensvoraussetzungen als solche überhaupt erkannten und die Entwicklung unserer Lebensgrundlagen über Jahrmilliarden hinweg zu rekonstruieren vermochten. Dazu bedurfte es komplizierter Experimente, Berechnungen, chemischer Analysen und eines schon fast detektivischen Spürsinns von Naturwissenschaftlern. Nur so gelang es herauszufinden, dass es Ozeane schon vor Milliarden von Jahren gegeben hat, wie der Erdmantel sich zusammensetzt und die Erde geschichtet ist, wie Gebirge entstehen oder wie sich aus Dinosauriern die ersten Vögel entwickeln konnten.

Um zu weiteren Erkenntnissen zu gelangen, ist es unumgänglich, die Erfahrungen und Methoden aus den Geowissenschaften, der Physik, der Chemie und der Biologie zu vernetzen. Neue Erkenntnisse stellen uns zwar manchmal vor neue Rätsel, helfen aber immer wieder, noch Unverstandenes zu begreifen. Aber selbst wenn irgendwann einmal alles erklärt wäre: Wunderbar bleibt die Entstehung der Erde allemal! □

Gregor Markl, 33, ist Professor für Petrologie am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen. Im September ist bei DVA sein Buch „Die Erde. Eine Reise durch ihre Geschichte“ erschienen.




Der einzige Planet, von dem wir wissen, dass es auf ihm Leben gibt: die Erde

Geburt aus Gas und Staub

Text: Ute Eberle

Winzige Gas- und Staubpartikel, die Reste zuvor explodierter Sterne, sammeln sich vor etwa fünf Milliarden Jahren in einer gewaltigen Wolke und verdichten sich – nach und nach entsteht daraus unser Sonnensystem



Wenn ein Stern (oder eine Sonne, Astronomen verwenden beides synonym) am Ende seiner Existenz explodiert, bleiben ungeheure Mengen von Staub- und Gasparkeln zurück, die in Wolken durchs All ziehen. Im Inneren solcher Wolken – wie hier im Sternbild Schütze – ballen sich die Partikel zuweilen so stark zusammen, dass sie aneinander reiben und sich aufheizen, bis ihre Atomkerne verschmelzen. Dabei wird Energie frei, und ein neuer Stern beginnt zu leuchten (siehe Kästchen). Auch unsere Sonne ist so entfacht worden

Lange bevor sich unsere Sonne entzündete, existierten und endeten im Kosmos bereits Generationen von Sternen. Wie Diamantenstaub flimmerten sie in gewaltigen **Galaxien** am Firmament, strahlten für ein paar Milliarden Jahre und verloschen. Manche verglühten, andere zerriss es in gewaltigen Explosionen.

Vermischt mit **interstellarem Gas**, trieben ihre Überreste durch den Raum: fein verteilt, pro Kubikzentimeter durchschnittlich ein paar Atome, zumeist Wasserstoff (70 Prozent) oder **Helium** (29 Prozent). Doch hier und da war auch schon der **Sauerstoff** dabei (den wir heute atmen), Eisen (ein Bestandteil unseres Blutfarbstoffs), Kohlenstoff, Silizium und Magnesium.

Alle diese Elemente waren spätestens 300 Millionen Jahre nach dem **Urknall** vor rund 13,7 Milliarden Jahren entstanden. Damals begannen im Inneren der ersten Sonnen Atomkerne zu neuen Stoffen zu verschmelzen. Diese Stoffe werden bis heute beim Tod einer Sonne freigesetzt.

Ebenfalls etwa 300 Millionen Jahre nach dem Urknall bildeten sich die ersten Galaxien. Rund eine Milliarde Jahre danach formte sich unsere **Milchstraße**. Vor allem in den armförmigen Ausläufern von Spiralgalaxien ballten sich Staub, Eis und Gas zu Wolken zusammen, die um ihre eigene Achse rotierten. Die Zusammenballung dieser **Dunkelwolken** wurde gefördert, wenn Galaxien aneinander gerieten.

Solche Kollisionen gehören bis heute zum kosmischen Alltag. Besonders als das **Universum** noch jung und die Abstände zwischen den Galaxien klein waren, stießen diese häufig zusammen. Allerdings: Die Entfernungen zwischen den Sternen waren für einen direkten Kontakt zu groß, doch wurden Staub und Gas durch die Kräfte der **Gravitation** zusammengeschoben.

Dabei entstanden Wolkenkerne, dichte Klumpen, die vielfach unter



Eine Scheibe aus 100 Milliarden Sonnen

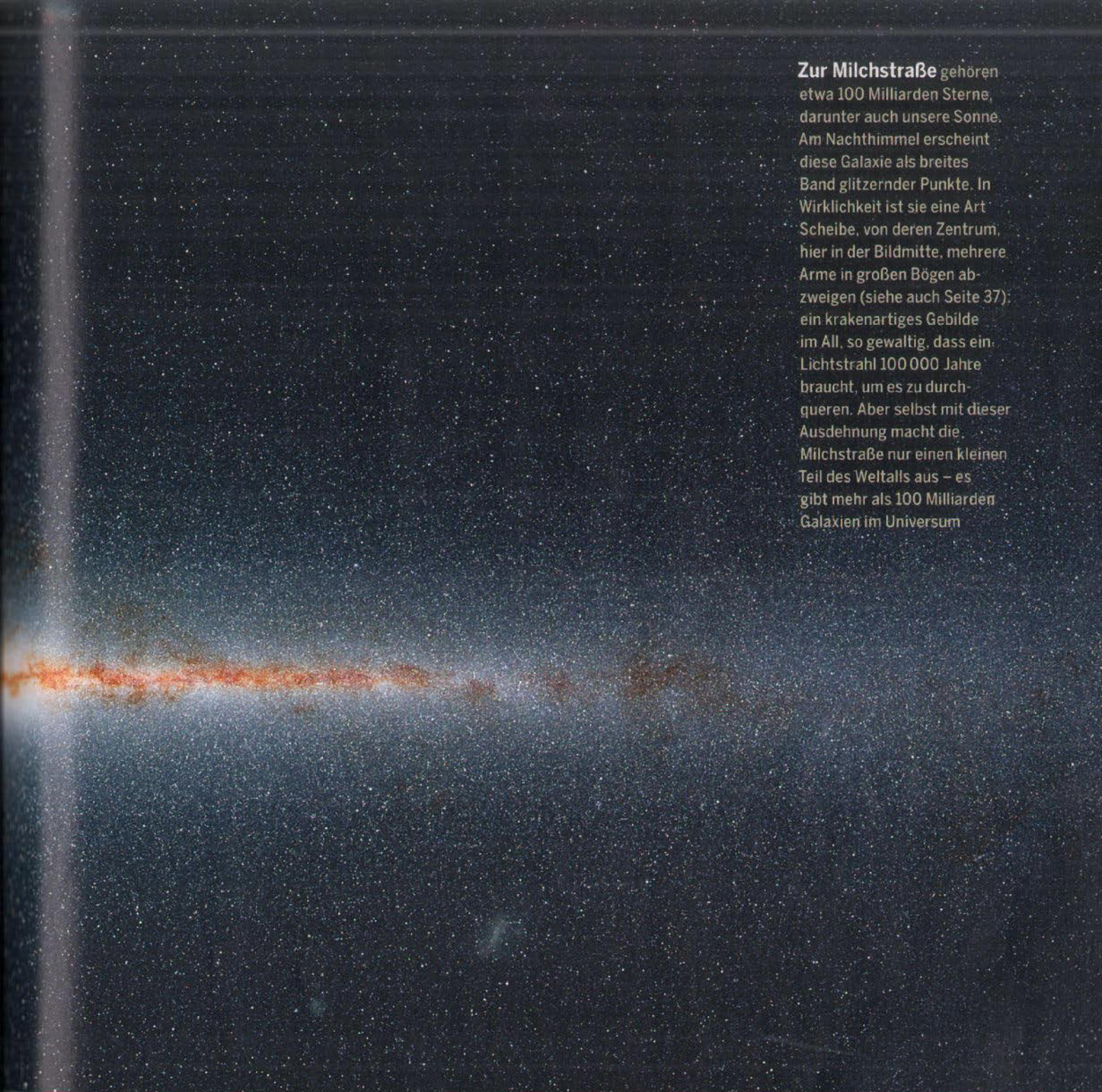
ihrer eigenen Schwerkraft kollabierten. Daraus entwickelten sich massenhaft neue **Sterne** – die Astronomen sprechen von „Starburst“. Aus einem solchen Zusammenstoß vor knapp fünf Milliarden Jahren könnte auch unser **Sonnensystem** hervorgegangen sein.

Wie das möglicherweise abgelaufen ist, haben Astronomen rekonstruiert: Im Inneren einer Dunkelwolke bildeten sich zunächst Wolkenkerne – jene Orte, an denen sich die Moleküle und Atome besonders stark verdichteten. Weil sich die Teilchen dort aneinander rieben

und gegenseitig abbremsten, flachte der Wolkenkern zu einer Scheibe ab: zu einem pfannkuchenähnlichen Gebilde aus Staub, Eis und Gas.

Einer dieser Pfannkuchen – er saß an einem der äußeren Spiralarme der Milchstraße – schickte sich an, unsere Sonne zu werden.

Zug um Zug schrumpfte der Pfannkuchen, wobei sich die Materie verdichtete. In nur 400 000 Jahren schnurrte die Scheibe so auf ein Millionstel ihrer Ursprungsgröße zusammen – was immer noch viermal so groß war, wie unser Sonnensystem heute ist.



Zur Milchstraße gehören etwa 100 Milliarden Sterne, darunter auch unsere Sonne. Am Nachthimmel erscheint diese Galaxie als breites Band glitzernder Punkte. In Wirklichkeit ist sie eine Art Scheibe, von deren Zentrum, hier in der Bildmitte, mehrere Arme in großen Bögen abzweigen (siehe auch Seite 37): ein krakenartiges Gebilde im All, so gewaltig, dass ein Lichtstrahl 100 000 Jahre braucht, um es zu durchqueren. Aber selbst mit dieser Ausdehnung macht die Milchstraße nur einen kleinen Teil des Weltalls aus – es gibt mehr als 100 Milliarden Galaxien im Universum

Mit jedem Neuankömmling drängelten sich die Atome und Moleküle im Innersten der Scheibe dichter aneinander und bildeten so ein Massezentrum. Dieses reichte bis zur heutigen Marsbahn und begann, von seiner Oberfläche Wärme abzustrahlen.

Im Mittelpunkt trieb der Druck die Temperatur so hoch, dass die Gasmoleküle auseinander brachen. Heißes **Plasma** entstand – ein Gemisch vor allem aus **Elektronen** und positiv geladenen Atomen, die sich in ständiger Wechselwirkung befanden.

Weiter hagelte Materie ins Innere. Vor ca. 4,6 Milliarden Jahren stieg dort die Temperatur auf eine Million Grad Celsius, und die ersten Atomkerne verschmolzen. Aus „schwerem“ Wasserstoff – **Deuterium** – wurde durch einen Fusionsprozess Helium. Das nuklea-

re Feuer war entfacht: Im Zentrum des Pfannkuchens begann der Vorläufer unserer Sonne zu brennen.

Immer weiter strömten Gas und Staub in Richtung **Proto-Sonne**, entsprechend schrumpfte der Wolkenkern. Je kleiner er wurde, desto schneller rotierte er – wie

Eine Region im Sternbild Südliche Krone, nahe dem Zentrum der Milchstraße und etwa 500 Millionen Lichtjahre von uns entfernt, zeigt mehrere Sonnen in verschiedenen Stadien ihrer Entstehung. Im Kästchen 1 etwa ist eine Dunkelwolke aus Gas und Staub zu sehen, die am Anfang dieser Entwicklung steht

5.

3.

2.

1.

Sonnenzündung in mehreren Etappen

eine Eisläuferin, die bei einer Pirouette die Arme anlegt. Schon schien es, als müsste ihn die Fliehkraft zerreißen, da sammelte sich ein Teil des Plasmas zu zwei dünnen Fontänen, die oben und unten aus der Scheibe herausschossen. Diese **Jets** trugen einen Großteil des **Drehimpulses** fort. Gleichzeitig rissen sie

den Wolkennebel auf: Die Sonne wurde zum ersten Mal sichtbar – wenn sie denn jemand gesehen hätte.

Den glühenden, noch recht losen gigantischen Gasball umkreiste eine dunkle Materiescheibe – der Rest der Dunkelwolke. Nur etwa ein Prozent der ursprünglichen Wolkenkernmasse war in die-

ser **protoplanetaren Scheibe** noch übrig geblieben, alles andere ins Innere gewandert.

Einen wichtigen Anteil der Scheibe machten winzige Staubteilchen verschiedener Elemente aus, von denen 1000 nebeneinander gelegt nur einen Millimeter messen würden. Doch zusammengekommen war das so viel

Materie, dass daraus im Laufe von Jahrmillionen ein System von **Planeten** entstand, von denen der gewaltigste heute 300-mal schwerer ist als die Erde.

Die Staubteilchen waren klebrig und hafteten, wenn sie gegeneinander prallten. Ketten entstan-

Wie aus Staub neue Himmelskörper wurden



1. Ungeordnete Wolke

Gas- und Staubpartikel, Reste explodierter Sonnen, wirbelten in einer Wolke zunächst chaotisch durcheinander. Vor etwa fünf Milliarden Jahren sammelten sich – zufällig oder weil zuvor zwei Galaxien zusammengeprallt waren (siehe Seite 10) – an einer Stelle mehr Partikel als anderswo in der Wolke. Das Mehr an Masse zog weitere Partikel an, ein Gravitationszentrum bildete sich: ein „Wolkenkern“.



2. Rotierende Scheibe

Der Kern zog kräftig Materie an. Die Partikel stürzten auf Kreisbahnen hinein – eine Scheibe formte sich, die um den Kern rotierte. Darin verdichteten sich immer mehr Partikel und heizten sich dadurch auf. Erste Atomkerne verschmolzen: Die Proto-Sonne, Vorläuferin unserer Sonne, glühte auf (erste Sonnenzündung). Gas-Fontänen („Jets“) schossen hervor.



3. Emporjagendes Gas

Die aufschießenden Gas-Fontänen nahmen einen Großteil des Drehimpulses auf und trugen ihn fort – sonst hätte die Fliehkraft die Scheibe zerfetzt. Gebündelt wurden die Säulen vermutlich durch ein Magnetfeld, das von der Scheibe erzeugt worden war. Der Kern zog nun wegen seiner zunehmenden Schwerkraft immer mehr Masse an.



4. Klebriger Staub

Die Wolkenmasse wurde fast ganz in den Kern gezogen – nur ein kleiner Rest (etwa ein Prozent der ursprünglichen Wolke) raste noch auf Bahnen um das Zentrum, darunter Staubpartikel. Die aber prallten oft gegeneinander, verklebten, formten erst kleine Kugeln, später fußballgroße Flocken und dann Planetesimale mit einem Durchmesser bis zu mehreren hundert Kilometern.



5. Entfesselte Sonne

Die Planetesimale zogen Materie an und wuchsen – so entstanden nach und nach die Planeten unseres Sonnensystems. Im Inneren der Proto-Sonne ballte sich so viel Materie zusammen, dass es dort zu Kernreaktionen kam: Atomkerne des Wasserstoffs verschmolzen zu Helium und setzten Energie als Licht frei – die Sonne begann gleißend hell zu brennen: die zweite Sonnenzündung.

den, dann Kugeln, dann lockere Materiebrocken, so groß wie Fußbälle. Und schließlich formten sich daraus kilometergroße Kleinplaneten – **Planetesimale** –, die nicht mehr von der allgemeinen Rotation mitgerissen wurden, sondern auf eigenen Bahnen um die Proto-Sonne kreisten und durch ihre

Schwerkraft weiteren Staub anzogen.

Ein Klumpen in einer mittleren Umlaufbahn – später Jupiter genannt – erreichte auf diese Weise als Erster die Größe von zehn Erdmassen. Das hatte dramatische Folgen. Denn damit war der Proto-Jupiter so schwer geworden, dass er, ähnlich wie die Sonne, Gas an sich binden konnte.

Er wuchs nun lawinenartig und zerschlug die einst homogene Materiescheibe in Fragmente, indem er die Bahnen der Planetesimale durch sein gewaltiges Kraftfeld beeinflusste. Er zog sie an sich und beschleunigte viele von ihnen dabei so sehr, dass sie aus ihrer Bahn geschleudert wurden. Insgesamt raffte Jupiter so viel Masse an sich, dass er am Ende zweieinhalbmal schwerer war als alle anderen Planeten zusammen – ein Gasriese, durch dessen Atmosphäre gigantische Blitze zuckten.

Als Nächstes entstand der Saturn. Wie Jupiter und Sonne besteht er vor allem aus Wasserstoff und Helium, den vorherrschenden Gasbestandteilen des einstigen **Urnebels**. Uranus und Neptun dagegen verleibten sich überwiegend Planetesimale vom äußeren Rand der Scheibe ein. Diese waren reich an Methan – das diesen beiden Planeten ihre bläuliche Färbung verleiht (Pluto, ganz außen, ist nach Meinung vieler heutiger Forscher gar kein Planet, sondern ein Kometenkern).

Die vier inneren Planeten – Mars, Erde, Venus, Merkur – konnten hingegen mangels Masse kein Gas um sich halten und blieben so im Verhältnis zu den Gasriesen klein. Immerhin blieb ihnen das Schicksal der Planetesi-

male jenseits der Marsbahn erspart, die vom Schwerefeld des Jupiter immer wieder mit solcher Gewalt gegeneinander geschleudert wurden, dass die größeren stets aufs neue in kleinere zerplatzten. Hunderttausende dieser Körper fliegen noch heute im so genannten Asteroidengürtel herum, manche haben Durchmesser von fast 1000 Kilometern.

Auch der **Kuiper-Gürtel** jenseits des Neptun ist voll von unverbauten Fels- und Eisbrocken. Etwa eine Billion davon haben sich zur **Oort-schen Wolke** gesammelt, die unser gesamtes Sonnensystem kugelförmig einhüllt. Gelegentlich gerät einer dieser Klumpen ins Innere des **Planetensystems**. Dann verdampfen dessen gefrorene Gase im Sonnenlicht zu prächtigen Kometenschweifen.

Die Planetenbildung muss für astronomische Verhältnisse rasend schnell fortgeschritten sein, denn bereits zehn Millionen Jahre später gab es keinen Baustoff mehr. In der immer noch kollabierenden Proto-Sonne setzte nämlich nun ein mächtiges „Wasserstoffbrennen“ ein, die zweite Sonnenzündung, das bis heute anhält. Dabei verschmelzen je vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern, wobei große Mengen Energie frei werden.

Anfangs verlief diese thermonukleare Reaktion besonders ungestüm. Mächtige Eruptionen schossen ins All, und eine tausendmal stärkere UV-Strahlung als heute toste um die sonnennahen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars. Sie riss Gase und flüchtige Elemente mit sich fort. Nur Metalle und Gestein blieben übrig.

Der mit mehr als drei Millionen km/h daherfegende

Wenn zwei Galaxien

kollidieren – so wie hier die »Whirlpool-Galaxie« und eine kleinere Nachbargalaxie –, entstehen zahllose neue Sterne. Denn dort, wo sich die beiden berühren, werden besonders viele Staub- und Gaspartikel zu Wolkenkernen verdichtet, in denen irgendwann junge Sonnen zünden





Folgenreiche Begegnung im All



Hat ein Stern den Großteil seines Wasserstoffs verbraucht, bläht er sich auf und bläst seine Hülle fort, zuweilen unter Explosionen. Beim To-deskampf dieser Sonne aus dem Sternbild Einhorn durchquerte ein bei einer solchen Explosion ausgesandter Lichtblitz die Schichten der Hülle innerhalb weniger Monate. So wurde in verschiedenen Aufnahmen des Hubble-Teleskops nach und nach mehr von der bereits abgestoßenen Hülle sichtbar – und das 100 000 Jahre dauernde Aufblähen scheint nun wie im Zeitraffer abzulaufen

Sonnenwind blies zudem die letzten Gas- und Staubreste aus der protoplanetaren Scheibe. Es gab nun nicht mehr genügend Material für die Formung weiterer Planeten.

Trotz ihrer unvorstellbaren Gewalt ist die Sonne im kosmischen Vergleich ein eher kleiner, massearmer Stern. Sie hat derzeit einen Durchmesser von rund 1,4 Millionen Kilometern. Physiker schätzen, dass sie derzeit pro Sekunde vier Millionen Tonnen ihres nuklearen Brennstoffs verbraucht und damit wohl so viel Energie erzeugt wie alle heutigen Kraftwerke der Erde, wenn sie eine Million Jahre lang in Betrieb wären.

Mittlerweile hat unser Zentralgestirn knapp die Hälfte seines Lebensweges hinter sich. In etwa sechs Milliarden Jahren wird die Sonne den größten Teil ihres Wasserstoffs im Kern verbrannt haben und sich langsam aufblähen. Sie wird den sonnennächsten Planeten Merkur verschlingen und die Temperaturen auf der Erde derart hochtreiben, dass die Meere zu kochen beginnen. Etwa zwei Milliarden Jahre danach wird sie zu einem **Roten Riesen** herangewachsen sein, rund 100-mal größer und 500-mal heller als heute.

Dann werden die äußersten Hüllen der Sonne abgestoßen (der zurückgebliebene Kern endet als **Weißer Zwerg**), und die Ausbeute von mehr als zehn Milliarden Jahren Kernfusion wird ins All geschleudert: Sternstaub – Baumaterial für die nächste Generation von Sternen und Sonnensystemen. □

Ute Eberle, 33, lebt als Wissenschaftsautorin in Leiden in Holland.

ALTERSBESTIMMUNG VON HIMMELSKÖRPERN

Auf der Spur der Strahlen

Leistungstarke Instrumente erlauben es Astronomen heute, Galaxien zu sehen, die ihr Licht vor 13 Milliarden Jahren ausgesandt haben. Neue **Infra-rot-Teleskope** werden sogar direkt in die Kinderstuben der ersten Sterne spähen können. Doch woher wissen die Forscher, wie alt jene Lichtquellen sind? Generell gilt: Je weiter entfernt ein Objekt, desto älter ist es, denn das **Universum** breitet sich seit dem Urknall aus. Und je weiter ein Stern oder eine Galaxie von unserem Sonnensystem entfernt sind, desto kleiner und weniger hell erscheinen sie uns. Deshalb ordnen Astronomen alle Sterne verschiedenen Helligkeitsstufen zu. Von manchen Sternen ist nun bekannt, welche Helligkeit welcher Entfernung entspricht. Diese „kosmischen Standardkerzen“ werden herangezogen, um die Distanz von Sternen unbekannter Entfernung zu bestimmen. Hat man so die Entfernung festgestellt, lässt sich das Alter ermitteln.

Auch die so genannte „Rotverschiebung“ des Lichts hilft bei der Altersbestimmung. Die am weitesten entfernten Galaxien erscheinen nicht nur viel kleiner und weniger hell, sie bewegen sich auch am schnellsten von uns weg. Dadurch sehen wir das von ihnen abgegebene Licht auf der Erde charakteristisch verändert. Die Wellenlängen des Lichts verändern sich: Sie werden blauer (kürzer), wenn die Galaxie sich auf uns zu-, und röter, wenn sie sich von uns weg bewegt. Forscher können so ausrechnen, wie weit entfernt – also wie alt – eine Galaxie ist.

Bei der Altersbestimmung von Gesteinen aus unserem Sonnensystem verwenden Forscher die radiometrische Datierung. Sie beruht darauf, dass chemische Elemente in mehreren Formen existieren, als so genannte **Isotope**. Diese haben die gleichen chemischen Eigenschaften, aber verschiedene Atommassen. Kalium etwa gibt es nicht nur als K-39 (mit 19 **Protonen** und 20 **Neutronen** im Kern), sondern auch als K-40 und K-41 (mit einem beziehungsweise zwei Neutronen mehr). Viele Isotope sind instabil: Sie zerfallen und senden dabei radioaktive Strahlung aus. Die Zeit, in der die Hälfte der Ausgangsmenge eines Isotops zerfällt, wird Halbwertszeit genannt. Das können je nach Element Mikrosekunden oder einige Milliarden Jahre sein. Bei der radiometrischen Altersbestimmung wird nun anhand der von dem Material ausgehenden Strahlung das Verhältnis des nicht zerfallenen Isotops zum zerfallenen Isotop festgestellt. Auf diese Weise konnten Forscher die ältesten bekannten Minerale datieren. Dabei handelt es sich um Kalzium/Aluminium-reiche Einschlüsse in kohligen **Chondriten** – einem Meteoritentyp. Diese Einschlüsse sind vermutlich durch Kondensation aus dem sich abkühlenden solaren Nebel entstanden. Ihr Alter liegt, wie aus Isotopenmessungen solcher Einschlüsse im Meteoriten „Allende“ hervorgeht, bei 4,566 Milliarden Jahren. Damit ist das Mineral immer noch deutlich jünger als das Universum, dessen Alter Astronomen auf etwa 13,7 Milliarden Jahre schätzen.



Letztes Aufleuchten vor dem Sternentod



Wer war der



Erster mit multitronic: Audi.*

**Vorsprung leben.
Der neue Audi A4.**

*Die revolutionäre Getriebetechnik von Audi verbindet Dynamik und Ökonomie des Schaltgetriebes mit dem Komfort einer Automatik. So nutzt multitronic® durch die stufenlose Übersetzung stets den Drehzahlbereich mit dem höchsten Drehmoment.

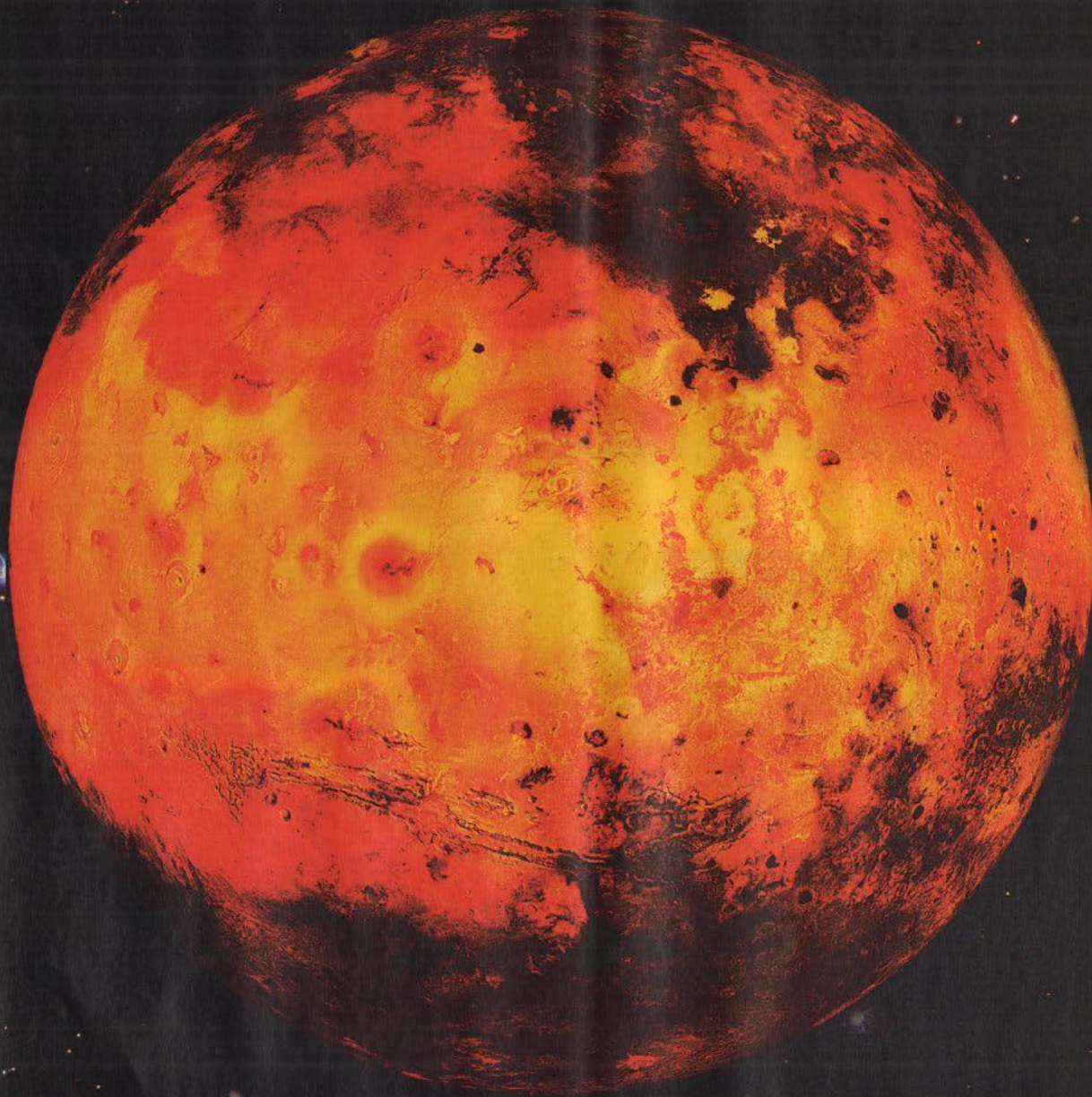
Vorsprung durch Technik www.audi.de



Zweite auf dem Mond?



Das Ergebnis: bessere Beschleunigung, optimierter Verbrauch, kein Schalldruckeln. Und in Kombination mit dem einzigartigen Dynamikfahrwerk mehr als ein Grund, warum der Audi A4 der Vorreiter seiner Klasse ist. Erleben Sie ihn als Erster. Jetzt bei Ihrem Audi Partner.



Der Vorläufer unserer Erde könnte wie auf dieser Foto-Illustration (einer Kombination aus dem Jupitermond Io und dem Mars) ausgesehen haben: ein von Asteroiden-Einschlägen zernarbter, glühend heißer Planet mit feurigen Spalteneruptionen.

Ein Planet entsteht

Aus Staub gefügt sind die ersten Gesteinskörper, die unablässig um die frühe Sonne rasen. Oft kollidieren sie miteinander und zerplatzen. Einige jedoch entgehen der Zerstörung und wachsen gewaltig – auch der Vorläufer unserer Erde

Text: Ute Eberle

Als unsere Sonne vor rund 4,6 Milliarden Jahren zum ersten Mal zündet, ist es in unserer kosmischen Heimat noch dämmrig. Die so genannte Proto-Sonne im Zentrum des damaligen Urnebels glimmt nur – sie ist noch ein Sternembryo und besitzt längst nicht ihre heutige Strahlkraft.

Doch dunkel heißt nicht friedlich. Abermilliarden kleiner Himmelskörper (Planetesimale) rasen rund um die Proto-Sonne. Über einen Zeitraum von mehreren zehntausend Jahren haben sie sich aus kosmischen Staubkörnern zu immer mächtigeren Gesteins- und Eisbrocken verklumpt. Die größten unter ihnen haben einen Durchmesser von einigen hundert Kilometern – darunter auch einer, der im Laufe von Jahrmillionen zur Erde heranwachsen wird.

Unaufhörlich krachen die großen und kleinen Planetesimale aufeinander. Manche zerbrechen unter der Wucht des Aufpralls. Andere verleiben sich ihren Kollisionsgegner ein und wachsen dadurch weiter. Allmählich zeigt sich, dass die **Proto-Erde** zu

den Gewinnern in dieser Remperei gehört. Aber auch der Proto-Mars, die Proto-Venus und der Proto-Merkur in den Umlaufbahnen nebenan wachsen stetig heran.

Verglichen mit den weiter von der Proto-Sonne entfernt sich formenden Gasplaneten, etwa dem Jupiter, sind diese so genannten terrestrischen Planeten allerdings Zwerge. Das liegt daran, dass in ihrem Einzugsbereich kaum flüchtige Materie existiert – also Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ammoniak, Methan sowie Helium und Wasserstoff aus dem Urnebel. Dort, wo die Proto-Erde ihre Bahnen zieht, sind diese Substanzen entweder verdampft, oder sie wurden durch den Strahlendruck der Proto-Sonne in die äußeren Regionen des Planetsystems getrieben (siehe Seite 30).

In den sonnennahen Bereichen haben sich nur durch Hitze zusammengebackene Gesteinspartikel gehalten, aus denen die hier kreisenden Proto-Planeten nach und nach ihre Masse zusammenklauen. Manchen davon gelingt es, Planetesimale einzufangen, die aus weit von der Proto-Sonne entfernten Regionen stammen und



Aus Staubkörnern, die in Eisschichten gehüllt sind (oben ein Plastikmodell; die Gelbfärbung ist Folge chemischer Veränderungen im Eis), entwickeln sich durch Anreicherung nach und nach zunächst Planetesimale (rechts) und später Planeten wie etwa der Mars oder die Erde



vereiste, flüchtige Elemente enthalten.

Wohl niemand würde zu diesem Zeitpunkt in der Proto-Erde den Vorläufer des heutigen Blauen Planeten erkennen. Sie ist weder kugelig noch blau. Aus Trümmern der Planetesimale zusammengewürfelt, ähnelt sie einem gigantischen Schotterstein. Ohne stabilisierenden Mond torkelt die werdende Erde mehr um die eigene Achse, als dass sie sich dreht. Kahl ist es auf ihr – und extrem heiß.

Dafür sorgt das Bombardement durch Planetesimale (bis mehrere hundert Kilometer groß) und Embryo-Planeten (mehrere tausend Kilometer groß). Wie Hämmer auf einen Amboss krachen die Himmelskörper auf die nackte Erd-

oberfläche und erzeugen auf diese Weise Hitze. Der durch den ständigen Massezuwachs – die Erde hat jetzt zwei Drittel ihrer heutigen Größe – erhöhte Druck im Inneren treibt die Temperatur weiter hoch.

Zudem zerfallen in dem noch jungen Erdgestein radioaktive Isotope, besonders Kalium-40, Thorium-232, Uran-235 und Uran-238. All dies lässt es auf der Proto-Erde so heiß werden, dass Minerale und Metalle zu schmelzen beginnen. Meere aus Lava entstehen.

Überhaupt verwandelt sich die einst kantige Proto-Erde immer mehr in einen zähen Ball. Ihre äußeren Schichten sind teilweise geschmolzen; die häufigsten der schwersten Elemente – Eisen und Nickel – hält es nicht mehr an der Oberfläche.

Zuerst in kleinen Portionen, dann in immer größeren Massen rutschen sie in die Tiefe und bilden dort einen gewaltigen Kern. Gleichzeitig steigen leichtere Elemente

wie Silizium und Aluminium nach oben. Auf diese Weise ordnet sich die Proto-Erde nach und nach in Schichten.

Seit rund zehn Millionen Jahren prasselt bereits Gestein auf die Proto-Erde herab – da treffen nach der zweiten Sonnenzündung die ersten gleißenden Strahlen jenen unspektakulären glühenden Schlackekörper. In ihrem Licht zeigt sich, dass er um seine Achse wirbelt. Auch alle anderen Körper im Sonnensystem sind in

endlosen Pirouetten gefangen. Ursache ist die Rotation des Urnebels, die sich dank der Drehimpulserhaltung auf die Sonne und ihre Planeten übertragen hat.

Nur allmählich wird die **Erdrotation** abgebremst. Am deutlichsten wirkt sich – allerdings erst viel später in der Erdgeschichte – der Mond auf die Rotation aus. Jeden Tag bremsen sie die Erde über einen komplexen Mechanismus: Alle 40 000 Jahre wird gegenwärtig ein Erdentag dadurch um etwa eine Sekunde länger. Und so wird irgendwann in ferner Zukunft die Sonne nur noch einmal pro **Mondperiode** aufgehen, wird ein Tag dann gut einen Monat lang dauern.

Der Vorrat des Sonnensystems an Planetesimalen hat sich heute weitgehend erschöpft, sieht man von den Körpern ab, die im Asteroiden- und Kuiper-Gürtel um das Zentralgestirn kreisen. Dennoch wird die Erde ständig getroffen – von interplanetaren Atomen und Molekülen sowie Mikrometeoriten von höchstens 0,5 Millimeter Durchmesser.

Jeden Tag nimmt unser Planet auf diese Weise um 50 bis 100 Tonnen zu. Das klingt viel, doch hochgerechnet auf die gesamte Lebenszeit der Erde ergibt das nur eine globale Schicht von 15 Zentimetern.

In ihrer frühen Geschichte aber, rund 70 Millionen Jahre nach Aufleuchten der Sonne, gab es noch viele massereiche Himmelskörper, die durchs All vagabundierten. Zu dieser Zeit wurde die Erde sogar von einem Himmelskörper getroffen, der groß genug war, sie wieder zu zerreißen.

Und nur dank eines glücklichen Zufalls (siehe Seite 46) überstand sie diesen Crash. □

Himmelskörper krachen auf die nackte Erdoberfläche und heizen sie auf

Wachstum durch Kollision



Phase 1: Staubkörner

(vor knapp fünf Milliarden Jahren)

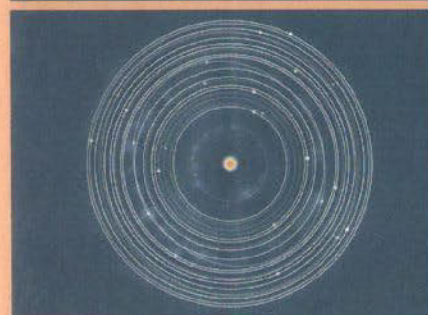
Aus früheren Sternexplosionen ist eine Dunkelwolke hervorgegangen – etwa minus 270 Grad Celsius kalt. Die darin herumwirbelnden Staubkörner aus Metall und Silikatgestein sind von einer Eisschicht vor allem aus Wasser, Kohlendioxid, Methan und Schwefelwasserstoff umgeben.



Phase 2: Erste Schmelze

(vor ca. 4,6 Milliarden Jahren)

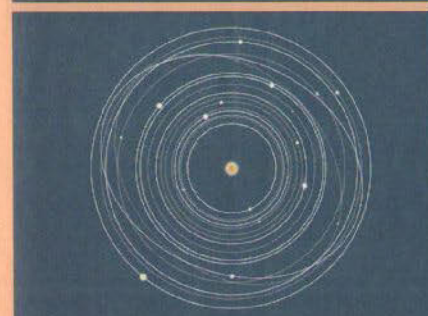
Aus der Wolke bildet sich eine Scheibe, in der die Körner rotieren. Im Zentrum der Scheibe formiert sich die Proto-Sonne. Ihre Wärme lässt bereits das Eis rund um die Staubkörner teilweise schmelzen, sich chemisch verändern und verfärben.



Phase 3: Verklebende Körner

(vor 4,567 Milliarden Jahren)

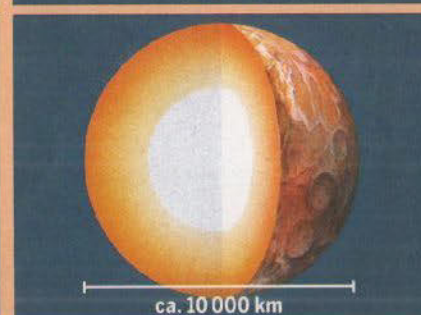
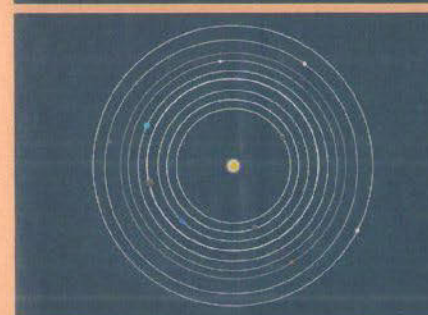
Als der Vorläufer unserer Sonne zu strahlen beginnt (erste Sonnenzündung), schmelzen die äußeren Schichten der Staubkörner weiter und werden klebrig. Um die Proto-Sonne rasend, stoßen sie gegeneinander, klumpen zusammen und wachsen auf diese Weise zu fußballgroßen Flocken heran.



Phase 4: Planetesimale

(vor 4,56 Milliarden Jahren)

Die Klumpen wachsen zu kilometergroßen Planetesimalen zusammen. Sie kollidieren miteinander, die Materie schmilzt und lagert sich je nach Dichte ab: Die Planetesimale bestehen nun aus einem Metall-Kern, einem Mantel aus Silikatgestein und einer Kruste zumeist aus Kohlenstoff.



Phase 5: Proto-Erde

(vor 4,547 Milliarden Jahren)

Manche Planetesimale zerplatzen bei Zusammenstößen, andere wachsen weiter, so auch die Proto-Erde. Schließlich erreicht sie zwei Drittel ihrer heutigen Größe. Weil immer noch Planetesimale auf ihr einschlagen, entweicht der Kohlenstoff aus der Kruste. Übrig bleiben ein Metall-Kern, ein Mantel aus schwerem und eine Kruste aus leichtem Silikatgestein.

Seit viereinhalb Milliarden Jahren hat die Erde einen zernarbten Begleiter: den Mond. Der Himmelskörper ist aus den Trümmern einer gewaltigen Kollision entstanden, die unser Planet nur knapp überstanden hat

DER TRABANT

Text: Henning Engeln

Rund 70 Millionen Jahre sind vergangen, seit die Sonne erstmals aufgeleuchtet ist. Um sie zieht der noch junge Vorläufer der Erde seine Bahnen. Wie Haut einen Pudding, so überzieht eine zarte Kruste diesen heißen Himmelskörper. In seinem Inneren haben sich Eisen und Nickel zu einem schweren, rundlichen Kern gesammelt.

Noch ist das Sonnensystem nicht vollendet, sind die Planeten nicht ausgereift. Zahllose kleine Materiebrocken, aber auch Hunderte kilometer-große Planetesimale kreisen um das Zentralgestirn. Immer wieder krachen solche Vagabunden aus dem All auf die Proto-Erde und reißen deren fragile Hülle auf.

Eines Tages kommt es zu einem kosmischen Drama, das fast zur Auslöschung der Proto-Erde führt. Ein Himmelskörper mit der Masse des Mars – etwa dem Zehntel der heutigen Erdmasse – gerät auf Kollisionskurs mit dem Erdenvorläufer. Mit einer Geschwindigkeit von etwa 36 000 km/h rast er auf den Planeten zu.

Zwar trifft er ihn nicht frontal – ein solcher Zusammenprall hätte die Proto-Erde zerrissen, und der Blaue Planet wäre vermutlich niemals entstanden. Aber der schräge Aufprall ist heftig genug, um die Energie von zehn Billionen Wasserstoffbomben freizusetzen. Ein gewaltiger Lichtblitz strahlt etwa eine Stunde lang in die Tiefe des Alls und überblendet selbst die Leuchtkraft der Sonne.

Die Kollisionsenergie reißt große Teile des Mantels aus der Proto-Erde und schleudert sie zusammen mit Bestandteilen des Einschlagkörpers weit ins All hinaus. Eine mehrere tausend Grad Celsius heiße Materiewolke entweicht, die hauptsächlich aus verdampftem Gestein besteht. Wasser wird in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Wasserstoff entweicht ebenso wie andere leichtere Elemente in den Weltraum, der Sauerstoff verbindet sich mit schwereren Elementen.

Erst von diesem Zeitpunkt an nennen Wissenschaftler den ramponierten Himmelskörper „Erde“.

Um diesen Planeten kreist nun die Gesteinswolke, die sich allmählich abkühlt und zu einer



Streifschuss im All

Phase 1:

Seit der Bildung der Proto-Erde vor gut 4,6 Milliarden Jahren sind immer wieder kleinere Planetesimale auf ihr eingeschlagen und haben ihre dünne Kruste zerstört. Rund 70 Millionen Jahre nach der Geburt der Proto-Erde rast ein etwa marsgroßer Himmelskörper heran

Phase 2:

Der Körper trifft den Vorläufer der Erde mit einer Geschwindigkeit von etwa 36 000 km/h – und in einem spitzen Winkel. Wäre er frontal gegen sie geprallt, hätte dies die Proto-Erde völlig zerfetzt

Phase 3:

Beim Aufprall wird ein großer Teil des glühend heißen Mantelgesteins herausgeschlagen. Die dabei frei werdende Energie lässt das Material verdampfen. Allein der metallische Kern der Proto-Erde bleibt unversehrt

Phase 4:

Mit den ebenfalls verdampften Überresten des Einschlagkörpers sammelt sich das Material in einer Wolke. Deren Bestandteile kreisen rund um den Planeten, gehalten von der Erdanziehung

Phase 5:

Als die Wolke abkühlt, kondensiert die Materie zu Partikeln. Die Umlaufbahnen werden geordneter. Schließlich liegen die Bahnen alle in einer Ebene, und eine Scheibe formt sich. Die darin kreisenden Partikel stoßen gegeneinander, verklumpen und stürzen zumeist auf den Planeten zurück

Phase 6:

Einer der Klumpen wächst zu einer Größe heran, die ihn in einer dauerhaften Umlaufbahn hält – die Erde hat von nun an einen Trabanten, den Mond

Scheibe aus Partikeln kondensiert. Ihre Masse entspricht knapp dem Zweieinhalbfachen des späteren Erdenmondes, der (im Verhältnis zu dem Element Silizium) weniger Eisen enthält als irgendein anderer fester Körper des Sonnensystems. Erklärung: Das Eisen aus jenem marsgroßen Himmelskörper, der in die Proto-Erde eingeschlagen war, ist von deren Gravitation zum größten Teil festgehalten worden und dann mit ihrem Eisen-Nickel-Kern verschmolzen.

Im Laufe der nächsten Tage werden in der um die Erde rotierenden Scheibe aus Silikatpartikeln und anderen, schwereren Stoffen die gleichen Kräfte wirksam, die auch die Planeten geformt haben. Durch Kollisionen ballen sich Klumpen zusammen, die durch weitere Zusammenstöße immer größer werden.

Einer dieser Klumpen dominiert nach etwa 30 Tagen und vereinigt sich im Verlauf der folgenden Monate durch fortwährende Kollisionen mit immer mehr Partikeln und Brocken. Schließlich wächst er zu einem Himmelskörper heran, dessen Masse heute rund 1,2 Prozent der Erdmasse ausmacht: Der Mond ist geboren.

Und dieser Trabant ist inzwischen durchaus imposant: Mit einem Durchmesser von 3476 Kilometern am Äquator ist er der fünftgrößte im Sonnensystem nach dem Jupitermond Ganymed, dem Saturnmond Titan sowie den Jupitermonden Kallisto und Io.

Aam Anfang allerdings hat der Erdenmond wenig Ähnlichkeit mit der heute sichtbaren Himmelserscheinung. Durch die Massenanziehung sammelt er Materie ein. Die Bewegungsenergie der

angezogenen Brocken wandelt sich bei Verschmelzung mit dem Mondkörper in Wärmeenergie um. Durch die dadurch entstehende Hitze bedeckt ein Ozean aus flüssigem Gestein die Oberfläche. Leichtere Anteile steigen nach oben, kühlen ab und kristallisieren zu einer dünnen, hellen Kruste.

In diese Kruste schlagen immer wieder große Asteroiden mit Durchmessern bis zu ei-

MOND-THEORIEN

Ein Doppelplanet?

Die Geburt des Mondes aus einer Kollision der Proto-Erde mit einem anderen Himmelskörper ist die zurzeit von der Mehrheit der Wissenschaftler favorisierte Theorie. Allerdings gibt es drei weitere Hypothesen:

1. Der Mond könnte sich von der sehr schnell rotierenden Proto-Erde durch eine Art „Pirouetten“-Effekt abgeschnürt haben (Abspaltungshypothese).
2. Er könnte sich gleichzeitig mit der Erde aus einer um die Sonne kreisenden Urwolke geformt haben (Doppelplanet-Hypothese).
3. Er könnte sich anderswo im Sonnensystem gebildet haben und von der Erde eingefangen worden sein (Einfang-Hypothese).

Der Planetenforscher Gerhard Neukum vom Institut für Geologie der Freien Universität Berlin etwa beurteilt die Kollisions-Hypothese skeptisch und glaubt eher an die Abspaltung oder den Doppelplaneten. Die Einfang-Hypothese hält er dagegen für extrem unwahrscheinlich.



Der Mond stabilisiert die Erde: Seine Schwerkraft verhindert, dass unser Planet durchs All schlingert

nigen hundert Kilometern ein. Durch die Wucht des Aufpralls reißen zehn bis 20 Kilometer tiefe Krater auf. Unter diesen meist kreisrunden Einschlagbecken entstehen Risse – so genannte Schwächezonen –, durch die zähflüssige Materie aus dem Mondinneren, das **Magma**, leichter an die Oberfläche steigen kann. So füllen sich diese Senken (Mare)

EIN ETWAS ANDERER WINKEL – UND DIE PROTO-ERDE WÄRE ZERPLATZT

über einen Zeitraum von Hunderten von Millionen Jahren mit ausgetretenem Magma – der **Lava**.

Obwohl die Einschläge der Asteroiden auf der ganzen Mondoberfläche gleich häufig sind, finden sich die mit Lava gefüllten Senken vor allem auf der zur Erde gerichteten Seite: Dort ist die Kruste

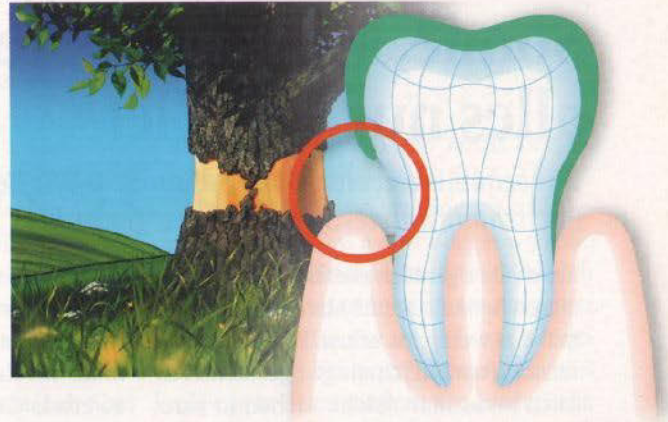
(wohl durch die Einwirkung der Erdgravitation) nur 50 bis 60 Kilometer dick, sodass das Magma leichter an die Oberfläche gelangen konnte – auf der erdabgewandten Seite hingegen ist sie 100 bis 120 Kilometer mächtig.

Nach etwa 600 Millionen Jahren wird das Bombardement sehr viel schwächer. Aber auch heute schlagen immer wieder **Asteroiden** ein und gestalten so die Oberfläche des Mondes.

3,9 Milliarden Jahre später wird der Mond erneut von fremden Körpern heimgesucht, doch dieses Mal treffen ihn keine Gesteinsbrocken, sondern die Rückstoßgase einer Rake, die sanft niederschwebt und zwei Menschen entlässt. Amerikanische Astronauten sammeln Gesteinsproben und bringen sie auf die Erde zurück – Materialproben, deren chemische Zusammensetzung den Erdenbewohnern die Geschichte ihres Trabanten erzählt. □

Henning Engeln, 50, war zehn Jahre lang GEO-Redakteur und hat in dieser Zeit häufig über astronomische Themen geschrieben.

Freiliegende Zahnhälsen, sensible Zähne?



Wenn ein Baum keine Rinde mehr hat, ist er schutzlos der Witterung ausgesetzt. Ähnlich ist es bei Zähnen, wenn die schmerzempfindlichen Zahnhälsen freiliegen und Zahnhalskaries droht.

Das ist der wunde Punkt.

Der freiliegende Zahnhals wird nicht mehr von Zahnfleisch geschützt und ist daher besonders anfällig. Dafür hat die **elmex® Forschung** ein spezielles Schutzsystem entwickelt. Es bietet bei regelmäßiger Anwendung:

- Schutz für sensible Zähne,
- Schutz vor Zahnhalskaries,
- sanfte und schonende Reinigung.

elmex® SENSITIVE Zahnpasta

mit Aminfluorid. Zum Schutz vor empfindlichen Zahnhälsen und Zahnhalskaries. Reinigt sanft und schonend.

elmex® SENSITIVE Zahnbürste

elmex® interX SENSITIVE mit Schon-Borsten, die den empfindlichen Zahnhals nicht angreifen.

elmex® SENSITIVE Zahnsplüsung

mit Aminfluorid. Das duale Wirkprinzip bildet einen doppelten Schutzfilm gegen schmerzhafte Reize und Zahnhalskaries.

Fragen Sie Ihren Zahnarzt.



elmex® SENSITIVE

Schutzsystem für sensible Zähne und freiliegende Zahnhälsen

GABA-Beratungsservice: ☎ 0800/8 85 63 51
montags bis freitags 9⁰⁰ bis 12⁰⁰ Uhr • Internet: www.elmex.de



Sonne, Mond und Sterne – alles nur Unfälle!

Wie beim Autoscooter: Ohne Zusammenstöße lief bei der Entstehung unseres Sonnensystems gar nichts

Haben Sie eigentlich alles behalten, was in diesen Artikeln steht? Mir geht es manchmal ein wenig zu schnell. In Naturwissenschaften bin ich nie gut gewesen. Für mich muss man solche Sachen in ganz einfache Bilder übersetzen.

Ich versuche mal zu wiederholen, was ich bisher verstanden habe. Frage: Wie hat alles angefangen? Das Weltall, die Sonne, oder die Schöpfung, falls Sie dieses Wort mögen. Antwort: mit Unfällen. Offenbar ist der Unfall der Motor von allem! Ohne Unfälle keine Sonne. Folglich keine Menschen.

Zuerst kam der Urknall. Eine Explosion, wie der Name schon sagt. Dann, Milliarden Jahre später, stoßen zwei Galaxien im All zusammen, aus diesem Unfall geht letztlich unsere Sonne hervor. Um die junge, noch ein bisschen verspielte Sonne herum treiben Bröckchen aus Materie, eines davon wird später die Erde. Andere werden andere Planeten. Wieder andere werden gar nix. Wodurch wachsen diese Bröckchen? Indem sie mit ihren Artgenossen zusammenstoßen, dabei verschmelzen sie.

Das Ganze ist sozusagen eine gigantische Kette von Auffahrunfällen. Das, was einmal die Erde wird, stößt schließlich – Unfall Nummer drei – mit diesem mysteriösen, marsgroßen Himmelskörper zusammen, von dem in den Texten immer wieder die Rede ist. Erst dadurch entsteht die Erde, und zwar in genau der Größe, die zu einem ordentlichen Erdesein erforderlich ist.

Wenn das marsgroße Ding nicht in den Himmelskörper-der-einmal-Erde-heißt hineingedonnert wäre, dann wäre alles anders gekommen. Bröckchen, die nicht mit anderen Bröckchen zusammenstoßen, werden nicht zu Planeten, sondern bleiben Sternenmüll.

Fazit: Ohne Zusammenstöße oder Explosionen entsteht im Weltall nichts Neues. Wenn aber nichts Neues entsteht, entsteht natürlich auch nichts Gutes, zum Beispiel so etwas Großartiges und gleichzeitig Komplexes wie Sie oder wie ich. Die Vorgänge im Kosmos sind allerdings bedeutend sinnlicher, als ich mir das vorgestellt habe. Die Atome der Dunkelwolken zum Beispiel, die gemeinsam die Sonne hervorbringen, „reiben sich aneinander“ und „heizen sich auf“, so lange, „bis ihre Kerne verschmelzen“. Wer würde da nicht gern mitmachen?

Durch das All treiben winzige Diamanten. Diamantenstaub. Die Sonne entsteht aus Staub, der sich zusammenbackt. Im Grunde ist alles aus Staub entstanden. Staub warst du, zum Staub kehrst du zurück, heißt es, naturwissenschaftlich völlig korrekt, in der Bibel. Beim Staubwischen denkt unsereins jetzt immer:

»Die Vorgänge
im Kosmos sind
bedeutend sinnlicher,
als ich mir das
vorgestellt habe«

„Du hättest eine Sonne werden können, mein kleiner Freund. Aber du musstest dich unbedingt auf meinen Schreibtisch setzen. Deswegen kommst du jetzt in den Müll, statt Milliarden von Jahren strahlend auf- und unterzugehen.“

Neben dem Unfall und dem Staub ist der Zufall der dritte Patenonkel unseres Universums. Wenn die Erde zum Beispiel ein bisschen kleiner oder größer ausgefallen wäre ... Wenn der Abstand zwischen Erde

und Sonne nur ein bisschen anders wäre ... Wenn wir keinen Mond hätten ...

Es heißt immer: Bei den vielen Milliarden Galaxien und Sonnen, die da draußen herumfliegen, gibt es bestimmt irgendwo Lebewesen, die so ähnlich sind wie wir. Wirklich? Mir kommt inzwischen unsere Erde ziemlich einmalig vor, weil es bei der Erde auf jede Kleinigkeit ankommt.

Ohne den Mond zum Beispiel, der im Maßstab des Kosmos wirklich nur eine Kleinigkeit ist, würde bei uns fast pausenlos ein orkanartiger Wind wehen. Um die 300 Kilometer schnell, fast immer aus dem Osten. Der Tag würde wahrscheinlich nur sechs Stunden dauern statt 24. Denn der Mond verlangsamt die Rotation der Erde.

Wenn die Erde, ohne Mond, schneller rotiert, werden nicht nur die Tage kürzer, auch der Wind wird brutaler. Das Leben auf der Erde würde völlig anders aussehen. Vögel würden es in dem Wind nicht aushalten, die Pflanzen wären womöglich flach wie Briefpapier, viele Tiere hätten vielleicht sechs dicke Beine statt vier dünne. Wir Menschen wären tiefer gelegt wie ein englischer Sportwagen, oder wir wären Dickbeiner, oder extrem windschnittig, wenn es uns überhaupt schon gäbe.

Die Gezeiten, Ebbe und Flut, haben bei der Evolution als Beschleuniger gewirkt, weil die Sedimente vom Land und aus der See sich ständig durchmischten. Mischen ist bei Evolutionen fast immer eine prima Sache. Ohne Mond, mit nur ganz schwacher Ebbe und Flut, wäre alles langsamer gegangen.

Es wäre auch immerzu furchtbar laut wegen des Windes. Die Menschen würden vielleicht nicht miteinander reden, sondern sich anders verständigen, durch Zei-

chensprache, oder Telepathie, vielleicht mit Leuchtzeichen. Weil die Tage so kurz sind, müssen alle alles immer furchtbar schnell erledigen, die Bank hat nur eine Viertelstunde am Tag geöffnet, die Zeitung hat aus Zeitgründen nur vier Seiten, aber der Leser muss sie an seinen dicken Beinen sorgfältig festketten, damit sie nicht wegfliegt.

Oder die Erde wäre zufällig etwas kleiner ausgefallen. Eine Erde mit, sagen wir, einem nur um etwa ein Drittel kleineren Radius hätte natürlich weniger Masse und deshalb weniger Anziehungskraft. Die Atmosphäre wäre dünner. Die Lebewesen müssten eine größere Lunge besitzen und größer sein. Wegen der geringen Anziehungskraft wiegt auf einer kleinen

Erde alles weniger, das ist praktisch für die großen Bewohner. Eine kleine Erde hat den Wärmevorrat im Erdinneren im Lauf der Zeit schon weitgehend verbraucht, das heißt, es gibt kaum Vulkanismus, also ist ihre Oberfläche flach. Die ganze Erde sieht aus wie ein ausschließlich von amerikanischen Basketballspielern bewohntes Schleswig-Holstein.

Wenn nun aber die Erde kleiner ist und es außerdem keinen Mond gibt, wird die Sache richtig kompliziert. Sind wir dann Riesen mit fetten Waden? Oder ganz etwas anderes? Haben die Menschen dann die Form eines Grashüpfers?

Klar, das ist alles Spekulation. Theorie. Aber was, so frage ich mich und Sie, ist in

der Erdgeschichte schon wirklich bewiesen? Einiges, behaupten die Wissenschaftler. Aber es war nie jemand dabei außer Steinen, Staub und Gasen.

Das Kapitel über den Mond zum Beispiel: Der Mond, heißt es, sei ein Abfallprodukt des Zusammenstoßes zwischen der Früh-Erde und dem marsgroßen Ding. Um die Erde herum kreiste nach dem Unfall eine Wolke, die sich abkühlte, zu Klumpen verfestigte, am Ende kam dabei der Mond heraus. Klingt plausibel. Aber

melskörpers mit 36 000 km/h Tempo. Woher wisst ihr das eigentlich?

Diese Frage habe ich einem Astrophysiker gestellt. Das Aufpralltempo 36 000 Kilometer pro Stunde wurde mithilfe von Computersimulationen ermittelt, sagt er. Sie haben im Computer so lange herumgetüftelt, bis bei einem Zusammenstoß mit etwas Marsgroßem am Ende Erde

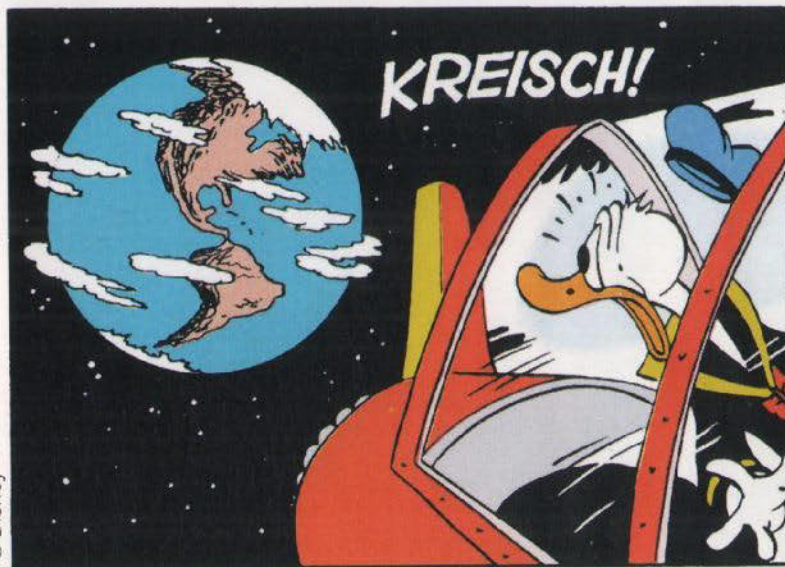
und Mond herauskamen, dazu musste das Marsgroße genau 36 000 km/h schnell sein.

Und 4566 Millionen Jahre ist das Alter des ältesten Meteoriten aus dem Sonnensystem, der jemals auf die Erde fiel. Das heißt, wenn nächste Woche irgendwo ein älterer Meteorit landet, gibt es eine neue Zahl.

Um herauszufinden, dass es 100 Milliarden Galaxien gibt, haben die Wissenschaftler einfach ein kleines Planquadrat des Firmaments genom-

men, gezählt und dann mit der Größe des Alls multipliziert. Man übersieht dabei hin und wieder eine Galaxie, das ist nur menschlich. „Mehr als 200 Milliarden“, sagt der Astrophysiker, „sind es bestimmt nicht.“

Das Leuchten des Urknalls aber strahlt immer noch vom Rand des Universums zu uns. Von dort, wo die Grenze von Raum und Zeit verläuft, diese Grenze, hinter die keiner schauen kann. Dahinter würde dann, gegebenenfalls, Gott sitzen. Oder das nächste Universum anfangen. „Für mich“, sagt der Astrophysiker, „fängt dort die Theologie an.“



haben Sie den kleinen Kasten auf Seite 48 bemerkt? Es gibt noch mindestens drei andere Theorien zur Entstehung des Mondes, jede dieser Theorien hat ein paar Wissenschaftler, die auf sie schwören.

War der Mond eine Art Schwesterplanet der Erde? Kam der Mond aus dem All herangeflogen? Die Unfall-Hypothese gilt zurzeit als Mehrheitsmeinung, aber was heißt das schon? Ein paar hundert Jahre glaubte die Mehrheit der Wissenschaftler, die Erde sei eine Scheibe. Dass eine bestimmte Meinung nur von einer Minderheit vertreten wird, sagt über ihre Glaubwürdigkeit erst mal gar nichts.

Die Zahlen klingen manchmal so verdammt genau: Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren. 100 Milliarden Galaxien. Geburt des Sonnensystems vor 4567 Millionen Jahren. Aufprall des marsgroßen Him-

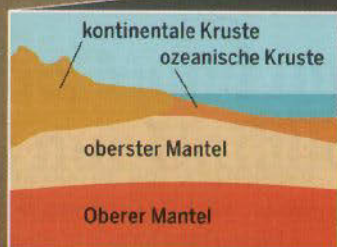
Harald Martenstein, 51, ist Autor in Berlin.

4,6 Mrd.

500 Mio.

Lithosphäre

Asthenosphäre



Der im Durchschnitt 2860 Kilometer mächtige **Erdmantel** besteht aus Gestein, das unter ungeheurem Druck und enormen Temperaturen fließt – die Materie bewegt sich wenige Zentimeter pro Jahr (siehe Seite 76). Mit diesen Strömungen wird Hitze vom Inneren allmählich nach außen transportiert

Der **Äußere Kern** ist gut 4000 Grad Celsius heiß und flüssig. Er ist 2250 Kilometer stark und besteht hauptsächlich aus Eisen und einigen Prozent Nickel

Die **Erdkruste** ist unter den Kontinenten bis zu 70, unter den Ozeanen bis zu zehn Kilometer dick. Sie ist Teil der starren Lithosphäre, unter der eine etwas heißere und daher weichere Schicht folgt – die 100 bis 150 Kilometer mächtige Asthenosphäre

Kurz nach dem Einschlag, der den Mond hervorbringt und den jungen Planeten fast zerreißt, beginnt sich dessen Materie endgültig in Schichten auszudifferenzieren – in Kern, Mantel und Kruste, aus denen die Erde bis heute besteht

Eisen und etwas Nickel bilden auch den **Inneren Kern** mit einem Radius von 1220 Kilometern. Er ist fest – unter anderem, weil noch mehr Materie auf ihm lastet und der Druck folglich höher ist

Anatomie einer Glutkugel

Text: Erwin Lausch

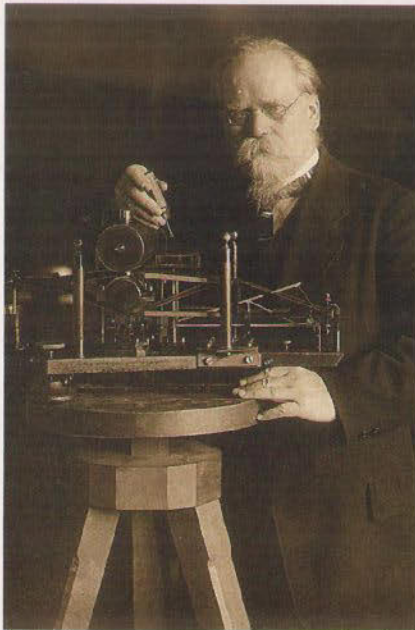
An Fantasie hat es Jules Verne nie gemangelt. 1863 etwa schickte der Altmeister der Science-Fiction drei unerschrockene Männer auf eine „Reise zum Mittelpunkt der Erde“.

Die abenteuerliche Expedition beginnt auf Island. Dort steigen der Hamburger Gymnasialprofessor Otto Lidenbrock, sein Neffe Axel und ihr Führer Hans in einen schlummernden Vulkan. Monatelang klettern sie durch alte Lavakanle, durch Höhlen und Spalten abwärts. In 140 Kilometer Tiefe gelangen sie zu einem Ozean, den urtümliche Landschaften umgeben und ein grauer Himmel überwölbt. Mit einem selbst gebauten Floß fahren die drei aufs Meer hinaus, begegnen urzeitlichen Monstern, denen sie nur knapp ent-

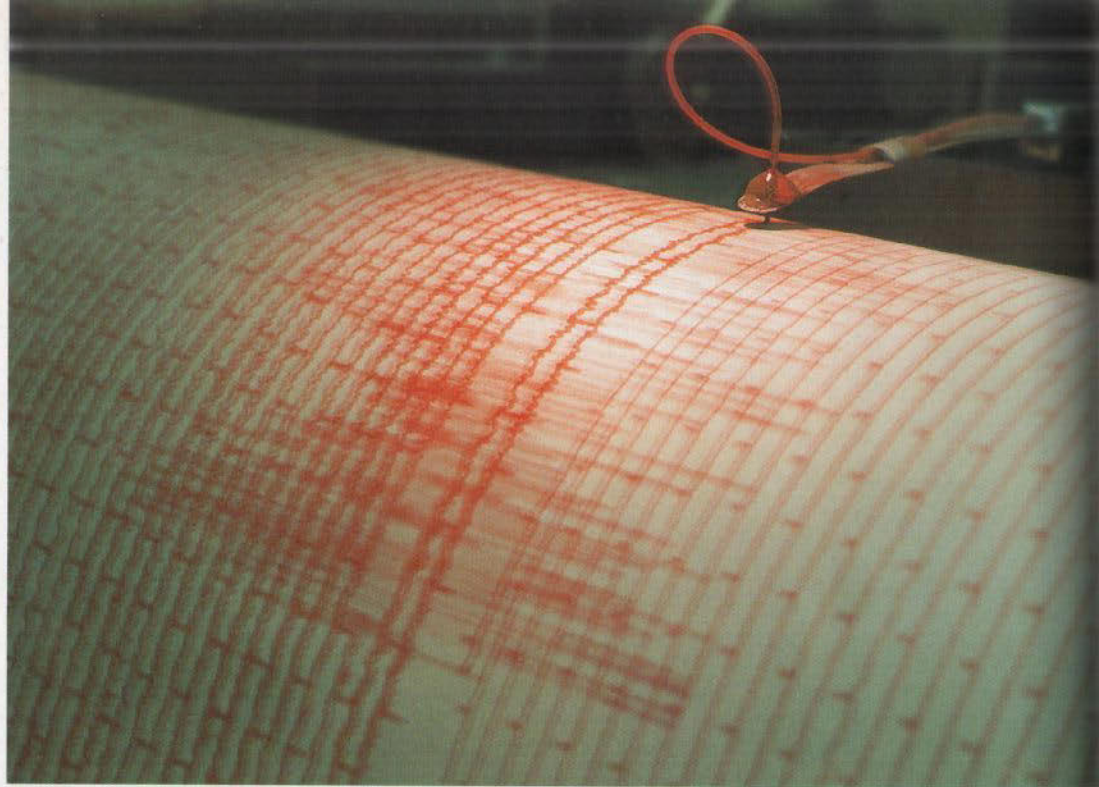
kommen. Wieder an Land, geraten sie in einen Schacht, in dem das Wasser unversehens zu steigen beginnt und sich dabei mehr und mehr erhitzt. Ein Vulkan speit die Tiefenforscher schließlich wieder aus – am Hang des Stromboli finden sie sich etwas mitgenommen, aber wohlbehalten wieder.

Wie es im Inneren der Erde wirklich aussieht, wusste damals niemand zu sagen, und es erschien schier hoffnungslos, darüber etwas erfahren zu wollen. Selbst heute noch gewähren Bergwerke Einblick nur bis in etwa vier Kilometer Tiefe. Bohrungen, bei denen Gesteinsproben emporgezogen werden, führen nur einige Kilometer tiefer.

Das tiefste Loch Deutschlands, das von 1987 bis 1994 in der Oberpfalz als



Emil Wiechert, Geophysiker in Göttingen, begann um 1900, Methoden zur Erforschung des Erdinneren zu entwickeln – und begründete so die Seismologie



Zur Messung von Erdbebenwellen übertragen Nadeln Bodenerschütterungen auf eine von Papier umhüllte Walze. Seismographen dieses Typs werden seit einigen Jahren aber kaum noch benutzt

aufwendiges Forschungsprojekt gebohrt wurde, endete 9101 Meter unter der Erdoberfläche. Den Tiefenrekord halten russische Forscher, die auf der Halbinsel Kola bis in 12 261 Meter Tiefe vorstießen. Bis zum Mittelpunkt der Erde aber sind es im Durchschnitt 6371 Kilometer.

Dennoch ist es Geowissenschaftlern gelungen, Einsichten in das unzugängliche Erdinnere zu gewinnen. Seismologen haben den Planeten mit immer leistungsfähigeren Methoden abgehört, Mineralogen und Petrologen, Hochdruckforscher und Geochemiker aus Analysen und ausgeklügelten Experimenten ihre Schlüsse gezogen. Meteoritenforscher trugen ebenfalls zur Aufklärung bei. Das Ergebnis ist ein erstaunlich detailliertes Bild des Erdinneren. Kern der Erkenntnis: Die Erde hat eine **Schalenstruktur**, sie ist aufgebaut wie eine Zwiebel.

Dass sich Menschen schon im Mittelalter gefragt haben, wie wohl die Erde in ihrem

Inneren beschaffen sei, zeigt unter anderem Dantes 1321 vollendete „Göttliche Komödie“. Darin streift der Dichter gemeinsam mit seinem antiken Kollegen Vergil durch die in der Tiefe gelegene Hölle. Sie begegnen Luzifer, dessen riesenhafte Figur in ewigem Eis steckt. Am zottigen Fell dieses fallenen Engels klettern die beiden abwärts und erreichen bei dessen Lende den Mittelpunkt der Erde.

Ein Erdkern aus Eis stand freilich im Widerspruch zu den Erfahrungen, die Menschen in vielen Teilen der Welt seit jeher gemacht hatten. Vulkanausbrüche und warme Quellen, auch ein vielerorts aus der Tiefe dringender leichter Wärmestrom sprachen eher für ein heißes Erdinneres. „Mir scheint“, befand im 17. Jahrhundert der englische

Chemiker Robert Boyle, „dass es in diesen Eingeweiden der Erde, in die noch niemand eingedrungen ist, große Vorräte von offenen Feuern oder beträchtlich heißen Stellen oder – in manchen Regionen – auch von beidem gibt.“

Ein ersten Anhaltspunkt dafür, woraus die Erde besteht, konnte die mittlere Dichte geben. Um die mittlere Dichte eines Körpers zu bestimmen, muss man dessen Volumen und Masse kennen. Den Umfang der Erdkugel hatte schon Eratosthenes von Kyrene im 3. Jahrhundert v. Chr. auf verblüffend einfache Weise ermittelt (siehe Kasten Seite 57), und damit waren später der Radius und das Volumen leicht zu errechnen.

Die Masse der Erde festzustellen war jedoch viel schwie-

riger. Eine entscheidende Voraussetzung dafür lieferte Isaac Newton mit seinem 1687 veröffentlichten **Gravitationsgesetz**. Aber noch war die Größe der darin enthaltenen Gravitationskonstante – unentbehrlich zur Berechnung der Erdmasse – nicht bekannt. Sie zu bestimmen gelang 1798 dem Engländer Henry Cavendish. Dazu diente ihm ein ungemein kompliziertes Experiment, bei dem er die Anziehung zwischen Bleikugeln maß und das als „Wiegen der Erde“ populär wurde.

Nach immer weiter verfeinerten Messungen wissen wir heute: Der Durchmesser der Erde beträgt am Äquator 12 757 Kilometer und nicht ganz 43 Kilometer weniger an den Polen. Bei einem Volumen von 1083 Milliarden Kubikkilometern hat sie eine Masse von

Seit jeher fasziniert die Menschen, wie es im Inneren der Erde aussieht

Was die Erde aus der Form bringt

Die Erdkugel ist gar keine Kugel – genau genommen. An den Polen ist sie etwas abgeplattet, und bei ganz präziser Betrachtung hat die Erde gar die unregelmäßige Figur einer Kartoffel. Experten sprechen von einem **Geoid**.

Für die Babylonier und andere Völker des Altertums war die Erde eine Scheibe. Dabei hätte Astronomen schon damals auffallen können, dass sich der Erdschatten auf dem Mond immer als Teil eines Kreises abzeichnet, einerlei wie Erde, Mond und Sonne gerade zueinander stehen: Das aber ist nur bei einer Kugelgestalt der Erde möglich. Die Anhänger des griechischen Gelehrten Pythagoras beschrieben im 6. Jahrhundert v. Chr. vermutlich als Erste die Erde als eine Kugel, allerdings mit einem anderen Argument: Da Mond und Sonne Kugeln seien, müsse auch die Erde eine sein.

1687 veröffentlichte Isaac Newton zusammen mit seinem Gravitationsgesetz die These, dass die Erde am Äquator etwas dicker sein müsse als an den Polen, bewirkt durch die von der Rotation ausgelösten Fliehkräfte. Die Kugel wäre demnach ein **Rotations-Ellipsoid**. Nach modernen Berechnungen beträgt der Durchmesser der Erde von Pol zu Pol tatsächlich rund 43 Kilometer weniger als

in der Ebene des Äquators. Bei einem 30 Zentimeter großen Globus würde die Abflachung an jedem Pol etwa einen halben Millimeter ausmachen.

Seit dem 19. Jahrhundert weiß man, dass die Erde selbst als Ellipsoid noch nicht genau genug beschrieben ist.

Im Erdinneren sind die verschieden dichten Gesteine nämlich ungleichmäßig verteilt, was ein unterschiedlich starkes Schwerfeld und damit eine unterschiedlich starke Anziehung bewirkt.

So wird das Wasser der Ozeane, die über zwei Drittel der Erdoberfläche ausmachen, von der Erde unterschiedlich stark angezogen – mit der Folge, dass die Meere Hügel und Täler aufweisen, selbst wenn Wellen, Meeresströmungen und Gezeiten herausgerechnet sind. Dieser fiktive, aus Schweremessungen errechnete Meeresspiegel, auf den sich alle Höhenangaben auf Landkarten beziehen, liegt bis zu 85 Meter über und bis zu 110 Meter unter den Konturen des Ellipsoids. 1872 wurde daher für die mathematische Figur der Erde ein spezieller Begriff eingeführt: das Geoid.

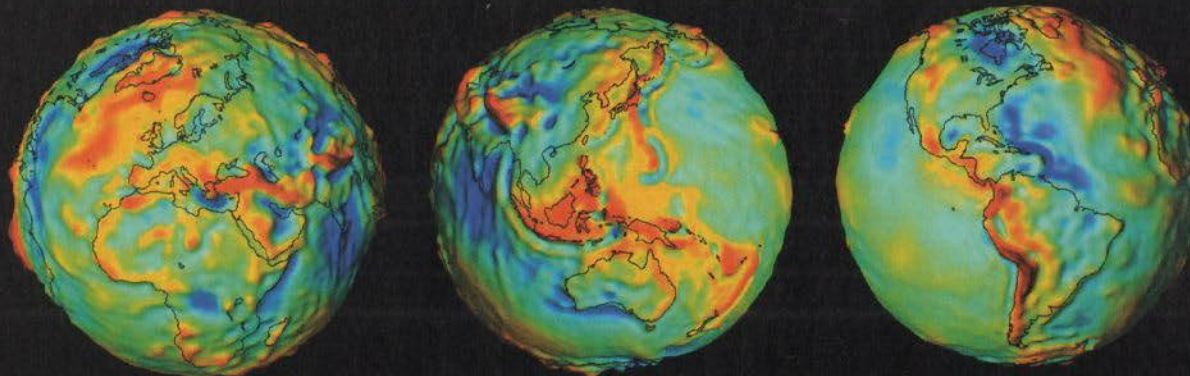
In jüngster Zeit brachten Erdsatelliten die Forscher in ihrem Bemühen, die Form der Erde möglichst exakt zu ermitteln, weiter voran. Allerdings sind für viele Fragen Höhenmessungen von Satelliten nur

dann aussagekräftig, wenn man die Ausgangspunkte der Messungen auf den Satellitenbahnen sehr genau kennt. Durch die ungleichmäßige Masseverteilung im Erdinneren wird die Bahn und Geschwindigkeit der Satelliten nämlich gestört.

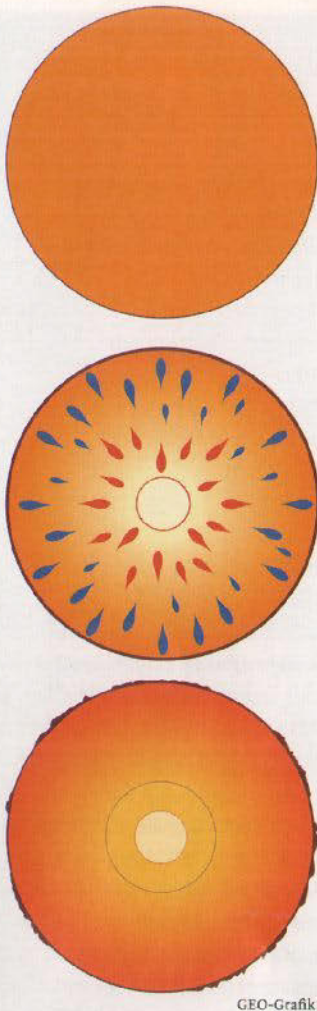
Deshalb erhoffen sich die Geoid-Forscher viel von der amerikanisch-deutschen Mission Grace („Gravity Recovery and Climate Experiment“) zur Erforschung des Schwerfeldes und des Klimas.

In 490 Kilometer Höhe jagen zwei baugleiche Satelliten in einem Abstand von 220 Kilometern um die Erde und messen fortwährend feinste Abweichungen dieser Distanz – auf Tausendstelmillimeter genau. Diese Abweichungen entstehen durch Beschleunigungen und Verzögerungen des einen oder des anderen Satelliten; die wiederum resultieren aus dem jeweils überflogenen Erdschwerfeld. Dank dieser Daten ist das Geoid demnächst womöglich zentimetergenau zu bestimmen.

Präzise genug, um zum Beispiel geringste Höhenveränderungen an Vulkanflanken vor dem Ausbruch erkennen zu können. Auch der Anstieg des globalen Meeresspiegels ließe sich so genauestens verfolgen – was für die Klimaforschung von großer Bedeutung wäre.



Die Erdanziehung ist auf dem Globus nicht überall gleich stark. Das liegt an der unregelmäßigen Verteilung verschieden dichter Gesteine. Dort, wo dichtere Materie oberflächennah konzentriert ist, ist die Anziehung stärker als in Zonen mit weniger dichtem Gestein. Diese auf Satelliten-Messungen der Grace-Mission beruhenden Simulationen zeigen die unterschiedliche Gravitation des Planeten – Rot steht für stärkere Anziehung, Blau für geringere. So ist beispielsweise die Gravitation nördlich von Europa (links) und in der Anden-Region Südamerikas (rechts) größer als südlich von Indien im Indischen Ozean (Mitte)



GEO-Grafik

Die Proto-Erde war heiß und gleichmäßig aufgebaut und hatte vermutlich noch keine Schalenstruktur (ganz oben). Als Planetoideneinschläge und radioaktive Prozesse sie noch mehr aufheizten, schmolz die Materie in ihrem Inneren. Die schweren Bestandteile aus Eisen und Nickel (rot) sanken ins Zentrum. Die leichteren Silikate (blau) stiegen dagegen auf, kühlten an der Oberfläche ab und bildeten eine Kruste. Heute besteht die Erde aus einem sehr schweren Eisen-Nickel-Kern, dem Mantel aus schwerem und einer Kruste aus leichtem Gesteinsmaterial

5974 Trillionen Tonnen. Daraus ergibt sich eine mittlere Dichte von 5,5 Gramm pro Kubikzentimeter (g/cm^3).

Damit erwies sich die Erde als überraschend schwer. Die mittlere Dichte der Gesteine der oberen Kruste ist aber nur halb so groß, nämlich $2,75 \text{ g/cm}^3$. Nur wenige Gesteine erreichen eine Dichte von $3,5 \text{ g/cm}^3$. Was im Inneren der Erde so viel schwerer sein konnte, blieb rätselhaft. Bis die Erforscher der **Meteoriten** ihre Befunde ins Spiel brachten.

Was aus dem All zur Erde fällt, ordnen Experten in zwei große Gruppen:

- Die eine, zu der die große Mehrzahl aller Meteoriten gehört, ist eine Art Urmaterie, die bei der Bildung der Sonne und der Planeten aus dem Sternstaub der protoplanetaren Scheibe übrig geblieben ist. Kennzeichnend für diese Materie ist, dass einzelne Bestandteile – etwa Eisen oder Silikate – noch nicht voneinander getrennt sind. An diesen Meteoriten untersuchen Forscher die physikalischen und chemischen Eigenschaften des frühen Sonnensystems.

- Die andere Gruppe besteht aus „entmischten“ Meteoriten. In ihnen haben sich aufgrund der Gravitation und großer Hitze die verschiedenen Stoffe bereits voneinander gelöst. So kommt es, dass es Meteoriten aus reinem Eisen gibt, andere aus reinem **Silikat** (also Stein) und wieder andere, wo Eisen und Stein zwar noch miteinander vermischt sind, der Differenzierungsprozess aber bereits eingesetzt hat.

Manche Forscher vermuten, dass die entmischten Meteoriten



Prototyp für den Einsatz im Ozean: Forscher haben Sensoren entwickelt, die, von Glas umhüllt und frei drehbar aufgehängt, Erdbebenwellen direkt auf dem Meeresboden registrieren

ten Teile einstmals größerer Himmelskörper waren, in denen sich das schwere Eisen bereits von den viel leichteren Silikaten getrennt hatte und schließlich erstarrt war, bevor sie in kosmischen Kollisionen zu Bruch gingen.

Ließen die Trümmer aus dem All Schlüsse auf das Innere der Erde zu? Waren Eisen und Silikat im Erdkörper vielleicht auch anfangs vermischt gewesen, aber nach und nach voneinander getrennt worden? 1872 warf der Berliner Mineraloge Carl Rammelsberg die Frage auf, ob im Erdinneren vielleicht als schwere Komponente große Mengen Eisen verborgen seien. Eisen hat eine Dichte von $7,9 \text{ g/cm}^3$.

Konkreter wurde die Vorstellung über das Erdinnere

erst, nachdem der Geophysiker Ernst von Rebeur-Paschwitz 1889 in Potsdam entdeckt hatte, dass durch Erdbeben ausgelöste Wellen den gesamten Planeten durchlaufen können. 1902 richtete Emil Wiechert in Göttingen die erste leistungsfähige Erdbebenwarte der Welt ein. Wiechert entwickelte wirksame Methoden, um das Innere unseres Planeten mithilfe der Laufzeiten von **Erdbebenwellen** zu erforschen.

Die Zeichen aus der Erde zu deuten gelang denn auch bald mit wachsendem Erfolg. Als der kroatische Seismologe Andrija Mohorovičić 1909 die Aufzeichnungen eines Bebens in seiner Heimat studierte, entdeckte er, dass die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen in 30 bis 40 Kilometer Tiefe plötzlich zunahm.

Er schloss daraus, dass dort die Untergrenze der Erdkruste liegt. Später fand sich diese „Mohorovičić-Diskontinuität“ überall auf der Erde, wenn auch in unterschiedlichen

Im Verhältnis zur gesamten Erde ist die Kruste kaum dicker als eine Briefmarke auf einem Handball

Tiefen. So ist die Kruste unter den Kontinenten dicker als unter der Tiefsee, am mächtigsten – bis zu 70 Kilometer – unter den großen Gebirgen. Im Verhältnis zur gesamten Erde aber ist die Kruste kaum dicker als eine Briefmarke auf einem Handball.

Je mehr Erdbebenwarten eingerichtet wurden, je mehr Messdaten die Seismologen von einzelnen Beben rund um die Erde registrierten und zueinander in Beziehung setzten, desto tiefer reichte ihr Blick: erst in den mächtigen Erdmantel unter der dünnen Kruste und schließlich bis hinab in den Kern des Planeten.

Die Forscher beobachteten, dass die Geschwindigkeit der durch ein Erdbeben erzeugten Druckwellen bis etwa 2900 Kilometer unter der Erdoberfläche – der Grenze zwischen **Erdmantel** und **Erdkern** – immer weiter zunimmt, in rund 400 und 670 Kilometer Tiefe jedoch jeweils sprunghaft wächst. Wie sich die so ermittelten drei Regionen Oberer Mantel, Übergangszone und Unterer Mantel unterscheiden, blieb zunächst unklar.

In 2900 Kilometer Tiefe offenbarten die Untersuchungen eine spektakuläre Veränderung. Bei einem Teil der Erdbebenwellen, den **P-Wellen**, halbiert sich die Geschwindigkeit nahezu; andere, die **S-Wellen**, scheinen sich spurlos zu verlieren. Solche Messgeräte an der Erdoberfläche, die mit dem Epizentrum eines Bebens Winkel zwischen etwa 100 und 140 Grad bilden, registrieren dementsprechend nur schwache P-Wellen und gar keine S-Wellen: Der Erdkern zeichnet sich als Schattenzone ab.

Genauso hatten sich Erdbebenwellen verhalten, als man sie in Laborversuchen durch

ERDUMFANG

Die geniale Berechnung des Eratosthenes

Im 3. Jahrhundert v. Chr. bestimmte der himmelskundige Mathematiker Eratosthenes von Kyrene, der Leiter der Bibliothek von Alexandria, den Umfang der Erde mit erstaunlicher Präzision. Er verglich an einem bestimmten Tag um die Zeit der Sommer Sonnenwende den Sonnenstand in Alexandria mit dem des heutigen Assuan, das etwa auf dem gleichen Längengrad rund 800 Kilometer weiter südlich und damit nahe am Wendekreis liegt.

Der Gelehrte wusste, dass an diesem Tag in Assuan die Sonne zur Mittagszeit genau senkrecht in einen Brunnen fällt und die Sonnenstrahlen folglich zum Mittelpunkt der Erde gerichtet sind. Über Alexandria hingegen stand die Sonne zur selben Zeit etwas weniger hoch. Ihre Strahlen trafen dort somit nicht senkrecht am Boden auf.

Eratosthenes maß nun in Alexandria die Länge des Schattens, den die einfallenden Sonnenstrahlen auf den Boden eines leeren Brunnens warfen. Nun berechnete er aus dem rechtwinkligen Dreieck, das Brunnenboden, Brunnenwand und Schattengrenze bildeten, den Einfallswinkel der Strahlen. Ergebnis: Der Winkel, in dem Sonnenstrahlen und Senkrechte einander schnitten, machte das Fünfundzwanzigstel eines Kreises aus und musste, wie die unten stehende Skizze zeigt, exakt jenem Winkel entsprechen, den die Senkrechten von Assuan und von

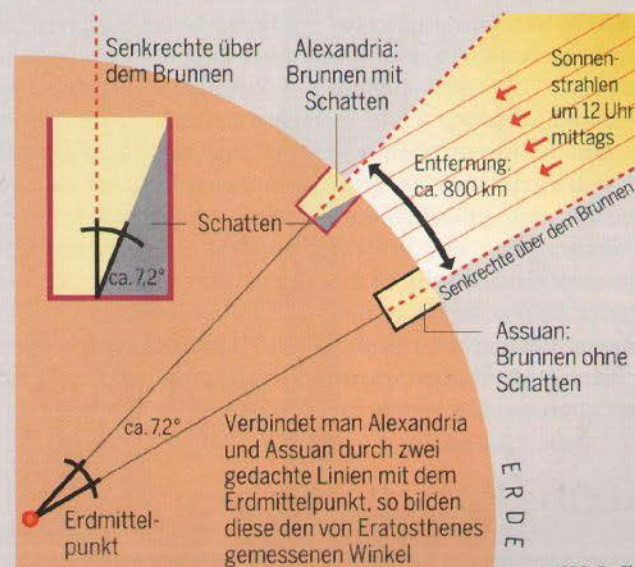
Alexandria zum Erdmittelpunkt miteinander bilden. Somit musste die Strecke über diesem Winkel – die Entfernung zwischen Alexandria und Assuan – auch ein Fünfundzwanzigstel des Erdumfangs ausmachen.

Diese Entfernung schätzte Eratosthenes aufgrund verschiedener Quellen auf 5000 „Stadien“ (ein antikes Längenmaß). Also hatte



Eratosthenes von Kyrene (rechts), wie ihn der Maler Bernardo Strozzi gesehen hat

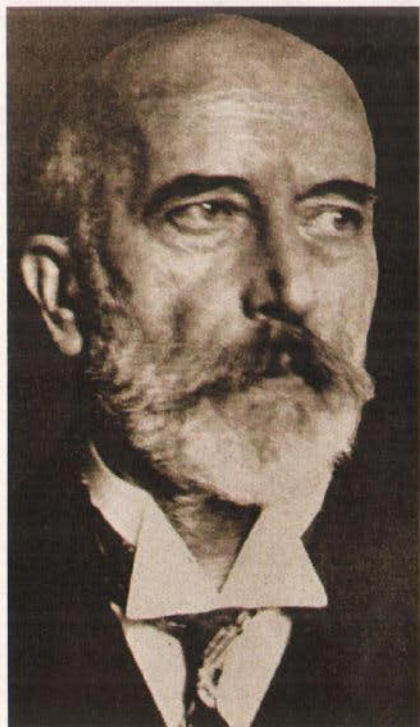
der Gelehrte lediglich 5000 mit 50 zu multiplizieren, um für den gesamten Erdumfang auf 250 000 Stadien zu kommen. 250 000 Stadien aber entsprechen – das im damaligen Ägypten vermutlich gebräuchliche Stadion zu 185 Metern eingesetzt – 46 250 Kilometern. Und das ist ein Ergebnis, das dem mit modernen Methoden gemessenen Wert von 40 075 Kilometern für den Erdumfang am Äquator bewundernswert nahe kommt.



Die Darstellung ist nicht maßstabsgemäß

GEO-Grafik

Durch den Vergleich des Sonnenstands in den ägyptischen Städten Alexandria und Assuan schloss Eratosthenes auf den Winkel, den die Senkrechten durch die beiden Städte mit dem Erdmittelpunkt bildeten. Ermöglicht wurde ihm dies durch die Tatsache, dass Stufen- und Wechselwinkel zu parallelen Geraden, die von einer dritten geschnitten werden, gleich groß sind



Andrija Mohorovičić, ein kroatischer Geophysiker, entdeckte 1909 die untere Grenze der Erdkruste

Flüssigkeiten schickte. Das legte den Schluss nahe, dass der Erdkern flüssig ist. Später leitete die dänische Seismologin Inge Lehmann (siehe Seite 60) aus einer diffizilen Untersuchung über die Geschwindigkeit von P-Wellen im Erdkern eine weitere überraschende Erkenntnis ab: Im flüssigen Kern steckt ein festes Zentrum.

Angesichts der seismologischen Erkenntnisse und der gefundenen Eisenmeteoriten gab es unter Geowissenschaftlern bald keinen Zweifel mehr: Der teils flüssige, teils feste Erdkern besteht aus Eisen. Wahrscheinlich ist er, wie die Brocken aus dem All, mit einigen Prozent Nickel sowie Spuren von Gold, Platin und anderen seltenen schweren Metallen versetzt.

Ein Kern aus reinem Metall wäre freilich etwas zu schwer für eine mittlere Dichte der Erde von $5,5 \text{ g/cm}^3$. Daher nehmen die Forscher an, dass der Äußere Kern zehn bis 15 Prozent eines leichteren Elements, Schwefel oder Sauerstoff, enthält. Da Schwefel und Sauerstoff in Verbindung mit Eisen dessen Schmelzpunkt senken, könnte eine solche Zutat mit ein Grund dafür sein, dass der Äußere Kern flüssig ist.

Außerhalb des Kerns ist alles „Stein“. Mantel und Kruste werden ganz überwiegend aus Silikaten gebildet, meist komplizierten Verbindungen von Silizium mit Sauerstoff und allerlei Metallen. Sauerstoff und Silizium machen, nach Gewichtsanteilen gerechnet, drei Viertel der Erdkruste aus. Mit den sechs häufigsten Metallen Aluminium und Eisen, Kalzium und Natrium, Kalium und Magnesium stellen sie mehr als 95 Prozent des gesamten Krustenmaterials.

Dass der Erdmantel aus dichterem Gestein besteht als die Kruste, hatten die seismologischen Untersuchungen frühzeitig klargestellt. Aber was für ein Gestein gab es da unten? Die Geowissenschaftler fragten sich auch, weshalb sich die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen in rund 400 und 670 Kilometer Tiefe so drastisch verändert.

Um herauszufinden, wie es weitergeht unter der Kruste, starteten amerikanische Forscher 1957 ein Projekt, bei dem ein Loch durch die ganze Erdkruste bis in den Mantel hineingebohrt werden sollte. Das Vorhaben wurde neun Jahre später wegen im-

mer neuer Schwierigkeiten aufgegeben.

Ein besonderer Verlust für die Geowissenschaften war das nicht. Denn bald darauf stellte sich heraus, dass direkt an der Erdoberfläche **Mantelgesteine** studiert werden können, die durch Bewegungen im Rahmen der Plattentektonik (siehe Seite 76) aus bis zu 150 Kilometer Tiefe ans Tageslicht gebracht wurden.

Als Mantelgestein identifizierten die Forscher Peridotit, ein durch Olivin meist grünlich gefärbtes Material. Olivin ist nicht selten Bestandteil jener Meteoriten, die von zertrümmerten Himmelskörpern stammen. Auf der Erde werden olivinreiche Schmelzen gelegentlich von Vulkanen ausgeworfen.

Aus welcher Tiefe solche „Olivin-Bomben“ kommen können, verraten Diamanten, die zusammen mit Peridotit an die Erdoberfläche befördert worden sind: Die Edelsteine bilden sich erst bei einem Druck und einer Temperatur, wie sie in mindestens 120 Kilometer Tiefe herrschen. Mehr noch: Mitunter enthalten Diamanten Einschlüsse anderer Minerale, die sich erst bei noch höheren Drücken in weit größerer Tiefe bilden.

Viele Untersuchungen sprechen dafür, dass der ganze Obere Mantel aus Peridotit besteht. In unterschiedlichen Anteilen und mannigfachen Varietäten bilden drei Gruppen von Mineralen – neben den Olivinen die Pyroxene und die Granate – die Hauptbestandteile dieses Gesteins, dessen Dichte gut zu den Ergebnissen der Seis-

mologen passt. Die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen wächst mit der Tiefe, weil unter höherem Druck die Dichte des Gesteins zunimmt.

Zahlreiche Versuche in Hochdrucklabors zeigten, dass das Gestein im Unteren Mantel die gleiche chemische Zusammensetzung hat wie im Oberen Mantel. Doch die Kristallstruktur unterscheidet sich. Denn der steigende Druck führt dazu, dass die Minerale zu so genannten „Hochdruckmodifikationen“ umkristallisieren. Sie werden dadurch dichter und leiten Erdbebenwellen schneller. Zu gehäuft Umwandlungen kommt es ab 400 und dann wieder ab 670 Kilometern – der Grund dafür, dass die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen in diesen Tiefen sprunghaft wächst.

Durch Hochdruckexperimente konnten Geowissenschaftler klären, dass ein schweres Silikat mit spezieller Kristallstruktur („Perowskit-Struktur“) im gesamten Unteren Erdmantel vorherrscht.

Mit tonnenschweren Hochdruckpressen, in denen millimetergroße Proben extremem Druck von mindestens 250 000 **Atmosphären** ausgesetzt werden können, haben sie Silikat mit Perowskit-Struktur produziert: unscheinbare schwarzbraune Krümel, die ohne entsprechenden Druck dazu neigen, sich in das Ausgangsmaterial zurückzuverwandeln.

Diese unansehnlichen Bröckchen, sonst weithin unbekannt, gehören ins Buch der Rekorde: Da der Untere Mantel etwa die Hälfte der Erdmasse ausmacht, ist Silikat mit Perowskit-Struktur somit das häufigste Mineral der Erde. □

Dr. Erwin Lausch, 75, war 15 Jahre lang Wissenschaftsredakteur bei GEO.

Diamanten – Botschafter aus mindestens 120 Kilometer Tiefe

dtv

Die Geburt und Entwicklung der Erde

Marcus Chown, Physiker und Wissenschaftsjournalist, erzählt die packende Geschichte der großen Forscher und ihrer Entdeckungen von den Anfängen bis in die Gegenwart.

»Ein außerordentlich lesbares Stück Wissenschaftsgeschichte.«
New Statesman

Übersetzt von Kurt Neff
Deutsche Erstausgabe
320 Seiten € 16,-
ISBN 3-423-24323-6



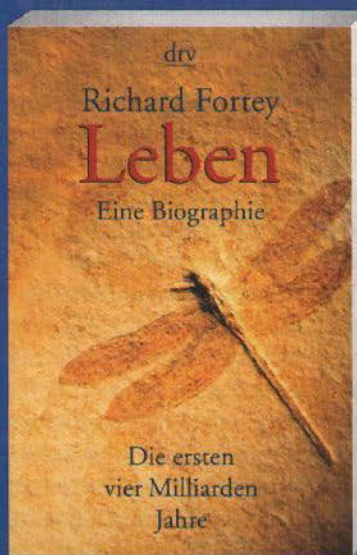
Mit Galilei und seinen Nachfolgern begann die Odyssee der Wissenschaft hinaus in die Unendlichkeit des Weltalls. Und je tiefer wir heute in die schiere Unendlichkeit blicken, desto mehr Geheimnisse entdecken wir.

Wissenschaftsbuch des Jahres

Übersetzt von Dieter Zimmer
192 Seiten € 8,50
ISBN 3-423-34109-2

»Mit seiner Leidenschaft gelingt dem Autor das Kunststück, den Leser für Tiere zu interessieren, deren Namen er vielleicht noch nie gehört hat und die nur noch als versteinerte Schalen oder indirekt als Abdrücke aus uraltem Gestein herausgeschlagen werden können.«
Süddeutsche Zeitung

Übersetzt von
Kurt Beginnen und Sigrid Kuntz
288 Seiten € 10,-
ISBN 3-423-34111-4



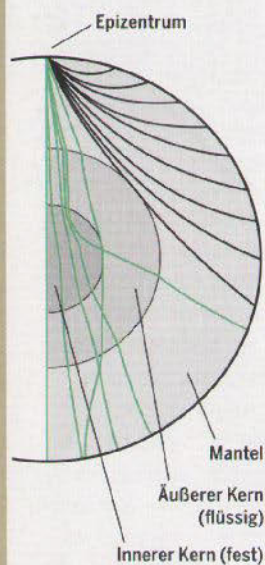
Vier Milliarden Jahre Erdgeschichte, von einem international renommierten Kenner witzig, temperamentvoll und kenntnisreich erzählt. Die wichtigsten Zeugen für Richard Fortey sind dabei Fossilien, und wenn Sie gedacht haben, Fossilien sind langweilig, dann wird er Sie eines Besseren belehren.

Übersetzt von Friedrich Griesse und Susanne Kuhlmann-Krieg
448 Seiten € 15,-
ISBN 3-423-33080-5

Das Geheimnis der P-Wellen

Ein Beben im fernen Neuseeland liefert der Kopenhagener Seismologin Inge Lehmann 1929 entscheidende Hinweise auf die tatsächliche Struktur des Erdinneren. Mit ihren Thesen revolutioniert sie die Lehrmeinung

Text: Jürgen Bischoff



Von einem Bebenzentrum ausgehende Wellen werden je nach Material, das sie im Erdinneren durchqueren, und je nach Einfallswinkel unterschiedlich abgelenkt – und sind an der Erdoberfläche registrierbar. Bestimmte Messpunkte lassen sich nur erklären, wenn man die Ablenkung an einem festen Inneren Kern postuliert (grüne Linien)

Am 17. Juni 1929, morgens um 10.17 Uhr, beginnt auf Neuseelands Südinsel die Erde zu beben. Das Epizentrum liegt im dünn besiedelten Nordwesten, im Buller District, bei dem 300-Seelen-Ort Murchison. Ein dumpfes Dröhnen erfüllt die Luft, und der Boden schwankt so gewaltig, dass sich die Menschen, die in Panik aus ihren Häusern fliehen, kaum auf den Beinen halten können.

Am College von Nelson bricht der Turm zusammen, im Steinbruch von Cobden können sich 30 Arbeiter gerade noch in Sicherheit bringen, ehe Tausende Tonnen Fels ihre Arbeitsplätze unter sich begraben, und ein 75 Kilometer langer und 30 Meter breiter Landstreifen wird um fast einen halben Meter angehoben. Als alles vorbei ist, zählt man 17 Tote, die meisten von ihnen sind unter Erdrutschen erstickt oder in aufgestauten Wassermassen ertrunken.

Mit einer Stärke von 7,8 auf der Richter-Skala gilt das Buller-Erdbeben als eines der schlimmsten, die je Neuseeland erschüttert haben. Seine Druckwellen indes sorgen noch für viele Jahre unter den Geophysikern für Diskussionsstoff – und sie machen eine Wissenschaftlerin im fernen Dänemark zur bedeutendsten Seismologin des vergangenen Jahrhunderts: Inge Lehmann, die Leiterin der seismologischen Abteilung vom Gradmaalingen, dem geodätischen Institut in Kopenhagen. Der damals 41-Jährigen liefert dieses Beben den Schlüssel zu einem der großen Geheimnisse in den Tiefen des Erdballs.

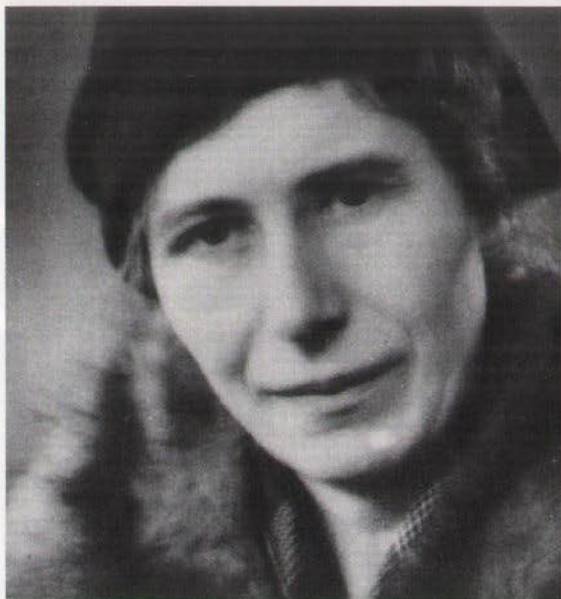
Im Herbst 1925 hat der Institutsdirektor Niels Erik Nørlund Inge Lehmann als seine Assistentin ans Gradmaalingen geholt. Nørlund hat den ehrgeizigen Plan, ausgerechnet im erdbebenarmen Dänemark die Seismologie als wissenschaftliche Disziplin zu etablieren. Er gibt seiner neuen Assistentin den Auftrag, zwischen Kopenhagen und Grönland ein kleines Netz moderner Seismographen installieren zu lassen.

Ursprünglich hat Inge Lehmann Mathematik studiert und danach als Assistentin eines Professors für Wirtschaftsstatistik ihr Geld verdient. Doch dann kam Nørlund. „Das Erdinnere fand ich ausgesprochen spannend“, schreibt Inge Lehmann später, „und ich begann, alles zu lesen, was ich darüber finden konnte.“ Wissbegierig reist sie monatelang in Europa herum und lässt sich von den erfahrensten Seismologen des Kontinents in die Geheimnisse der Erdbebenkunde einweisen.

Zu ihren Lehrern gehört auch der junge Geophysiker Beno Gutenberg, dem im Jahre 1912 nach der Analyse von Erdbebenwellen der Nachweis gelungen ist, dass in etwa 2900 Kilometer Tiefe die Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern verläuft. Dass dieser Erdkern zudem flüssig sei, hat bereits im Jahre 1906 der britische Geologe Richard Dixon Oldham vermutet. Und 1926 präziserte der Geophysiker Harold Jeffreys, ebenfalls Brite, dass der flüssige Kern vor allem aus Eisen bestehe.

Mithin scheint hinreichend geklärt, wie sich die Erde in ihrem Innersten zusammensetzt, als Inge Lehmann im Jahre 1930 in Kopenhagen damit beginnt, jene Kurven auszuwerten, welche die Messgeräte in aller Welt von der Katastrophe im Buller District gezeichnet haben. Akribisch notiert sie auf kleinen Pappkärtchen, die sie in Haferbreikartons verwahrt, all jene Observationspunkte sowie die Laufzeiten, die die Druckwellen des Bebens benötigen, bevor sie in anderen Teilen der Erde registriert werden konnten. So entsteht Kärtchen für Kärtchen eine Datenbank.

Die Seismologin untersucht vor allem die so genannten P-Wellen, die nach einem großen Beben vom Epizentrum aus den gesamten Erdball durchlaufen. Inge Lehmann vermerkt die Messwerte, bis ihr auffällt, dass etwas nicht stimmt: Auf das Buller-Erdbeben haben Seismographen auch an solchen Orten reagiert,



Inge Lehmann
(1888–1993)
erkennt als Erste,
dass sich im Zentrum
des flüssigen ein harter
Erdkern befindet

an denen sie nach damaligem Wissensstand gar keine P-Wellen hätten registrieren können.

Denn nach einem Beben sind die schnellen P-Wellen, die Kompressionswellen, die Einzigen, die den Erdkern mit nur geringer Ablenkung durchqueren. Zumindest trifft das auf diejenigen P-Wellen zu, die sich quasi senkrecht vom Epizentrum entfernen und dadurch steil auf den Kern treffen. Jene hingegen, die den Erdmantel schräg durchlaufen, werden dort, wo der Mantel in den flüssigen Kern übergeht, mehrfach abgelenkt. Zwischen den Endpunkten der gerade durchlaufenden und der gebrochenen Wellen entsteht auf der Erdoberfläche ein „toter“ Bereich, in dem der Theorie nach keine seismischen Wellen zu messen wären. Diese so genannte Schattenzone umfasst etwa das Gebiet, das zwischen 100 und 140 Grad vom Beben entfernt liegt.

Beim Buller-Erdbeben aber hat sich die Praxis nicht an die Theorie gehalten. Denn ausgeschlagen haben nicht nur Seismographen in Europa, sondern auch Geräte im sibirischen Swerdlowsk und in Irkutsk am Baikalsee – die aber liegen in der Schattenzone des Buller-Bebens.

Obwohl sie all dies nicht erklären kann, veröffentlicht Inge Lehmann ihre Beobachtungen in einer Fachzeitschrift. Doch keiner ihrer Kollegen merkt auf – die meisten tippen auf einen schlichten Messfehler. Die Dänin aber nimmt sich die Messungen wieder und wieder vor, stellt immer neue Berechnungen an und findet schließlich die Lösung: Ihre Aufzeichnungen ergeben sofort einen Sinn, wenn man davon ausgeht, dass ein Teil der P-Wellen ein weiteres Mal abgelenkt wird – und zwar innerhalb des Erdkerns.

Eine gewagte Hypothese. Für Inge Lehmann bedeutet sie, dass der Erdkern eben nicht nur aus flüssigem Metall besteht. Sondern dass sich in dem weichen äußeren Kern noch ein fester innerer verbergen muss. Nach dieser Annahme ist das Modell, das sich die Geo-

physiker bis dahin vom Aufbau der Welt gemacht haben, schlicht falsch.

Die Dänin schreibt an Harold Jeffreys nach Cambridge und teilt ihm ihre Schlussfolgerungen mit. Der aber ist nicht interessiert, ebenso wenig sind es die anderen Größen seiner Zunft: Ihrer Meinung nach ist der Erdkern flüssig, und dabei bleibt es.

Vier Jahre denkt Inge Lehmann über ihre Theorie nach. „Sie zeichnet sich schließlich ein sehr einfaches Modell, bei dem sie die P-Wellen als gerade Linien darstellt“, berichtet der dänische Seismologe Erik Hjortenberg. „Und dabei bemerkt sie, dass auch die Laufzeiten der Wellen, die bei einem homogen flüssigen Kern theoretisch hätten gemessen werden müssen, nicht mit der Realität übereinstimmen.“ Das ist der Moment, in dem sich die Seismologin entschließt, ihre Entdeckung zu publizieren. Die Veröffentlichung erscheint 1936 auf 28 Seiten in der Publikation des Bureau Central Séismologique International in Straßburg, und sie trägt den schlichten Titel: „P“.

Plötzlich ist die Welt vom Kopf auf die Füße gestellt. Beno Gutenberg, inzwischen Professor in Kalifornien, begreift schnell, dass Inge Lehmanns Berechnungen stimmen müssen. Gemeinsam mit seinem Kollegen Charles Richter ermittelt er zwei Jahre später den Radius dieses neu entdeckten Inneren Kerns: 1200 Kilometer. Harold Jeffreys indes braucht noch ein weiteres Jahr, ehe er seinen Irrtum eingesteht.

Inge Lehmann stirbt 1993 im Alter von fast 105 Jahren. Die große alte Dame der Seismologie hat zeitlebens nur ein echtes Erdbeben selbst erlebt: in ihrem Elternhaus in Kopenhagen, im Alter von 15 oder 16 Jahren. Lakonisch notiert sie noch kurz vor ihrem 100. Geburtstag, wie jenes Beben einst auf sie gewirkt hat: „sehr eigenartig“.

Jürgen Bischoff, 50. ist Reporter in Hamburg.



Bei ihrer Daten-Analyse des Buller-Bebens, das auf Neuseeland unter anderem Straßen aufgerissen hat, stützt sich Inge Lehmann auch auf Forschungen eines ihrer Lehrer, des deutsch-amerikanischen Seismologen Beno Gutenberg (2. v. l.)

Feuer aus der

Seit ihrer Entstehung ist die Erde ein glühend heißer Planet – im Kern herrschen heute bis zu 4300 Grad Celsius, im Mantel bis zu 3200 Grad. Zwar schirmt das Krustengestein diese Hitze nach oben hin gut ab. Doch manchmal stößt sie – besonders aus Vulkanen – mit Urgewalt empor

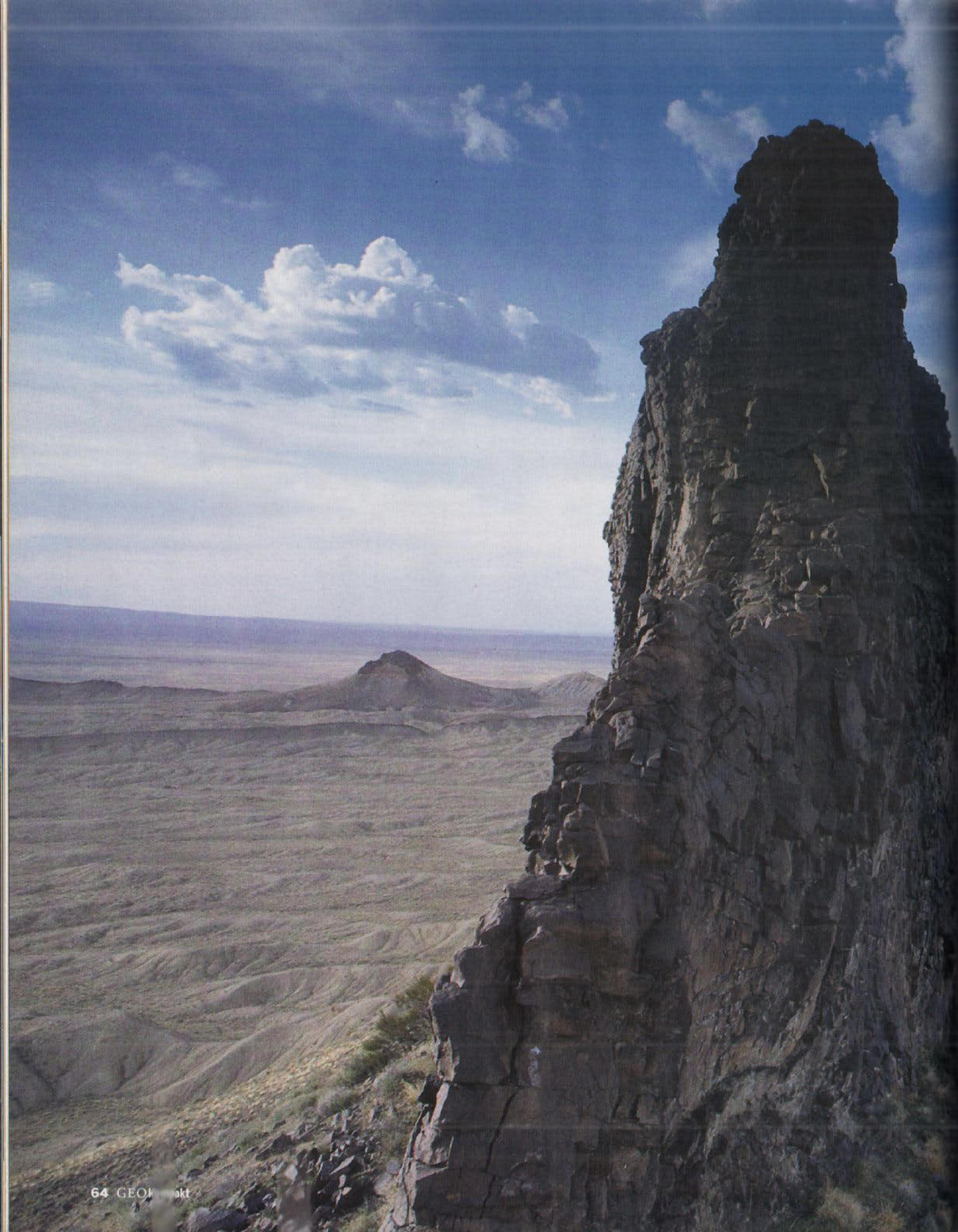
Text: Erwin Lausch

Vulkanausbruch Kamtschatka/Russland

Bei einer Eruption im Jahr 1975 häufte der Tolbatschik an einer Flanke in nur fünf Tagen einen Gesteinskegel von 165 Meter Höhe auf. Dieser Vulkan auf der sibirischen Halbinsel Kamtschatka gehört zu einer Reihe von Feuerbergen, die sich am Rand einer Erdplatte erheben (siehe Seite 72). Dort steigt Magma – geschmolzenes Gestein – aus der Tiefe empor und formt neue Vulkane

Tiefe







Magmagebirge New Mexico/USA

Vor gut 30 Millionen Jahren schoben sich im heutigen US-Bundesstaat New Mexico enorme Mengen Magma in der Kruste empor, erstarrten aber knapp 1000 Meter unter der damaligen Erdoberfläche. Nach und nach erodierte das umgebende Gestein – bis auf das härtere erstarrte Magma. Die größte der dadurch entstandenen bizarren Formationen ist rund 600 Meter hoch. Die von ihr abzweigenden Gesteinsgänge sind noch in Fragmenten (vorn) erhalten



Lavastrom

Hawaii/USA

Glühende Lava ergießt sich im Mondlicht über die Hänge des hawaiischen »Hot Spot«-Vulkans Kilauea. Das 800 bis 1200 Grad Celsius heiße Gestein legt einen Kilometer pro Tag zurück. Quelle der Laven ist ein so genannter »Plume«, eine Säule aus geschmolzenem Gestein, das aus großer Tiefe aufsteigt und an der Oberfläche an einem Hot Spot (siehe Seite 71) ausströmt







Geysir Island

15 Meter hoch schießt eine Fontäne aus dem Strokkur, einem der zahlreichen »Wasservulkane« auf Island. Zu solchen Eruptionen kommt es, wenn Wasser auf Magma trifft. Versickerter Regen gelangt über ein Geflecht von Rissen im Boden in die Nähe heißer Magmazonen und wird stark erhitzt. Dabei dehnt er sich explosionsartig aus, verdampft und presst das darüber liegende Grundwasser nach oben

Deutschlands tiefstes Loch, von 1987 bis 1994 in der Oberpfalz gebohrt, sollte ursprünglich noch viel tiefer werden. Dass bei 9101 Metern und nicht erst bei zwölf oder gar 14 Kilometern Schluss war, lag wesentlich an der Temperatur, die mit größerer Tiefe über Erwarten schnell bis auf 270 Grad Celsius angestiegen war.

Was war da los im Untergrund? Eigentlich nichts Besonderes. Die Temperatur der Erdkruste nimmt über die ersten zehn Kilometer im Durchschnitt um drei Grad Celsius je 100 Meter Tiefe zu. Die Initiatoren des Bohrprojekts hatten nach umfangreichen Voruntersuchungen auf einen langsamen Anstieg gesetzt – und sich schlicht verkalkuliert.

An die Oberfläche dringt die Wärme aus dem Erdinneren nur als schwacher Energiestrom mit durchschnittlich 0,08 Watt pro Quadratmeter. Dass aber gar nicht weit unter der Oberfläche schon Höllenhitze herrscht, bleibt uns normalerweise verborgen, weil das Krustengestein unserer Erde so gut gegen Wärme isoliert.

Tatsächlich aber leben wir auf einem Feuerball, der unter enormem Druck steht. Dieser Druck nimmt mit der Tiefe nach relativ einfachen physikalischen Gesetzen zu und erreicht 3,6 Millionen Atmosphären im Erdmittelpunkt. Das konnten die Geophysiker errechnen, sobald sie den Aufbau der Erde mit ihren Schalen unterschiedlicher Dichte kannten.

Die Temperaturen im Erdinneren zu bestimmen war dagegen schwieriger. Denn das Wissen darüber, wie sie sich nahe der Erdoberfläche verhalten, hilft in der Tiefe nicht weiter. Stiege die Temperatur wie in der Kruste linear immer

weiter an, würde sie im Erdmittelpunkt fast 200 000 Grad Celsius erreichen. Unmöglich, schließlich haben seismologische Untersuchungen ergeben, dass der Erdmantel wie auch der Innere Kern fest und nicht geschmolzen sind.

Wie heiß das Erdinnere wirklich ist, haben Experimente in Hochdrucklabors gezeigt. Dabei wurden Proben von der gleichen Zusammensetzung wie der des Mantelgesteins erhitzt und zugleich dem Druck einer bestimmten Tiefe ausgesetzt. Dann schickten die Forscher Ultraschallwellen hindurch. In langen Versuchsreihen bestimmten sie, bei welcher Temperatur diese Wellen mit welcher Geschwindigkeit durch die Gesteinsprobe eilten.

Um nun die Temperatur im flüssigen Äußeren Erdkern bei dem entsprechenden Druck zu ermitteln, pressten Forscher staubkorngroße Proben zwischen zwei Diamanten in eine Art Schraubzwinge. Diamanten sind das härteste bekannte Material. Weil sie auch durchsichtig sind, konnten die gepressten Proben von außen durch den Strahl eines Infrarotlasers erhitzt werden, und durch ein Mikroskop war zu beobachten, bei welcher Tem-

peraturen Füßen kaum als Wärme spüren, hat sie dennoch enorme Auswirkungen auf die Erdoberfläche. Energie aus der Tiefe steigt bis in die Erdkruste auf und reißt sie auseinander.

Die aufsteigende Hitze lässt die **Vulkane** speien und die Erde seismisch erzittern. Unter ihrem Einfluss türmen sich Gebirge auf, und die Böden der Ozeane sind ständig in Bewegung – weg von den mittelozeanischen Gebirgsrücken, den Geburtsstätten der ozeanischen Kruste, hin zu jenen Tiefseegräben, in denen Meeresböden zurück ins Erdinnere gleiten.

Ihre Energie bezieht die Wärmekraftmaschine Erde aus zwei Quellen: je etwa zur Hälfte aus dem Zerfall natürlich radioaktiver Elemente und aus dem „Ausfrieren“ von Eisen.

Durch radioaktiven Zerfall heizen vor allem bestimmte Isotope der Elemente Uran, Thorium und Kalium den Erdmantel und die Erdkruste auf. Und im Erdkern lagern sich Eiseinteilchen aus der Schmelze an das feste Zentrum an; dabei wird Wärme freigesetzt – so wie umgekehrt Wärme erforderlich ist, festes Eisen zu schmelzen.

Um die im Erdinneren ständig produzierte Wärme

Wirksamer fördert die **Konvektion** den Energietransport: Dort, wo das Mantelgestein besonders kräftig erhitzt wird, dehnt es sich stärker aus. Es wird dadurch etwas leichter als die Umgebung und drängt nach oben. Kühleres, schwereres Gestein sinkt hingegen ab. Aber auch so dauert es Jahrmillionen, bis Wärme aus dem Kern in die Nähe der Erdoberfläche aufsteigt.

Unter dem ungeheuren Druck und der Hitze im Erdinneren reagiert Gestein wie eine leicht plastische Masse. Geowissenschaftler führen zum Vergleich das Eis in einem Gletscher an: Es ist unheimlich hart, und doch verformt es sich, wenn der Gletscher talwärts fließt.

Besonders plastisch reagiert das Gestein in 70 bis 200 Kilometer Tiefe – das schlossen Seismologen aus den in dieser Region besonders langsam laufenden Erdbebenwellen. Beim allmählichen Aufstieg des Gesteins hat der Druck nämlich immer weiter abgenommen, und mit dem Druck sind die Schmelztemperaturen der im Gestein enthaltenen Minerale abgesunken. Kommen sie im Oberen Erdmantel mit Wasser in Berührung, entsteht eine Schmelze, die sich ihren Weg in die darüber liegende Kruste bahnt.

Magma erstarrt dort zu Gestein, das in den mittelozeanischen Rücken die seitwärts davongleitenden Erdplatten ergänzt (siehe Seite 76). Der widerstandsfähigere, nicht geschmolzene Rest des Mantelgesteins breitet sich seitwärts aus und bildet die Unterlage für die Platten, die nach mehr oder weniger weiter Reise in den Mantel abtauchen.

Wie tief sie sinken, hat unter Geowissenschaftlern zu heftigen Diskussionen geführt. Tauchen die Platten bis zum

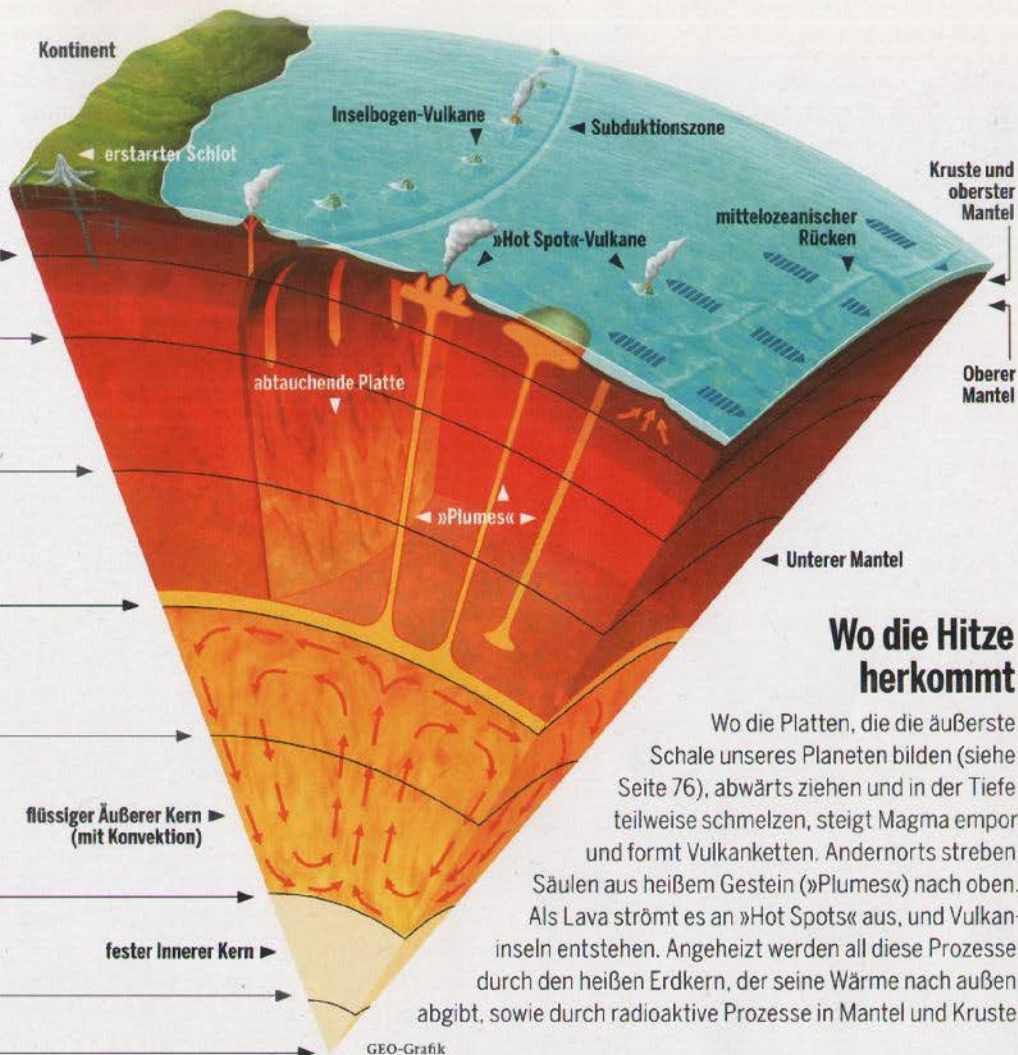
Das heiße Erdinnere befeuert nicht nur Vulkane, sondern setzt auch Erdplatten in Bewegung

peratur die Probe schmolz. Das Ergebnis der Messungen: Die Temperaturen im flüssigen Erdkern müssen zwischen 3200 und 4000 Grad liegen. (Andere Verfahren freilich lieferten bis zu mehrere tausend Grad höhere Temperaturen.)

Auch wenn wir die innere Glut des Planeten unter un-

abzuleiten, genügt die einfache Weitergabe von Atom zu Atom oder Molekül zu Molekül – die Wärmeleitung – nicht: Erdmantel und Kruste sind sehr schlechte Wärmeleiter. Im Mantel käme Wärme in fast fünf Milliarden Jahren nicht einmal 400 Kilometer weit voran.

Tiefe in km	Druck in Kilobar	Temp. in °C
0	0	20
400	150	1400
1000	350	1900
2000	850	2200
2900	1400	3200
4000	2400	3900
5110	3300	4000
6000	3500	4300
6230	3600	4300



Wo die Hitze herkommt

Wo die Platten, die die äußerste Schale unseres Planeten bilden (siehe Seite 76), abwärts ziehen und in der Tiefe teilweise schmelzen, steigt Magma empor und formt Vulkanketten. Andernorts streben Säulen aus heißem Gestein (»Plumes«) nach oben. Als Lava strömt es an »Hot Spots« aus, und Vulkaninseln entstehen. Angeheizt werden all diese Prozesse durch den heißen Erdkern, der seine Wärme nach außen abgibt, sowie durch radioaktive Prozesse in Mantel und Kruste

Grund der 2900 Kilometer tiefen Grenze zwischen Mantel und Kern? Oder gibt es zwei Kreislaufsysteme übereinander, welche die Platten hinab- und Energie herauftransportieren? Immerhin geht es hier um die Frage, wie die Wärmekraftmaschine Erde im Einzelnen funktioniert.

Wichtige Hinweise darauf, dass zumindest ein Teil der Platten bis auf den Grund des Erdmantels sinkt, hat die seismische Computertomographie geliefert, ein besonders aufwendiges Verfahren zur Analyse von Erdbebenwellen.

Dabei werden ungeheure Datenmengen mit Computerhilfe zu Schnittbildern verarbeitet, auf denen die seismische Geschwindigkeit und damit auch die Temperaturunterschiede des Gesteins

innerhalb der gleichen Tiefenstufe auszumachen sind.

Manche Bereiche deuten auf wärmeres, aufsteigendes Gestein – sie werden von Erdbebenwellen langsamer durchlaufen. Andere Regionen lassen auf absinkende kühlere Massen schließen – dort werden die Wellen schneller. Entsprechend erstellte Schnittbilder zeigen in große Tiefe abgesunkene Platten, die noch Millionen Jahre lang starrer sind als ihre Umgebung.

Nach herrschender wissenschaftlicher Meinung landen die alten Platten am Grunde des Erdmantels, und dort wird ihnen ordentlich eingeheizt. Direkt über dem Kern zeichnet sich in den seismologischen Aufzeichnungen eine etwa 200 bis

300 Kilometer dicke, auffällige Schicht ab, ungleichmäßig zusammengesetzt und relativ heiß. Sie gilt als Schauplatz eines grandiosen Recyclings.


Aus dieser Schicht steigt an manchen Stellen wie in einem Schlot besonders stark erhitztes Gestein bis unter die Lithosphäre auf, wo die **Mantel-Plumes** (englisch: Feder, Federschmuck, auch Rauchwolke) dann auseinander fließen. So kann ein **Hot Spot** entstehen, ein „heißer Fleck“, über dem Vulkane über Jahrtausende Lavamassen austößen. Immer wieder im Laufe der Erdgeschichte hat hier ein **Super-Plume** so viel Lava an die Erdoberfläche befördert, dass riesige Gebiete kilometerhoch mit schwerem Gestein bedeckt worden sind.

Viel Bewegung im Erdmantel also. Doch wie passt das mit

der von den Seismologen so gut belegten Schalenstruktur der Erde zusammen? Zur Erklärung führen die Forscher an, dass die Grenzen im Mantel ja nicht durch Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung bestimmt werden, sondern dadurch, dass die Mineral-Kristalle aufgrund des Drucks dichter gepackt werden („umkristallisieren“).

Der Druck aber bleibt innerhalb der jeweiligen Tiefenstufe konstant. Geraten Minerale auf dem Weg nach oben unter geringeren Druck, werden sie an den Schalgrenzen in andere, weniger dichte verwandelt, beim Abstieg hingegen geschieht das Umgekehrte.

Und deshalb bleiben bei aller Bewegung die für Seismologen messbaren Grenzen stets die gleichen. □



urozean | vor 4,2 mrd. Jahren

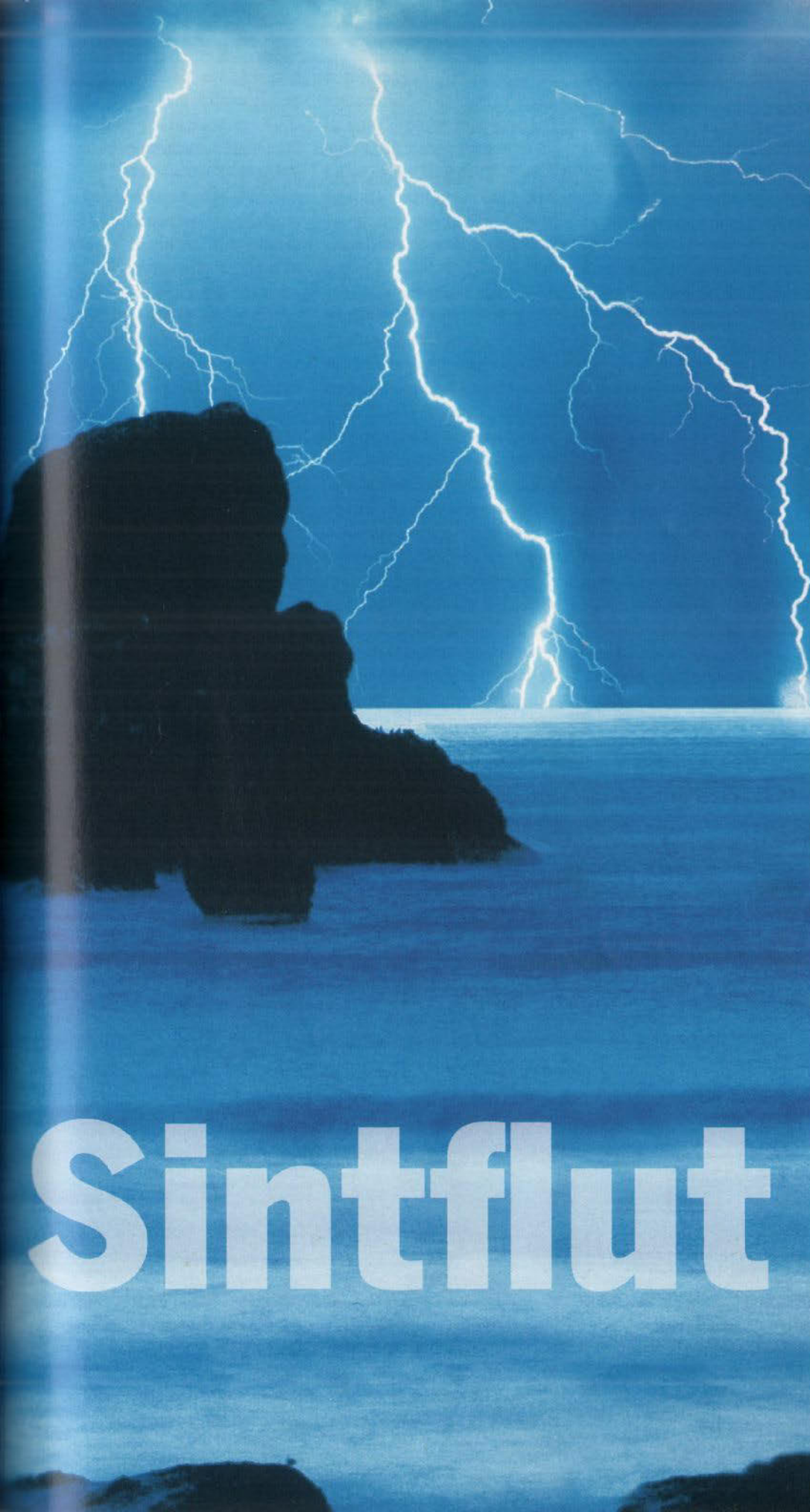
4,6 Mrd.

500 Mio.

Text: Claus-Peter Sesin, Carsten Riedel

Aus ihrer wasserdampfreichen Atmosphäre ergießt sich in der Frühzeit der Erde ein unermesslicher Regenschwall. Er sammelt sich im Urozean und trägt durch Erosion des Erdkrustengesteins zur Entstehung der Kontinente bei

Die erste



Sintflut

Die erste Uratmosphäre der Erde war kaum mehr als ein Hauch. Sie bestand hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium – den Gasen des Urnebels, aus denen sich auch die Sonne gebildet hatte.

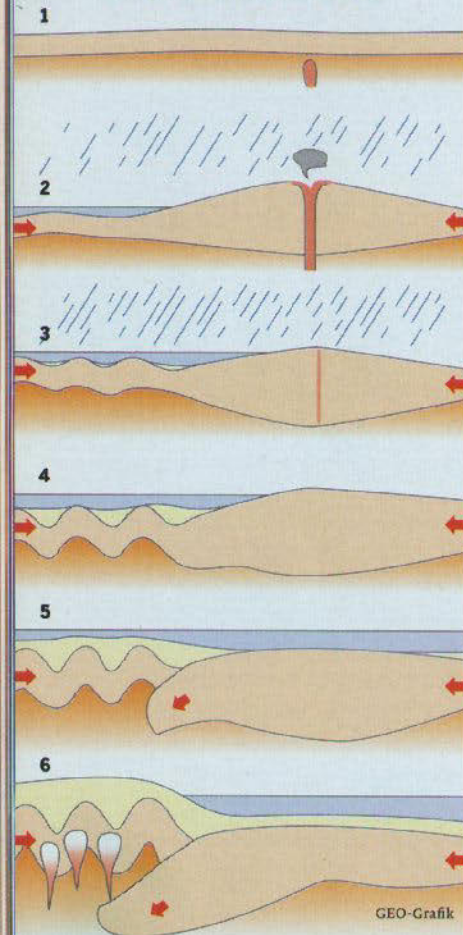
Damals wuchs unser Heimatplanet noch: In den ersten 200 Millionen Jahren nach seiner Geburt traf ihn ein Trommelfeuer kosmischer Gesteinsbrocken, die er sich einverleibte und die ihn immer umfangreicher werden ließen. Entsprechend nahm seine Schwerkraft zu.

Lange jedoch konnte sich die erste Uratmosphäre, die rund 100-mal dünner war als die heutige, nicht halten. Die Sonne schleuderte in jener Zeit ständig große Mengen ihrer eigenen Substanz mit hoher Geschwindigkeit ins All. Noch heute geht von unserem Heimatstern unablässig ein „Sonnenwind“ aus geladenen Teilchen aus. Der damalige Sonnenwind indes glich mehr einem Sturm: Er blies die erste Uratmosphäre der Erde fast vollständig fort.

Unterdessen nahm die Erde nicht nur weiter an Umfang zu, sondern sie wurde auch immer heißer: Die mit hoher Geschwindigkeit auf sie einprasselnden Steinbrocken – einige waren mehr als 100 Kilometer dick – setzten beim Einschlag enorme Energie frei, welche die Erde im Inneren aufschmolz. Die schwereren Bestandteile der Schmelze, vor allem Eisen, wurden von der Schwerkraft ins Zentrum des Planeten gezogen. Leichtere Gesteine hingegen trieben an die Oberfläche.

Aus der Gesteinsglut lösten sich außerdem riesige Mengen Gase. Die schossen

Land entsteht



Zunächst ist die Erde von einer primitiven Kruste bedeckt (1). An manchen Stellen bricht Magma durch und türmt Vulkane auf (2). Als der große Regen fällt und sich zum Urozean sammelt, wird das Gestein der Vulkane abgetragen (3). Nachwachsende Erdkruste (siehe Seite 76) presst die bereits vorhandene zusammen; in deren Falten lagert sich das erodierte Gestein als Sediment ab (4). Dieser Teil der Kruste wird dicker, ist aber durch Hohlräume relativ leicht – und schiebt sich über die schwere Urkruste (5). Der untere Teil der Sediment-Krustenschicht schmilzt und dringt als Magma nach oben. Dort erstarrt die Schmelze zu Granit. Die Kruste wird dicker und leichter als ihre Umgebung – und erhebt sich als Kontinent aus dem Urozean (6).

an die Erdoberfläche und entluden sich in gigantischen Vulkanausbrüchen. Die gesamte Oberfläche des Planeten war mit glühender Lava überzogen, die erst allmählich zu basaltischem Gestein erstarrte. Das Schwerefeld der Erde nahm dabei nach und nach auf die annähernd heutige Stärke zu und konnte die Gase dadurch immer besser halten.

Diese Hexenküche gebar die zweite **Uratmosphäre** – eine extrem dichte und heiße Dampf Wolke, die den gesamten Globus umgab. Sie bestand anfangs vor allem aus dem, was die Vulkane ausgespien hatten – und auch heute noch ausspeien: aus Wasserdampf (71 Prozent), Kohlendioxid (23 bis 24 Prozent), Stickstoff (5 bis 6 Prozent) und geringen Mengen Schwefelverbindungen. Aber auch zahlreiche mit der Erde kollidierende Himmelskörper setzten beim Aufschlag Gase frei – darunter Wasserdampf, Ammoniak und Methan.

Nachdem die dichte, erdumspannende Dampf Wolke und die Erde selbst sich abgekühlt hatten, kondensierte der Wasserdampf zu Tropfen. Sintflutartige Regenfälle strömten herab. Zunächst allerdings erreichten die Fluten nicht den Erdboden: Die unteren Bereiche der Atmosphäre waren derart heiß, dass die Tropfen noch im Fallen verdunsteten.

Schließlich aber sanken die Temperaturen weit genug, dass sich auf der Erde die ersten, noch siedend heißen Regenpfützen bilden konnten.

Zur Zeit des großen Regens ähnelte die junge Erde äußerlich noch dem heutigen Mond: Ihre Oberfläche aus schwarzem **Basaltgestein** war pockennarbig von Einschlägen, aber es gab kaum größere Senken,

in denen sich die Regenfluten hätten sammeln können. Das Wasser stieg deshalb überall gleichmäßig – mit der Folge, dass der nun gebildete Ozean bald den gesamten Globus bedeckte. Nur die hohen Vulkanberge ragten als Inseln aus dem Meer.

Dieser **Urozean** war vermutlich bereits salzig. Zum einen enthielten die Vulkanausdünstungen, die mit dem Regen ins Urmeer gewaschen wurden, geringe Mengen Salz-, Salpeter- und Schwefelsäure; zum anderen fraß der saure Dauerguss am Lavagestein, das die Vulkane ausgeworfen hatten, und löste darin enthaltene Salze.

Der Regen wusch zudem große Mengen Kohlendioxid aus der Atmosphäre und spülte sie in den Ozean. Dort wurde das Gas zusammen mit Kalzium in Form von **Kalkstein** gebunden. Ansonsten aber hatte dieser Ozean mit den heutigen Weltmeeren wenig Ähnlichkeit. Er war anfangs ein riesiges totes Meer ohne jedes Lebewesen.

Über Jahrtausende spülte der Regen von den Hängen der Vulkaninseln lockere Basaltbrocken unterschiedlicher Größe in Richtung Meer – ein witterungsbedingter Abtrag, den Geologen als **Erosion** bezeichnen. Das ausgewaschene Material sammelte sich massenhaft in Tümpeln am Fuß der Vulkane und in ruhigen Uferbereichen an den Flanken der Inseln, wo es sich als **Sediment** nach und nach auf dem Ozeanboden anlagerte. Die winzigen Räume zwischen den Körnern waren gefüllt mit Wasser und Gasen.

Als diese Sedimentschichten immer dicker und damit schwerer wurden, weil von oben ständig neues Material hinzukam, sackten – vereinfacht gesagt – die untersten

Lagen sowie die darunter liegende ursprüngliche Kruste der Erde in die heiße Tiefe des Planeten und schmolzen dort (siehe Grafik links).

Die Gesteinsschmelzen – manche hatten einen Durchmesser von mehr als einem Kilometer – stiegen nach und nach aus der Tiefe wieder auf und drangen in die Sedimentschichten ein. Dabei entstand ein neues kristallines Gestein: **Granit**. Der war sehr viel härter als das Sediment – zugleich aber leichter als das Material der Urkruste.

Dieser Vorgang wiederholte sich nun wieder und wieder. Gesteinsschmelzen drängten nach oben, kühlten in den Sedimenten ab und verbackten sie dabei zu festen Schichten. Schließlich entstanden aus diesem Granit-Sediment-Gemisch unterseeische Platten, die in der Größe wahrscheinlich stark variierten: Manche waren so klein wie das heutige Ibiza, andere so groß wie Island.

Noch lagerten die Granit-Sediment-Platten kilometer-tief unter dem Meeresspiegel. Da ihr Gesteinsmaterial aber weniger dicht war als die sie umgebende Basaltschicht der Urkruste, entstand ein ungeheurer Auftrieb. In der Folge stiegen die Platten langsam empor. Als sie vor etwa vier Milliarden Jahren die Meeresoberfläche erreichten, entstanden die ersten nichtvulkanischen Inseln auf der Erde.

Über die nächsten Jahrtausende wurden die obersten Schichten dieser Inseln von der Erosion wieder abgetragen und ins Meer gespült; sie lagerten sich als Tiefsee-Sedimente auf dem basaltischen Ozeanboden ab. Solche Sedimente sind heute zum Teil mehrere tausend Meter stark, etwa im Nordatlantik.

Durch den enormen Auftrieb der von Granit durchsetzten Inseln rissen die Nahtstellen zwischen ihnen und der sie umgebenden, ursprünglichen Erdkruste mehrere Kilometer tief auf, und die Inseln begannen noch weiter aufzusteigen – wie Eisberge im Wasser.

Nun kam es zu einer der spektakulärsten Entwicklungen in der Erdgeschichte: zu einem Prozess, der bis heute anhält. Die Inseln begannen nach dem Prinzip der Platten tektonik (siehe Seite 76) zusammen mit dem Meeresboden zu driften. Dabei wurde immer wieder basaltische Ozeankruste ins heiße Erdinnere gedrückt und heizte darüber liegende Granit schollen von unten auf. Folge: Es entstanden neue Schmelzen, die sich an die Inseln an-

Aus Teilen der frühen Erdkruste sowie Sedimenten und Granit formen sich die ersten Landmassen

lagerten und sie immer weiter wachsen ließen.

Auf ihrer „Wanderschaft“ stießen Eilande gegeneinander und verklebten. Das geschah so lange, bis einige die Größe heutiger **Kontinente** erreicht hatten. Zeitzeugen dieses Verschmelzens zweier Inseln findet man heute im äußersten Nordwesten Kanadas. Dort entdeckten die Geowissenschaftler Samuel Bowring und Ian Williams im Jahr 1999 das älteste Gestein der Erde. Per Isotopenanalyse (siehe Kasten Seite 38) bestimmten sie dessen Alter auf 4,03 Milliarden Jahre.

Dieses Gestein war ein **Gneis** – ein durch hohe Drücke und Temperaturen umgewandelter Granit: für die Wissenschaftler der Beweis dafür, dass bereits in frühesten Erdgeschichte Kontinental splitter miteinander verschmolzen waren.

Mehrmals im Laufe der Erdentwicklung formierten sich die aus dem Urozean aufgestiegenen Landmassen zu Superkontinenten. Vor rund 200 Millionen Jahren begann der letzte dieser Superkontinente, Pangaea, auseinander zu brechen – zunächst

in zwei Teile, die langsam voneinander wegdrifteten.

Aus einem der Bruchstücke bildeten sich Nordamerika und Eurasien, aus dem anderen Südamerika, Afrika, die Antarktis, Australien und Indien. Die anfangs kleine Bruchzone zwischen beiden Teilen weitete sich immer mehr aus und füllte sich mit Meerwasser. So entstand der Ozean **Tethys**, der Vorläufer des Mittelmeeres. Bei weiteren Brüchen zwischen den Platten bildeten sich zudem neue Weltmeere.

Der eigentliche Urozean aber hatte bereits mit dem Auftauchen der ersten Granit-Sediment-Platten aufgehört zu existieren. □

Claus-Peter Sesín, 52, ist seit vielen Jahren GEO-Autor. Dr. Carsten Riedel, 33, ist Geophysiker und einer der wissenschaftlichen Berater dieses Heftes.

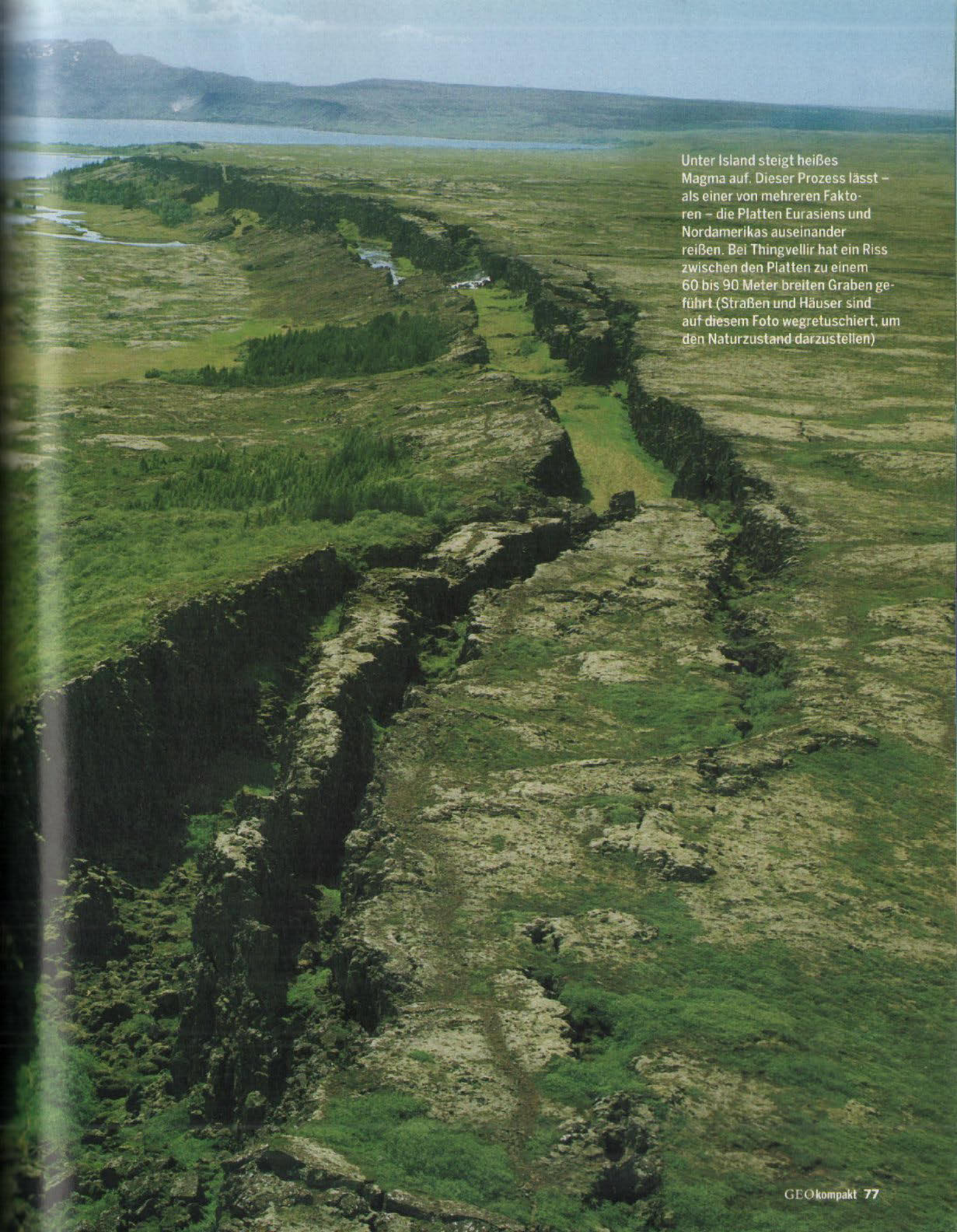


Knapp 30 Prozent der Erdoberfläche bestehen aus Landmassen; die ältesten Teile der Kontinente sind etwa vier Milliarden Jahre alt. Durch die Ozeane ziehen sich auf einer Länge von insgesamt 65 000 Kilometern die mittelozeanischen Rücken (in der Reliefkarte dunkel schattiert) – das größte Gebirgssystem der Erde. Diese Unterwassergebirge sind dadurch entstanden, dass Magma entlang von Spalten in der Erdkruste aufstieg und erkalte: ein Prozess, der bis heute anhält. Manche dieser Rücken ragen bis zu 2500 Meter über dem Meeresboden auf

Die Drift der Kontinente

Text: Jörn Auf dem Kampe, Carsten Riedel

Die äußere Schale unserer Erde ist in einzelne Platten zerbrochen. Diese tragen die Kontinente und Ozeanböden und schwimmen auf dem plastischen Teil des Erdmantels. Weil der, ähnlich wie siedendes Wasser in einem Topf, unablässig in Bewegung ist, kollidieren oder verhaken sich die Platten. Die Folge sind Vulkanausbrüche, Erdbeben und Gebirgsbildungen



Unter Island steigt heißes Magma auf. Dieser Prozess lässt – als einer von mehreren Faktoren – die Platten Eurasiens und Nordamerikas auseinander reißen. Bei Thingvellir hat ein Riss zwischen den Platten zu einem 60 bis 90 Meter breiten Graben geführt (Straßen und Häuser sind auf diesem Foto wegretuschiert, um den Naturzustand darzustellen)

Vor gut einer Milliarde Jahren hätte ein Wanderer vom heutigen Skandinavien aus zu Fuß Nordamerika erreichen können. Denn damals war der größte Teil der globalen Landmasse in einem Riesenkontinent verbunden. Dessen Zentrum bildete vermutlich Laurentia, das Ur-Amerika. Australien lag hoch im Norden, gleich neben der östlichen Antarktis, und auch Indien war nicht weit entfernt.

Viel mehr wissen Geologen nicht über das Aussehen dieses Großkontinents, den sie Rodinia genannt haben. Für gesichert aber halten sie, dass er vor rund 750 Millionen Jahren auseinander gebrochen ist. Und dass es andere Riesenkontinente gegeben hat, vor und nach Rodinia. Schlüsse darauf erlaubt die Weltkarte von heute. Südamerikas Ostküste beispielsweise passt wie in

Mit ihrem ungeheuren Gewicht lasten die rund 100 Kilometer mächtigen Platten auf einer verformbaren Schicht im oberen Erdmantel, der **Asthenosphäre** (siehe Seite 52), die für sie eine Art zähes Schmiermittel ist. Sie können auf ihr, gigantischen Flößen gleich, hinweggleiten. Und das verursacht die Bewegung der Kontinente, die Entstehung von Vulkanen und neuen Ozeanen, den Aufstieg von Gebirgen, nicht zuletzt Erdbeben.

Sämtliche Erkenntnisse über die unaufhörliche Mobilität dieser äußersten, starren Schale der Erde, der **Lithosphäre**, haben die Geologen in einer umfassenden Theorie gebündelt: der Lehre von der **Plattentektonik**. Sie beschreibt die Bewegungen der Lithosphären-Platten und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte und gilt heute als Grundlage der modernen Geologie (siehe Seite 86).

Eine Platte taucht unter die andere und versinkt in der heißen Tiefe des Erdinneren

einem Puzzle zur Westküste des südlichen Afrika.

Um zu verstehen, wieso die Erde ihre Oberfläche verändern kann, muss man sich Folgendes klar machen: Die äußerste Schale unseres Planeten besteht derzeit aus sieben riesigen und zahlreichen kleineren **Lithosphären-Platten**, die auseinander driften, aneinander vorbeigleiten oder kollidieren. In diese driften Platten eingebettet sind: ein Kontinent (dann spricht man von **kontinentaler Kruste**) oder ein Stück Meeresboden (**ozeanische Kruste**) – oder beides.

Dass aber die wandernden Platten, die wie ein Mosaik die Erdoberfläche bedecken, sich nicht gegenseitig den Weg versperren, folgt aus der so genannten **Subduktion**: Immer wieder werden Platten bei der Kollision mit einer anderen in die Tiefe gedrückt, sodass sie in den heißen Erdmantel versinken. Dabei gelangt eine Platte in eine Zone mit deutlich höherem Druck und höheren Temperaturen. Die Minerale in ihrem Gestein wandeln sich um, sodass die Platte dichter und damit schwerer wird – und noch weiter hinabsinkt (siehe Seite 71).



Wenn Kontinente krachen, schieben, zerren

Sieben große und zahlreiche kleinere Platten bilden die Oberfläche unseres Planeten – wie die Teile eines gigantischen Puzzles. Sie sind, wenn auch sehr langsam, ständig in Bewegung. Die treibende Kraft dafür sind Bewegungen im plastischen Erdmantel, auf dem die starren Erdschollen schwimmen, sowie das Gewicht der abtauchenden Platten selbst. Wo zwei Platten auseinander driften, reißt die Erdkruste auf, und glutflüssiges Gestein quillt hervor (E). Meistens geschieht das am Grund der Ozeane – so entstehen untermeerische Gebirge (D). Gleiten Platten aneinander vorbei, können sie sich ineinander verhaken und Spannungen aufbauen, die sich mit einem Ruck lösen – als Erdbeben (F). Prallen sie aufeinander, schiebt sich meist eine unter die andere und versinkt in einer so genannten Subduktionszone in den Erdmantel (A, C). Die obere Platte wird dabei in der Kollisionsregion emporgedrückt: Vulkane (rote Punkte) brechen aus, und mächtige Gebirge wachsen (B). Erdbeben sind in solchen Zonen häufig.



Japan

Als sich die Pazifische unter die Eurasische Platte schob, entstand Japan. Zudem grenzt die Philippinische Platte an die Inselkette. Folge: Erdbeben



Anden

Weil sich die Nazca-Platte unter die Südamerikanische Platte drückt, werden dort die Anden emporgehoben



Mittelatlantischer Rücken

Dieses untermeerische Gebirge, aus geschmolzenem Gestein gebildet, erstreckt sich an dem Riss zwischen zwei auseinanderweichenden Platten



Ostafrikanisches Rift

Über das Rote Meer bis nach Mosambik zieht sich ein Grabensystem, das den östlichen Teil Afrikas spaltet



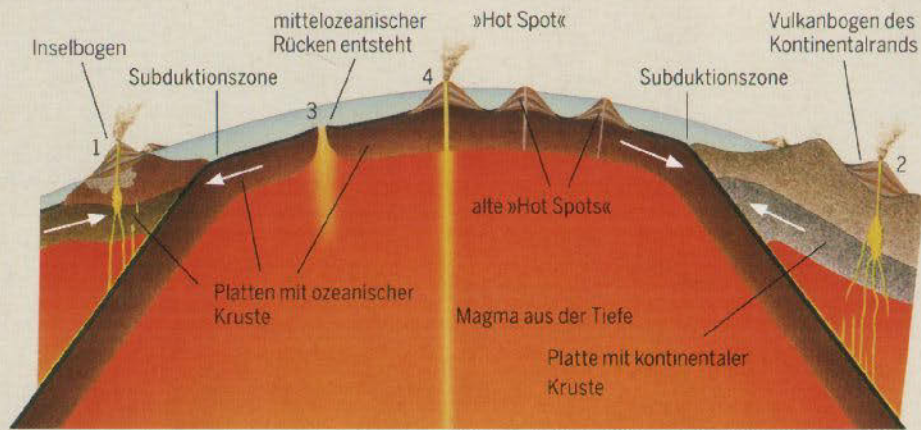
Himalaya

Weil die Indisch-Australische auf die Eurasische Platte trifft, faltet sich der Himalaya immer höher auf

San-Andreas-Verwerfung

Ein gewaltiger Riss, der von Plattenbewegungen zeugt: Unter Kalifornien schrammen die Pazifische und die Nordamerikanische Platte aneinander vorbei und verhaken sich dabei. Die Spannungen lösen sich in Erdbeben. Beim San-Francisco-Beben von 1906 etwa haben sich Teile der Platten ruckartig um sechs Meter verschoben





Der Kreislauf von Schmelzen und Erstarren

Wo Magma an die Erdoberfläche dringt, entstehen Vulkane – aber unterschiedlichen Typs. Taucht eine Platte mit ozeanischer Kruste unter eine andere, schmilzt ein Teil des Gesteins in der Tiefe, steigt als Magma auf und bildet Inseln im Meer (1). Schiebt sich eine ozeanische Platte unter eine kontinentale, falten sich Gebirge auf – und auch hier entstehen Vulkane (2). Wo zwei Platten am Boden eines Ozeans auseinander rücken, quellen riesige Mengen Magma hervor und erkalten meist unter Wasser (3); es bilden sich mittelozeanische Rücken. An manchen Stellen steigt Magma aber auch unabhängig von den Grenzen der Platten aus dem tiefsten Erdinneren hoch und bricht als Vulkan hervor (4). Weil sich die Platten über solche „Hot Spots“ hinweg-schieben, können im Laufe der Zeit ganze Inselketten entstehen – etwa die Hawaii-Gruppe.

Derzeit spielt sich ein solcher Prozess beispielsweise vor der Westküste Südamerikas ab: Dort wird die pazifische Nazca-Platte in einer **Subduktionszone** unter die Südamerikanische Platte gedrückt, pro Jahr um zehn Zentimeter. (Bei einer Kollision zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste sinkt grundsätzlich die ozeanische ab – sie ist dichter und damit schwerer. Kontinentale Landmasse bleibt dagegen fast immer erhalten; siehe Seite 72).

Durch die ungeheuren Zugkräfte, die beim Absinken entstehen, reißt am anderen Ende einer Platte die Erdkruste auf – im Falle der Nazca-Platte etwa 3200 Kilometer westlich. Dort spaltet sich der unterseeische Boden, und zwar jedes Jahr um rund 7,6 Zentimeter.

Zugleich quillt aus dem Spalt geschmolzenes Gestein: Magma, das sich an die Naz-

ca-Platte anlagert – allerdings nur eine Schicht von rund zwei Zentimetern pro Jahr.

Die Folge: Die Nazca-Platte – die ja jedes Jahr um zehn Zentimeter versinkt – wird immer kleiner (wenn auch sehr, sehr langsam) und im Verlauf der nächsten 180 Millionen Jahre komplett unter der Südamerikanischen versinken. Gleichzeitig wird Südamerika nach Westen driften: in die durch das Abtauchen der Nazca-Platte entstandene Lücke.

Dort, wo im Pazifik aufsteigendes Magma den Riss teilweise füllt, entsteht derzeit ein untermeerisches Gebirge, ein **mittelozeanischer Rücken**.

Solche Spreizungszonen, an denen zwei Plattenstücke aus-einander driften, finden sich in allen Weltmeeren. An ihnen wird immer wieder neue Ozeankruste gebildet, die langsam in Richtung der Subduktionszone driftet und dort wieder absinkt.

Nach etwa 500 000 Jahren wird die abgetauchte Nazca-Platte gut 50 Kilometer tief unter den südamerikanischen Kontinent abgesunken sein. Dort beginnt ein Teil ihres Gesteins zu schmelzen und sich in neues Magma umzuwandeln. Weil es leichter ist als das umgebende Material, steigt es verhältnismäßig schnell auf und durchschlägt

Unter Südamerika brodeln geschmolzenes Gestein, steigt auf und schießt in Vulkanen an die Oberfläche

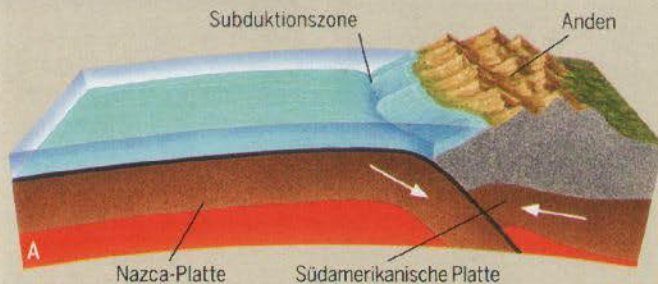
unter Bildung von Vulkanen die Erdoberfläche Südamerikas. Im Verlauf dieses Prozesses, der bereits seit mehr als 350 Millionen Jahren abläuft, haben sich die Riesenvulkane der Anden gebildet.

Der größere Rest der Nazca-Platte aber sinkt weiter hinab und wird in 2900 Kilometer Tiefe – an der Grenze zwischen Erdmantel und Äußerem Kern – bei einer Temperatur von 3200 Grad Celsius und einem Druck von 1400 Kilobar im Glutofen des Erdinneren aufgelöst.

Ursache all dieser Plattenbewegungen ist die **Konvektion** (siehe Illustration Seite 71), durch die Wärme aus dem Erdinneren abgeleitet wird. Besonders kräftig erhitztes Mantelgestein dehnt sich aus, wird leichter und steigt langsam auf. Etwa 100 Kilometer unter der Erdoberfläche tritt eine basaltische Schmelze aus, die schließlich an der Oberfläche die mittelozeanischen Rücken aufstürmt.

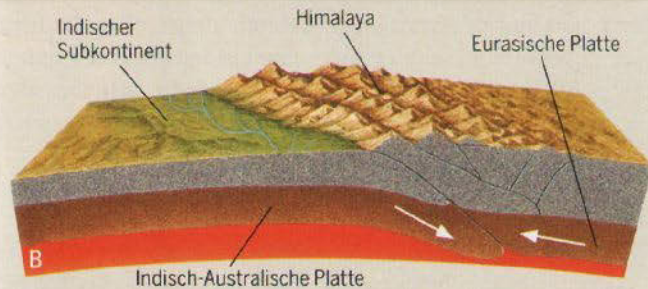
Da ständig heißes Material nachfolgt, wird die neu gebildete Kruste zusammen mit dem obersten Teil des Erdmantels – beide bilden eine Lithosphären-Platte – immer weiter vom mittelozeanischen Rücken weggedrückt. Mit zunehmender Entfernung wird diese Platte immer kälter und schwerer – bis sie schließlich mit einer anderen Platte kollidiert und nach und nach wieder in den heißen Erdmantel gezogen wird.

Begonnen haben diese Vorgänge vor mehr als vier Milliarden Jahren, als sich über dem glühenden Inneren der Erde eine erste primitive Kruste bildete. Die kühlte nach und nach immer weiter ab und formte schließlich eine feste Schale um die Glut im Erdinneren. Das



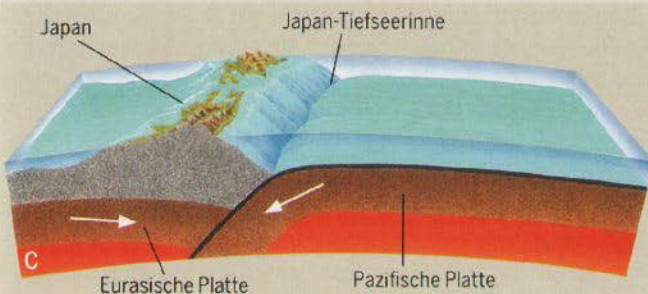
Wie die Anden entstanden sind

Wenn eine Platte mit dichter, schwerer ozeanischer Kruste auf eine Platte mit leichterer kontinentaler Kruste trifft, gleitet sie darunter – wie an der Westküste Südamerikas. Als Folge türmen der Druck der Kollision sowie in der Tiefe zu Magma aufgeschmolzenes Gestein – das in Vulkanen hochdrängt – Gebirgszüge wie die Anden auf.



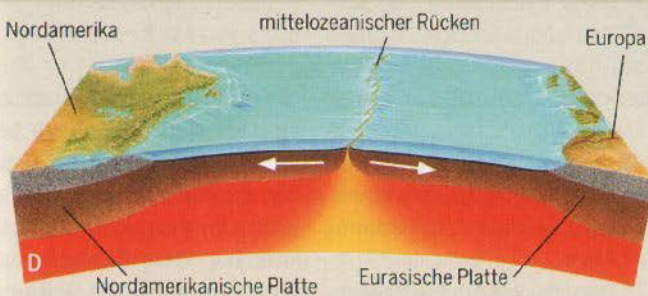
Der Himalaya – Folge einer Kollision

Beim Zusammenstoß zweier gleich schwerer Platten mit kontinentaler Kruste gleitet nicht die eine komplett unter die andere, sondern beide verschieben sich in mehrfachen Schichten ineinander, falten sich und verdicken die kontinentale Kruste. Dadurch türmen sich gewaltige Gebirge auf, etwa der Himalaya. Auch die Alpen sind auf ähnliche Weise entstanden.



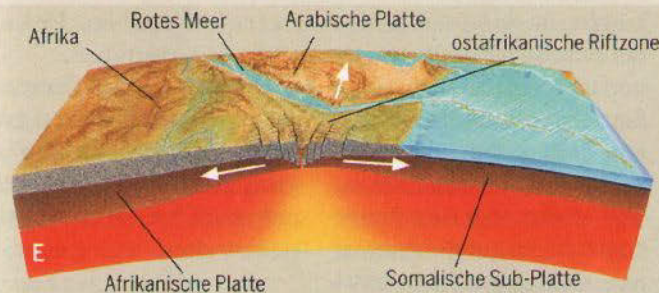
Japan wuchs aus dem Meer

Der gesamte japanische Inselbogen ist vulkanischen Ursprungs und entstanden, als die Pazifische Platte sich unter den östlichen ozeanischen Teil der Eurasischen Platte geschoben hat. Sinkt eine Platte mit ozeanischer Kruste unter eine andere, entsteht eine Tiefseerinne. Material der abgetauchten Platte schmilzt in der Tiefe, steigt als Magma wieder hoch und speist indirekt Vulkane, die neue Inseln – wie hier Japan – aufschütten.



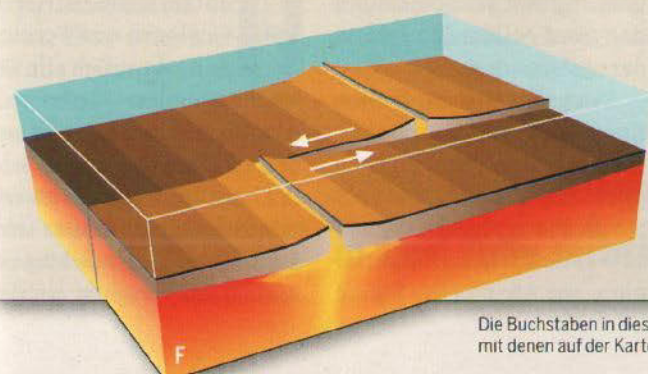
Europa und Amerika treiben auseinander

Dort, wo zwei Platten mit ozeanischer Kruste auseinander driften, bildet sich ein so genannter mittelozeanischer Rücken: ein von riesigen untermeerischen Gebirgen flankierter Riss in der Erdkruste, in dem fortwährend neuer Meeresboden aus nachströmendem Magma wächst. Meerwasser, das durch Ritzen in die Tiefe des Gesteins dringt, tritt stark erhitzt in hydrothermalen Quellen, etwa „Black Smokers“, wieder aus dem Boden (s. S. 108).



Afrika steht vor der Spaltung

Die Gräben der ostafrikanischen Riftzone dokumentieren das Zerbrechen eines Kontinents: Zwei Platten werden voneinander weggedrückt. Es kommt hier zu Verwerfungen in der Kruste, zu Vulkanismus und Erdbeben. Vor 20 bis 30 Millionen Jahren, als die Arabische Platte von Afrika fortdriftete, öffnete sich das Rote Meer. In einigen Millionen Jahren könnte sich im wachsenden Ostafrikanischen Graben ein neues Meer gebildet haben.



Reibung lässt die Erde beben

Zwei Platten können kollidieren, auseinander driften oder aber aneinander vorbeigleiten. Entlang einer solchen Grenze treten steile Bruchkanten auf, und die Platten können sich verhaken. Wenn sie sich dann plötzlich lösen, kommt es zu einem Erdbeben. Das kann sowohl am Meeresboden geschehen (wie in dieser Zeichnung) als auch auf dem Festland, etwa an der San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien.

Von Pangaea bis heute

Mehrfach im Verlauf der Jahrmilliarden haben sich die Kontinente zu einem Superkontinent vereint und wieder, wie hier dargestellt, getrennt



vor 200 Mio. Jahren
Alle Landmassen sind noch zum Superkontinent Pangaea vereint, der das Meer Tethys einrahmt

vor 150 Mio. Jahren
Pangaea ist in die Teile Laurasia und Gondwana zerbrochen



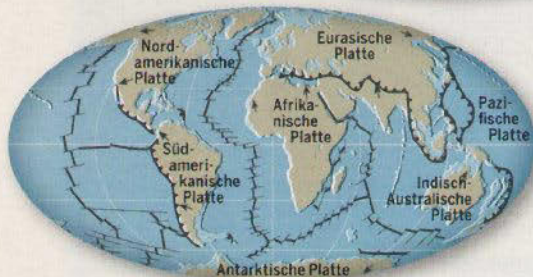
vor 100 Mio. Jahren
Laurasia ist in Nordamerika und Eurasien, Gondwana in fünf Teile zerfallen. Indien liegt vor der Antarktis



vor 50 Mio. Jahren
Indien kollidiert mit Asien, Nord- und Südamerika nähern sich an, die Antarktis und Australien werden isoliert



Gegenwart
Nord- und Südamerika sind miteinander verbunden, ebenso Indien und Asien. Australien driftet nach Norden



Die Landverteilung bestimmte das Leben

Weil Südamerika und Afrika einst beisammenlagen, finden sich dort Fossilien von eng verwandten Sauriern aus jener Zeit. Als die Antarktis zum Südpol driftete, ging auf ihr fast alles Leben zugrunde. Nachdem Süd- und Nordamerika zusammengedrückt waren und die Tierwelt sich mischen konnte, kamen viele Arten mit der Konkurrenz nicht zurecht und starben aus.

Magma, das aufgrund seines Auftriebs weiterhin aus der Tiefe aufstieg, erzeugte beim Austritt an der Erdoberfläche Risse in dieser nunmehr gebildeten Kruste – und drückte sie zugleich auseinander.

Dabei wurde die Kruste gestaucht und brach schließlich an anderer Stelle ein weiteres Mal. Dort kam es erstmals zur Subduktion: Ein Teil der aufgebroschenen Kruste wurde unter den anderen geschoben. Dadurch begann jener komplexe Prozess, durch den letztlich die Ozeane und Kontinente entstanden sind.

Die ältesten bekannten Kontinentfragmente sind 4,03 Milliarden Jahre alt. Wie groß die Kontinente damals waren und wo sie auf der Asthenosphäre geschwommen haben, vermag niemand zu sagen. Man weiß nur so viel: Im Verlauf der folgenden 1,5 Milliarden Jahre riss aufsteigendes Magma immer wieder den Meeresboden zwischen ihnen auf – und die Platten drifteten auseinander und tauchten ab. Das führte dazu, dass sich die frühen Kontinente langsam aufeinander zubewegten und schließlich zusammenprallten.

Damals, vor 2,5 Milliarden Jahren, entstand vermutlich der erste **Superkontinent**: Kenorland – eine Rieseninsel am Äquator. Sie umfasste mindestens das heutige Nordamerika, Australien, Teile Europas und Afrikas (der Rest der gegenwärtigen Landmassen ist nach dem Prinzip der Kontinentbildung in den folgenden zwei Milliarden Jahren dazugekommen).

Dort aber, wo die frühen Kontinente in Kenorland gegeneinander stießen, türmten sich Gebirge auf und bremsen die Plattenbewegung ab – so wie heute in der Alpenregion, wo Afrika eine kleine

Platte des Mittelmeeres unter Europa schiebt.

Rund um Kenorland aber entstand in den aufgerissenen Spalten am Meeresboden weiterhin neue Kruste. Die drückte nun gegen den Superkontinent und tauchte per Subduktion wieder ins Erdinnere ab – und zwar von allen Seiten gleichzeitig. Dadurch entstanden enorme Zugkräfte, die dazu führten, dass Kenorland wieder auseinander riss.

So entstehen und vergehen seither Superkontinente. Geowissenschaftler schätzen, dass sich alle 500 bis 700 Millionen Jahre Kontinente zu Superkontinenten zusammenschieben. Vor rund 1,8 Milliarden Jahren bildete sich auf diese Weise Hudsonland: eine Landmasse, die vermutlich aus Nordamerika, Australien und Teilen Europas und Südamerikas bestand. Später bildeten sich Rodinia und – vor etwa 350 Millionen Jahren – Pangaea.

Dieser Superkontinent erstreckte sich vom Nord- bis zum Südpol und vereinigte fast sämtliches Land des Planeten. Im Norden lagen Nordamerika, Teile Europas und Sibirien, im Süden Südamerika, Afrika, Indien, die Antarktis und Australien.

Und erst als sich Pangaea vor rund 200 Millionen Jahren langsam aufzuspalten begann, entwickelte sich nach und nach die Erde, wie wir sie kennen.

Heutzutage registrieren Geologen und Vermessungskundler alle Bewegungen der Platten mit Satelliten und wissen so auf den Millimeter genau, wie tief beispielsweise die Nazca-Platte zwischen Januar und August 2004 abgetaucht ist. Zudem überwachen sie die



Das Mittelmeer entsteht

Während sich die Afrikanische und die Eurasische Platte im Verlauf der letzten 100 Millionen Jahre immer mehr angenähert und dabei die Alpen aufgefaltet haben, ist das Meer Tethys zum heutigen Mittelmeer geschrumpft. Vor rund 65 Millionen Jahren war es noch eine offene, an Inseln reiche See (links oben). Im Laufe der Jahrmillionen drängten die Landmassen die Tethys immer stärker

zusammen, bis sie vor etwa fünf Millionen Jahren (rechts unten) in Größe und Form bereits weitgehend dem heutigen Mittelmeer glich. Dieser Prozess dauert an, denn die Afrikanische Platte schiebt nach wie vor kleinere Platten in Richtung der Eurasischen. In 50 bis 80 Millionen Jahren wird das Mittelmeer deshalb vermutlich verschwunden sein und sich an seiner Stelle ein Gebirge erheben.

Plattengrenzen weltweit mit Seismometern. Denn dort, wo die Platten gegeneinander stoßen, werden fast alle **Erdbeben** ausgelöst – und zwar aufgrund zweier Phänomene:

- der Subduktion, die dazu führt, dass sich eine abtauchende Platte mit der darüber liegenden verhakt und dabei Spannungen aufbaut, die sich in Beben entladen (etwa in der Andenregion);
- der so genannten **Horizontalverschiebungen**, die dort entstehen, wo sich zwei Platten

seitwärts gegeneinander verschieben (etwa in Kalifornien, wo die Pazifische an der Nordamerikanischen Platte entlangschrammt).

Es gibt aber auch Beben, die entstehen, wenn zwei Platten voneinander wegdriften – wie in Ostafrika, wo eine 6400 Kilometer lange

Riss-Zone, das Rift Valley, vom künftigen Schicksal des Kontinents kündigt: In wenigen Millionen Jahren könnte sich der Riss zwischen Jordanien im Norden und Mosambik im Süden so sehr verbreitert und gleichzeitig vertieft haben, dass dort ein neuer Ozean entsteht.

Und der Zug der Kontinente geht weiter. In etwa 250 Millionen Jahren werden Nordamerika, Afrika, Europa, Asien und Südamerika vermutlich wieder zu einem Riesenkontinent verbunden sein. Und so könnte sich dann ein Wanderer – sollte es noch Menschen geben – aufmachen und von Schleswig-Holstein bis nach Patagonien marschieren. □

Afrika wird entlang des Rift Valley in zwei Teile zerbrechen

Jörn Auf dem Kampe, 31, Redakteur bei GEO kompakt, hat unter anderem Geologie studiert.

Und sie bewegen sich doch

Ein gelernter Astronom revolutioniert die Vorstellung von der Erde: Mit der Theorie der Kontinentalverschiebung zerschlägt Alfred Wegener 1912 das geologische Weltbild des 19. Jahrhunderts. Trotz erdrückender Beweise bleibt ihm die Anerkennung der Fachwelt zu Lebzeiten jedoch versagt

Text: Antje Helms

Passt nicht die Ostküste Südamerikas genau an die Westküste Afrikas, als ob sie früher zusammengehangen hätten?“ Nur zögernd beginnt der deutsche Polarforscher Alfred Wegener sich einen Reim darauf zu machen, was ihm Weihnachten 1910 beim Betrachten einer Weltkarte aufgefallen ist. Waren womöglich alle Kontinente einst in einer gigantischen Landmasse miteinander verbunden?

Den 30-Jährigen fasziniert dieser Gedanke. Doch erst als er zufällig erfährt, dass Paläontologen Fossilien gleicher Tier- und Pflanzenarten an den Küsten beider Kontinente gefunden haben, sucht er nach weiteren Hinweisen für seine These. Und schon bald ist er sicher, dass jener urzeitliche kontinentale Gigant tatsächlich existiert hat. Er nennt ihn Pangaea (griechisch für „ganze Erde“).

Beispielsweise sind 20 von 27 in der Antarktis nachgewiesenen Arten der Glossopteris-Flora, eines Zungenfarns, bis nach Indien verbreitet. Dass der Wind die Farnsamen über die Meere getragen haben könnte, schließt Wegener aus: Dafür seien sie mit Durchmesser von mehreren Millimetern viel zu groß gewesen. Auch eine bestimmte Regenwurm-Gattung kommt sowohl auf der Südspitze Südamerikas als auch auf der Afrikas vor – und eine weitere Gattung im Süden Indiens und Australiens, und zwar ausschließlich dort. Die beste Erklärung dafür ist für Wegener, dass Indien und die Antarktis, Südamerika und Afrika sowie Indien und Australien einst miteinander verbunden waren.

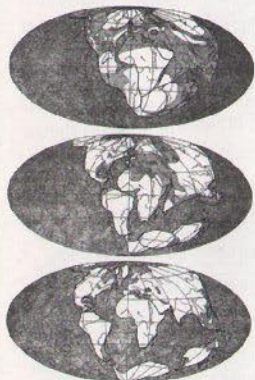
Zudem lassen Gletscherablagerungen ihn vermuten, dass die Kontinente früher eine andere Position hatten. Und weil Forscher in der Antarktis Kohlelager

entdeckt haben, also auf dieser riesigen Landmasse irgendwann einmal eine fast tropische Vegetation geherrscht haben muss, folgert Wegener, dass sie vor mehr als 300 Millionen Jahren östlich der Südspitze Afrikas gelegen haben könnte.

Als Alfred Wegener seine These von Pangaea und von der Drift der Kontinente am 6. Januar 1912 auf der Hauptversammlung der Geologischen Vereinigung in Frankfurt am Main präsentiert, wird er ausgelacht. Schließlich ist der junge Mann zu jener Zeit vor allem als Astronom und Meteorologe bekannt und will nun gestandene Geowissenschaftler überzeugen. Dabei ist er gar nicht der Erste, dem aufgefallen ist, dass die Küstenlinien der Kontinente auf beiden Seiten des Atlantik so gut zusammenpassen. Vielmehr haben aufmerksame Kartenbetrachter das bereits im 16. und 17. Jahrhundert vermerkt, und der deutsche Theologe Christoph Lilienthal hat 1756 behauptet, eine Sintflut habe die Erdkruste auseinander gerissen.

Charles Darwins Sohn George (1845–1912) fand sogar schon eine – wie heute erwiesen ist, falsche – geophysikalische Erklärung: Vor langer Zeit habe sich die Erde viel schneller als heute gedreht, sodass die Masse des Mondes aus ihr herausgeschleudert worden sei. In dem entstandenen Loch habe sich der Pazifik gebildet, und weil die Erde danach ihre Masse neu habe auswuchten müssen, seien Nord- und Südamerika von Europa und Asien losgerissen worden und nach Westen getrieben. So sei der Atlantik entstanden.

Insbesondere steht Wegeners Theorie von der Kontinentalverschiebung im Widerspruch zur damals anerkannten Lehre von der Kontraktion, der Schrumpfung der Erde, die der österreichische Geologieprofessor Eduard Suess (1831–1914) nach einer Idee des franzö-



Die Karten in Wegeners Hauptwerk »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane« zeigen, wie der Superkontinent Pangaea einst auseinander gebrochen ist



Alfred Wegener
(1880–1930)
während einer
Expedition ins
Inlandeis von
Grönland

sischen Philosophen René Descartes weiterentwickelt hat. Danach hat sich die Erde im Laufe ihrer Geschichte wie ein alter, schrumpfender Apfel zusammengezogen – sie gebe ja seit ihrer Entstehung Wärme ab und verliere dadurch an Volumen. Durch diese Schrumpfung hätten sich einerseits an der Erdoberfläche Gebirge gebildet, andererseits seien Landmassen zwischen den jetzigen Kontinenten im Meer versunken.

Horizontale Verschiebungen der Kontinente, wie Wegener sie annimmt, sind für Suess undenkbar. Er und andere „Fixisten“ gehen von ortsfesten, nicht verschiebbaren Landmassen aus. Deren Gegner hingegen wenden ein, dass nach dieser Theorie die ganze Erdoberfläche gleichmäßig schrumpfen müsste, wie es bei einem trocknenden Apfel der Fall ist. Und was den angeblichen Untergang der Landbrücken zwischen Kontinenten angeht, so schreibt Wegener im November 1911 an den angesehenen Meteorologen Wladimir Köppen: „Ein Kontinent kann nicht versinken, denn er ist leichter als das, worauf er schwimmt. Warum sollen wir zögern, die alte Anschauung über Bord zu werfen?“

Jahrzehntelang führt Wegeners Theorie, die er 1915 in seinem Buch „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“ publiziert, zu heftigen Debatten unter den Erdkundlern. Noch 1944 etwa fordert ein führender Geologe, die Idee der Kontinentalverschiebung solle aufgegeben werden, weil „jede weitere Diskussion darüber nur das Schrifttum vermehrt und den Verstand der Studenten verwirrt“.

Hauptgrund für die Ablehnung ist, dass Wegener nicht erklären kann, wodurch die Drift der Kontinente überhaupt erzeugt wird. Weder mit der Annahme einer

„Polfluchtkraft“, die Landmassen in der Nähe des Nord- und Südpols in Richtung Äquator schiebe, noch mit der Vorstellung, die Anziehungskraft von Sonne und Mond bewirke die Kontinentalverschiebung, kann er seine Kontrahenten überzeugen.

Erst Jahrzehnte später erbringen neue Technologien Erkenntnisse, die den Querdenker bestätigen: Seit den 1970er Jahren liefern Messungen mit Satelliten, bodengestützten Lasern, Radiowellen und dem Global Positioning System (GPS) präzise Daten über die Drift der Kontinente. Dabei entdecken Geowissenschaftler, dass sich beispielsweise Europa und Nordamerika pro Jahr um zwei bis drei Zentimeter voneinander entfernen – unumstößliche Beweise für die Bewegung der Kontinente.

Viele Wissenschaftler entwickeln im Laufe der Zeit Wegeners Hypothese weiter – bis hin zur heute anerkannten „Theorie der Plattentektonik“. Danach sind so genannte Konvektionsströme im Erdmantel die Hauptantriebskraft der Erdmassen (siehe Seite 71): Entlang großer Bruchspalten drängen unter den Ozeanen Gesteinsschmelzen empor und erstarren buckelförmig an der Oberfläche; da ständig glutflüssiges Magma nachfolgt, werden große Platten – gebildet aus Erdkruste und oberstem Erdmantel – seitwärts weggedrückt, bis sie mit anderen Platten kollidieren und ins Erdinnere gleiten (siehe Seite 76).

Alfred Wegener, der Außenseiter, hat den Siegeszug seiner Hypothese nicht mehr miterlebt. Er starb 1930, nicht lange nach seinem 50. Geburtstag, auf einem Marsch durch Grönland – von den Geologen seiner Zeit als „Märchenerzähler“ verspottet.

Antje Helms, 30, ist Journalistin in Hamburg.



1929/1930 leitet
Alfred Wegener
eine Grönland-Expe-
dition, um dort
geophysikalische und
meteorologische
Messungen vorzuneh-
men. Das letzte
Foto (unten, links)
zeigt ihn kurz vor
seinem Tod

4,6 Mrd.

500 Mio.

ca. 5 mm

Der grün gebänderte Malachit bildet sich meist in Nieren- oder Traubenform aus Kupferkarbonat, einem Mineral, das sich zuweilen zusammen mit reinem Kupfer findet. Um einen Kristallkern lagern sich in Gesteinsspalten nach und nach immer neue Schichten von Kupferkarbonat an. Minerale sind Festkörper aus meist anorganischen Verbindungen, die durch Kristallisation entstehen. Fast jedes Gestein setzt sich aus mehreren Mineralen zusammen, von denen es Tausende auf der Erde gibt



Vom Werden und Vergehen der Gesteine

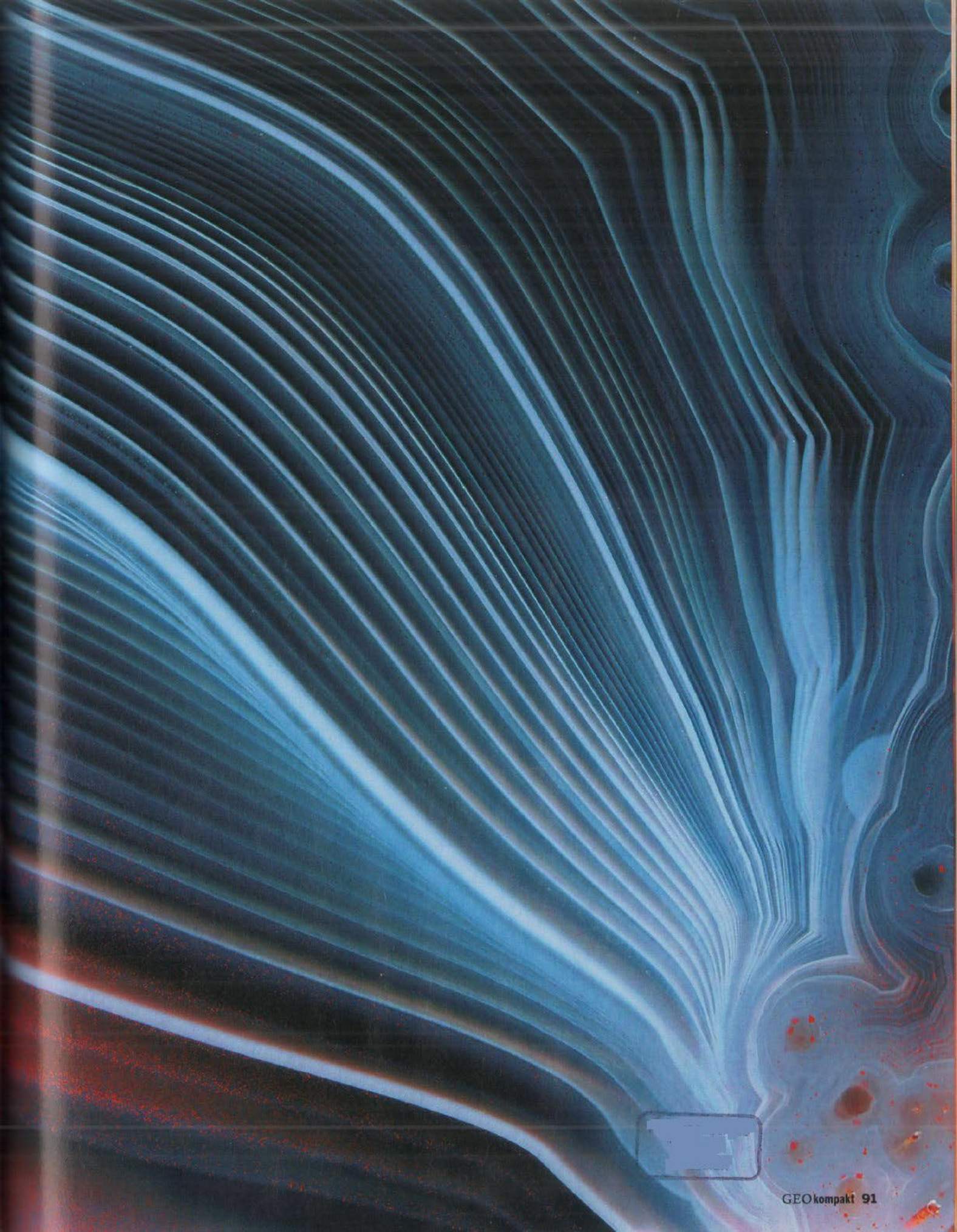
Text: Helmut Horch; Fotos: Dirk Wiersma

Kaum ist die Erdkruste erkaltet, beginnt auf der Erde ein bis heute andauernder Prozess: Gesteine verwittern, sedimentieren und tauchen ab ins heiße Innere des Planeten. Und wandeln sich dort um in andere Gesteine – samt den Mineralen, aus denen sie gebildet sind



ca. 2 mm

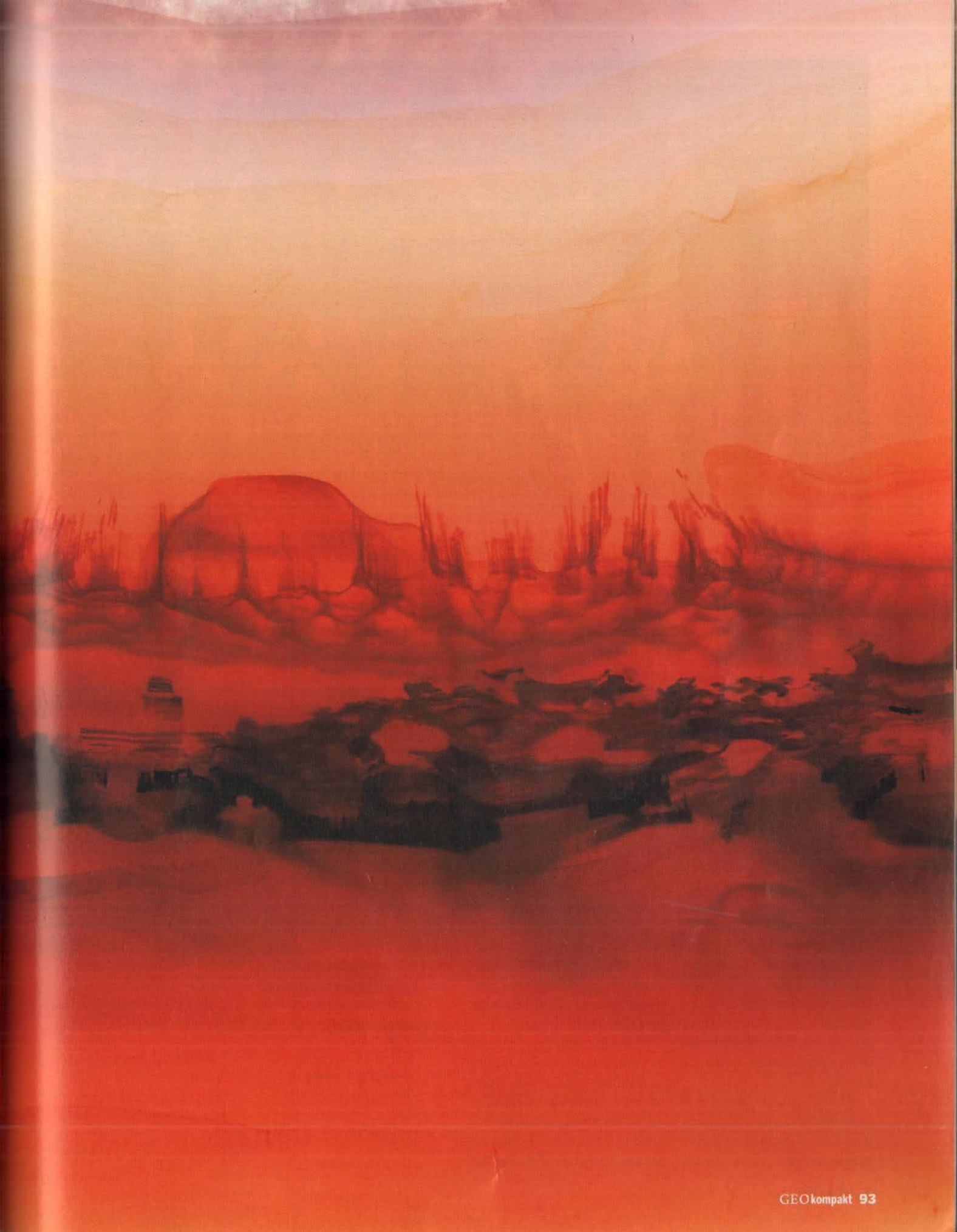
Die für den Achat typischen Schichten bilden sich aus, wenn in Wasser gelöster Quarz sich in Hohlräumen von Gesteinen Schicht um Schicht absetzt und kristallisiert. Gerät ein Achat mit dem umgebenden Gestein dann im Rahmen der gesteinsumbildenden Kreisläufe in derart große und damit heiße Tiefen der Erde, dass es schmilzt, zerfällt das Gestein in der Regel in seine Bestandteile. Kühlt die Schmelze ab, kristallisieren die Minerale aus – und es bilden sich neue Gesteine

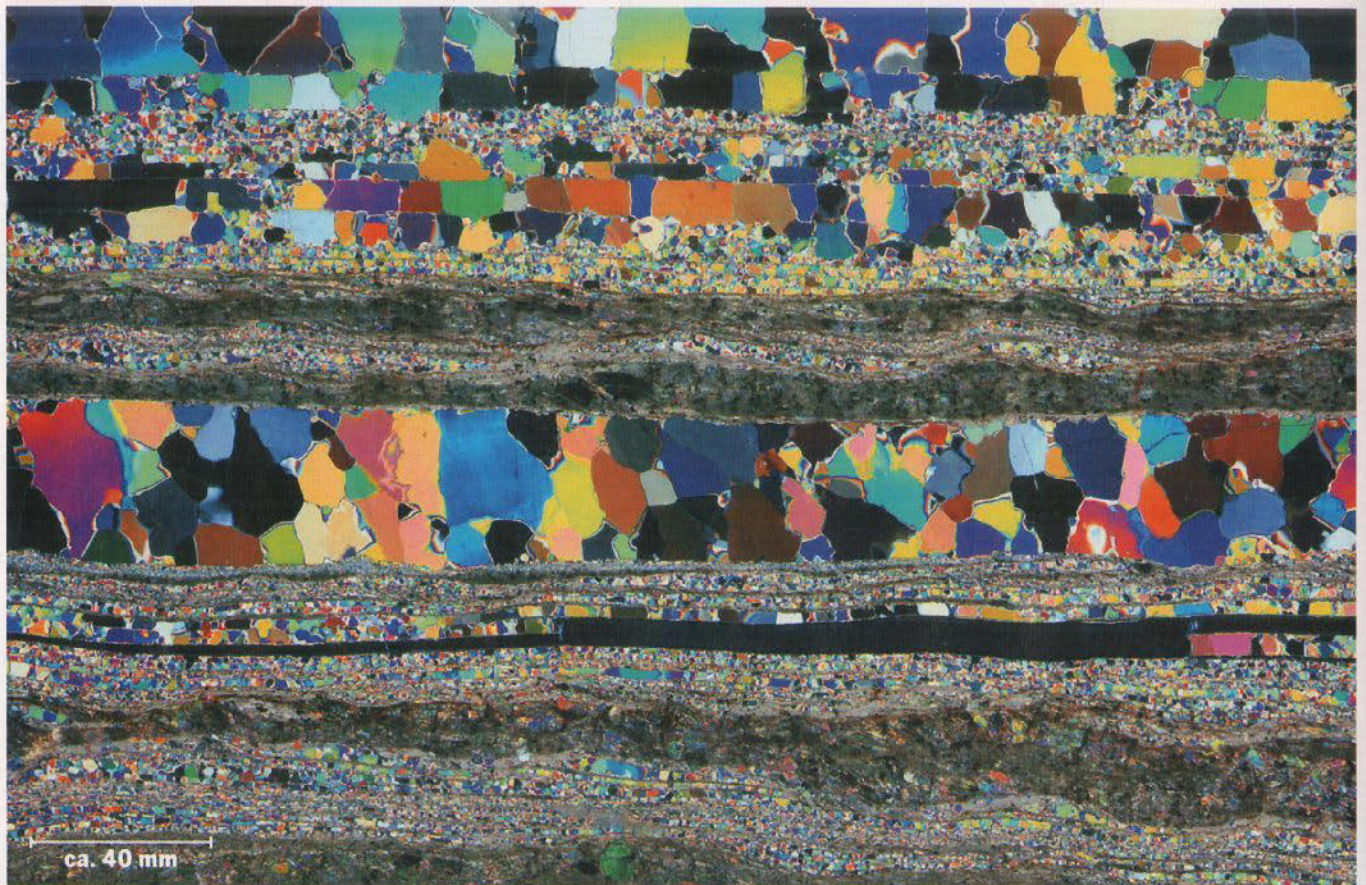




ca. 1 mm

Achat besteht hauptsächlich aus Quarz – chemisch Siliziumdioxid –, dem in Gesteinen der oberen Erdkruste neben Feldspat häufigsten Mineral. Ein Gestein kann auch verändert werden, ohne dass es schmilzt. Gelangt es in tiefe Zonen der Erde, in denen hohe Drücke und Temperaturen herrschen, werden seine Minerale bei einem »Metamorphose« genannten Prozess umgewandelt – auch so entsteht neues Gestein





Wie fast alle Gesteine ist auch Mylonit aus verschiedenen Mineralen zusammengesetzt (hier sichtbar gemacht durch polarisiertes Licht). Er entsteht dort, wo Gestein durch aneinander vorbeirutschende Erdplatten zermahlen und durch gewaltigen Druck zu neuem Gestein zusammengepresst wird

Ein Vulkan bricht aus: Glühende Lava sprudelt aus Spalten, feurige Fetzen fliegen durch die Luft. Anderswo nagt an einer Steilküste die Brandung, und das Meer trägt das abgetragene Land fort, um es in ruhigem Gewässer wieder abzusetzen. Von einem Gebirge stürzt nach starken Regenfällen ein reißender Strom aus Schlamm und Gesteinstrümmern zu Tal. Und in einer Ebene drängt ein trüber Fluss über die Ufer und lässt nach dem Abfließen des Wassers jene Stoffe zentimeterdick zurück, die sich aus der braunen Brühe abgesetzt haben.

All das sind Stationen ewigen Werdens und Vergehens irdischer **Gesteine** – eines grandiosen Recycling: Gestei-

ne werden zersetzt und neu zusammengefügt, gehärtet und in andere umgewandelt. Sie werden aufgeschmolzen und erstarren aus der Schmelze in neuer Form.

Dabei handelt es sich gar nicht um einen einzigen Kreislauf. Das Recycling der Gesteine, das auf der Erde begann, sobald ihre Oberfläche zu einer festen Kruste erkaltet und der Verwitterung ausgesetzt war, geht vielmehr in einem Geflecht kleinerer und größerer Schleifen vonstatten, die zusammen ein großes System von Kreisläufen bilden.

Gesteine sind die wichtigsten Studienobjekte der Geologen, denn sie dokumentieren all jene Prozesse, durch die sie entstanden sind. So dienen sie den Forschern als Schlüssel zur Vergangenheit der Er-

de. Dabei bezeugen sie auch Vorgänge, die nicht direkt zu beobachten sind, weil sie sich tief unter der Erdoberfläche abspielen (weiter oben sind zahlreiche relativ junge „Lockergesteine“ nur lose übereinander gelagert und werden leicht wieder zerstört – Gestein muss also nicht immer „steinhart“ sein).

Fachleute verstehen unter Gesteinen „natürliche Bildungen, die aus Mineralen, Bruchstücken von Mineralen oder Gesteinen, Organismenresten usw. aufgebaut werden“ – so ein geologisches Wörterbuch.

Minerale wiederum sind Stoffe mit einheitlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften – Gesteine dagegen Gemenge aus jeweils variierender Zusammensetzung.

Granit zum Beispiel besteht im wesentlichen aus den Mineralen Feldspat, Quarz und Glimmer, die in ganz unterschiedlichen Verhältnissen darin vorkommen können. Im Ausnahmefall kann ein Gestein auch aus nur einem einzigen Mineral bestehen.

Bei den zahlreichen Mineralen, die zu Schmuck verarbeitet werden, unterschied man

Erdwärme, Sonne und Schwerkraft halten den Kreis- lauf der Gesteine in Gang

früher zwischen besonders klaren und harten Edelsteinen und vielfach undurchsichtigen und weniger harten Halbedelsteinen. Diese Begriffe gelten heute als überholt. Alles, was ziert, fällt nun in die Kategorie Schmucksteine.

Als **Erz** wird ein Gestein bezeichnet, wenn es Minerale enthält, aus denen nutzbare Metalle zu gewinnen sind.

Geologen unterteilen die Gesteine nach ihrer Entstehung in drei große Gruppen:

- magmatische Gesteine,
- Sedimentgesteine,
- metamorphe Gesteine.

Magmatische Gesteine entstehen, wenn Magma erstarrt. Kühlt sich die Schmelze in einer Magmakammer unter der Erdoberfläche langsam ab, wie etwa bei der Bildung von Granit, entstehen gut sichtbare **Kristalle**. Wird das Magma hingegen von einem Vulkan ausgestoßen, geht die Abkühlung viel schneller vor sich, und die Kristalle bleiben winzig. In vulkanischen Gesteinen sind deshalb mit dem bloßen Auge meist nur jene einzelnen Kristalle zu erkennen, die sich in der Erde bereits vor dem Ausbruch gebildet hatten. Beispiele für magmatische Gesteine sind: Basalt, Granit, Quarzporphyr, vulkanischer Tuff.

Sedimentgesteine entstehen aus Verwitterungsprodukten, nachdem Gesteine zersprengt, zerrieben, aufgelöst worden sind. Ton, Sand, Kieselsteine oder auch größere Brocken werden von Flüssen, vom Wind, von Gletschern oder Meeresströmungen davongetragen und schließlich abgelagert, gelöste Stoffe in den Meeren oder in Seen ausgefällt – schlagen sich also als feste Substanz auf dem Boden nieder. Irgendwann versteinern diese Sedimente. Beispiele für Sedimentgesteine sind:

Buntsandstein, Grauwacke, Kalkstein, Löss.

Metamorphe Gesteine entstehen, wenn Sediment- oder magmatische Gesteine hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt sind. Das ist vor allem der Fall, wenn Gesteine in tektonisch aktiven Zonen zehn, 20 oder mehr Kilometer tief abgesenkt werden. Unter den dort herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen wandeln sich Minerale in andere um, und das Gefüge der Gesteine verändert sich. Durch heiße Lösungen oder Gase, die in der Tiefe zirkulieren, können Stoffe ausgetauscht werden. Beispiele für metamorphe Gesteine

sind: Gneis, kristalline Schiefer, Marmor, Tonschiefer.

Im großen Recycling gibt es viele Wege, auf denen sich Gesteine verändern. Unter den Kräften, die das Kreislaufsystem in Gang halten, unterscheiden Geowissenschaftler **endogene** (aus dem Erdinneren wirkende) und **exogene** (von außen eingreifende).

Endogen wirkt die im tiefen Erdinneren vorhandene Wärme, die an der Oberfläche unseres Planeten die mächtigen Erdplatten in Bewegung hält (siehe Seite 71). Die aber auch Vulkane spucken lässt, Gebirge auftürmt und laufend die Böden der Ozeane verschiebt.

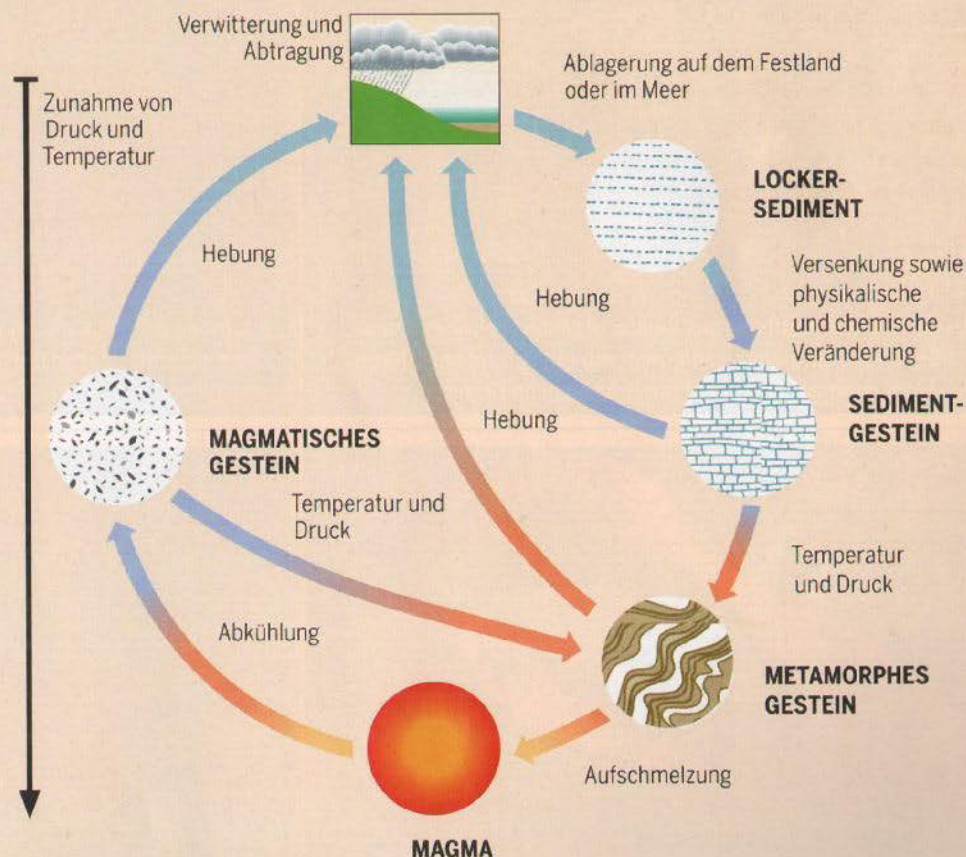
Magmatische und metamorphe Gesteine entstehen durch endogene Kräfte.

Exogen wirkt vor allem die Sonne durch die von ihr gesteuerten klimatischen Erscheinungen. Die von ihr ausgestrahlte Wärme hält den Wasserkreislauf in Gang und lässt die Winde wehen. Unter den Einflüssen des Klimas verwittert das Gestein an und nahe der Erdoberfläche. Die Trümmer werden abgetragen und mehr oder weniger weit transportiert. Immer weiter zerkleinert, bleiben sie schließlich irgendwo als Sedimente liegen.

Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Schwerkraft,

VOM SEDIMENT BIS ZUM MAGMA

Kreislauf der Gesteine



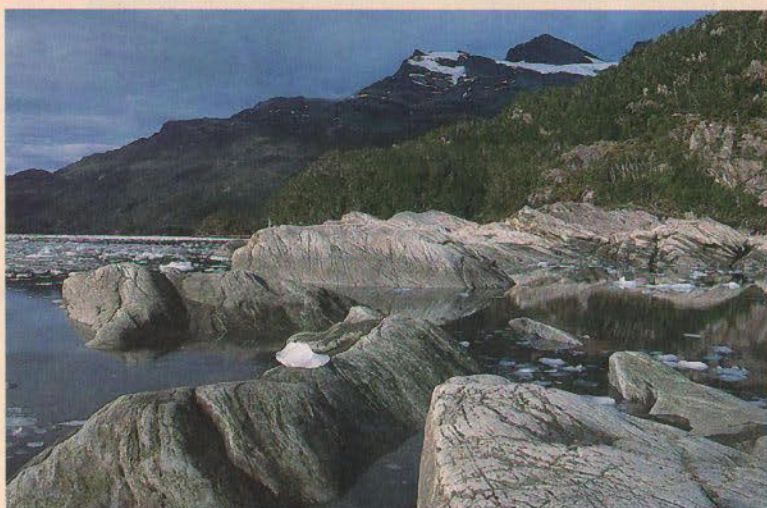
In einem System von Kreisläufen verändern sich die Gesteine: Sie verwittern, werden durch die Erosion abgetragen und als Sediment abgelagert. Sie verfestigen sich, sinken und schmelzen unter Druck und hoher Temperatur. Die Schmelzen erstarren zu magmatischen Gesteinen, die – wie die anderen Gesteinsarten auch – oft wieder an die Erdoberfläche gehoben werden



Gebändertes Eisenerz entstand vor 2,5 bis 1,8 Milliarden Jahren, als Eisen im Meer durch Sauerstoff aus der Photosynthese gebunden wurde. Rote Eisenoxid-Schichten, hier in Australien, setzten sich am Grunde ab



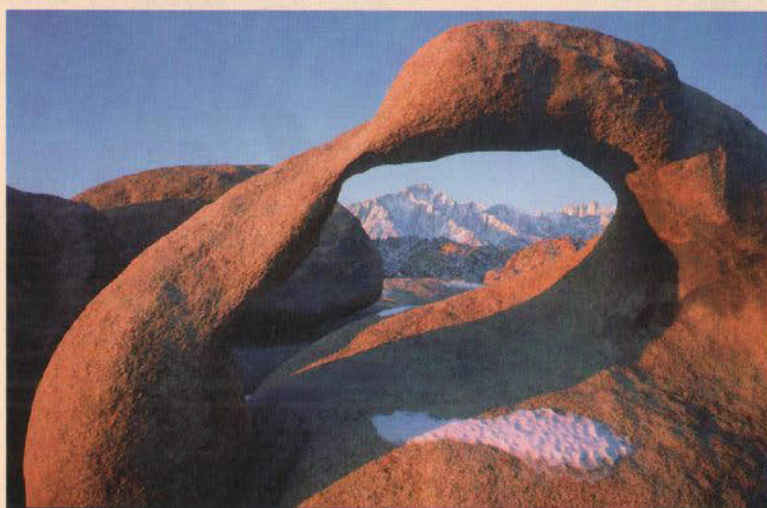
Kalkstein, hier in Nordengland, entsteht, wenn Kalziumkarbonat im Wasser ausgefällt wird oder zahlreiche Schalen, Gehäuse oder andere kalkige Teile toter Tiere auf den Meeresboden sinken



Gneis, der durch Metamorphose aus Sedimentgesteinen wie aus magmatischen Gesteinen entstehen kann, zeigt nur eine grobe Schieferung. Diese Gneislandschaft auf Feuerland war ursprünglich Granit



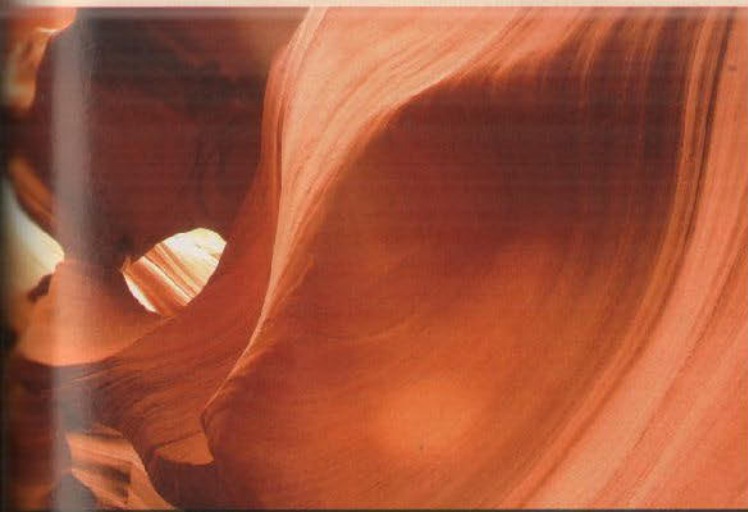
Marmor geht aus Kalkstein oder Dolomit hervor. Er ist deutlich härter und resistenter gegen Erosion als das Ausgangsgestein. Ursprünglich vorhandene Fossilien werden durch die Metamorphose meist vernichtet



Granit entsteht, wenn eine siliziumreiche Gesteinsschmelze kilometer-tief in einer Magmakammer erstarrt. Durch spätere Hebung und Erosion wird er, wie hier in Kalifornien, an der Erdoberfläche freigelegt



Basaltlava tritt bei Vulkanausbrüchen, hier auf Hawaii, zunächst als flüssiger Gesteinsstrom aus und erstarrt nach und nach. Die oberste Schicht zeigt oft Fließstrukturen, wie hier die so genannte Stricklava



GESTEINSARTEN

Aus Alt mach Neu

Sedimentgesteine

entstehen aus Verwitterungsprodukten: aus größeren und kleineren Gesteinstrümmern oder aus Mineralen, die aus Gesteinen herausgewaschen und gelöst worden sind. Der Gesteinsschutt wird von Flüssen, vom Wind, von Gletschern oder Meeresströmungen abgelagert, das gelöste Material chemisch oder durch Lebewesen in Meeren und Seen ausgefällt

die alles Lose nach unten fallen und Wasser, aber auch Gletschereis abwärts fließen lässt. Voraussetzung ist ein hinreichendes Gefälle. Dafür, dass es an diesem Gefälle trotz aller Abtragung über Äonen hinweg nie gemangelt hat, sorgt die Wärme im Erdinneren. Sie lässt über plattentektonische Prozesse immer neue Gebirge wachsen oder ganze Gebiete absinken (siehe Seite 76).

Aber auch lokal aufsteigende riesige Pakete heißen Gesteins können die Erdoberfläche heben. Ein Betrag von vielleicht einem Millimeter pro Jahr erscheint nicht viel. Doch in zehn Millionen Jahren – geologisch gesehen eine kurze Zeit – summieren sich die Millimeter zu zehn Kilometern.

Sandstein, hier in Arizona, ist nach den Körnern (0,06 bis 2 mm groß) benannt, aus denen er sich aufbaut. Er wird durch Wind, Eis oder Wasser abgerieben, die Körner werden in ruhigen Gebieten wieder abgelagert



Metamorphe Gesteine

bilden sich, wenn Sedimentgesteine oder magmatische Gesteine in größere Tiefen versenkt und dort veränderten Temperatur- und Druckbedingungen ausgesetzt werden. Unter dem Einfluss von Druck und Hitze werden Minerale in andere umgewandelt. Gleichzeitig verändert sich die Struktur der Gesteine

Und so könnte in einem einfachen Modell ein Kreislauf aussehen: Frisch abgelagerte, noch lockere Sedimente werden allmählich von immer mächtigeren Schichten bedeckt und erhärten unter deren Druck. Die nun festen Sedimentgesteine verwandeln sich mit zunehmender Tiefe nacheinander in verschiedene metamorphe Gesteine – und schmelzen schließlich. Die Schmelzen erstarrten zu magmatischen Gesteinen, entweder langsam in der Erdkruste oder sehr schnell, nachdem sie von einem Vulkan ausgestoßen worden sind.

Werden dann die Gesteine aus den unterschiedlichen Tiefen an die Erdoberfläche gehoben, schließt sich der Kreis: Die Gesteine sind nun der Verwitterung ausgesetzt – und liefern das Rohmaterial für neue Sedimentgesteine. □

Tonschiefer bildet sich, wenn Ton unter der Erdoberfläche aufgeheizt wird und plättchenförmige Kristalle neu gebildet werden. Das führt, wie hier in Oregon, zu typischen Schiefer-Strukturen



Magmatische Gesteine

entstehen, wenn eine Gesteinschmelze (Magma) erstarrt. Die Schmelze kann als Lava von Vulkanen ausgestoßen werden oder sich in der Erdkruste in riesigen Magmakammern sammeln und dort erkalten

Der niederländische Geologe und Fotograf Dirk Wiersma, 65, hat für diese Bilder Gestein in zuweilen hauchdünne Scheiben geschnitten. Helmut Horch ist Wissenschaftsautor in Hamburg.

Basalt ist das häufigste vulkanische Gestein. Er entsteht an mittelozeanischen Rücken und über Hot Spots. Beim Abkühlen bilden sich oft sechseckige Säulen – wie hier am Giant's Causeway in Nordirland

DIE KRAFT AUS DEM KERN

Vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren hat im Erdinneren ein gigantischer Dynamo den Betrieb aufgenommen. Er erzeugt einen unsichtbaren Schild, der uns vor der Strahlung aus dem All schützt

Text: Erwin Lausch; Illustration: David Pierce

Innerhalb des magnetischen Schirms der Erde existieren Reservoirs aus geladenen Teilchen verschiedenen Ursprungs, die so genannten **Strahlungsgürtel**. Verformt ein Sonnensturm das Erdmagnetfeld, kann die Schockwelle die in diesen Gürteln gefangenen Partikel stark beschleunigen und so die Funktion von Satelliten und sensiblen elektronischen Geräten etwa in Krankenhäusern beeinträchtigen

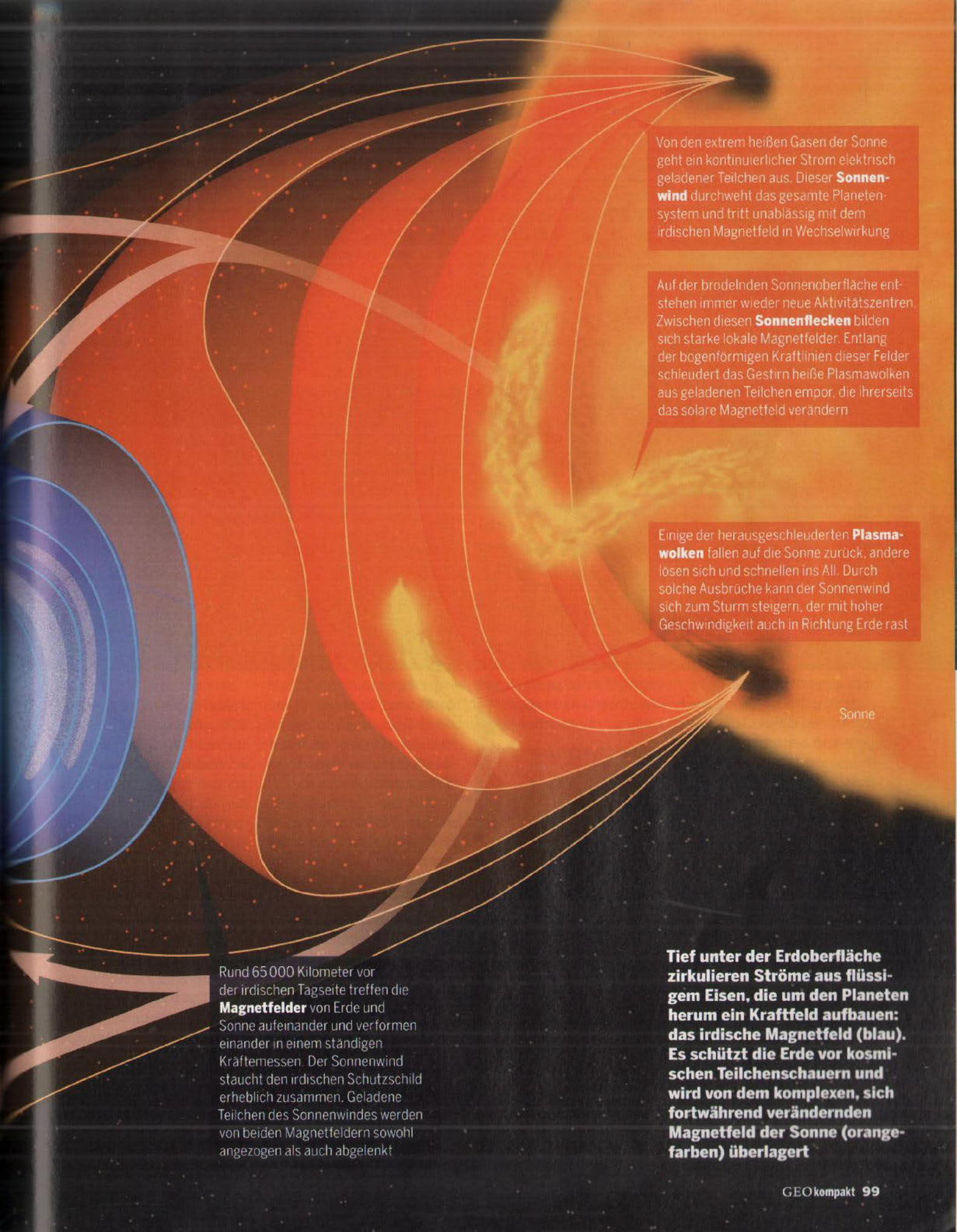
Das schützende Erdmagnetfeld hat seinen Ursprung im flüssigen **Äußeren Kern** des Planeten: Dort wälzt sich geschmolzenes Eisen unter dem Einfluss von Hitze und Erdrotation ständig um einen festen Eisenkern. Diese Ströme wirken wie ein riesiger Dynamo und erzeugen ein Magnetfeld

In den Polregionen laufen Kraftlinien der irdischen und der solaren Magnetosphäre trichterförmig zusammen. Vom Erdmagnetfeld eingefangene Partikel des Sonnenwindes, die den Feldlinien folgen, können hier in die Erdatmosphäre eindringen. Durch Wechselwirkungen mit Luftteilchen entstehen spektakuläre Leuchtkränze: die **Polarlichter**

Auf der sonnenabgewandten Seite der Erde läuft das **Magnetfeld** in einem Millionen Kilometer langen, stromlinienförmigen Schweif aus. Auf einem Umweg gleichsam und weit entfernt von dem Planeten, dringen durch diesen Teil des Erdmagnetfeldes die meisten Sonnenteilchen in das Magnetfeld ein und lösen Polarlichter aus

Erde

Polarlichter



Von den extrem heißen Gasen der Sonne geht ein kontinuierlicher Strom elektrisch geladener Teilchen aus. Dieser **Sonnenwind** durchweht das gesamte Planetensystem und tritt unablässig mit dem irdischen Magnetfeld in Wechselwirkung

Auf der brodelnden Sonnenoberfläche entstehen immer wieder neue Aktivitätszentren. Zwischen diesen **Sonnenflecken** bilden sich starke lokale Magnetfelder. Entlang der bogenförmigen Kraftlinien dieser Felder schleudert das Gestirn heiße Plasmawolken aus geladenen Teilchen empor, die ihrerseits das solare Magnetfeld verändern.

Einige der herausgeschleuderten **Plasmawolken** fallen auf die Sonne zurück, andere lösen sich und schnellen ins All. Durch solche Ausbrüche kann der Sonnenwind sich zum Sturm steigern, der mit hoher Geschwindigkeit auch in Richtung Erde rast

Sonne

Rund 65 000 Kilometer vor der irdischen Tagseite treffen die **Magnetfelder** von Erde und Sonne aufeinander und verformen einander in einem ständigen Kräftemessen. Der Sonnenwind staucht den irdischen Schutzschild erheblich zusammen. Geladene Teilchen des Sonnenwindes werden von beiden Magnetfeldern sowohl angezogen als auch abgelenkt

Tief unter der Erdoberfläche zirkulieren Ströme aus flüssigem Eisen, die um den Planeten herum ein Kraftfeld aufbauen: das irdische Magnetfeld (blau). Es schützt die Erde vor kosmischen Teilchenschauern und wird von dem komplexen, sich fortwährend verändernden Magnetfeld der Sonne (orange-farben) überlagert

Elektrisch geladene Teilchen rasen in dichten Schauern von der Sonne auf die Erde zu. Doch die meisten werden schon weit draußen im All abgefangen und um die Erde herumgeleitet. Ein unsichtbarer Schirm, der tief aus dem Inneren der Erde heraus aufgespannt ist, schützt deren Bewohner und die moderne menschliche Technik: das **Magnetfeld**.

Uralte Gesteine bezeugen die Existenz des Erdmagnetfeldes schon vor 3,5 Milliarden Jahren. Wahrscheinlich aber entstand es noch früher: als sich im Erdinneren ein eiserne Kern abgesondert hatte.

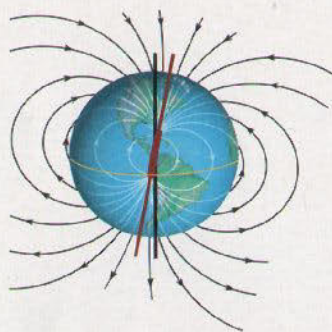
Die Kraft aus der Tiefe ist nicht zu spüren, kein menschlicher Sinn kann sie erfassen. Lange ahnte daher niemand etwas von dem erdumspannenden Feld, dessen **Kraftlinien** sich in weiten Bögen von Pol zu Pol ziehen. Und noch immer ist für Nichtphysiker schwer zu begreifen, worum es sich beim Magnetismus eigentlich handelt.

Magnetismus, definiert etwa Meyers Lexikon, ist die „Eigenschaft bestimmter Körper (Magnete) oder stromdurchflossener Leiter, auf andere Körper, besonders Eisen, Kräfte auszuüben“. In der Encyclopaedia Britannica heißt es, Magnetismus sei eine „Erscheinung, die mit der Bewegung elektrischer Ladungen verbunden ist“ – etwa: mit der Bewegung elektrisch negativ geladener Atomteilchen (Elektronen). Das sind Teilchen, die bei Eisen und anderen Metallen nur lose mit dem Atomkern verbunden sind und sich so nahezu frei im ganzen Metall ausbreiten können.

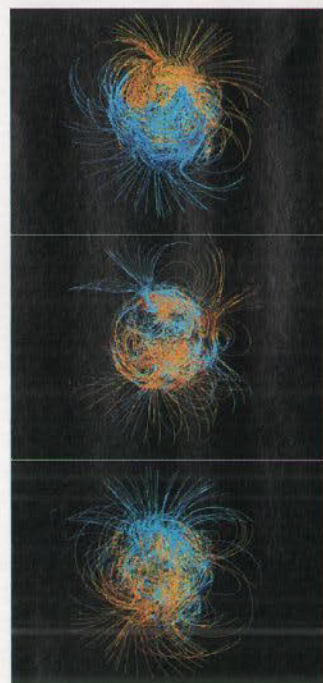
Aus physikalischer Sicht sind Magnetismus und **Elektrizität** eng miteinander verbunden: Denn nicht nur Ma-

gnete erzeugen Magnetfelder oder verstärken sie, sondern auch elektrische Ströme. Umgekehrt können Magnetfelder elektrische Ströme in Gang setzen. Auf solchen Wechselwirkungen beruht zu großen Teilen die Elektrotechnik.

Im Gegensatz zum Magnetfeld der Erde sind Magnete schon lange bekannt. Grie-



Alle paar hunderttausend Jahre ändert das Erdmagnetfeld seine Ausrichtung: Der nördliche und der südliche Magnetpol tauschen die Positionen. Während der Umpolung (unten: Simulation über einen Zeitraum von 9000 Jahren) kann es zeitweise mehr als zwei Magnetpole geben. Derzeit ist die Achse des Magnetfeldes (oben, rot) um etwa elf Grad gegen die Erdachse geneigt



chische Schriften aus dem 8. Jahrhundert v. Chr. erwähnen das Mineral Magnetit, ein Eisenoxid (Fe_3O_4), das Eisen anzieht. Wann Menschen zuerst bemerkten, dass ein freibeweglicher Magnetit-Splitter sich in Nord-Süd-Richtung einpendelt, ist nicht bekannt. Und ob Chinesen bereits um 2500 v. Chr. Magnetit als Kompass benutzten oder ob sie die Navigationshilfe erst im 13. Jahrhundert n. Chr. von Italienern oder Arabern übernahmen, ist umstritten. Der erste schriftliche Hinweis auf einen Kompass in Europa stammt aus der Zeit um 1200.

Für die Seeleute war das Instrument, das ihnen bei jedem Wetter anzeigte, wo Norden war, ein Segen. Aber auch ein Ärgernis: Denn die Richtung, in welche die Kompassnadel weist, stimmt mit der geographischen Nordrichtung nicht genau überein.

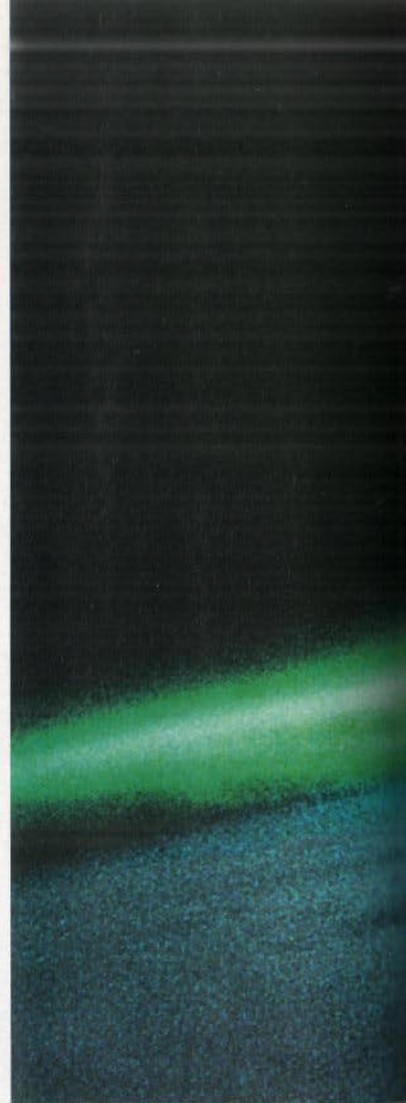
Zwar beträgt die „Missweisung“ – die Abweichung von der exakten, astronomisch zu bestimmenden Nordrichtung – zumeist nur wenige Grad, doch in der Nähe der Pole kann sie 90 Grad erreichen. Kapitäne berichteten seit dem Mittelalter zudem immer wieder von Unregelmäßigkeiten.

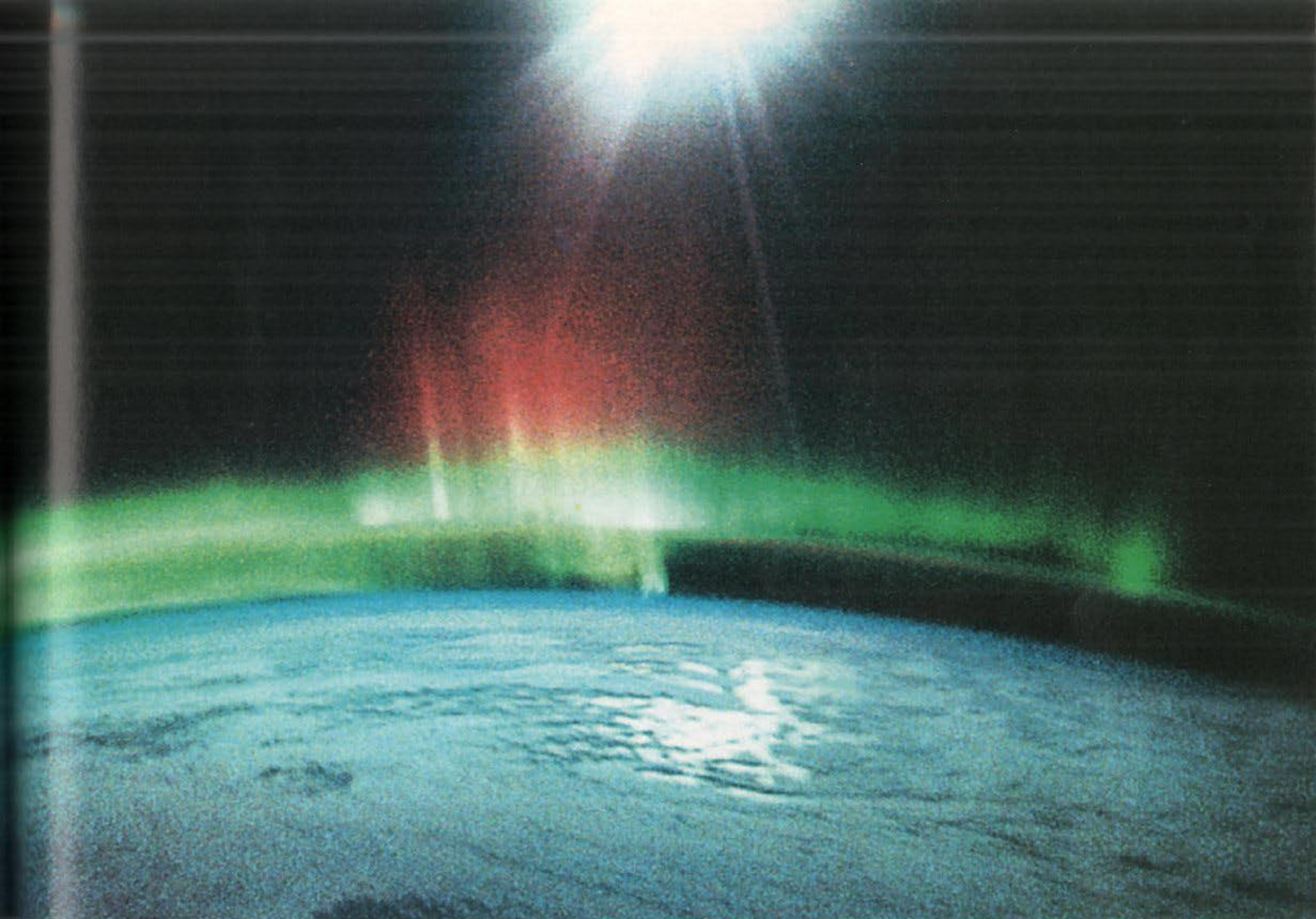
Zum Pionier der Magnetismusforschung wurde Ende des 16. Jahrhunderts der Engländer William Gilbert. Der Leibarzt Elisabeths I. experimentierte 17 Jahre lang mit Magneten und studierte Schiffsaufzeichnungen über magnetische Messungen. Im Jahre 1600 gelangte er in einem grundlegenden Werk zu dem Schluss, dass sich die Erde wie ein riesiger Magnet verhält, dessen Pole in der Nähe der geographischen Pole liegen.

Auch konnte er erhellen, dass Kompassnadeln nach Norden zeigen, weil sie sich entlang einem zwischen den

Polen ausgestreckten Magnetfeld ausrichten. Wie so ein Magnetfeld aussieht, lässt sich leicht demonstrieren: Streut man Eisenspäne über ein Stück Papier, unter das ein stabförmiger Magnet gehalten wird, richten sie sich von Pol zu Pol in bogenförmigen Linien aus.

Richtig in Schwung kam die Erforschung von Magnetfeldern, als in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entdeckt wurde, dass jeder stromdurchflossene Leiter wie ein Magnet wirkt (**Elektromagnet**). Zum einen lockten die nun entdeckten engen Wechselbeziehungen zwischen Magnetismus und Elektrizität zu weiteren Forschungen. Zum anderen erwies sich das irdische Magnetfeld bereits als hinreichend komplex, um Wissenschaftsgrößen





Teilchen des Sonnenwindes, die vom Erdmagnetfeld eingefangen werden, reagieren über den Polregionen mit den Gasen der Erdatmosphäre und regen sie zur Strahlung in den Farben Grün, Rot oder Violett an. Polarlichter (hier eine Shuttle-Aufnahme mit dem Mond am oberen Bildrand) machen Teile des irdischen Magnetfeldes vorübergehend sichtbar: Die vertikalen Strahlen (Mitte) folgen dessen Kraftlinien

wie Alexander von Humboldt derart zu faszinieren, dass sie selbst Messungen vornahmen und zum Aufbau von Beobachtungsstationen aufriefen.

Heute registrieren Wissenschaftler in rund 200 magnetischen Observatorien weltweit die Schwankungen des irdischen Magnetfeldes. Seine Stärke verändert sich fortwährend und in unterschiedlicher Weise von Ort zu Ort.

Doch weshalb verhält sich die Erde wie ein Magnet?

Noch zu Humboldts Zeiten vermuteten Wissenschaftler im Erdinneren einen riesigen Stabmagneten. Gegen diese These sprach aber schon damals die große Variabilität des Erdmagnetfeldes.

Zudem verlieren Magnete ihren dauerhaften Magnetismus bei Temperaturen, die in der Erde schon in relativ geringer Tiefe erreicht werden. Die wirkliche Ursache blieb rätselhaft, bis Mitte des 20. Jahrhunderts zwei Forscher die These

aufstellten, im Erdkern wirke eine Art Dynamo.

Ein Dynamo ist eine Maschine, die mechanische Energie in elektrische verwandelt. Bekanntestes Beispiel: der Fahrraddynamo. Der dabei erzeugte Strom baut ein Magnetfeld auf.

Nach der Theorie vom **Geodynamo** funktionieren im Inneren unseres Planeten Konvektionsströme aus flüssigem Eisen (durch die Wärmeenergie

aus dem festen Inneren Kern in den Äußeren Erdkern abgeleitet wird) wie Spulen. Die Forscher nehmen an, dass sich diese Eisenströme unter dem Einfluss der Erdrotation schraubenförmig zu den Polen winden und abgekühlt wieder absinken. Die Rotation führt auch dazu, dass diese **Konvektionswalzen** sich etwa parallel zur Erdachse ausrichten.

Die Theorie ist im Einzelnen hoch kompliziert, und noch immer sind nicht alle Details geklärt. Dennoch ist sie heute allgemein anerkannt. Auch lassen sich viele Unregelmäßigkeiten im Erdmagnetfeld durch die in Walzen wandernde Schmelze gut

Seit Urzeiten kommt es immer wieder zu
dramatischen Schwankungen des Erdmagnetfeldes

Magnetische Chroniken

Geowissenschaftler, die der Vergangenheit der Erde nachspüren, schätzen das Magnetfeld. Es hat ihnen reiche Erkenntnisse beschert, zu denen sie auf andere Weise kaum gekommen wären. Denn erstarrte Laven und erhärtete Sedimente sind magnetische Chroniken aus Urzeiten. Das Erdmagnetfeld verändert sich fortwährend, aber es wird in Gesteinen aufgezeichnet. Das Eisenoxid Magnetit und andere Minerale, die aus Lava auskristallisieren, werden beim Abkühlen dauerhaft in der Richtung des vorherrschenden Magnetfeldes magnetisiert. Zerfällt das Gestein, können sich die dann frei gewordenen winzigen Magnete am Boden eines Gewässers absetzen und sich dabei wieder wie kleine Kompassnadeln ausrichten.

Paläomagnetische Untersuchungen trugen unter anderem entscheidend dazu bei, die Lehre der Plattentektonik zu begründen, nach der die äußere Hülle der Erde aus beweglichen Platten besteht (siehe Seite 76): Geowissenschaftler entdeckten im Meeresboden abwechselnd normal und umgekehrt magnetisierte Streifen parallel zu den mittelozeanischen Rücken, wo ständig geschmolzenes Gestein aus dem Erdinneren aufquillt. Die Streifen sind unterschiedlich breit, und das Muster auf der einen Seite entspricht spiegelbildlich dem auf der anderen.

An diesen magnetischen Zebrastrifen erkannten die Forscher, dass die Tiefseeböden in den mittelozeanischen Rücken entstehen. Das geschmolzene Material aus dem Erdinneren kühlt hier ab und wird dabei in Richtung des gerade herrschenden Magnetfeldes magnetisiert, ehe es seitwärts davongleitet. **Seafloor Spreading** (Spreizung des Meeresbodens) heißt dieser Vorgang. Zugleich zeigte sich auf den Kontinenten, dass Mini-Magnete in Gesteinen aus verschiedenen Perioden der Erdgeschichte unterschiedlich ausgerichtet sind. Anfangs dachten die Forscher lediglich an Polwanderungen. Doch auch die Magnete in weit voneinander entfernten Gesteinen des gleichen Alters waren verschieden ausgerichtet. Erklären ließ sich die Diskrepanz jedoch, wenn die Gesteine selbst ihre Lage verändert hatten. Anhand dieser paläomagnetischen Kompassnadeln gelang es, zu rekonstruieren, wo die Gesteine ursprünglich magnetisiert worden waren, welchen Weg sie zurückgelegt hatten und sogar mit welcher Geschwindigkeit. Aus der Entdeckung und Interpretation des Seafloor Spreading entstand so kurz darauf das global umfassende Konzept der Plattentektonik.



Erstarrende Lava wird stets in Richtung des vorherrschenden Magnetfeldes magnetisiert. Ältere Lavaschichten geben deshalb frühere Umpolungen der Erdmagnetosphäre wieder

GEO-Grafik

erklären – denn während eine Spule akkurat gewickelt ist, verändern sich die Strömungen im Erdkern ständig.

So driftet das Magnetfeld in manchen Regionen westwärts, in unseren Breiten etwa 20 Kilometer pro Jahr. Auch die magnetischen Pole wandern. Geophysiker, die an Computermodellen im Zeitraffer untersucht haben, wie sich ein vom Geodynamo erzeugtes Magnetfeld über lange Zeit

Ständig zerren die Kräfte der Sonne am irdischen Schutzschirm

räume verhält, konnten im Rechner sogar die spektakulärste Erscheinung des wirklichen Feldes beobachten: die Umkehr seiner Richtung.

Denn immer wieder im Lauf der Erdgeschichte hat sich das Magnetfeld umgepolt, ist der Nord- zum Südpol geworden und umgekehrt. Das haben Untersuchungen etwa an alten Lavaströmen ergeben, in denen die jeweils herrschenden Magnetfelder quasi eingebakken sind (siehe Kasten).

Durch die Konvektion im Erdkern aber werden höchstens 94 Prozent des an der Erdoberfläche zu messenden Magnetfeldes erzeugt. Drei weitere Prozent tragen magnetisierte Gesteine in der Erdkruste und vielleicht auch im Oberen Erdmantel bei. Die Quelle für den Rest liegt außerhalb der Erde.

Denn auf das magnetische Außenfeld der Erde trifft unablässig der so genannte **Sonnenwind**: ein beständiger Strom elektrisch geladener Teilchen, der von der Sonne ausgeht.

Durch das Zusammenwirken des Sonnenwindes mit den magnetischen Kraftlinien unseres Planeten werden in der Erdkruste und in der Atmosphäre elektrische Ströme erzeugt, die wiederum Magnetfelder hervorrufen und so das an der Erdoberfläche gemessene Feld beeinflussen.

Schon als normale Brise verzerrt der Sonnenwind das irdische Magnetfeld gewaltig. Doch manchmal kommt es zu veritablen Sonnenstürmen, und dann spielt vieles auf der Erde verrückt.

Während das Magnetfeld der Erde auf der sonnenzugewandten Seite etwa 65 000 Kilometer weit ins All hinausreicht, wird es auf der anderen Seite zu einem mehrere Millionen Kilometer langen Schweif verformt. In großer Entfernung von der Erde können Sonnenpartikel von der sonnenabgewandten Seite – sozusagen von hinten – in das irdische Magnetfeld eindringen.

Dann sausen sie, beschleunigt vom Erdmagnetfeld, auf spiralförmigen Bahnen in Richtung der Erdpole, regen dort hoch in der Atmosphäre Bestandteile der Luft zum Leuchten an und erzeugen so



Durch Schwankungen des Erdmagnetfeldes verändern sich die Positionen der magnetischen Pole: Allein im letzten Jahrhundert hat sich der magnetische Pol im Norden um 1100 Kilometer verschoben. Gegenwärtig befindet er sich nördlich von Kanada und bewegt sich jährlich etwa 40 Kilometer in Richtung Sibirien

Polarlichter – jene schillernen Himmelserscheinungen, die ohne das irdische Magnetfeld überall auf der Erde zu beobachten wären.

Bis vor wenigen Jahrzehnten mussten sich neben Forschern nur Seefahrer oder Piloten mit dem Erdmagnetfeld beschäftigen – diejenigen also, die auf einen Kompass angewiesen waren. Doch heute erweisen sich gerade jene Bereiche als anfällig für Störungen aus dem All, die für das fehlerfreie Funktionieren unserer Zivilisation unerlässlich sind: Satellitentechnik, Kommunikation, Computertechnik, Luftverkehr, Energieversorgung.

Bei starker Sonnenaktivität ausgelöste **Magnetstürme** richten immer wieder immense Schäden an. Die energierei-



Wie komplex das Magnetfeld der Sonne ist, zeigt diese Röntgen-UV-Aufnahme: Lokale Kraftlinien zeichnen sich als leuchtende Gasbögen ab

chen Teilchen setzen Satelliten zu, die Telefongespräche und TV-Programme übertragen sowie Daten für die Wettervorhersage. Manche Satelliten sind deshalb bereits als irreparabel ausgefallen.

Auch das auf 25 Satelliten angewiesene Global Positioning System (GPS) zur Positions-

bestimmung und Navigation wird bei Magnetstürmen unzuverlässig. Und bei einem durch solche Stürme ausgelösten Zusammenbruch der Energieversorgung waren im März 1989 sechs Millionen Kanadier neun Stunden lang ohne Strom.

Gegenwärtig nimmt die Stärke des irdischen Magnetfeldes zudem dramatisch ab. Seit dem Beginn regelmäßiger Beobachtungen vor über 150 Jahren ist es ständig schwächer geworden, in den letzten 20 Jahren im globalen Mittel um 1,7 Prozent, stellenweise sogar um zehn. Experten sehen darin den möglichen Beginn einer **Polumkehr**, was im Durchschnitt alle 500 000 Jahre geschieht. Der letzte Wechsel erfolgte vor 780 000 Jahren, der nächste wäre somit fällig.

Bis sich das Feld neu ausgerichtet hat, vergehen ein paar

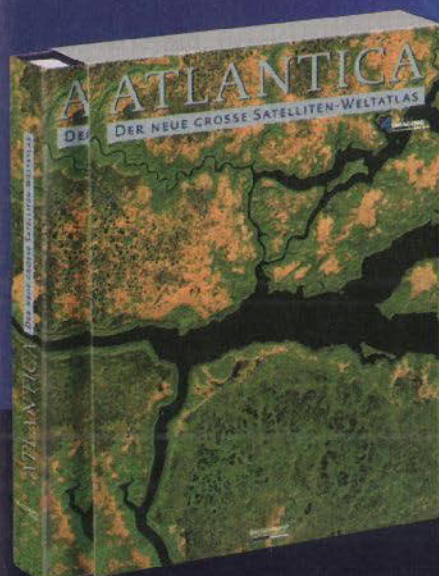
tausend Jahre. Vorher aber werden voraussichtlich mehr als zwei Pole in Erscheinung treten, wird die Erde vorübergehend an magnetischem Schutz einbüßen – und damit den Einwirkungen des Sonnenwindes stärker ausgesetzt sein.

Wie sich das auf das irdische Leben auswirken wird, ist schwer vorherzusagen. Zahlreiche Tiere, die sich am Magnetfeld orientieren – Zugvögel, Meeresschildkröten, Wale –, könnten Probleme bekommen. Und auch die Navigationstechnik des Menschen wird durcheinander geraten.

Ihre komplexe Technik werden unsere Nachkommen also sturmfest machen müssen. □

David Pierce, 42, aus Cleveland, Ohio, lebt in Hamburg und hat sich auf technische und wissenschaftliche Illustrationen spezialisiert.

Atemberaubende Perspektiven



Die ganze Welt in einem Buch

Atlantica - der neue Satellitenbild-Weltatlas fasziniert und informiert: Über 100 aktuelle Satellitenaufnahmen in Verbindung mit hochwertigen Karten zeigen die Erde von ihrer schönsten Seite. Diese einzigartige Kombination aus Weltatlas und Bildband wird Sie fesseln und Ihnen völlig neue Perspektiven eröffnen.

Atlantica
Der neue große Satelliten-Weltatlas
496 Seiten
Mit Schutzumschlag im Schubert
ISBN 3-577-07215-6
€ 68,- [D]

Bertelsmann
LEXIKON INSTITUT

www.wissenmediaverlag.de



Alles fließt – auch ein Basaltfelsen

Wissenschaftler sprechen bei der Drift der Kontinente von »Subduktion« und »Scherbrüchen« – aber in Wirklichkeit ist das Ganze ein ständiges Gewusel und Gewalle

Wir werden zurzeit gerade umgepolt. Haben Sie das mitbekommen? Die Magnetpole tauschen ihre Position. Das tun sie offenbar gelegentlich. Der Nordpol wird zum Südpol, und der Südpol wird zum Nordpol. Wusch. Dieser Tausch hat zum letzten Mal vor 780 000 Jahren stattgefunden, das heißt, die Urmenschen haben es erlebt. Magnetpole sind generell unstete Gesellen. Der Nordpol bewegt sich gerade von Kanada Richtung Sibirien. Ich habe mich gefragt: Was bedeutet das? Ist es gefährlich? Wie lange dauert es? Dann habe ich einen der für dieses Heft zuständigen Experten angerufen, einen Geologen.

Im Vergleich zu dem Astronomen, den ich kürzlich zu einem anderen Thema befragt habe und der gern erzählte und große, interstellare Entwürfe ausbreitete, war der Geologe auffällig wortkarg. Er hat jeden Tag mit Steinen zu tun. Ich dachte: Steine sind das Wesentliche, der Kern von allem, Anfang und Quintessenz des Universums. Wer mit Steinen zu tun hat, ist der Philosoph unter den Naturwissenschaftlern und wägt jedes Wort.

Die große alte Dame der Seismologie, die Dänin Inge Lehmann, der wir zu

wesentlichen Teilen die Erkenntnis verdanken, dass sich innerhalb des flüssigen Erdkerns noch ein zweiter, fester Erdkern befindet – diese Jahrhundertwissenschaftlerin also hat ihrem Grundsatzwerk, das ihren Wissenszweig revolutionierte und gewisse Lehren ihrer Vorgänger vom Tisch



fegte, den folgenden Titel gegeben: „P“. „P“ war genau 28 Seiten lang, Inhaltsverzeichnis inklusive.

Der Tausch der Magnetpole dauert ein paar tausend Jahre, wie lange genau, weiß man nicht. In dieser Zeit wird die Erde fast kein Magnetfeld besitzen, sie wird starkem Sonnenwind und extremer Strahlung ausgesetzt sein, wir bleiben wohl besser in der Wohnung. Obwohl es die Urmenschen und die Tiere damals, vor 780 000 Jahren, ja auch irgendwie überlebt haben.

Der Geologe sagt: „Gewisse Tiere, die sich mithilfe des Magnetfeldes orientie-

ren, werden völlig desorientiert sein.“ Die Vögel stoßen in der Luft zusammen und trudeln kreischend zur Erde. Statt nach Afrika fliegen alle Störche nach Harvestehude. Die Riesenschildkröten bekommen eine Identitätskrise, und die Pinguine versuchen zu fliegen. Es wird bestimmt interessant, wenn das Umpolen anfängt. Morgen schon kann es losgehen.

Fassen wir wieder zusammen, was wir gelernt haben. Unsere Erde ist nicht hart und rund wie der Globus aus dem Erdkundeunterricht. Unsere Erde ist in Wirklichkeit weich wie ein alter Kopfsalat und hat die Form einer Kartoffel. Das heißt, uns Menschen kommt sie zwar hart vor und wunderbar formstabil. Aber das ist nur deswegen so, weil wir Menschen so kurz leben und selber schlapper weich sind, wenn man uns mit einem Basaltfelsen vergleicht. Alles fließt.

Sobald ich mir die Erde mal im extremen Zeitraffer vorstelle, sehe ich etwas, das sich dauernd verformt, wo Kontinente versinken und auftauchen, sich ineinander schieben und wegdrücken, wo auf einem Gesteinsbrei sieben große Platten herumdriften wie riesengroße Flöße, Gebirge hochschießen, Landmassen aufreißen, Meere sich ergießen – kurz,

ein ständiges Gewusel und Gewalle, wobei ein Wissenschaftler natürlich niemals Gewusel und Gewalle sagen würde, sondern Subduktion, Scherbrüche und solche Sachen. Im Inneren der ganzen Sache rotiert, möglicherweise, eine gigantische Spule aus unvorstellbar großen Strömen von flüssigem Eisen.

Ich verstehe es so: Das Bild von der weichen Kartoffelerde ist im Grunde genauso richtig oder falsch wie das Bild von der harten Ballerde. Nur: Das eine ist eben der Lebensdauer und den Sinnesorganen eines Menschen angepasst, und das andere beschreibt die Erde sozusagen mit den Augen eines weisen alten Granitfelsens. Der älteste uns persönlich bekannte Stein der Erde ist übrigens 4,03 Milliarden Jahre alt und stammt aus Kanada. Ein Gneis. Dieser Alte hat schon so manchen Wilson-Zyklus kommen und gehen sehen.

Ein Wilson-Zyklus beschreibt das Entstehen und Vergehen von Ozeanen und dauert 300 bis 500 Millionen Jahre. Das ist, wenn die Erde sich zusammenzieht und dehnt wie die Lunge beim Atmen. Atmet die Erde? Der Wilson-Zyklus ist nur eine Theorie. Fest steht, dass die Meere Hügel und Täler haben. Ein Schiff kann auf dem Meer bergauf fahren, was aber weder die Besatzung noch die Passagiere merken, schon wieder deshalb, weil unsere Sinnesorgane den kosmischen und gesamtplanetarischen Gegebenheiten einfach nicht gewachsen sind.

Wenn Sie eine Gegenstimme zu den wissenschaftlich belegten, faktisch garantierten richtigen Aussagen der anderen Texte in diesem Heft haben möchten, sind Sie hier richtig. Zum Beispiel: Fällt Ihnen auf, wie sehr die Tatsachen der Erdgeschichte dem uralten biblischen Mythos der Genesis entsprechen? Am Anfang entstehen der Himmel und die Erde. Und dann trennen

sich das Land und das Wasser, die Kontinente entstehen. So war es. Und genau so beschreibt es die Bibel.

Oder: Die ganze Erde ist eine Art riesiger Magnet. Magnetismus, die Schwester der Elektrizität, ist eine gewaltige unsichtbare Kraft, die uns umgibt. Keine Angst, ich bin kein Mystiker oder Spiritist. Aber nach der Lektüre der Texte kann man schon die Idee bekommen, dass diejenigen, die dem Magnetismus alle möglichen Kräfte und Einflüsse zuschreiben, keineswegs komplett wahnsinnig sein müssen.

Einige der wahrsten Zeilen, die jemals zum Thema Geologie geschrieben wor-

»Eine der wahrsten Zeilen zum Thema Geologie lautet: Marmor, Stein und Eisen bricht. Alles, alles geht vorbei«

den sind, stammen aus einem berühmten deutschen Liedtext, 1960er Jahre. Sie lauten: „Marmor, Stein und Eisen bricht. Alles, alles geht vorbei.“ Drafi Deutscher! Genau so ist es. Die Steine haben ihren Kreislauf, ähnlich wie die Lebewesen, nur viel langsamer, sie zerfallen, brechen, gehen entzwei und formen sich neu.

Faszinierend ist auch die Tatsache, dass die Anziehungskraft der Erde wegen der unterschiedlich dichten Erdkruste an verschiedenen Stellen verschieden stark ist.

Frage an den Geologen: „Wiegen wir im Urlaub vielleicht plötzlich weniger, obwohl wir gar nicht abgenommen haben? Wegen der Erdanziehung?“

Die Antwort: Ja, so etwas kann theoretisch passieren. Es geht dabei nicht um Kilos, sondern höchstens um ein paar hundert Gramm. Immerhin. Der Geologe sagt außerdem: „Wenn Sie auf dem Mount Everest stehen, sind Sie besonders leicht. Wenn Sie aber zum Mittelpunkt der Erde reisen, wie in dem Buch von Jules Verne, werden Sie immer schwerer. Direkt am Erdmittelpunkt sind Sie wieder leicht, aber bis Sie da ankommen, sind Sie sowieso schon geschmolzen.“

Eine Sache, die wir kleinen, jungen, butterweichen Menschen für eine Klimakatastrophe halten, bedeutet im Maßstab der Erdgeschichte gar nichts. Und wenn es jetzt ein Jahr lang ununterbrochen regnet? Nein, zehn Jahre? Das ist nichts. Zu Beginn der Erdgeschichte hat es möglicherweise 100 000 Jahre lang geregnet. Die Sintflut. Die Sintflut kam schon mal vorbeugend, lange bevor der erste Sünder die Szene betrat. Die gesamte Erde war von einem Ozean bedeckt, der so heiß war, dass man sich darin die Füße verbrannt hätte.

Was immer in den nächsten 1000 Jahren passieren wird – so hart, wie es mal war, kann es nicht mehr kommen, und überhaupt, um wieder von der Naturwissenschaft zur Geisteswissenschaft zurückzukehren, was ist der Mensch? Ein Klacks, verglichen mit den meisten anderen Dingen, von denen die Erdgeschichte handelt.



Gewinnen Sie jetzt mit dem neuen GEOkompakt!

Sensationelle Chance für besonders Schnelle: Unter den ersten 1.111 Teilnehmern verlosen wir eine 15-tägige Gebeco-Reise »Chile – Erlebnis einzigartiger Geographie« mit Besuch einer Sternwarte für zwei Personen. Das wird ein unvergessliches Reise-Erlebnis!



Hauptpreis: 15 Tage Chile für 2 Personen

Die Tour des Studien- und Erlebnisreiseveranstalters Gebeco führt Sie von Santiago de Chile unter anderem zum bizarren Mondtal, zu verlassenen Salpeterminen-Siedlungen, einem 4.200 Meter hoch gelegenen Geysirfeld, den Petrohué-Wasserfällen bis in den Nationalpark Torres del Paine. Für den Gewinner schließt sich der Besuch einer Sternwarte an.

Die 15-tägige Gebeco-Erlebnisreise hat einen Wert von € 7.500,-.

Oder gewinnen Sie einen von 33 weiteren attraktiven Preisen:



3x den GEO-Globus

In exzellenter Handarbeit in der ältesten Globus-Manufaktur der Welt, der Firma Columbus Globus, eigens für GEO hergestellt: der neue GEO-Leuchtglobus. **Der GEO-Globus hat einen Wert von € 199,90.**



10x das BRESSER Saturn Explorer-Teleskop

Mit Linsensystem nach Fraunhofer, Zenit-Prisma. 5 x 24-Sucher-Fernrohr inkl. Halterung. Vergrößerung: 25 x -150 x. Objektiv: Ø 50 mm. Brennweite: 625 mm. 2 Okulare und viel Zubehör. **Das BRESSER-Teleskop hat einen Wert von € 65,-.**



20x das GEO-Buch „Wie laut war der Urknall?“

Wieso ist der Himmel blau? Weshalb ist der Atlantik salziger als der Pazifik? Dieses Buch versammelt die schönsten »Fragen der Woche« von GEO.de, dem Online-Magazin von GEO, und GEO. **Das GEO-Buch hat einen Wert von € 14,90.**

NEU!

GEO kompakt

Die Grundlagen des Wissens

Vorteilskarte



Einführungsangebot:
Sichern Sie sich
jetzt GEO kompakt
mit 13 % Ersparnis +
Sammelbox gratis!

GRATIS

Tauchen Sie ein:

GEOkompakt präsentiert Themen in außergewöhnlicher visueller Opulenz, mit anschaulichen, leicht verständlichen Texten und Erklärungen.

Lesen oder verschenken Sie jetzt GEOkompakt 4-mal jährlich zum Vorzugspreis von nur € 26,-! Sie sparen so über 13 % gegenüber dem Einzelkauf. Als Dankeschön erhalten Sie die praktische Sammelbox gratis!

- Sammelbox gratis!
- Über 13 % sparen gegenüber dem Einzelkauf!
- Lieferung frei Haus!
- Nach 4 Ausgaben jederzeit kündbar!
- Geld-zurück-Garantie für zu viel bezahlte Hefte!
- Ideal auch als Weihnachtsgeschenk!

Deshalb: Gleich oben stehende Karte ausfüllen und abschicken!

Dunkle Brühe schießt aus einer Hydrothermalquelle in 3500 Meter Tiefe. An solchen bizarren Schloten – »Black Smoker« (»Schwarze Raucher«) genannt – entstanden möglicherweise die ersten Echten Bakterien und Archaeobakterien

Das Wunder in der Tiefsee

Text: Ute Kehse

Im Urozean entstanden einst womöglich die ersten Organismen des jungen Planeten: Aus einfachen chemischen Verbindungen entwickelten sich an unterseeischen Hydrothermalquellen immer komplexere organische Moleküle – bis hin zur fertigen Zelle



Thermoplasma acidophilum, eine Archaeobakterie, lebt in heißem, äußerst saurem Wasser. Die Archaeen gehören neben den Echten Bakterien zu den stammesgeschichtlich ältesten Lebewesen der Welt



Aquifex pyrophilus, eine Echte Bakterie, gedeiht am besten in etwa 90 Grad Celsius heißem Wasser – Temperaturen, die wohl auch die Urzellen vertragen konnten



Noch heute bilden sich in den Tiefen der Meere die Schlotte der Black Smoker, inzwischen auch von höheren Organismen bevölkert

Vor rund vier Milliarden Jahren liegen die schlimmsten Geburtswehen hinter der jungen Erde, doch sie ist noch immer eine aufgewühlte, unruhige Welt. Zahlreiche Vulkane schleudern giftige Gase und glühend heißes Gestein in die Atmosphäre, in der Gewitter wüten. Dann und wann trifft ein verirrter Asteroid den jungen Planeten und bringt das Ozeanwasser zum Kochen.

Auch am Boden des bis zu 10 000 Meter tiefen Urmeeres tobt der Kampf der Elemente. Auf der dünnen Kruste, die

den Urozean von dem heißen Erdinneren trennt, türmen sich bizarre Schlotte. Aus ihnen quillt eine ätzende, zwischen 70 und 400 Grad Celsius heiße Flüssigkeit voller Gase und Minerale.

Mitten in dem Inferno geschieht irgendwann etwas Erstaunliches: An den kühleren der heißen **Hydrothermalquellen** brauen sich aus dem höllischen Chemiecocktail erst einfache, dann immer komplexere organische Verbindungen zusammen. Aus toter Materie werden lebende Zellen, die sich vermehren und fortbewegen können. Sol-

che hydrothermalen Quellen, zu denen die **Black Smoker** („Schwarze Raucher“) gehören, sind die Brutstätten des Lebens auf der wüsten Erde – so zumindest eine neue, viel diskutierte Hypothese des Glasgower Geologen Michael Russell und des Biologen William Martin von der Universität Düsseldorf.

Die Energie für diesen Schöpfungsakt beziehen die Hydrothermalquellen aus dem Erdinneren. Meerwasser, das durch Spalten einige Kilometer tief in die Kruste eindringt, wird dort erhitzt und nimmt zahlreiche Gase auf – darunter Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff.

Dann schießt es wieder empor. Wenn die hydrothermale Flüssigkeit auf das kühlere Wasser des Ozeans trifft, verbindet sich der Schwefelwasserstoff mit im Meerwasser gelösten Metallen wie Eisen und Nickel, Mangan, Kupfer und Zink.

Dunkle Metall-Schwefelverbindungen („Metallsulfide“) entstehen, die den Ausstrom der heißen Quellen schwärzen. Nach und nach türmen sich aus diesen herabsinkenden Partikeln die Schlotte der Black Smoker auf. Und: Am Rand der Kamine blähen sich winzige Blasen mit einer dünnen Haut aus **Eisensulfid** auf.

Diese Eisensulfid-Haut trennt zwei völlig gegensätzliche Milieus voneinander: Im

Inneren der Blasen ist eine bis zu 100 Grad Celsius heiße Flüssigkeit voller reaktionsfreudiger Substanzen gefangen, draußen strömt weniger als 30 Grad warmes, sauerstoffarmes und kohlendioxidreiches Meerwasser.

Zwischen beiden Bereichen herrscht auch ein elektrochemisches Ungleichgewicht: Das Meerwasser ist leicht sauer, es enthält Säuren, wie zum Beispiel Phosphorsäure, die positiv geladene Wasserstoff-Ionen (H^+) abspaltet.

In der hydrothermalen Flüssigkeit im Inneren der Blasen befinden sich vor allem alkalische Stoffe wie Ammoniak, die mit Wasser reagieren und dabei negativ geladene Hydroxid-Ionen (OH^-) zurücklassen.

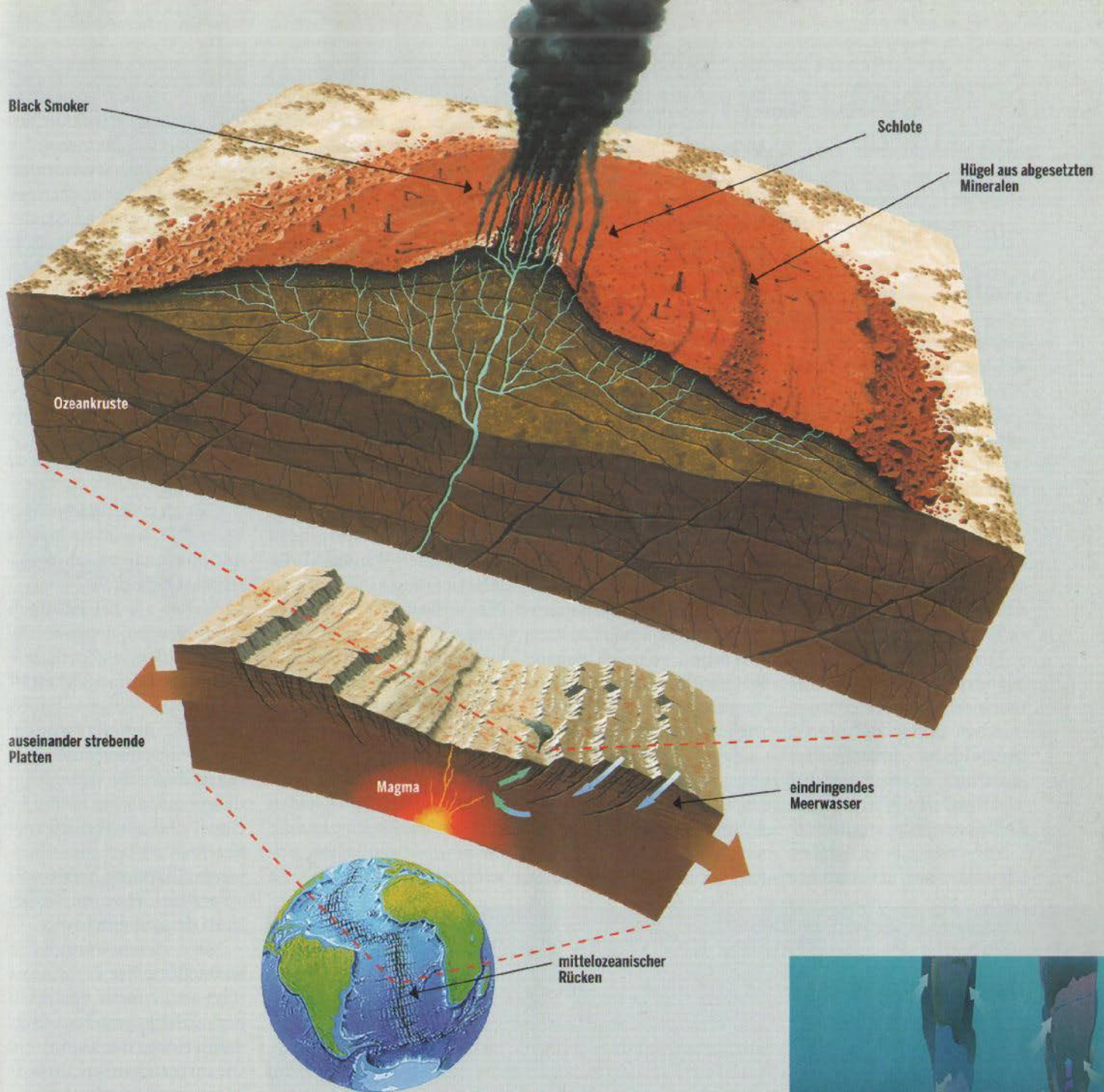
All das führt dazu, dass reichlich Energie vorhanden ist – Energie, die Moleküle zu trennen und andere zusammenzubauen vermag. Kohlendioxid und Wasserstoff verschmelzen zum Beispiel zu ersten einfachen organischen, also auf Kohlenstoff basierenden Verbindungen.

Die Bläschenhaut aus Eisensulfid dient bei diesen Prozessen als **Katalysator**: Sie erleichtert Reaktionen zwischen den Stoffen im Inneren der Hohlräume, verändert sich selbst dabei aber nicht. Gleichzeitig verhindert sie, dass die entstandenen **organischen Moleküle** im Meer verschwinden.

Eine der ersten so zusammengefügt organischen Substanzen ist vermutlich Essigsäure: ein einfaches Molekül aus zwei Kohlenstoff-, zwei Sauerstoff- und vier Wasserstoffatomen.

Bei dieser Reaktion wird Energie frei, die den Zusammenbau weiterer Verbindungen ermöglicht. So brauen sich beispielsweise energiereiche Thioester zusammen –

Aus winzigen Partikeln wachsen in der Tiefe bis zu 60 Meter hohe Kamine heran



BLACK SMOKER

Mineralquelle am Meeresgrund

Dort, wo in den Ozeanen Erdplatten auseinander streben, steigt aus den Rissen heißes Magma auf, kühlt ab und formt neues Krustengestein (siehe Seite 76). Diese so genannten mittelozeanischen Rücken sind zerfurcht – Meerwasser kann so mehrere Kilometer tief in das Gestein sickern. Gelangt es in die Nähe des Magmas, wird es aufgeheizt, dehnt sich aus und steigt über Risse und Spalten wieder nach oben. Auf seinem Weg löst es aus dem Gestein Minerale und Gase, wie etwa Schwefelwasserstoff. Bei dem Austritt ins kalte Meerwasser reagieren die Stoffe miteinander, verbinden sich neu und quellen wie flüssiger Rauch aus. Dessen Partikel schlagen sich nieder, türmen sich zu Hügeln auf und lassen Schlote heranwachsen – die Black Smoker. In kühleren Bereichen ihrer Wände, so eine neue Hypothese, könnte das Leben entstanden sein.



Einem Riss im Ozeanboden entweichen zunächst nur Gase (links), dann auch gelöste Minerale. Die sinken herab und bilden die Schlote der Black Smoker

Schicht um Schicht türmen Minerale die Schlotwände auf

Verbindungen aus Schwefel, Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff.

Zu diesen Thioestern gehört auch die „aktivierte Essigsäure“. Sie bildet später den Ausgangspunkt für einen der wichtigsten Stoffwechselprozesse: den **Zitronensäurezyklus**, bei dem Zwischenprodukte abgezweigt werden können, aus denen die Grundbausteine des Lebens entstehen.

Viele Jahrmillionen lang beendenden gewaltige Meteoriteneinschläge diese geochemischen „Versuche“ der Lebensbildung immer wieder vorzeitig – der gesamte Planet wird durch den Gluthauch der Kollisionen quasi sterilisiert.

Vor etwa 3,8 Milliarden Jahren aber lässt der Trümmer-

regen aus dem Kosmos allmählich nach. Geschützt vor den Tumulten an der Oberfläche, kocht – gemäß der Hypothese von Michael Russell und William Martin – in den Wänden eines Schwarzen Rauchers am Boden des Urozeans schließlich ein Gebräu zusammen, das mehr ist als nur eine Ansammlung organischer Substanzen.

Manche der einfachen organischen Grundbaustoffe verbinden sich zunächst zu kurzen Kohlenstoffketten, etwa zu **Kohlenhydraten (Zucker)**.

Eine andere Stoffgruppe entsteht, wenn sich der Ausgangsstoff Essigsäure mit Stickstoff verbindet, der im Ammoniak aus dem Erdinneren enthalten ist: Es bilden sich **Aminosäuren**. Ketten aus mehreren Aminosäuren ergeben Peptide, die sich zu langkettigen **Proteinen** (Eiweißen) zusammenschließen können (siehe Kasten Seite 114).

Sobald der Bioreaktor im Inneren der Eisensulfid-Bläschen erst einmal in Gang gekommen ist, produziert er eine kaum überschaubare Vielfalt von Substanzen. Darunter

sind auch vier ringförmige Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindungen: die **Nukleinsäurebasen** Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil. In einem dieser unzähligen Hohlräume entsteht aus diesen vier Basen zusammen mit der Zuckerart Ribose und der Phosphorsäure aus dem Meerwasser ein Kettenmolekül, das für das aufkeimende Leben von entscheidender Bedeutung ist.

Dieser Molekülstrang heißt Ribonukleinsäure (**RNS**) und hat zwei aufregende neue Eigenschaften: Zum einen wirkt die **RNS** ähnlich wie das Eisensulfid in den Bläschen-Wänden als Katalysator (und zwar beschleunigt sie Reaktionen zwischen Aminosäuren). Zum anderen kann sie sich vervielfältigen.

Mithilfe der **RNS** setzen sich Aminosäuren nun zu den längeren Protein-Ketten zusammen. Und es beginnt ein merkwürdiger Kreislauf: Einige Moleküle der Ribonukleinsäure stellen genau solche Proteine her, die ihnen wiederum helfen, sich selbst zu vervielfältigen – die

Enzyme. Die dabei entstandene neue **RNS** fördert nunmehr die Bildung weiterer Proteine – und so weiter und so fort.

Die Substanzen vermehren sich prächtig. Mit der Zeit entwickelt sich die Abfolge der Basen Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil in der **RNS** zu einer Art Sprache (oder zum „genetischen Code“, wie man heute sagt): Jeweils drei Basen bilden einen „Buchstaben“, der bestimmt, welche Aminosäure in das Protein eingebaut wird – auch die Reihenfolge der eingebauten Aminosäuren ist so festgelegt.

Verändert sich ein Buchstabe der **RNS**, so wird ein Protein mit einer anderen Aminosäurefolge hergestellt.

Anders als bei heutigen Lebewesen, bei denen solche Kopierfehler im genetischen Material (Mutation) meist nachteilige Folgen haben, bilden sich in dieser Phase der Lebensentstehung immer leistungsfähigere Proteine: Denn diejenigen, die am besten geeignet sind, die Vermehrung der **RNS** zu beschleunigen, werden häufiger hergestellt als andere und setzen sich im Laufe der Zeit durch.

Mit anderen Worten: Die Herstellung der Proteine erfolgt nicht mehr chaotisch und zufällig, sondern folgt dem Prinzip der Evolution: Die am besten an ihre Umwelt angepassten Proteine behaupten sich.

Die nächste Neuerung betrifft die Ribonukleinsäure selbst: Durch Zufall entsteht irgendwann ein Molekül, in dem die Base Uracil durch die ähnlich aufgebaute Verbindung Thymin ersetzt wird. Der Zuckerart Ribose geht außerdem ein Sauerstoffatom verloren – möglicherweise durch die Aktivität eines Enzyms.

Das Molekül, das durch diese Veränderung geschaffen



0,002 mm



2,5 cm



30 cm

In einem Black-Smoker-Kamin (oben im Quer- und links im Längsschnitt) scheiden sich unterschiedliche Minerale ab und bilden poröse Wände. Ebenso wie der zentrale Schlot werden sie von Wasser durchströmt – so gelangen die Minerale weiterhin in die äußeren Schichten des Schornsteins. Dort kann sich deshalb Eisensulfid niederschlagen, das in der Wand zum Teil mikroskopisch kleine Kammern bildet (oben links). Diese waren möglicherweise der Schauplatz der Lebensentstehung

Neun Etappen zum Leben

Sollten sich die ersten Organismen der Erde tatsächlich in den Wänden der Schwarzen Raucher entwickelt haben, so war das ein ungemein komplexer Prozess. Dessen wichtigste Schritte sind hier in der Wand einer Hydrothermalquelle von unten nach oben schematisch dargestellt

9. Abspaltung von der Schlotwand Vermutlich vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren trennen sich die Zellen von ihren Kammern, vielleicht weil die Wände der Black Smoker einstürzen. Aus einer Linie der Archaeen gehen einfach gebaute Vielzeller hervor, später das höhere Leben. Noch heute sind die Archaeobakterien besonders an extreme Lebensräume angepasst – haben aber, wie die Eubakterien, auch fast alle anderen Lebensräume erobert.

8. Fertige Zellen Die Zellen verfügen nun über Schutzhüllen (Doppelmembran und Wand), können Moleküle erzeugen und Informationen darüber in ihrer DNS speichern. Die Urzelle ist komplett, das irdische Leben kann beginnen – also die Existenz von Organismen, die über einen Stoffwechsel verfügen und sich reproduzieren können.

7. Bau einer Zellwand Archaeobakterien und Eubakterien bilden neben der Membran eine zweite, noch robustere Schutzschicht – die Zellwand. Diese stabilisiert die Zelle und schützt gegen hohe Temperaturen und Säure.

6. Trennung in zwei Linien Aus Kohlen- und Wasserstoff entstehen Lipide: Fette und fettähnliche Substanzen. Die bilden eine Doppelmembran – eine Hülle, die das Innere abschirmt. Die nun entstandene Proto-Zelle kann sich mehr und mehr selbst schützen. Es formen sich zwei chemisch unterschiedliche Membranen – die Vorstufe zur Entwicklung der Echten Bakterien (Eubakterien, links) und der Archaeobakterien (rechts).

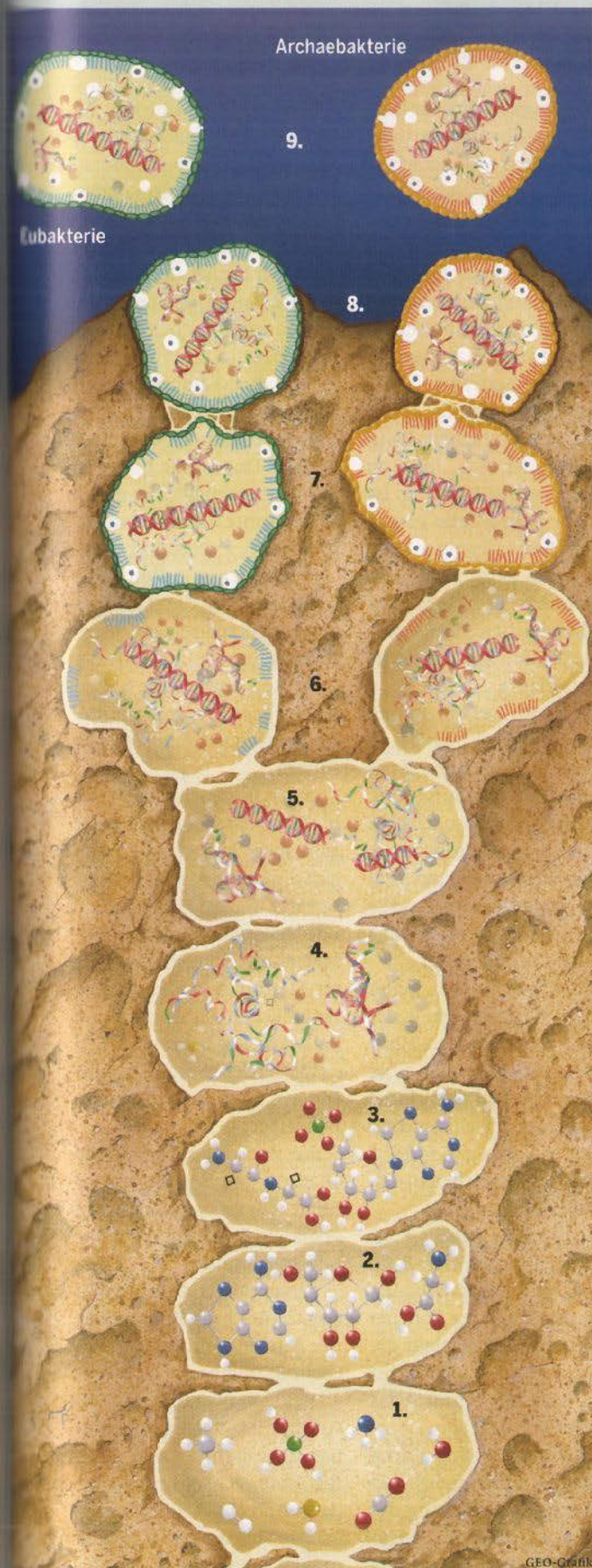
5. DNS Zufällig entsteht aus der RNS ein anderes Molekül, die Desoxyribonukleinsäure (DNS). Sie enthält einen anderen Zucker und eine andere Base. Dieser wendelförmige Doppelstrang ist stabiler als die RNS und übernimmt die Speicherung von Informationen, etwa für den Bau von Proteinen. Die RNS hingegen entwickelt sich unter anderem zum Überträger jener Informationen.

4. RNS und Proteine Die Nukleotide verknüpfen sich zu langen Ketten, der Ribonukleinsäure (RNS). Sie besteht unter anderem aus Zucker und vier Nukleinsäurebasen. Dies ist das erste Molekül, das sich vermutlich selbst vervielfältigen kann. Aus Peptiden wiederum formen sich Proteine (Eiweiße). Schließlich kommt es zu einer Art „Zusammenarbeit“: Die RNS entwickelt sich zu einem Bauplan für Proteine.

3. Nukleotide und Peptide Nukleinsäurebasen, Zucker und Phosphate verbinden sich zu so genannten Nukleotiden, den Bausteinen der Nukleinsäuren. Unabhängig davon bilden Aminosäuren kurze Ketten, die Peptide.

2. Zucker, Aminosäuren und Nukleinsäurebasen Die Substanzen reagieren auf immer neue Art miteinander – die chemischen Bedingungen ändern sich von Kammer zu Kammer. Ideal sind hier Temperaturen zwischen 50 und 70 Grad Celsius, weil dann Reaktionen besonders gut in Gang kommen. Durch komplexe biochemische Prozesse bilden sich Kohlenhydrate (Zucker), Aminosäuren und Nukleinsäurebasen: die Bausteine des Lebens. Die Eisensulfid-Hüllen der Kammern wirken dabei als Katalysatoren – sie beschleunigen also die chemischen Reaktionen – und sorgen für eine Konzentration der entstandenen Substanzen.

1. Anorganische Substanzen Die Schlotwände der Black Smoker bestehen aus einem Geflecht von Eisensulfid-Kammern, die über ihre porösen Hüllen untereinander und mit dem Ozeanwasser verbunden sind. Ständig strömt heißes Wasser durch den Schlot und presst sich durch die Kammern (siehe Seite 111). Das Wasser ist mit anorganischen Stoffen wie Ammoniak, Wasserstoff, Methan, Schwefelwasserstoff, Phosphorverbindungen und anderen reaktionsfreudigen Substanzen angereichert (siehe Seite 114).



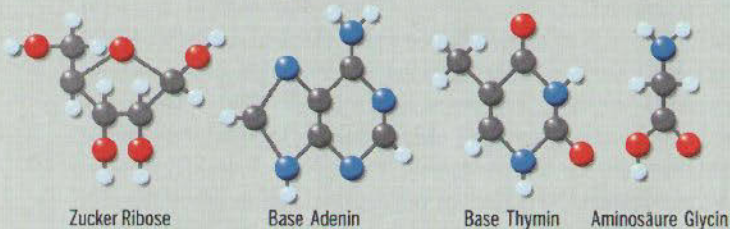
Der Schöpfung auf der Spur

Die Substanzen, die für die Entstehung von Organismen nötig waren, sind auf der jungen Erde reichlich vorhanden – etwa Kohlendioxid, Wasserstoff, Ammoniak oder Schwefelwasserstoff. Aus diesen und anderen Bausteinen formten sich irgendwann in der Frühzeit der Erdgeschichte komplizierte organische Moleküle – bis hin zur DNS, der Trägerin des genetischen Codes, ohne den kein Leben möglich wäre. Noch ist nicht genau bekannt, in wie vielen Schritten dies geschehen ist. Wahrscheinlich aber entwickelten sich die Moleküle in Etappen



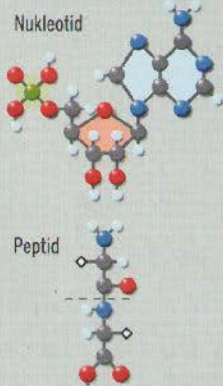
Grundbausteine

Wasser, Kohlendioxid, Wasserstoff, Methan, Ammoniak, Schwefelwasserstoff sowie Phosphorsäure und ihre Salze, die Phosphate, sind einige der Grundstoffe des Lebens. Sie alle sind Moleküle – Verbindungen aus mindestens zwei Atomen (wie etwa Wasser, das aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen besteht und mit der „Summenformel“ H_2O dargestellt wird). Unter geeigneten Bedingungen können Moleküle miteinander reagieren und neue, größere Formen, von denen die wichtigsten nachfolgend aufgelistet sind.



1. Zucker, Nukleinsäurebasen und Aminosäuren

Über komplizierte Schritte entstehen bei der Entwicklung des Lebens irgendwann aus Kohlenstoff (der aus dem Kohlendioxid stammen könnte) und Wasserstoff kurze Ketten: die Kohlenhydrate (Zucker). Sie können Ringformen annehmen, eine besonders stabile Verbindungsart. Eine davon ist die Ribose. Wie sich die Nukleinsäurebasen damals gebildet haben, ist unbekannt. Sie sind aus einem (Thymin) oder zwei Ringen (Adenin) gebaut. Drei weitere wichtige Nukleinsäurebasen sind Cytosin, Guanin und Uracil. Unabhängig davon entwickeln sich wahrscheinlich aus Ammoniak und ersten organischen Substanzen die Aminosäuren – etwa Glycin.



2. Nukleotide und Peptide

Nukleinsäurebasen verknüpfen sich mit Zucker und Phosphorsäure. Die **Nukleotide** entstehen – die Bausteine der Nukleinsäuren. Aminosäuren verbinden sich zu kurzen Ketten, den **Peptiden**. Die wiederum bilden längere Ketten, die Proteine. An die Peptide sind oft noch so genannte „Seitengruppen“ aus anderen Atomen geknüpft, etwa Schwefel. Sie sind hier nur als Raute angedeutet.

wird, heißt Desoxyribonukleinsäure (**DNS**) und ist stabiler als die RNS.

Allerdings verfügt die DNS nicht mehr über katalytische Eigenschaften – sie speichert nur den genetischen Code. Auch einige RNS-Stränge dienen noch als Informationsspeicher. Andere wiederum entwickeln sich und helfen fortan, den DNS-Code zu übersetzen und diese Informationen in Proteine zu übertragen (Transfer- und Boten-RNS).

Aus der einfachen Reaktionskammer im Inneren der Eisensulfid-Bläschen ist nun eine **Proto-Zelle** geworden, der Vorläufer einer Zelle. Jetzt laufen darin geordnete biochemische Prozesse ab: Immer die gleichen Substanzen vermehren sich durch einfache Stoffkreisläufe.

Die Proto-Zellen stehen gleichsam an der Schwelle zum Leben. Sie haben einen einfachen **Stoffwechsel** aufgebaut: Dank der ständigen Zufuhr von Energie und Substanzen aus den Schwarzen Rauchern bilden sie Zucker und Eiweiße, setzen diese um und scheiden Abbauprodukte aus.

Sie vermehren sich, gelangen über Poren in den Eisensulfid-Bläschen in freie Hohlräume und passen sich über Mutationen und natürliche Auslese ihrer jeweiligen Umgebung an – etwa unterschiedlich warmen Bereichen in den Smoker-Wänden.

Allerdings können diese Zellen ihre Hülle aus Eisensulfid nicht selbst zusammenbauen. Bricht der Schwarze Raucher zusammen oder versiegt die Wärmezufuhr aus dem Erdinneren, bedeutet das auch das Ende der Proto-Zellen.

Aus dieser Beschränkung befreit eine aufkeimende biochemische Entwicklung die Urzellen: Einige der Proto-Zellen stellen Fette und fett-

ähnliche Stoffe her, aus denen sie eine Art Haut aufbauen können.

Nun schottet eine aus diesen wasserabweisenden Stoffen gebildete Doppelmembran das Innere der Proto-Zellen von der Umwelt ab und lässt nur bestimmte Moleküle hinein – oder heraus. Der Katalysator Eisensulfid geht bei dieser Veränderung nicht verloren: Eingebaut in Proteine (Enzyme), tut diese Verbindung nach wie vor ihren Dienst.

Einige der Proto-Zellen stellen Doppelmembranen aus Fettsäuren her, die durch so genannte **Esterbindungen** miteinander verknüpft sind.

Bei anderen Zellen dagegen bestehen die Membranen aus Fettsäuren, die durch **Etherbindungen** miteinander verknüpft sind. Diese halten höhere Temperaturen aus und sind widerstandsfähiger gegen Säuren.

Noch bevor dieser Prozess hin zur Entstehung des Lebens ganz abgeschlossen ist, spalten sich die Urzellen aller Lebewesen also in zwei Linien auf:

- die Echten Bakterien (**Eubakterien**) mit den Fettsäure-Ester-Membranen, die nun als zusätzlichen Schutz noch eine Zellwand aus Murein bilden – einem Riesenmolekül, das wie ein Sack um die ganze Zelle liegt;
- die **Archaeobakterien** (Archaeen) mit den Fettsäure-Ether-Membranen, deren nun gebildete Zellwand ohne Murein auskommt.

Zusammen bilden die **Bakterien** das Reich der **Prokaryoten**, der Einzeller ohne Zellkern (siehe Stammbaum Seite 157).

Beide verwenden die Erbsubstanz DNS als Speicher für den genetischen Code, doch ihr Stoffwechsel unterscheidet sich erheblich. Eubakterien wie Archaeobakterien kommen praktisch überall vor – im Bo-

den, im Meer, im tierischen Darm –, doch die Archaeen sind zudem besonders gut an extreme Lebensräume angepasst, etwa heiße Quellen oder stark salzhaltige Gewässer.

Der Entstehungsprozess des ersten Lebens ist nun vollendet. Hier und da brechen die Schlotte der Hydrothermalquellen ein. Dabei verlassen die Einzeller (die sich nun durch Zellmembranen und -wände gegen die Umwelt schützen) ihre an die Black Smoker gebundenen Eisensulfid-Lebensräume und beginnen, sich frei im Meerwasser zu vermehren.

So haben sich womöglich die ersten Schritte des Lebens abgespielt. Doch ob all dies im Inneren der Black Smoker geschehen ist oder an einem anderen Schauplatz, ist strittig (siehe Kasten Seite 116). Noch liegen die Ursprünge des Lebens im Verborgenen.

Auch die Geburtszeit des Lebens gilt nicht als gesichert: Zwar enthalten schon die ältesten Sedimentgesteine der Erde – 3,7 Milliarden Jahre alte Ablagerungen aus Grönland – Kohlenstoffe, die den chemischen Fingerabdruck des Lebens tragen. Doch noch zweifeln Wissenschaftler, ob damit wirklich schon der Beweis erbracht ist, dass die Erde die ersten Spuren des Lebens so bald nach dem Ende des großen Meteoritenhagels hervorgebracht hat.

Für die Russell-Martin-Hypothese spricht, dass sie eine besonders einleuchtende Erklärung für ein Problem ist, das Biologen von jeher Kopfzerbrechen bereitet: die Frage nämlich, wo sich die Bausteine des Lebens genügend stark konzentrieren konnten, damit ein einfacher Stoffwechsel überhaupt zum ersten Mal in Gang kam.

Die Eisensulfid-Kammern der Black-Smoker-Wände, in

denen sich die Substanzen anreichern konnten, bieten darauf eine elegante Antwort – eine Erklärung dafür, dass sich einst die genau richtige Kombination aller Bestandteile für eine Zelle von allein zusammengeschlossen hat.

Das Problem, vor dem die Biologen stehen, ähnelt dem von der Henne und dem Ei: Würden Proteine und die **Nukleinsäuren** RNS und DNS nicht in einer von einer Wand umschlossenen Zelle erzeugt, würden sie sich im ganzen Ozean verteilen. Andererseits ist eine geeignete, haltbare Zellmembran derart kompliziert aufgebaut, dass sie ohne Stoffwechsel erst gar nicht entstehen kann.

Derzeit gehen die Anhänger der Russell-Martin-Hypothese davon aus, dass der Stoffwechsel offenbar *zuerst* existierte: Denn Zellmembran wie auch Zellwand wurden von Eubakterien wie auch Archaeen jeweils eigenständig entwickelt – und zwar *nachdem* der genetische Apparat und damit ein Großteil der biochemischen Prozesse bereits etabliert waren.

Wo und wann genau sich diese ersten Schritte auch immer abgespielt haben mögen: Sobald das Leben auf diesem Planeten einigermaßen Fuß gefasst hat, beginnt es ihn zu verändern. Einige Archaeen setzen bei ihrem Stoffwechsel das höchst wirksame Treibhausgas Methan frei. Da die Atmosphäre noch ohne Sauerstoff ist, können die Methan-Moleküle in der Luft etwa 10 000 Jahre lang überdauern (unter heutigen Bedingungen wird ein Methan-Molekül innerhalb von zehn Jahren abgebaut).

Schnell reichert sich das Gas in der von Wasserdampf, Stickstoff und Kohlendioxid dominierten Atmosphäre an. Die Erde wird durch den vom

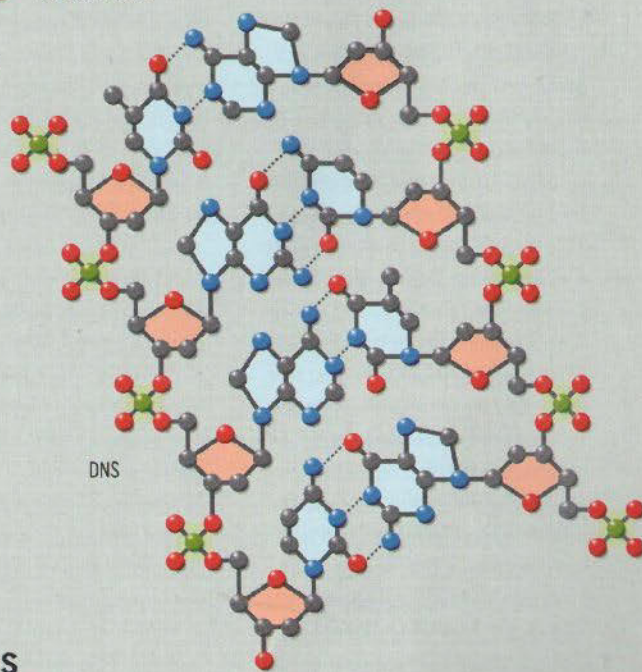
3. RNS und Proteine

Nukleotide verknüpfen sich zu langen Ketten, zur Ribonukleinsäure (RNS). Sie enthält den Zucker Ribose sowie die Nukleinsäurebasen Adenin, Uracil, Cytosin, Guanin. Deren Reihenfolge ist eine Art

Code, in dem Informationen gespeichert sind. Die RNS kann sich – als erstes Molekül überhaupt – selbst kopieren. Aus den Peptiden formen sich, zunächst zufällig, Proteine (Eiweiße). Es kommt zu einem Pingpong-Effekt zwischen RNS und Proteinen: Die RNS stellt genau jene Proteine her, die ihr wiederum bei ihrer Vermehrung helfen. Die RNS entwickelt sich also zu einem Bauplan für Proteine – und die Produktion dieser Eiweiße wird nun systematisiert: Nach dem in der RNS gespeicherten Code aus der Basenabfolge werden in komplizierten Schritten Aminosäuren zu Proteinen verknüpft. Die Proteine sind in der Natur allerdings meist nicht linear gebaut, sondern komplex gefaltet. Sie können aus mehr als 1000 Aminosäuren bestehen und dreidimensionale Strukturen annehmen.



Protein



DNS

4. DNS

Aus der sich immer wieder kopierenden RNS geht irgendwann zufällig die Desoxyribonukleinsäure (DNS) hervor. Sie enthält anstelle der Base Uracil die Base Thymin, statt Ribose den Zucker Desoxyribose. Die DNS ist ein wendelförmiges Molekül, das aus zwei sich ergänzenden Strängen mit mehreren Millionen Nukleotiden besteht. Sie ist stabiler als die RNS und übernimmt deshalb die Speicherung der Erbinformationen. Die RNS entwickelt sich weiter – zum Übersetzer und Überbringer der Erbinformationen, über welche die DNS etwa den Aufbau von Proteinen und damit die Struktur und Funktion einer Zelle regelt. Die Entwicklung von Proteinen, RNS und DNS ist die entscheidende Voraussetzung für Leben.



Das Leben: Kam es aus dem All?



Entwickelte es sich im Urozean?



Oder im Meereis?

ALTERNATIVE THEORIEN ZUR LEBENSENTSTEHUNG

Wo fand das Wunder statt?

Text: Anja Jacobi

Seit jeher beschäftigt die Menschheit die Frage, wie der erste Funke des Lebens entstanden ist. Bereits um 450 v. Chr. entwickelte der griechische Philosoph Anaxagoras dazu eine rational-materialistische Vorstellung. Ihr zufolge sind überall im Kosmos Lebenskeime vorhanden, die sich unter günstigen Bedingungen entfalten können. Auf dieser Basis baute der Naturwissenschaftler Svante Arrhenius Anfang des 20. Jahrhunderts seine umfassendere **Panspermie-Theorie** auf. Die geht davon aus, dass das Leben nicht spontan auf der Erde entstand, sondern aus dem Weltall in Form von Bakteriensporen auf unseren Planeten gelangt ist. Kritiker zweifelten diese Theorie an, weil solche Sporen einen interstellaren Transport angesichts der im Weltraum herrschenden lebensfeindlichen Bedingungen – Vakuum, extrem niedrige Temperaturen, kosmische Strahlung – nicht überstanden hätten. In den 1970er Jahren aber gaben die Astronomen Sir Fred Hoyle und Chandra Wickramasinghe der Arrhenius-

These neuen Auftrieb durch die chemische Analyse des interstellaren Staubes. Darin entdeckten sie Hinweise auf Lebensspuren und postulierten, dass die hauptsächlich aus Wassereis bestehenden **Kometen** ein geeignetes Transportmittel für bakterielles Leben darstellen könnten. Widerstandsfähige Bakteriensporen wären im Eis vor kosmischer Strahlung geschützt, könnten deshalb eine intergalaktische Reise überstehen und bei Kollisionen andere Planeten „infizieren“. Inzwischen hat Wickramasinghe in Luftproben, die er mithilfe eines Stratosphärenballons genommen hat, wohl jene extraterrestrischen Bakterien entdeckt. Das spricht für die Panspermie-Theorie. Doch auch sie erklärt ja nicht prinzipiell, wie das Leben entstanden ist, sondern verlagert die Frage nur an einen anderen Schauplatz, außerhalb der Erde. Wo auch immer das Leben begonnen hat, ob auf der Erde oder irgendwo im All – alle Hypothesen gehen von den gleichen drei Prämissen aus:

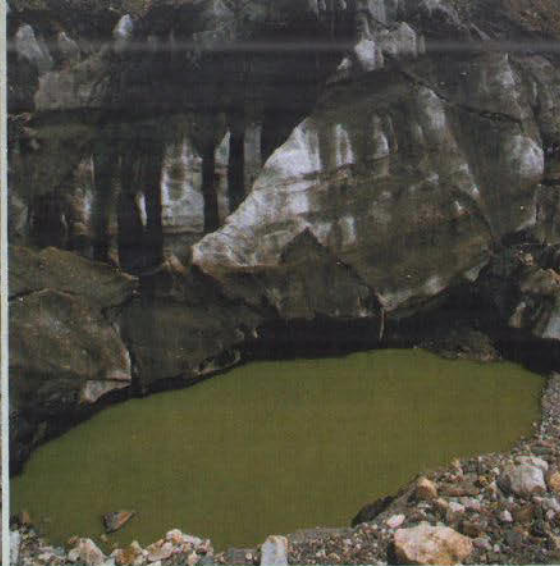
- Organische Moleküle wurden in einem wässrigen Milieu angereichert.
- Angereicherte Moleküle waren in abgegrenzten Räumen von dem sie umgebenden Medium geschützt.
- Reaktionen zwischen den Molekülen fanden katalytisch verstärkt und gerichtet statt.

Entlang dieser Prämissen wurden bisher diverse Szenarien für die Entstehung des Lebens entworfen – und für die Orte, an denen dies einst, vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren, geschehen sein könnte. Zu den etabliertesten und bekanntesten Szenarien zählen die **Ursuppen-Theorie** von Stanley Miller (siehe Seite 118) aus dem Jahre 1953 sowie die **Biofilm-Theorie** des Münchner Chemikers und Patentanwalts Günter Wächtershäuser von 1988. Danach haben sich die ersten Moleküle des Lebens in der Nähe hydrothermaler Quellen an Pyritkristallen gebildet – aus der Reaktion von Eisensulfid und Schwefelwasserstoff zu Pyrit. Die dabei ausgetauschten Elektronen sowie die frei werdende Energie könnten Kohlen-

dioxid in Kohlenstoff verwandelt haben: den Hauptbestandteil von Biomolekülen. Einen bislang unbeachteten Lebenspendenden Schauplatz schlug jüngst der Hamburger Physik-Professor Hauke Trinks in seiner **Meereis-Theorie** vor. Inspiriert durch eine Kajakfahrt in Spitzbergen, startete er ein Forschungsprogramm, das sich mit Kälte liebenden Organismen, den „Psychrophilen“, beschäftigt. Untersuchungen des hoch komplexen Mediums Meereis lassen ihn annehmen, dass hier die Bedingungen für die Entwicklung erster organischer Moleküle nahezu ideal waren: Denn Meereis besteht aus einem kompliziert aufgebauten, fein strukturierten Material aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen. Trinks beschreibt Meereis als eine Art schwammigen Körper, in dem das Süßwasser gefroren und der Salzwasseranteil als konzentrierte Salzlösung zurückgeblieben ist. In den damit gefüllten winzigen Hohlräumen und Kanälen wäre, bedingt durch die niedrige Temperatur und die hohe Anreicherung von Salzen,



Im Tongestein?



Oder in Süßwasserseen?

die Bildung stabiler Wasserstoffbrücken begünstigt gewesen. Diese wiederum wären wichtig gewesen bei Reaktionen von Molekülen der Ribonukleinsäure (RNS), denen eine Schlüsselrolle in der Entstehung des ersten Lebens zugeschrieben wird. Der hohe Anteil aktiver Oberflächen zwischen Eis und Salzlösung könnte wie geschaffen sein dafür, Moleküle zu ordnen und Reaktionen zu katalysieren. Zudem schützt das Meereis die darin entstandenen Moleküle vor der UV-Strahlung.

Ein weiteres Lebensentstehungs-Szenario entwarf Mitte der 1980er Jahre der britische Chemiker Graham Cairns-Smith mit seiner **Tonmineral-Theorie**. Er mutmaßte, dass sich erstes Leben womöglich auf Tonmineralen gebildet haben könnte. Tonminerale entstehen auf der Erde durch Verwitterung unablässig neu und bilden Schichtsilikate. Diese kommen beispielsweise in Poren von Sandstein vor; ihre kristalline Gitterstruktur sowie ihre Ladungsverteilung sind ähnlich der Erbinformation in lebenden Zellen gespeichert und werden im Laufe des Kristallwachstums weitergegeben. Cairns-Smith nimmt an, dass sich organische Moleküle an die

Tonkristalle angelagert haben könnten und dadurch stabilisiert beziehungsweise geordnet worden seien. Die Kristalle hätten so die Bildung erster Informationsträger begünstigt, die sich dann im Laufe der Evolution von ihnen gelöst hätten.

Aufbauend auf diesem Ansatz, haben Wissenschaftler der Universitäten Edinburgh und Chicago auch andere Minerale gefunden, die als Orte für die erste Synthese von Biomolekülen in Frage kommen: Zeolith und Feldspat.

Die Forscher sehen in den Zwischenräumen, Poren und Kanälchen dieser Minerale ideale Umgebungen, in denen sich organische Moleküle gesammelt und stabilisiert haben könnten – und wo sie zudem vor photochemischer Zerstörung sicher gewesen wären.

Zudem scheint die große, spezifische Oberfläche dieser Minerale für katalytische Prozesse prädestiniert zu sein. In Australien, wo einige der ältesten Gesteine der Erde gefunden worden sind, wird nun nach Zeolithen als Belegen für diese frühe Biokatalyse gesucht.

Die bislang allgemein anerkannte Annahme, das Leben sei in den salzigen Urmeeren entstanden, wird seit jüngstem von amerikanischen und

deutschen Wissenschaftlern infrage gestellt. Sie haben beobachtet, dass sich im Süßwasser aus organischen Bestandteilen spontan winzige Membranbläschen bilden. In diesen relativ stabilen Strukturen könnte die Entwicklung komplexer Verbindungen geschützt abgelaufen und schließlich auch eine Reproduktion der Moleküle möglich gewesen sein.

In Süßwasser experimentell hergestellte, stabile Membranbläschen zerfielen nach Zugabe von Salzen. Deshalb gehen die Wissenschaftler davon aus, dass das Leben auf der jungen Erde im Süßwasser seinen Anfang genommen haben könnte – und gerade nicht in den Urmeeren, die ja große Mengen an Salz enthielten.

Im Wasser, an Mineralen oder im All – das Rätsel um die Entstehung des Lebens bleibt. Urplötzlich, auf einen Schlag, hat es sich bestimmt nicht entwickelt. Die spontane Entstehung einer Zelle aus Molekülen, so Sir Fred Hoyle, ist genauso wahrscheinlich wie der zufällige Zusammenbau eines Jumbo-Jets aus dessen Einzelteilen auf einem Schrottplatz, wenn ein Wirbelwind darüber hinwegfegt.

Die Biologin Anja Jacobi, 38, ist Mitglied des wissenschaftlichen Beirates dieses Heftes.

Methan ausgelösten Treibhauseffekt immer wärmer. Das ist ein Segen für das junge Leben, denn die Sonne leuchtet zu dieser Zeit noch deutlich schwächer als heute.

Zu warm wird es wiederum auch nicht, denn sobald die Konzentration des Methans eine gewisse Grenze überschreitet, verschmelzen dessen Moleküle zu längeren Ketten, die einen kühlenden Dunstschleier bilden.

Die ersten Einzeller, die in der Nähe der Schwarzen Raucher leben, sind noch abhängig von der Energiezufuhr durch chemische Verbindungen aus Hydrothermalquellen – etwa Wasserstoff oder Schwefelwasserstoff. Diese Energie speichern sie in Form von Kohlenhydraten, die sie selbst zusammenbauen.

Nach einer Weile aber werden die Urzellen *selbst* zur Energiequelle für eine neue Lebensform. Ihre Überreste schneien in großer Zahl zum Meeresboden herab. So können auch Einzeller überleben, die durch Mutation neue Ernährungswege erschließen, also etwa befähigt werden, Zellmaterial zu zersetzen.

Immer wieder erfassen Meeresströmungen nun Einzeller und tragen sie zur Meeresoberfläche empor. Auch dort gibt es für sie chemische Energiequellen – etwa in der Nähe von schwefelhaltigen Quellen im flachen Wasser vor Vulkaninseln. So dringen Archaeen und Eubakterien allmählich in die sonnendurchfluteten Bereiche des Meeres vor.

Dort entdecken einige Eubakterien dann eine andere Energiequelle als die Chemikalien aus der Erde: das Sonnenlicht (siehe Seite 120). Aber das ist ein anderes Kapitel in der Geschichte des Lebens. □

Die Geowissenschaftlerin Ute Kehse, 35, lebt in Delmenhorst.

Experiment Ursuppe

Ein junger Chemiestudent verblüfft 1953 die Fachwelt: Der 23-jährige Stanley Lloyd Miller erzeugt in einem genial einfachen Experiment aus Wasserdampf und einigen Gasen mittels elektrischer Energie Aminosäuren – Grundbausteine alles Organischen. Hat so ähnlich einst das Leben begonnen?

Text: Susanne Krieg

Es brodelt in einem der beiden Glaskolben – wie im Urozean. Der andere ist mit Gasen befüllt, den dichten Schwaden aus Vulkanen gleich, die über die Meere der Urerde hinweggezogen sein müssen – damals, vor rund vier Milliarden Jahren. Blitze jagen nun durch die Mini-Atmosphäre des oberen der beiden miteinander verbundenen Kolben. Und in diesem Gewitter beginnt der Ozean sich langsam rosa zu färben, dann tiefrot bis bräunlich. An der Innenseite des Gewitter-Kolbens bildet sich eine gelbbraune, ölige Schicht. Am siebten Tag dann ist „Leben“ in der trüben Suppe – oder, genauer, finden sich wichtige Bausteine lebender Zellen darin: Aminosäuren. Die sammeln sich in einer U-förmigen „Falle“. Aus Chemie ist Biologie geworden.

Im Frühling 1953 betritt ein nervöser junger Mann die knarrenden Dielen von „Kent 120“. Dieser Seminarraum am Chemischen Institut der Universität von Chicago ist eigentlich renommierten Wissenschaftlern vorbehalten, doch diesmal steht ein 23-jähriger Student am Rednerpult: Stanley Lloyd Miller.

Ein paar Monate zuvor hat er im Labor jenen Glaskugelapparat gebastelt – ein verblüffend einfaches Gestell, das der Welterklärung dienen soll. Denn in ihm hat Miller die braune Ursuppe des Lebens köcheln lassen und nachvollzogen, wie einst aus Gasen, Funken und Wasser die ersten organischen Moleküle hervorgegangen sein könnten.

Millers Experiment stützt vor allem eine These: Am Anfang allen Lebens stand Chemie. Diese Vermutung ist zwar schon früher geäußert worden, doch niemandem war es gelungen, sie im Labor zu untermauern. Neun Aminosäuren sowie Hydroxysäuren und Harnstoff kann Miller schließlich nachweisen; außerdem hat sich eine teerige Masse gebildet. (Später gelingt es ihm, Zucker und Adenin herzustellen – siehe Seite 108.)

In ein Rohr über der luftleeren Kugel mit brodelndem Wasser hat er die Gase Methan, Ammoniak und Wasserstoff im Verhältnis 2:2:1 geleitet, sie mit dem

Wasserdampf zirkulieren lassen und in einem zweiten Kolben elektrischer Spannung ausgesetzt.

Nachdem das Dampfgemisch kondensiert und zurück ins Wasser gelangt ist, hat Miller Proben entnommen und dabei komplex gebaute organische Moleküle entdeckt. Einige, so Glyzin, Alanin oder Asparaginsäure, sind als Aminosäuren Bestandteile von Eiweißen – und die sind wiederum wichtige Bausteine lebender Zellen.

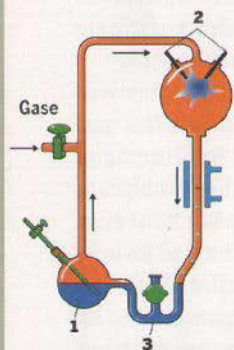
Peinlich genau hat Miller bei seinem Versuch darauf geachtet, dass seine Apparatur frei von Bakterien und Luft war. Doch im Seminarraum stößt er auf tiefe Skepsis. Weshalb er sicher sei, dass sich die Entstehung des Lebens so zugetragen habe, wollen die Wissenschaftler wissen.

„Wenn Gott es nicht genauso gemacht hat“, ruft Harold Urey, Millers Doktorvater, schließlich, „hat er sich ganz schön was entgehen lassen!“

Wohlwollendes Gelächter beendet die Sitzung. Am 15. Mai 1953 veröffentlicht das Wissenschaftsmagazin „Science“ die Ergebnisse: die endgültige Anerkennung für Miller – und der Beginn der chemischen Evolutionsforschung.

Genau in jenem Raum, in dem im Frühjahr 1953 erstmals öffentlich über die Ursuppe diskutiert wurde, hatte Miller 18 Monate zuvor eine Vorlesung Harold Ureys verfolgt, welche die Basis für das Experiment lieferte. Urey, der 1934 den Chemie-Nobelpreis für die Entdeckung des schweren Wasserstoffs erhalten hatte, beschrieb die vermutlichen Verhältnisse auf der jungen Erde. Seiner These zufolge überschwemmten brodelnde Ozeane die Erdkruste. Heftige Gewitter wüteten, begleitet von zahlreichen Vulkanausbrüchen. Meteoriten und Kometen donnerten auf die Meere nieder.

Die Erdatmosphäre sei, so Urey, reich an Wasserstoff, Ammoniak und Methan gewesen. Die Gase hätten miteinander reagieren können, weil die Luft anders als heute keinen freien Sauerstoff enthielt –



Millers Versuch: In einem Glaskolben (1) wird Wasser zum Sieden gebracht, sodass Dampf – vermischt mit Methan, Ammoniak und Wasserstoff – in einen zweiten Kolben steigt (2). Dort zünden Elektroden tagelang Funken und simulieren so die Gewitter der Uratmosphäre. Die elektrische Energie regt die durch die Kugel strömenden Gase und den Wasserdampf zur Reaktion an. In einer U-förmigen »Falle« (3) sammeln sich die Reaktionsprodukte – unter anderem Aminosäuren



auf der Erde gab es damals noch keine Photosynthese, die Sauerstoff hätte freisetzen können.

Deshalb fehlte auch die Ozonschicht, die aus dem Sauerstoff der Atmosphäre entsteht. So konnte energiereiche UV-Strahlung leichter in die Urmeere eindringen – ein Phänomen, das ebenso wie die bei Vulkanausbrüchen und Gewittern frei werdende Energie zum Leben führende chemische Reaktionen ausgelöst haben könnte.

Miller war fasziniert: Es musste möglich sein, diese Verhältnisse im Reagenzglas zu simulieren. Ein Jahr lang beschäftigte er sich jedoch noch mit anderen Fragen. Erst dann wechselte er als Doktorand zu Urey und studierte zunächst Fachveröffentlichungen – auch, um dessen Theorie abzusichern.

Da war zum einen Charles Darwin, der große Evolutionsforscher, der seiner Zeit ein großes Stück voraus gewesen ist. Auch er schien davon überzeugt gewesen zu sein, dass alles Leben auf der Erde chemischen Reaktionen entsprungen war.

1871 hatte Darwin dem Botaniker Joseph Hooker von einer Idee geschrieben, die er in seinem ohnehin von vielen als gotteslästerlich bezeichneten Hauptwerk über den Ursprung der Arten verschwiegen hatte: Er träumte davon, in einem warmen Tümpel voll Ammoniak und Phosphorsalzen mithilfe von Hitze, Licht und Elektrizität Proteinverbindungen entstehen zu lassen. Diese sollten miteinander reagieren und schließlich zu Lebewesen werden – die erste Vision einer Ursuppe.

Die Idee wurde konkreter, als zwei Biochemiker, der Russe Alexander Iwanowitsch Oparin und der Brite John Burdon Sanderson Haldane, unabhängig voneinander 1924 und 1928 die gleiche These aufstellten: dass in den Urmeeren durch starke Energiezufuhr aus unbelebter Materie komplexe Biomoleküle entstanden sein könnten.

Einer heißen, dünnen Suppe hätten die Ozeane des Archaikums geglichen, in denen die Anfänge des Lebens entstanden seien – möglich jedoch nur unter Ausschluss von Sauerstoff. Denn heute würde

der hohe Sauerstoffgehalt der Luft (21 Volumenprozent) solche organischen Moleküle durch Oxidation abbauen. Oder bereits existierende Organismen würden die neu entstandene Biomasse auffressen – eine Schlussfolgerung, die auch Darwin schon gezogen hatte.

Millers Experiment war ein in vieler Hinsicht entscheidender Fortschritt – jedoch noch weit entfernt von der Produktion lebender Zellen. Bausteine wie Aminosäuren und Adenin, ein Bestandteil des Erbmoleküls DNS, waren zwar entstanden. Doch das Rätsel, wie sich im nächsten Akt jene langkettigen Moleküle bilden konnten, welche Biozellen letztlich ausmachen, blieb ungelöst – bis heute. So gesehen bleibt Millers Versuch genau an der Schwelle des Lebens stehen.

Das deutete sich bereits in jenem Jahr an, in dem Miller die Ursuppe nachkochte: James Watson und Francis Crick hatten die Struktur der DNS enträtselt und herausgefunden, dass auch zur Entstehung von Einzellern Nukleinsäuren nötig sind – und solche vielgliedrigen Verbindungen fehlten eben in Millers brauner Suppe.

Weitere Belege für die Ursuppen-Theorie gibt es bislang nicht. Stattdessen tauchen immer neue Theorien auf (siehe Seite 108 und 116). Manche Forscher vermuten, ein Meteoritenhagel habe die Bausteine des Lebens auf die Erde katapultiert. Andere lokalisieren die chemische Evolution auf heißen Eisen- und Nickel-Mineraloberflächen in der Nähe von Vulkanschlotten.

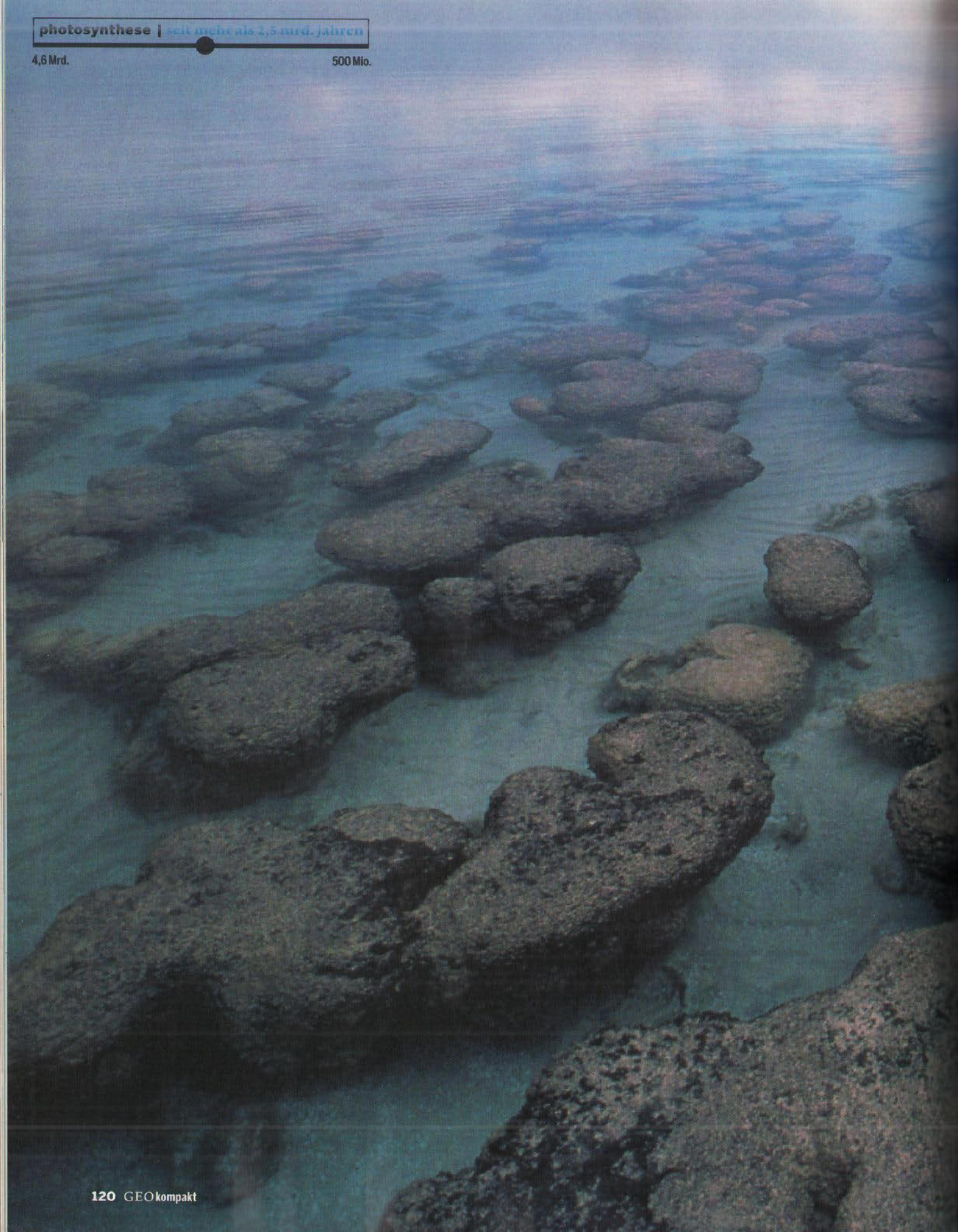
Miller selbst hält auch heute noch an seiner Theorie fest. Inzwischen aber hat er den Skeptikern ein Zugeständnis gemacht: Er glaubt nun, dass die Ursuppe statt im Meer in Tümpeln und Pfützen gebrodelt habe. Nur hier hätten sich die Ausgangsstoffe derart konzentrieren können, dass Leben entstand.

Sollte also Charles Darwin, der große Visionär, selbst mit dieser, seiner kühnsten These Recht behalten haben? □

Stanley Lloyd Miller (geb. 1930) kam dem Rätsel des Lebens experimentell womöglich näher als jeder andere Forscher vor ihm

4,6 Mrd.

500 Mio.





Manche der Photosynthese betreibenden Cyanobakterien bilden aus unzähligen Einzelorganismen mattenartige Kolonien, in denen sich Kalk abgelagert. Wie hier vor der Westküste Australiens bauen sie so allmählich steinerne Blöcke auf, die oben von einer Schicht Cyanobakterien bedeckt sind. Die frühesten dieser »Stromatolithen« sind mehr als 2,5 Milliarden Jahre alt

Lebenselixier aus dem Meer

Text: Ute Kehse, Horst Rademacher

Gut eine Milliarde Jahre nachdem die ersten Organismen begonnen haben, die Ozeane zu bevölkern, bahnt sich dort eine Revolution an: Winzige Einzeller, Cyanobakterien, fangen mithilfe der Photosynthese nicht nur das Sonnenlicht ein, sondern setzen auch Sauerstoff frei – und verändern so die Lebensbedingungen auf der gesamten Erde

Vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren begann eines der spannendsten Kapitel der Erdgeschichte.

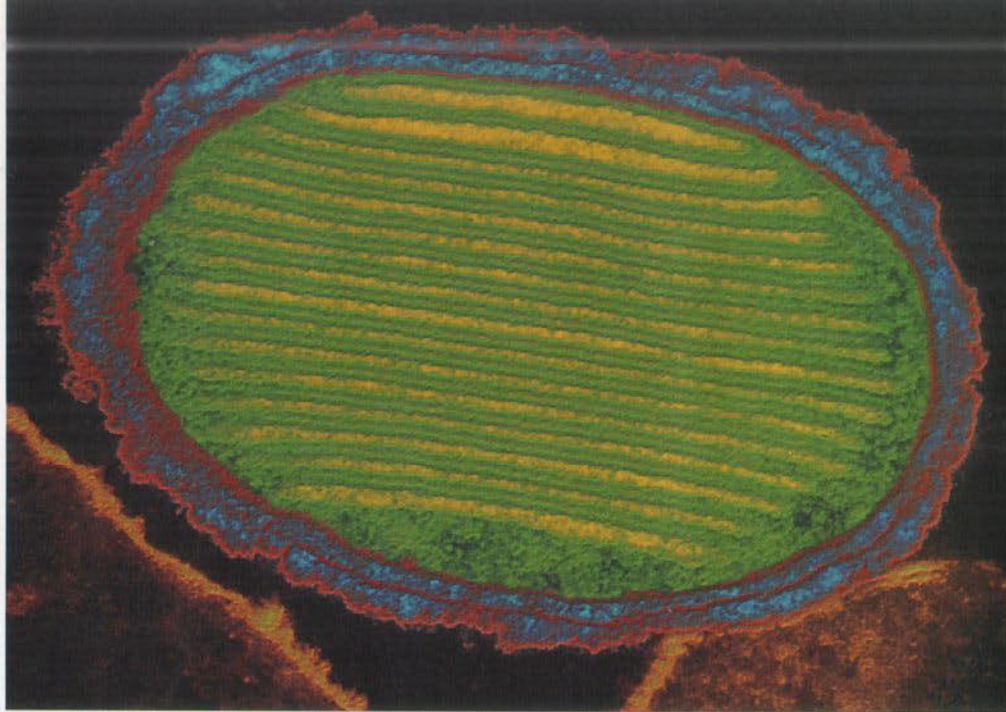
Der vorherrschenden Lehrmeinung zufolge setzte damals jene chemische Revolution der Erdhülle ein, bei der aus einer sauerstofffreien Gasmischung die „frische Luft“ wurde, die wir heute atmen.

In der Jugendzeit der Erde, vor 4,45 Milliarden Jahren, bestand die Atmosphäre vermutlich aus den Gasen, die anfangs in den Gesteinsschmelzen im Inneren des Planeten gelöst gewesen waren. Nach und nach hatten sich viele dieser flüchtigen Substanzen durch die Risse und Spalten in der noch wenig festen Erdkruste einen Weg an die Oberfläche gebahnt. Ein großer Teil dieser Gase wurde bei Vulkanexplosionen – die damals wohl viel heftiger und häufiger waren als heute – in die Atmosphäre geschleudert.

Über den Vulkanschlotten standen oft für längere Zeit riesige Gassäulen. Vermutlich enthielten sie ein ähnliches Gemisch an Stoffen wie heutige Vulkangase: hauptsächlich Wasserdampf, etwas Kohlendioxid, einige Prozent Stickstoff sowie Spuren zahlreicher Schwefelverbindungen.

Sauerstoff indes kam wohl nur in chemisch gebundener Form vor – zum Beispiel in Eisenverbindungen, im Wasser oder im Kohlendioxid der damaligen Atmosphäre. Als freies Gas war es offenbar nicht vorhanden.

Noch unterschied sich die Erde nur wenig von ihren Nachbarplaneten Venus und Mars. Auch diese waren zu Beginn wahrscheinlich von einer Atmosphäre umhüllt, die sich wie die der Erde hauptsächlich durch Freisetzung von Gasen aus ihrem Inneren zusam-



Schwefelpurpurbakterien waren wahrscheinlich die ersten Organismen, die in bestimmten Membranen (hier grün eingefärbt bei der heutigen Art *Ectothiorhodospira halochloris*) Photosynthese betrieben haben. Allerdings produzierten sie dabei noch keinen Sauerstoff

mensetzte. Wasser kam auf der heißen Venus in Form von Dampf vor und auf dem Mars vielleicht schon in flüssiger Form und als Eis. Womöglich existierte auf dem Roten Planeten eine Zeit lang sogar ein Urmeer.

Doch nur auf der Erde waren die Temperaturen nach Abkühlung ihrer Oberfläche so günstig, dass sich das Wasser dort dauerhaft sammeln und zum Urozean werden konnte (siehe Seite 72). Wäre die Erdentfernung zur Sonne nur um fünf Prozent geringer, hätte unser Planet vermutlich die gleiche Entwicklung genommen wie die Venus: keine Ozeane, kein Wasserkreislauf, kein Leben. So aber entwickelten sich die Atmosphären der drei planetaren Nachbarn ganz unterschiedlich.

Der Urozean der Erde war auch maßgeblich dafür, dass sich die heutige Erdatmosphäre so und nicht anders zusammensetzt. Denn er diente als Auffangbecken für das sich immer stärker in der Atmosphäre anreichernde Kohlen-

dioxid, ein Treibhausgas: Es speichert Wärmeenergie, die sonst von der durch die Sonne aufgeheizten Oberfläche der Erde wieder an das Weltall abgegeben würde.

Erhöht sich die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre, steigen auch die Temperaturen. Auf der Erde jedoch wurde das Kohlendioxid durch Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen und sammelte sich, über Zwischenschritte in Kalziumkarbonaten gebunden, als Sediment im Urozean.

Kalzium war im Meerwasser reichlich gelöst – so wie auch Magnesium-, Eisen- und Siliziumverbindungen, die zum Teil vom Regen aus dem Erdboden gewaschen worden oder während untermeerescher Vulkanausbrüche aus der Lava ins Wasser gelangt waren.

Auf der Venus hingegen verblieb das Kohlendioxid größtenteils in der Atmosphäre und machte den Planeten zu einem unwirtlichen Treibhaus. Auch in der extrem

dünnen Atmosphäre des Mars dominierte das Kohlendioxid.

In der Erdatmosphäre dagegen blieb aus den Vulkangasen der Urzeit vor allem der **Stickstoff** erhalten (er macht heute noch mehr als drei Viertel der Atmosphäre aus).

Dass sich aber auch freier Sauerstoff in der Atmosphäre anreichern konnte – so stark, dass er gegenwärtig etwa ein Fünftel der irdischen Lufthülle ausmacht und unser Leben ermöglicht, ist vor allem den **Cyanobakterien** zu verdanken. Sie haben den Sauerstoff aus dem Wasser sozusagen „befreit“. Genauer: Sie lösten die Sauerstoffatome aus der Verbindung mit Wasserstoffatomen – und zwar durch die **Photosynthese**.

Entwickelt haben sich die Cyanobakterien vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren im irdischen Urozean, wo sie sich schon bald in flachen Küstengewässern ausbreiteten. Dort wuchsen einige zu großen Kolonien oder Mat-

ten heran; in diesen lagerten sie Kalk ab und bildeten so genannte **Stromatolithen** – aus Kalkschichten gestapelte, manchmal meterhohe Körper, auf denen die Cyanobakterien außen siedelten.

Die Photosynthese ist eine der bedeutendsten Reaktionen in der Natur – und Voraussetzung für das Leben aller tierischer Organismen einschließlich der Menschen. Dieser biologisch-chemische Prozess läuft noch heute bei allen grünen Pflanzen nach demselben Prinzip ab: Sonnenlicht wird in chemische Energie umgewandelt, wobei Sauerstoff als Abfallprodukt entsteht.

Das geschieht ganz ähnlich wie in einer Solarzelle, in der Sonnenlicht in Strom umgewandelt wird. Statt auf eine siliziumhaltige Schicht fällt das Licht bei den Pflanzen auf kompliziert gebaute Molekülanordnungen, deren wichtigster Bestandteil Farbpigmente sind: das Blattgrün (Chlorophyll). Diese Pigmente fangen die im Sonnenlicht enthaltene Energie ein – einem schwarzen Kleidungsstück vergleichbar, das sich in der Sonne erwärmt.

Allerdings erhitzen sich die Farbpigmente der Pflanzen nicht. Stattdessen nehmen ihre Elektronen – Bestandteile aller Atome und Moleküle – während der so genannten **Lichtreaktion** die Energie auf. Energiegeladen wandern sie dann von den Molekülen über eine Kette von Einzelschritten durch eine Membran, die dadurch aufgeladen wird wie eine Batterie.

Diese Ladung wandelt die Pflanze in chemische Energie um und nutzt sie später in der so genannten **Dunkelreaktion**, um aus Kohlendioxid Zucker aufzubauen. Den Zucker verwendet die Pflanze dann zum

Beispiel für ihr Wachstum (siehe Kasten Seite 124).

Wo aber kommt nun der Sauerstoff ins Spiel? Weil den Pigmenten während der Lichtreaktion Elektronen abhandeln kommen, suchen sie dafür Ersatz. Als Elektronenquelle bieten sich Wassermoleküle an, die überall in den Pflanzenzellen vorhanden sind. Die Pigmente „entreißen“ dem Wasser dessen Elektronen, aus den Wassermolekülen wird dabei Sauerstoff in reiner Form abgespalten, der dann als Gas in die Atmosphäre entweicht.

Wahrscheinlich war anfangs der durch Photosynthese freigesetzte Sauerstoff für die meisten damaligen Organismen ein tödliches Gift; es gibt sogar Anhaltspunkte dafür, dass sich das frühe Leben durch den Sauerstoff, den es nunmehr produzierte, beinahe selbst vergiftet und ausgelöscht hätte. Jedenfalls bahnte sich wohl vor etwa 2,5 Milliarden Jahren eine starke

Veränderung der zweiten Uratmosphäre und des Ozeans an.

Hunderte von Jahrmillionen hatte der von den Cyanobakterien freigesetzte Sauerstoff im Meer mit anderen im Wasser gelösten Substanzen reagiert, insbesondere mit Eisenionen und Schwefelverbindungen. Diese waren bei untermeerischen Vulkanausbrüchen entstanden und deshalb in hoher Konzentration

aus den Tiefen des Ozeans an die Grenze zum Oberflächenwasser und reagierten dort mit Sauerstoff – sie wurden oxidiert. Durch diese chemische Reaktion wurden die Eisenverbindungen so verändert, dass sie sich nun nicht mehr wie zuvor im Meerwasser lösten, sondern größere Molekülverbände bildeten.

Da diese Molekülverbände schwerer waren als Wasser, san-

Ohne Sauerstoff gäbe es heutzutage auf der Erde vermutlich kein höheres Leben

im sauerstoffarmen Tiefenwasser des Ozeans gelöst.

Anders waren dagegen die Bedingungen in den Oberflächengewässern des Ozeans: Dort war das Wasser durch die Photosynthese der Cyanobakterien sauerstoffreicher. Mit den Meeresströmungen gelangten nun immer wieder lösliche Eisenverbindungen

ken sie zu Boden und sedimentierten in Form winziger Körner oder Schlämme auf dem Meeresboden. Auch Schwefelverbindungen reagierten mit Sauerstoff zu meist nicht mehr löslichen Formen und sanken ebenfalls zu Boden.

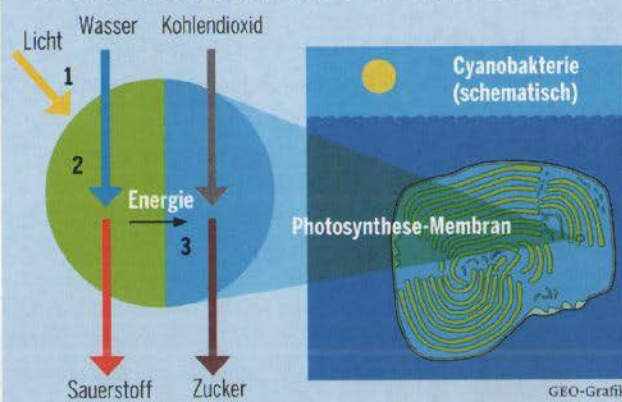
Dieser Prozess lief jedoch nicht gleichmäßig ab. Möglicherweise sorgten Strömungen dafür, dass Eisenionen und Schwefelverbindungen zeitweise nicht mehr aus der Tiefe bis an die Grenzschicht zum Oberflächenwasser aufstiegen. Oder aber die Sauerstoffproduktion der Cyanobakterien variierte periodisch.

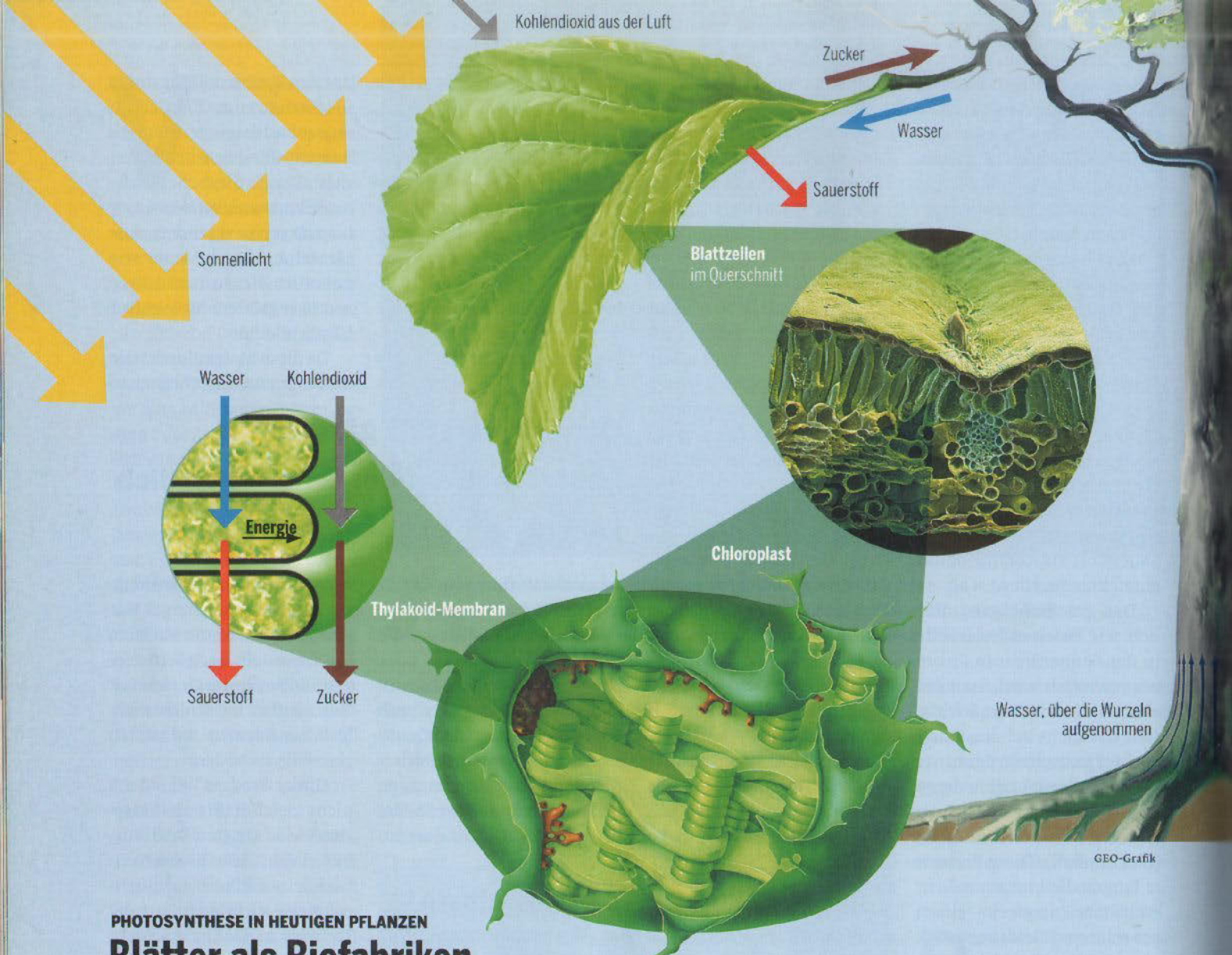
Diese Schwankungen sind anhand von Ablagerungen auch heute noch gut rekonstruierbar: Denn je nach Eisen- und Schwefelkonzentration im Wasser sedimentierten auf dem Meeresboden im Laufe von Hunderten Jahrmillionen immer wieder verschieden dicke Schichten dieser nach Reaktion mit Sauerstoff unlöslichen Verbindungen.

Heute findet man in vielen Regionen der Erde mächtige Ablagerungen dieser „gebänderten“ Eisenerze: Der weit überwiegende Teil aller ökonomisch wichtigen Eisenerz-

Das Prinzip der frühen Photosynthese

Als erste Organismen der Erde produzierten die im Urozean lebenden Cyanobakterien vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren Sauerstoff – und zwar bei einem Prozess, bei dem sie Sonnenlicht nutzten, um aus Kohlendioxid und Wasser Kohlenhydrate (Zucker) aufzubauen. Über ihre „Photosynthese-Membranen“ (Thylakoide, grün) nahmen sie Licht auf (1) und wandelten die Lichtenergie in biochemische um (2). Diese wiederum war notwendig, um anschließend aus dem Kohlendioxid Zucker aufzubauen (3). Der Sauerstoff entstand durch die Wasserspaltung während der Energieumwandlung – sozusagen als „Abfall“.





PHOTOSYNTHESE IN HEUTIGEN PFLANZEN

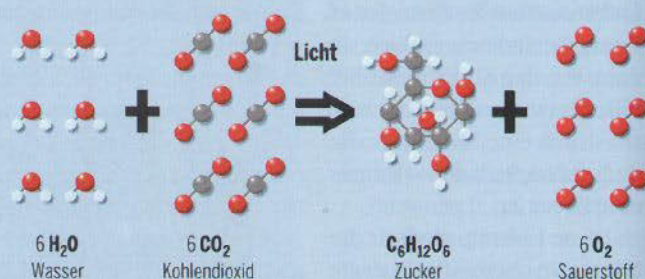
Blätter als Biofabriken

Bei Pflanzen läuft die Photosynthese in den Chloroplasten ab. Das sind linsenförmige, von einer Hülle umgebene Bestandteile bestimmter Blattzellen. Sie enthalten „Photosynthese-Membranen“ (Thylakoide): flache Säckchen, die an manchen Stellen in Stapeln übereinander liegen. Diese Membranen nehmen über bestimmte Farbstoffe (Chlorophylle) Licht auf.

Die Photosynthese gliedert sich in zwei hintereinander geschaltete Prozesse – die Licht- und die Dunkelreaktion. Bei der Lichtreaktion absorbieren die Chlorophylle bestimmte Wellenlängen des Sonnenlichts und wandeln dessen Energie durch komplexe Reaktionen um in eine andere Energieform, nämlich die biochemische. Dabei werden die Moleküle des über die Pflanzenwurzeln aufgenommenen und in Leitungsbahnen herantransportierten Wassers (H_2O) gespalten. Der dabei freigesetzte Sauerstoff wird über Spaltöffnungen auf der Blattunterseite an die Umwelt abgegeben.

Bei der Dunkelreaktion spielt die durch die Lichtreaktion gewonnene und von der Pflanze gespeicherte biochemische Energie eine entscheidende Rolle: Mit ihrer Hilfe wird zwischen den Thylakoid-Stapeln aus dem Kohlendioxid in mehreren komplizierten Schritten Zucker aufgebaut.

Kann nicht aller Zucker direkt aus den Chloroplasten abtransportiert werden, wird er in Form von Stärke gespeichert. In nächtlicher Dunkelheit wandelt sich diese Stärke erneut in Zucker um. Der wird durch das Pflanzengewebe unter anderem zu den Wachstumszonen geleitet, wo er als Ausgangsmaterial für die Produktion anderen organischen Materials oder zur Energiebereitstellung dient.



Aus sechs Molekülen Wasser (H_2O) und sechs Molekülen Kohlendioxid (CO_2) baut die Pflanze, wie diese vereinfachte Gleichung zeigt, mithilfe des Sonnenlichts ein Molekül Zucker ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) und setzt dabei sechs Moleküle Sauerstoff (O_2) frei

Lagerstätten ist auf diese Weise in der Periode zwischen 2,5 und 1,8 Milliarden Jahren vor unserer Zeit entstanden.

Lange Zeit produzierten die Cyanobakterien also Sauerstoff, der jedoch gebunden wurde. Im Laufe der Jahre aber besiedelten sie immer größere Meeresgebiete, und so nahm auch die Sauerstoffbildung zu. Zunächst entstand ein Gleichgewicht zwischen Produktion und chemischer Bindung des Elements. Schließlich kippte das Gleichgewicht zugunsten des Sauerstoffs: Die Cyanobakterien bildeten solche Mengen, dass nicht mehr alles gebunden wurde, sondern nun ein nennenswerter Anteil als freies Gas in die Atmosphäre gelangte.

Als Folge begann nun auch die Erdoberfläche zu oxidieren: Die Eisenminerale auf den Kontinenten reagierten zu dem roten Eisenerz Hämatit. Noch heute dokumentieren jene **Rot-sedimente** den signifikanten Sauerstoffanstieg in der Atmosphäre vor etwa 2,3 Milliarden Jahren.

Der fortan zunehmend zur Verfügung stehende freie Sauerstoff war für die Erde eine Revolution. Denn je mehr sich in der Uratmosphäre konzentrierte, desto schneller wurde aus dieser

sauerstoffresistenten Bakterien, verdauten sie jedoch nicht, sondern bildeten mit ihnen eine Lebensgemeinschaft zum gegenseitigen Nutzen: Sie boten den Bakterien sichere Unterkunft und Nahrung, ließen dafür die Bakterien tun, was sie selbst nicht konnten – Photosynthese betreiben (siehe Kasten Seite 129).

Diese „Endosymbiose“ genannte Vereinigung war der erste Schritt zur Herausbildung der Grünalgen. Die Cyanobakterien in den Zellen entwickelten sich nämlich weiter – zu Chloroplasten, den Chlorophyll-Behältern der Zelle. So konnten sich viel später die grünen Landpflanzen entwickeln. Die setzten über die Jahrtausende mehr und mehr Sauerstoff in die Atmosphäre frei. Vor etwa 350 Millionen Jahren pendelte sich dann ein Gleichgewicht zwischen Sauerstoffproduktion und -verbrauch ein; seither beträgt der Sauerstoffanteil in der Atmosphäre relativ konstant knapp 21 Prozent.

Als Glücksfall für die Entwicklung des Lebens erwies sich zudem, dass Sauerstoff in der **Stratosphäre** durch die kurzweilige, energiereiche UV-Strahlung der Sonne gespalten wird. Als Folge entsteht dort Ozon – jene Substanz, die uns

Manche Urbakterien leben heute in Pflanzen weiter

Uratmosphäre ein Gemisch, das von den in der Folgezeit entstehenden Lebewesen eingeatmet werden konnte.

Vor etwa 1,5 Milliarden Jahren kam es schließlich zu einer Vereinigung zwischen Verwandten der Cyanobakterien und weiter entwickelten Zellen, die schon einen Zellkern besaßen.

Diese so genannten Eukaryoten – die nicht zur Photosynthese fähig waren – verschlangen die

auch heute vor der ultravioletten Sonnenstrahlung schützt. Unter diesem Schutzschirm konnte die Entwicklung des Lebens nun auch an Land beginnen.

Der Schritt aus der Frühzeit der Erde, dem Archaikum, in das Sauerstoffzeitalter war damit endgültig vollzogen. □

Horst Rademacher, 50, ist der Wissenschaftskorrespondent der „Frankfurter Allgemeinen Zeitung“ in San Francisco.

No1 in Europa für China-Reisen

Gebeco

LÄNDER ERLEBEN



Mehr China – mehr erleben



Unser Top-Tipp:

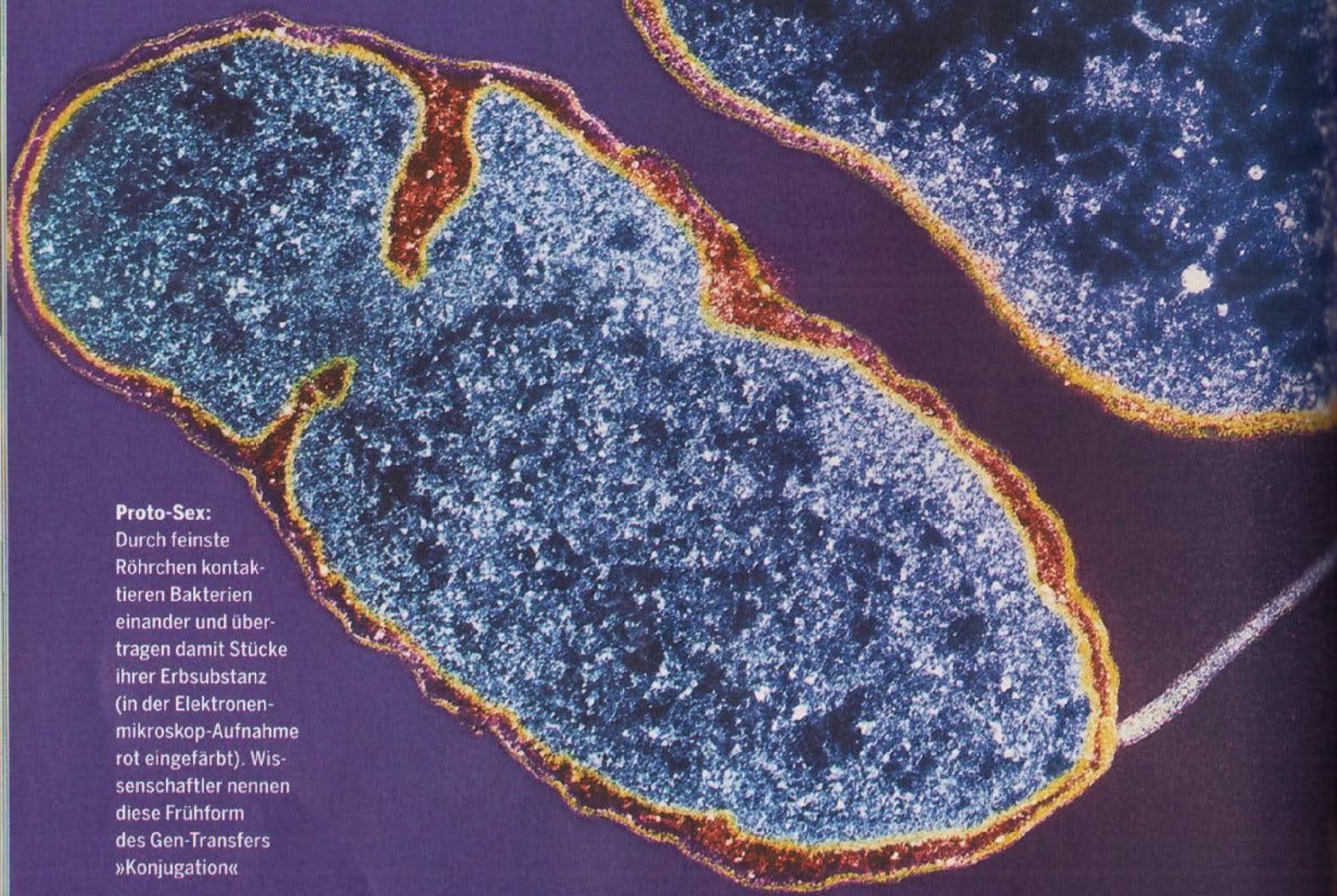
Historische
Plätze in China
12-Tage-Studienreise
ab € 1.595,-

Gut, dass die Reiseleiter von Gebeco echte Insider sind. Auch in den fernsten Winkeln dieser Erde. Reisen Sie abseits touristischer Pfade und begegnen Sie anderen Kulturen hautnah. Studien- und Erlebnisreisen von Gebeco sind die ideale Verbindung aus perfekter Reiseplanung und hoher Flexibilität – kombinierbar mit Ausflügen, Reisebausteinen und Anschlussprogrammen Ihrer Wahl.

Mehr Details über unsere Reisen erhalten Sie in unseren Länderkatalogen. Zu bestellen unter **04 31 / 5 44 60** und **www.Gebeco.de** – oder buchen Sie gleich in Ihrem Reisebüro.

25
JAHRE
ERFAHRUNG

World of
TUI

**Proto-Sex:**

Durch feinste Röhrrchen kontaktieren Bakterien einander und übertragen damit Stücke ihrer Erbsubstanz (in der Elektronenmikroskop-Aufnahme rot eingefärbt). Wissenschaftler nennen diese Frühform des Gen-Transfers »Konjugation«

Wenn es um das eine geht, den Sex, verhalten sich nicht nur Menschen mitunter bizarr. Gottesanbeterinnen etwa und manche Spinnenweibchen verschlingen die Männchen

während oder nach der Paarung. Junge Blaupunkt-Korallenrundeln, eine Fischart in Australien, besetzen einen Brutplatz und warten auf einen Partner; dessen Geschlecht ist ihnen egal – denn sie nehmen einfach das jeweils gegenteilige an.

Manche männliche Wanzen wiederum bohren ein Loch in den Bauchpanzer des Weibchens und bringen dort ihre Samenzellen hinein, die über das Herz in die Eierstöcke wandern.

Sexualität ist kompliziert, aufwendig und in manchen


Fällen sogar lebensgefährlich. Dennoch können sich 99,9 Prozent aller Tier- und Pflanzenarten auf diese Art fortpflanzen.

Das muss einen Grund haben – allerdings nicht den, dass es zum Sex keine Alternative gäbe.

Der Mix macht's

Vor 1,5 Milliarden Jahren erfindet die Natur den Sex. Dessen evolutionärer Vorteil: Erstmals wird das Erbgut von Generation zu Generation neu kombiniert – und macht die Individuen überlebensfähiger

Text: Henning Engeln



Bakterien beispielsweise vervielfältigen sich unabhängig von Sexualität, und viele Wirbellose können (zumindest zeitweise) darauf verzichten – etwa Würmer, Quallen und Blattläuse.

Manche Rädertierchen existieren schon seit mehr

als 40 Millionen Jahren ohne Sex. Unter den Wirbeltieren vermehren sich vor allem gewisse Reptilien eingeschlechtlich: Ungefähr 30 Echtenarten sind imstande, sich selbst zu befruchten, ebenso manche Amphibien und einige Fische.

Geradezu mysteriös erscheint das Phänomen der Sexualität, wenn man in Betracht zieht, dass die sexuelle Fortpflanzung innerhalb weniger Generationen verschwinden würde, wenn sie mit den Alternativen direkt konkurrieren müsste:

der eingeschlechtlichen Vermehrung, bei der eine unbefruchtete Eizelle heranwächst, und der ungeschlechtlichen Vermehrung, bei der sogar aus **Körperzellen** neue Individuen entstehen.

In solchen Populationen vermehren sich nämlich sämtliche Tiere, während bei den sexuell aktiven Spezies die Hälfte aus „überflüssigen“ Männchen besteht, die zwar ihre Samen beisteuern, aber selbst keine Nachkommen produzieren.

Außerdem mixt ein weibliches Lebewesen seine Gene mit dem Erbgut eines Männchens. Dadurch ist es mit seinen Kindern nur zu 50 Prozent verwandt – im Gegensatz zu jenen Populationen, die sich ungeschlechtlich vermehren und so 100 Prozent ihrer Gene mit den Nachkommen gemeinsam haben. Der Verzicht auf 50 Prozent der eigenen Gene ist höchst verwunderlich, denn nach einem Grundsatz der Evolutionstheorie sollten Lebewesen danach streben, nur das eigene Erbgut zu fördern.

Solchen gewaltigen Nachteilen müssen also deutliche Vorteile der sexuellen Fortpflan-

Durch die Erbgut-Kombination zweier Geschlechter testet die Natur stets neue Chancen aus

zung gegenüberstehen. Eine Erklärung für das Entstehen dieser Form der Vermehrung liegt in der jahrmilliardenalten Geschichte der Lebensentstehung verborgen.

Schon bei Bakterien, den frühesten Lebensformen, gab es etwas Ähnliches wie Sex: Manche der Organismen besitzen längliche, dünne Auswüchse auf ihrer Zelloberfläche, mit denen sie sich an eine andere Bakterienzelle heften und genetisches Material übertragen können.

Diese Art von Zellkontakt und teilweiser Übertragung des Erbgutes gilt Biologen als Ursprung der Sexualität, und sie bringt enormen Gewinn: Sie erhöht die genetische Vielfalt, führt dazu, dass Organismen sich auseinander entwickeln und schneller an neue Umweltbedingungen anpassen können. Heutige Bakterien zum Beispiel verbreiten so genetische Informationen, die

etwa zur Resistenz gegen verschiedene Antibiotika führen – ein gewaltiger Vorteil für die Bakterien, ein großes Problem für die Menschheit.

In einem nächsten evolutionär wichtigen Schritt verdoppelten die Zellen ihr Erbgut. Zum ersten Mal geschehen ist das womöglich, nachdem zwei Tochterzellen nach der Teilung einer Zelle aneinander haften blieben – oder indem zwei fremde Zellen miteinander verschmolzen. Das Erbgut im Doppelpack bedeutete wiederum einen großen Vorteil: Jedes Gen war nun zweifach vorhanden. Wurde das eine durch Mutation defekt, konnte das andere den Mangel ausgleichen.

Ein weiterer Schritt der Evolution verhinderte, dass solche Verschmelzungen das Erbgut uferlos vervielfältigten: Durch die **Meiose**, die Reifeteilung, entstehen spezielle Fortpflanzungszellen des Organismus – die **Keimzellen**. Darin ist das Erbgut halbiert, der frühere einfache Satz an Genen also wieder hergestellt. Und noch mehr geschieht bei dieser Gelegenheit: Das Material der beiden genetischen Sätze wird zuvor kräftig gemischt.

Schließlich spezialisierten sich einige Individuen darauf, große, unbewegliche Keimzellen auszubilden – die **Eizellen**. Andere erzeugten kleine, bewegliche Keimzellen – die **Spermien**. Womit die Geschichte der echten Sexualität begann.

Die Verdopplung des Erbguts und die Reifeteilung könnten vor rund 1,5 Milliarden Jahren entstanden sein, denn sie kommen nur bei den

höher entwickelten Zellen mit Kern und Mitochondrien vor, die erst zu dieser Zeit auftauchten (siehe Kasten rechts).

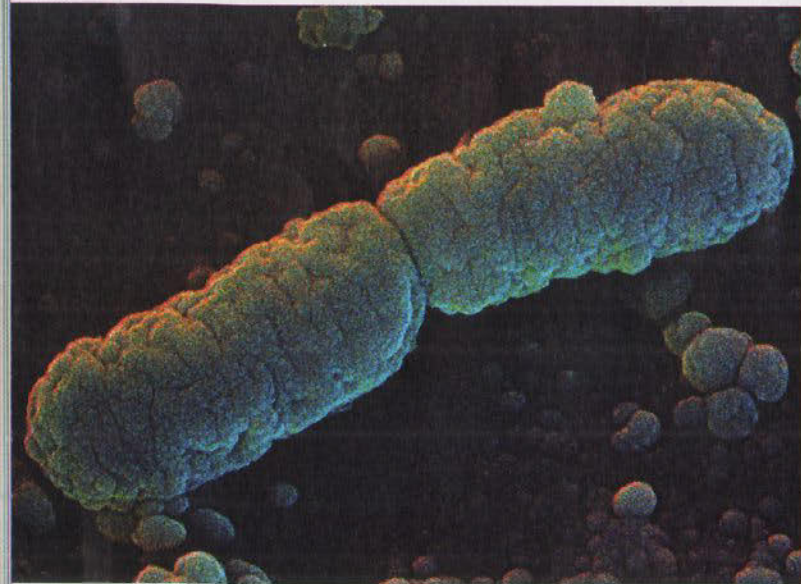
Auch die vielzelligen Tiere, die sich innerhalb der folgenden Jahrtausende entwickelten, setzten auf die zweigeschlechtliche Fortpflanzung. Denn die Natur hatte damit ein effektives Verfahren entwickelt, um Gene neu zu kombinieren, so eine größere Vielfalt zu erzeugen und dadurch eine raschere Anpassung an die Umwelt zu bewerkstelligen.

Trotzdem sind Fortpflanzung und Überleben auch ohne Sex möglich. In relativ schnell sich wandelnden Lebensräumen wie Wüsten und Hochgebirgen scheinen sich Spezies mit **Jungfernzeugung** besonders wohlfühlen.

Auch deshalb begannen Forscher, nach weiteren Erklärungen für die Zweckmäßigkeit der Sexualität zu suchen. Und sie kamen unter anderem darauf, dass die geschlechtliche Fortpflanzung eine Strategie gegen Defekte in der Erbsubstanz ist: Weil die Zellen ihr Erbgut von Generation zu Generation neu kombinieren, können sie schädliche Erbänderungen besser aussortieren.

Ein weiteres Argument für den Sex ist die durch ihn erreichte Unterschiedlichkeit: Ungeschlechtlich vermehrte, genetisch identische Tiere sind extrem ähnlich und konkurrieren deshalb um die gleichen Lebensgrundlagen. Dagegen nutzen die Varianten einer sich sexuell vermehrenden Spezies ihre Umwelt vielfältiger.

Die heute geläufigste Erklärung für den Sinn der Sexualität aber ist die „Red Queen“-Hypothese. In Lewis Carrolls Buch „Alice hinter den Spiegeln“ muss die „Rote Königin“ so schnell laufen, wie sie kann, nur um auf der-



Ein Bakterium teilt sich: Die »Tochterzelle« ist ein Klon – also genetisch absolut identisch mit der »Mutterzelle«

Ein Schutz fürs Erbgut

Vor rund 2,1 Milliarden Jahren nahm die Geschichte des Lebens auf der Erde abermals eine dramatische Wendung. Damals stieg der Gehalt an Sauerstoff in der Atmosphäre kräftig an (siehe Seite 120). Einigen Bakterien (**Prokaryoten**) gelang es, sich an die für sie eigentlich giftige Substanz anzupassen, sie durch Atmung sogar für die Energiegewinnung zu nutzen. Einer anderen Gruppe von Einzellern dagegen fehlte diese Fähigkeit. Sie waren viel größer als Bakterien und besaßen nicht deren Zellwand. Stattdessen umhüllten sie sich mit einer weichen Membran, die sie um Nahrungspartikel, ja ganze Bakterien stülpen konnten, um die in sich aufzunehmen und zu verdauen. Und genau diese Fähigkeit war es, die einige dieser frühen „Räuber“ vermutlich vor dem Aussterben in der für sie nun lebensfeindlichen, sauerstoffangereicherten Atmosphäre rettete. Denn sie verschlangen die zur Atmung befähigten Bakterien, verdauten sie jedoch nicht, sondern bildeten mit ihnen eine Lebensgemeinschaft zum gegenseitigen Nutzen: Die Bakterien waren nun durch eine weitere Hülle geschützt, die „Räuber“ konnten dank ihrer Beute mit dem Sauerstoff zurechtkommen. Diese **Endosymbiose** erwies sich als großer Überlebensvorteil. Einige der großen Einzeller verliebten sich später noch einen weiteren Gast ein: Cyanobakterien, die Licht in chemische Energie umwandeln, also Photosynthese betreiben können. Hinzu kamen weitere Eigenschaften, die den „Räubern“ eine erfolgreiche Zukunft bescherten und letztlich auch die Entwicklung der Sexualität ermöglichten. So bewahrten sie ihre Erbsubstanz (DNS) in einer Hülle aus einer Doppelmembran auf: dem Zellkern. Sie werden deshalb **Eukaryoten** genannt (gr. „eu“ = gut; „karyon“ = Kern). Im Zellkern ist der DNS-Faden in so genannten **Chromosomen** aufgewickelt. In Form der Chromosomen lässt sich das Erbmateriale gut transportieren; seine korrekte Aufteilung bei der Zellverdopplung wird so gewährleistet – eine

selben Stelle zu bleiben. Auf die Biologie bezogen, ist damit gemeint: Der Körper eines Lebewesens befindet sich in einem ständigen Abwehrkampf gegen Parasiten und Krankheitserreger. Je schneller er sich von Generation zu Generation wandeln kann, je vielfältiger die Moleküle auf den Zelloberflächen sind, desto schwerer wird es für Bakterien, Viren und andere Keime, ihn zu besiedeln und in Zellen einzudringen. Und die sexuelle Vermehrung ist die Methode, mit der sich am schnellsten eine größtmögliche Vielfalt erzielen lässt.

Untersuchungen an Zahnkärpflingen in Mexiko haben bestätigt, dass sich eingeschlechtlich vermehrende Fische deutlich anfälliger für Plattwurmlarven sind als sich sexuell fortpflanzende Varianten – solange Letztere über ein genügend großes Genreservoir für ihre Vielfalt verfügen.

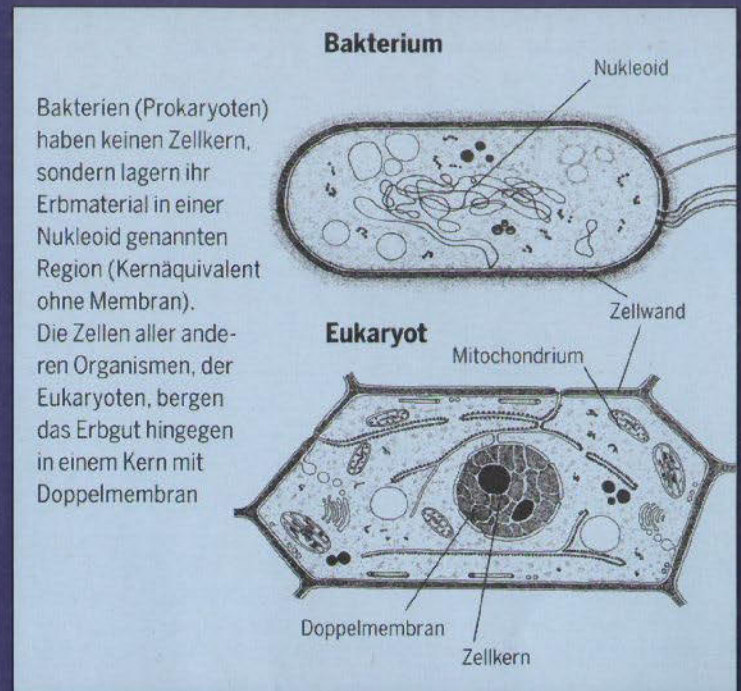
Ingo Schlupp vom Zoologischen Institut der Universität Hamburg erforscht die Fortpflanzung eingeschlechtlicher Zahnkärpflinge einer anderen Gattung. Er resümiert: „Trotz mancher Schwachpunkte ist die Red-Queen-Hypothese

das Beste, was wir zurzeit haben.“ Endgültig, so räumt der Zoologe ein, sei das Rätsel der Sexualität aber noch nicht gelöst.

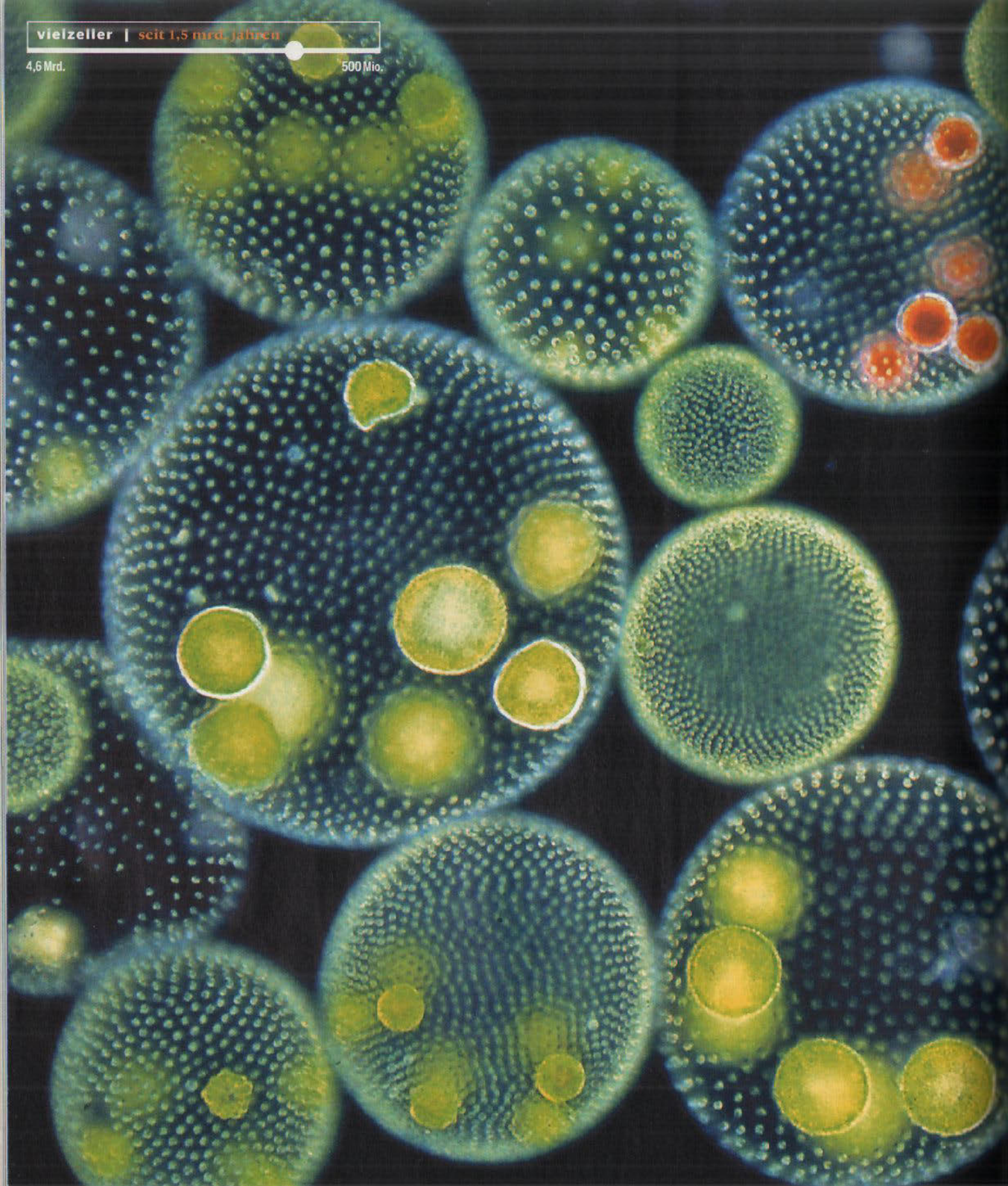
Selbst die Frage, warum es überhaupt männliche Individuen gibt, ist Zündstoff für wissenschaftliche Debatten. Manche Forscher glauben, dass sie zu nichts anderem dienen, als Gene von einem weiblichen Individuum – der Mutter – zu einem anderen – der Partnerin – zu übertragen. Und aus der Sicht von Parasitologen gleichen Spermien Schmarotzern, die

sich in die Eizelle bohren und sie benutzen, um die eigene Erbsubstanz von ihr vermehren zu lassen.

Das Leben der Spermien-erzeuger ist gleichwohl kein leichtes: Um zu demonstrieren, dass sie körperlich fit und mit „guten“ Genen ausgestattet sind, müssen sie zum Beispiel kämpfen – wie etwa der Rothirsch – oder ihre Schönheit zur Schau stellen – wie der Pfau. Weibchen entscheiden sich eher für solche „Sieger-typen“ und sorgen so für besonders lebensstüchtigen und womöglich sogar genetisch überlegenen Nachwuchs. □



wichtige Voraussetzung echter Sexualität. Insofern ist auch der Zellkern als Ort der Chromosomenbildung für sie entscheidend. Eukaryoten besitzen zudem spezielle Eiweiße, die als skelettähnliche Struktur der Stabilisierung dienen. Mithilfe weiterer Eiweiße, darunter Actin und Myosin, können sich die Eukaryoten durch Kontraktion fortbewegen; noch heute sind ähnliche Moleküle Bestandteil unserer Muskeln. All das waren Voraussetzungen für die spätere Entstehung vielzelliger Lebewesen, also aller Tiere, Pilze und Pflanzen. Die „Untermieter“ – die Sauerstoff verwertenden Bakterien – sind geblieben und existieren noch heute in den eukaryotischen Zellen auch von Menschen: als **Mitochondrien**, chemische Kraftwerke, die aus Zucker, Fetten und Sauerstoff Energie gewinnen.



Die Grünalge Volvox ist wohl der erste echte Vielzeller. Bis zu 16 000 Zellen bilden eine mit durchsichtigem Gel gefüllte Hohlkugel. Während die Geißel tragenden Zellen der äußeren Schicht die Ernährung und Fortbewegung übernehmen, dienen größere Zellen im Inneren der Fortpflanzung: Die kann sexuell oder, wie in dieser mikroskopischen Aufnahme, ungeschlechtlich durch die Bildung von Tochterkolonien erfolgen

Die Erfindung der Leiche

Irgendwann im Verlauf der Evolution bilden viele Zellen gemeinsam einen Organismus und spezialisieren sich unterschiedlich – ein Riesensprung in der Entwicklung des Lebens. Auch wenn die meisten Zellen nun sterben müssen

Text: Henning Engeln

Eine Bakterienzelle teilt sich im günstigsten Fall innerhalb von 20 Minuten. Das Resultat sind dann zwei Bakterien mit identischem Erbgut und gleichen Eigenschaften. Könnten sie sich ungehemmt vermehren, würden die Nachkommen in nur zwei Tagen die gesamte Erde bedecken.

Wenn sich hingegen eine befruchtete menschliche Eizelle teilt, dann dauert das nicht nur mindestens 48-mal länger, auch das Ergebnis ist ein völlig anderes: Obwohl sie die gleichen Gene beherbergen, sehen die Zellen schon nach wenigen Teilungen

unterschiedlich aus – und sie bleiben miteinander verbunden, statt als Einzeller ihrer Wege zu gehen. Ist schließlich ein Embryo herangewachsen, enthält er rund 200 verschiedene Zelltypen.

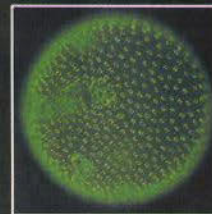
Diese sind von derart unterschiedlicher Gestalt und Fähigkeit, dass sie mal ein Gehirn, mal einen Knochen oder ein Bakterien attackierendes Immunsystem formen können.

Das Geheimnis aller vielzelligen Lebewesen – seien es Bäume oder Moose, Spinnen, Fische oder Vögel – besteht in dieser Fähigkeit, aus ein und demselben Material unter-

schiedliche Zellen heranwachsen zu lassen.

In der Urzeit der Erde waren alle Wesen simple Einzeller, wie zum Beispiel die heutigen Bakterien. Irgendwann aber müssen sie sich so weiterentwickelt haben, dass sich ihnen völlig neue Möglichkeiten eröffneten.

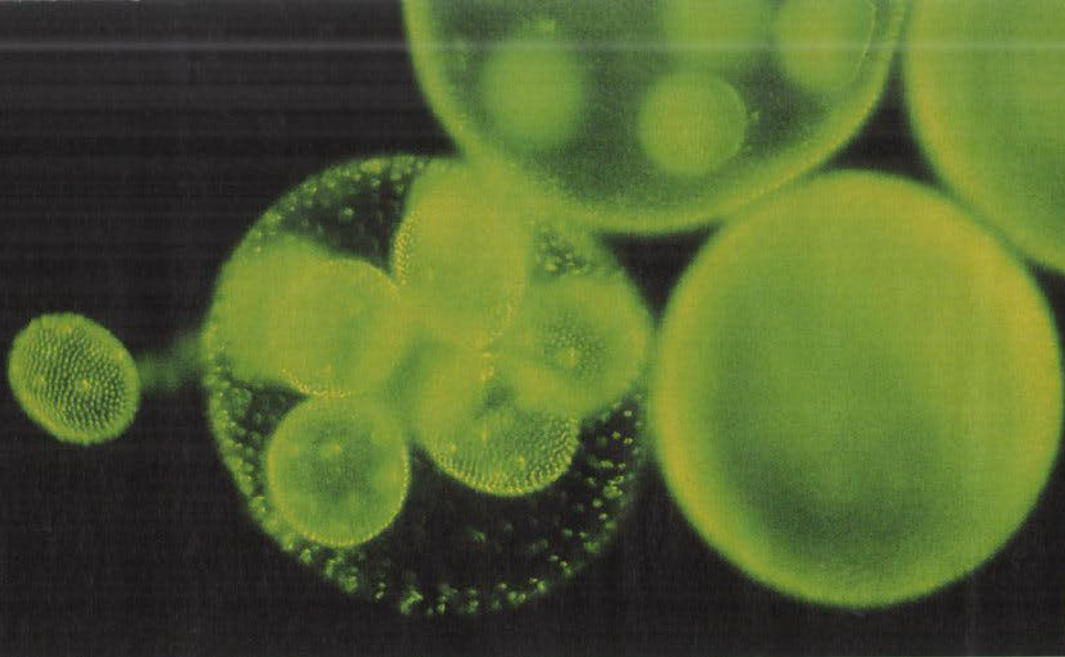
Der erste Schritt auf dem Weg zum Vielzeller war die Bildung von Kolonien. Zellen trennten sich nach der Teilung nicht mehr vollständig, sondern blieben an-



einander haften. Die Bildung von Zellkolonien hat manchen Vorteil: Die Verbände können aufgrund ihrer Größe nicht so leicht gefressen werden, und mehr- oder

vielzellige Kolonien, die Geißeln tragen, können sich deutlich schneller fortbewegen als begeißelte Einzeller. Selbst einfache Schleimpilze, die normalerweise als einzellige Amöben lebten, waren schon sehr früh zur Koloniebildung fähig.

Doch zum echten Vielzeller war mehr nötig. Die Zellen mussten sich spezialisieren können – also trotz gleichen Erbgutes unterschiedliche Formen entwickeln und verschiedene Aufgaben übernehmen. Wann das erstmals geschah, ist schwer zu sagen. Von den ersten Vielzellern sind kaum Fossilien er-



Tochterzellen von Volvox werden im Inneren der Mutterkugel gelagert und erst mit deren Absterben frei: Fortpflanzung durch Tod

halten, da diese Organismen sehr klein waren und keine festen Bestandteile wie etwa Kalkschalen besaßen – was eine Voraussetzung für die Bildung von Abdrücken im Gestein ist.

Deshalb versuchen Forscher die Frage nach der Entstehung der Vielzelligkeit mithilfe der so genannten „molekularen Uhr“ zu beantworten. Dabei wird genetisches Material von Einzellern und **Vielzellern** miteinander verglichen, und es lässt sich errechnen, wie nahe verwandt die untersuchten Organismen sind und wann ihre Vorfahren unterschiedliche Wege gingen.

Demnach hat es schon vor rund 2,3 Milliarden Jahren – kurz nachdem der erste freie Sauerstoff in der Atmosphäre auftauchte – Organismen mit zwei oder drei unterschiedlichen Zelltypen gegeben, ohne dass sie schon echte Vielzeller waren.

Dazu mussten vor vielleicht 2,1 Milliarden Jahren die so genannten „eukaryotischen Zellen“ ihre Entwicklung vollenden (siehe Seite 129). Diese Zellen haben ein mehr als 10 000-fach größeres Volumen

als Bakterien. Zudem ist ihre Erbsubstanz in einem Zellkern eingeschlossen. Sie sind die typischen Zellen aller höheren Lebewesen, und sie entstanden etwa zu der Zeit, als der Sauerstoffgehalt zunächst im Meer und dann in der Atmosphäre eine stabile Konzentration erreicht hatte.

Mit der Spezialisierung dieser Zellen wurden die entscheidenden Weichen zur Vielzelligkeit gestellt – und damit für die drei Reiche der höheren Lebewesen: die der Pflanzen, der Tiere und der Pilze.

Innerhalb der nächsten Jahrmilliarde nahm die Vielfalt der Lebewesen enorm zu, und es entwickelten sich Organismen mit bis zu 50 Zelltypen (darunter auch Vorläufer der gegenwärtig lebenden Arten).

Vermutlich lebten die ersten echten Vielzeller vor rund 1,5 Milliarden Jahren. Die ältesten Funde vielzelliger Algen oder Schwämme sind allerdings nur rund 580 Millionen Jahre alt.

Wahrscheinlich entstanden vielzellige Organismen im Verlauf der Evolution nicht nur einmal, sondern wiederholt. Wie sich die Vielzelligkeit entwickelt haben könnte,

untersucht derzeit ein Team der Universität Bielefeld an Grünalgen der Ordnung *Volvocales*, die dafür ein ideales Studienobjekt sind.

Manche *Volvocales*-Arten leben als Einzeller; bei anderen bilden mehrere oder sogar viele Zellen einen Organismus in Form einer Kugel. Einige der kugelförmigen *Volvocales*-Arten besitzen sogar schon unterschiedlich große Zellen (zum Beispiel die Gattung *Volvox*). Die Forscher haben herausgefunden, dass die Veränderung nur weniger Gene ausreicht, um eine vielzellige Grünalge wieder in einen Einzeller zurückzuverwandeln.

Das wichtigste Kennzeichen der Vielzeller ist die Arbeitsteilung zwischen den Zellen. Sie könnte dadurch entstanden sein, dass sich Zellen nicht mehr genau in der Mitte geteilt und damit einen ersten Schritt zur Spezialisierung gemacht haben.

Durch die ungleichmäßige Teilung bildeten sich nämlich größere und kleinere Zellen: Die größeren waren ihrerseits wieder zur Teilung (Vermehrung) fähig und entwickelten

sich zu den späteren **Keimzellen** (die vor allem mehr Nährstoffe enthalten und damit größere Überlebenschancen besitzen).

Die zunächst noch kleineren Zellen – die späteren **Körperzellen** – unterstützten auf unterschiedliche Weise die großen, waren aber selbst nicht mehr fähig, sich immer aufs neue zu teilen: Sie altern und mussten irgendwann sterben. Die Evolution hatte somit erstmals Leichen hervorgebracht.

Tatsächlich war die Fähigkeit, besondere Formen oder Funktionen auszubilden, für die Körperzellen nur um den Preis der Sterblichkeit zu haben. Doch nun hatten sie die Möglichkeit, immer komplexere Körper mit unterschiedlichen Gewebetypen zu entwickeln – und zwar mithilfe spezieller Regulationsgene, die je nach Bedarf in dem einen Zelltyp einzelne Gene oder ganze Gruppen von Genen stilllegen, sie in einem anderen Zelltyp aber anschalten. Die Fortpflanzung dagegen blieb den Keimzellen überlassen, deren Gene noch alle Möglichkeiten haben, also omnipotent sind.

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung des Lebens auf der Erde war die sexuelle Fortpflanzung (siehe Seite 126). Dank ihrer waren von jedem Gen zwei Varianten vorhanden, sodass sich nachteilige **Mutationen** nicht so schnell auswirkten – was bei den immer komplexeren Organismen von großer Bedeutung war. Und durch die genetische Vermischung konnten sich ständig neue Genkombinationen zusammenfinden und sich Arten somit gut an neuartige Umweltbedingungen anpassen.

Dem höheren Leben, so wie wir es heute kennen, standen nun alle Chancen zur Weiterentwicklung offen. □

Überall zu Hause, wo es spannend ist: **GEOLino**.

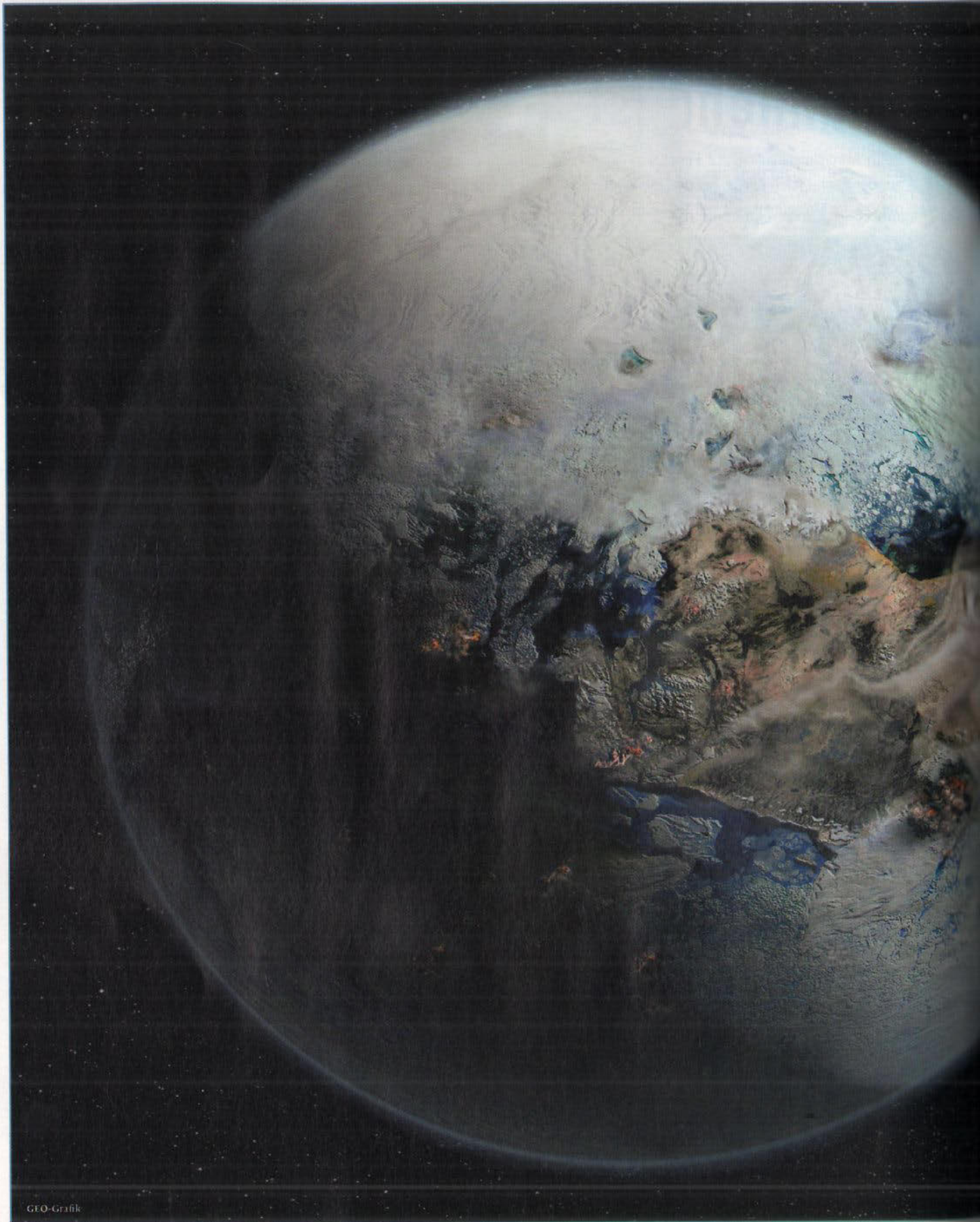
Beim **Astronautentraining**, auf Ferienreise zum **Mond**, an Bord einer **Raumstation**, auf der Suche nach **Aliens**, bei den Pionieren der **Weltraumforschung**, am Anfang der **Zeit**, im **Meteoritenhagel**, mit **Tieren** im All: der Weltraum – jetzt in **GEOLino extra**.

Ab 16.11.04 im Handel!



Das große Extraheft
von GEOLino.





GEO-Grafik



Die Erde sieht aus wie ein blauer Edelstein in der Finsternis des Alls!“, schwärmte der amerikanische Astronaut Frank Borman während des ersten bemannten Fluges zum Mond im Dezember 1968 über den Planeten der Meere.

Doch blau war die Erde nicht immer. Anfangs wirbelte sie als feurige Kugel durchs All. Abgekühlt mag sie eine Zeit lang düster ausgesehen haben, bis sich Atmosphäre und Ozeane gebildet hatten und sie blau schimmern ließen. Manchmal aber war sie auch einfach nur glitzernd weiß – umhüllt von einem Panzer aus Eis.

Schon mehrmals in ihrer Geschichte ist die Erde für Millionen Jahre zum Schneeball geworden. Während dieser Mega-Eiszeiten herrschten, so schätzen Paläoklimatologen, Temperaturen von minus 50 Grad Celsius. Daneben gab es öfter auch Vereisungen geringeren Ausmaßes:

Allein dreimal in den letzten 500 000 Jahren waren Teile Nord- und Mitteleuropas, Nordasiens und Nordamerikas für jeweils Zehntausende von Jahren kilometerdick von Eis bedeckt.

Auf dem Höhepunkt des vorerst letzten dieser Eisvorstöße vor 20 000 Jahren reichten die Gletscher von Skandinavien bis in den heutigen Hamburger Raum und über Berlin hinaus. Noch weiter, bis nach Sachsen und ins Ruhrgebiet, war das Eis in den beiden vorangegangenen Eiszeiten vorgedrungen.

Nach Meinung von Experten leben wir auch derzeit noch in diesem Eiszeitalter und warten lediglich auf die nächste größere Vereisung, die wahrscheinlich in einigen tausend Jahren folgen wird.

Die noch frischen Spuren vergangenen Eises liegen in der Landschaft offen zutage: Moränen und Urstromtäler, Seenplatten, Sand- und Schotterflächen sowie unzählige Findlinge.

Das Eis hat große Mengen von Gesteinstrümmern aufgenommen und über Hunderte von Kilometern fortgetragen. In Norddeutschland zeugt eine durchschnittlich mehr als 100 Meter dicke Decke aus Sand und Ton, aus kleineren und größeren Felsbrocken von jener Zeit, als dort arktische Temperaturen herrschten. Wo immer das Eis festen Untergrund überfuhr, hat es den Fels geschliffen und geschrammt.

Auf dem Höhepunkt der jüngsten Kälteperiode waren weltweit etwa 30 Prozent aller Landflächen von Gletschern bedeckt. Heute liegen noch rund zehn Prozent des Festlandes, hauptsächlich in der Antarktis und auf Grönland, unter Eis. Aber die längste Zeit der Erdgeschichte befand sich an den Polen überhaupt kein Eis.

Nachdem es Forschern gelungen ist, weit in die klimatische Vergangenheit der Erde zurückzublicken, haben sie herausgefunden,

Der Klima-Schock

Text: Helmut Horch; Illustration: Tim Wehrmann

Das weltweite Klima ist das Ergebnis eines komplexen Wechselspiels zwischen Sonne, Erdoberfläche und Atmosphäre. Vor 750 Millionen Jahren geriet es aus den Fugen – und unser Planet fror fast völlig ein

dass das Klima immer wieder beträchtlich geschwankt hat. Meist war es wärmer als heute, aber immer wieder eben auch weitaus kälter.

Die Erklärung solcher Schwankungen stellt die Experten vor große Schwierigkeiten: Klimatologen kennen zwar zahlreiche Faktoren, die das Klima beeinflussen, doch sie sind weit davon entfernt, deren kompliziertes Zusammenwirken zu verstehen.

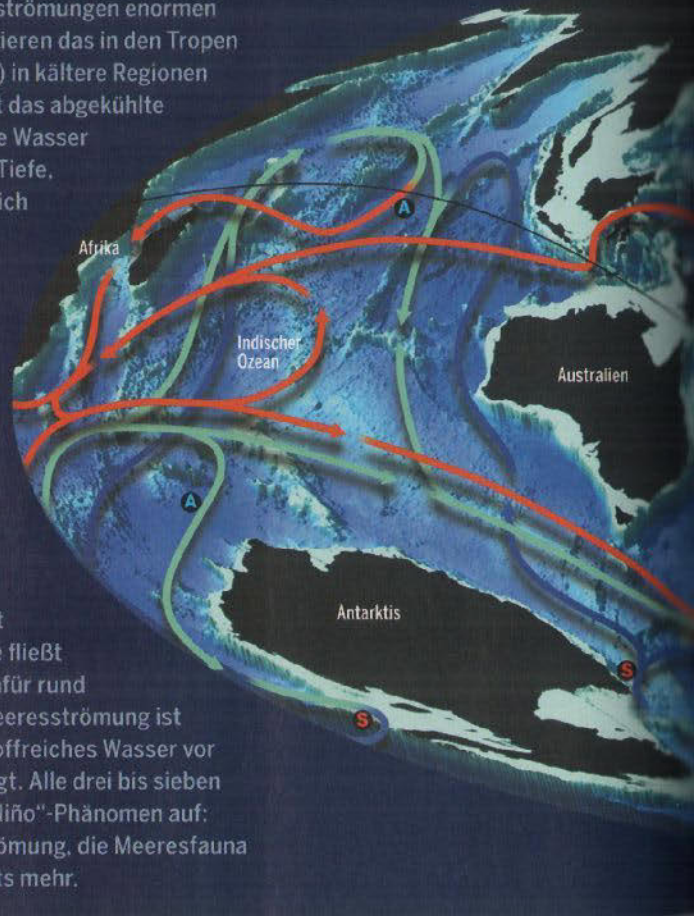
Schon die Frage, was der Begriff **Klima** eigentlich beschreibt, ist nicht einfach zu beantworten. Das aus dem Griechischen stammende Wort bedeutet „Neigung“. In der Antike war damit auch der unterschiedliche Einstrahlungswinkel der Sonne gemeint, von dem in groben Zügen die Temperatur in den verschiedenen Klimagürteln abhängt: Steht die Sonne hoch, gelangt deutlich mehr Energie pro Flächeneinheit zur Erde als bei flachem Einstrahlungswinkel.

In einer ersten Annäherung an eine Definition kann man sagen, dass Klima so etwas wie „durchschnittliches Wetter“ ist. Meteorologen fassen Wetterlagen, die einen oder wenige Tage andauern, als Witterung zusammen – und was in der Zusammenschau über eine Jahreszeit hinausgeht, das nennen sie Klima. „Unter Klima verstehen wir“, definierte 1923 der deutsche Meteorologe Wladimir Köppen, „den mittleren Zustand und gewöhnlichen Verlauf der Witterung an einem gegebenen Ort.“

Bei Untersuchungen von Klimaschwankungen ist mit einer solch allgemeinen Definition jedoch wenig anzufangen. „An einem gegebenen Ort“ können nämlich je nach Betrachtungsweise mancherlei Klimate herrschen. Für das örtliche Klima ergeben sich ande-

Das globale Wärme-Transportband

Weil Wasser sehr viel mehr Wärme speichern kann als Land oder Luft, haben die großen Meeresströmungen enormen Einfluss auf das Klima. Sie transportieren das in den Tropen aufgeheizte Oberflächenwasser (rot) in kältere Regionen und erwärmen diese. Dort aber sinkt das abgekühlte und durch Verdunstung salzhaltigere Wasser infolge seiner höheren Dichte in die Tiefe, zieht dabei weiteres Wasser hinter sich her und treibt so den weltweiten Wasserkreislauf wie eine Pumpe an. Als Tiefenstrom (grün und blau) fließt es wieder zurück in wärmere Gegenden, um sich neu aufzuheizen. Die wichtigste warme Oberflächenströmung führt vom Pazifik durch den Indischen Ozean bis in den Atlantik. Vor Mexiko geht sie in den Golfstrom über, transportiert ihre Wärmeenergie quer über den Ozean nach Nordosten und beschert Europa ein mildes Klima. In der Tiefe fließt das Wasser zurück – und braucht dafür rund 1000 Jahre. Eine andere wichtige Meeresströmung ist der Humboldtstrom, dessen nährstoffreiches Wasser vor der Westküste Südamerikas aufsteigt. Alle drei bis sieben Jahre tritt dort das gefürchtete „El Niño“-Phänomen auf: Wärmeres Wasser verdrängt die Strömung, die Meeresfauna wandert ab, die Fischer fangen nichts mehr.



re Durchschnittswerte als für großräumigere Klimate, also für das Landschafts-, das Zonen- oder das globale Klima.

Ähnliches gilt für die Zeitmaßstäbe: Je nachdem ob ein Klimatologe seinen Berechnungen 10, 100 oder 1000 Jahre zugrunde legt, erfasst er in unterschiedlichem Ausmaß kürzer- und längerfristige Schwankungen und gelangt so zu unterschiedlichen Ergebnissen. Vor allem aber ist in der Klima-Forschung zu berücksichtigen, dass unsere Atmosphäre mit den anderen Sphären der Erde eng ver-

knüpft ist: mit den Gewässern (**Hydrosphäre**), der festen Erde (**Geosphäre**), den von Eis und Schnee bedeckten Gebieten (**Kryosphäre**) und der Welt der Lebewesen, besonders der Pflanzen (**Biosphäre**).

Je nach Beschaffenheit der Erdoberfläche wird die von der Sonne eingestrahlte Energie in ganz unterschiedlichem Ausmaß aufgenommen oder zurückgeworfen. Die Meere reflektieren nur drei bis zehn Prozent des senkrecht einfallenden Lichts, Wiesen und Felder zwölf bis

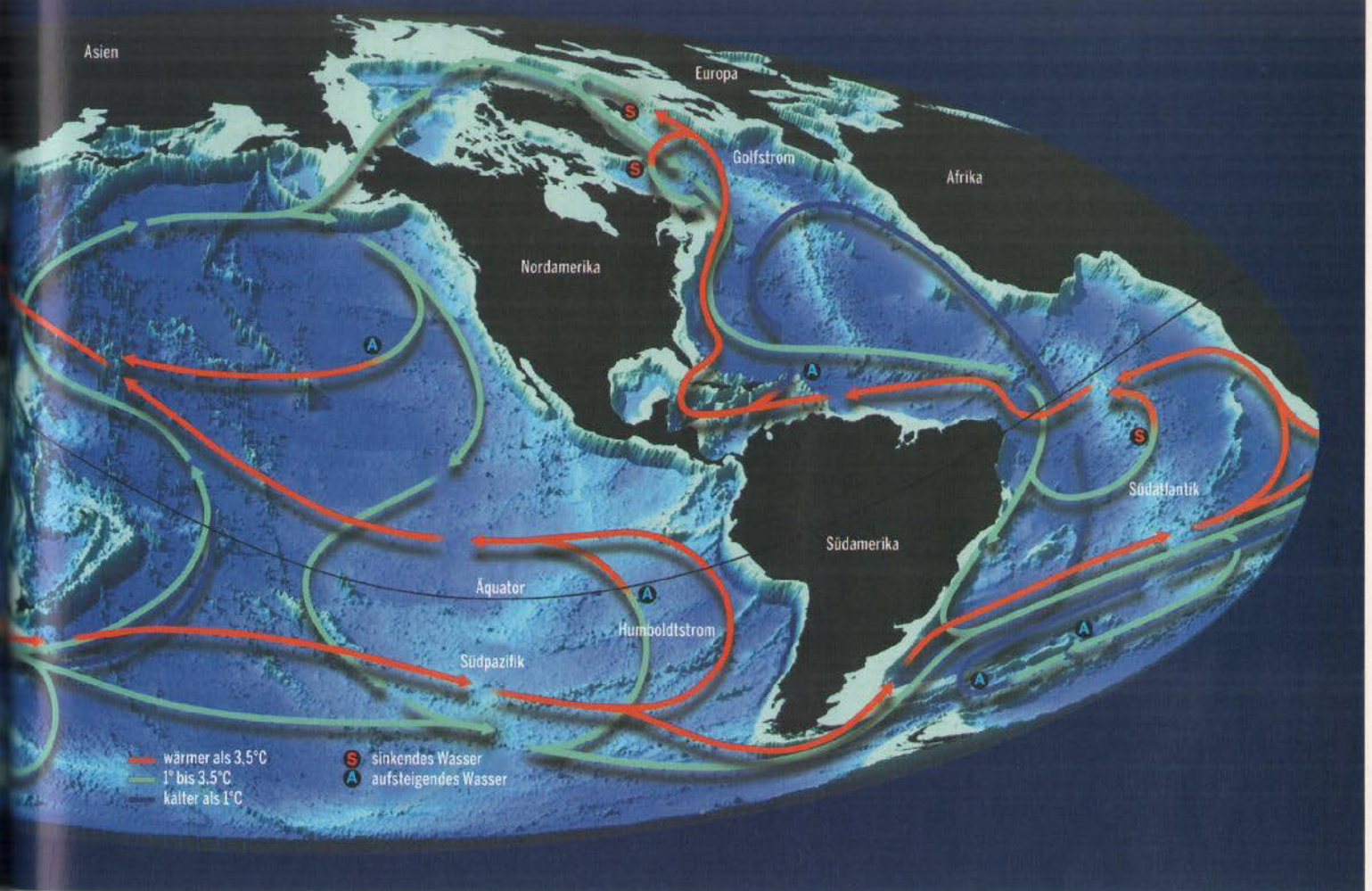
30 Prozent, eine geschlossene Wolkendecke 45 bis 80 Prozent, eine von Neuschnee bedeckte Fläche 75 bis 95 Prozent. Wasser speichert weitaus größere Wärmemengen als Land oder gar Eis – und kann deshalb auch viel mehr Wärme an die Atmosphäre zurückgeben.

Luft- und Meeresströmungen transportieren gewaltige Energiemengen aus äquatornahen Zonen in Richtung der Pole. Ohne eine derartige Zusatzheizung, ohne Golfstrom und westliche Winde, wäre beispielsweise Mitteleuropa ein unwirtliches Land wie etwa Labrador jenseits des Atlantik auf gleicher geographischer Breite.

Von der Sonnenenergie angetrieben, steigt aus den Ozeanen der größte Teil der Wassermengen, die über

Winde und Meeresströmungen

bringen große Mengen an Wärmeenergie vom Äquator in kältere Regionen

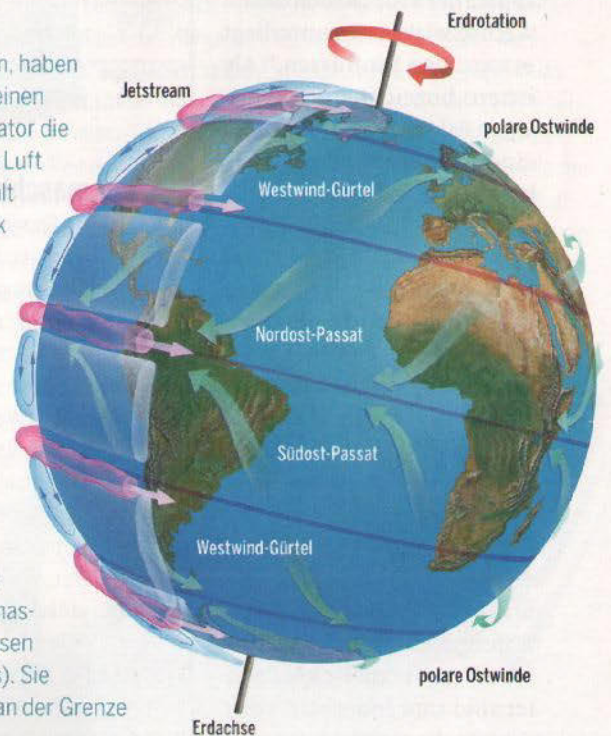


Land niedergehen, in die Atmosphäre auf. Ausreichender Niederschläge bedarf es, damit an Land Pflanzen gedeihen können, die wiederum durch Verdunstung zu dem Wasserkreislauf beitragen. Auch das Eis der Erde braucht zu seiner Erhaltung außer Kälte Niederschläge. Mangelt es an einem von beiden, schrumpft das Eis. Denn wo kein Eis mehr gleißt, reflektiert die Landschaft weit aus weniger Sonnenenergie – was eine Erwärmung einleiten oder verstärken kann.

Zwischen diesen so verschiedenartigen Sphären hängt wiederum alles mit allem zusammen. Für Meteorologen, die sich nur um das augenblickliche Wettergeschehen kümmern, genügt es völlig, die Vorgänge in der schnell veränderlichen Atmosphäre zu beobachten.

Winde machen Wetter

Drei große Windsysteme, die das Klima prägen, haben sich auf unserem Planeten ausgebildet. Zum einen wehen zwischen 30 Grad Breite und dem Äquator die so genannten Passate: Am Äquator erwärmte Luft steigt auf, fließt nach Norden oder Süden, kühlt sich dabei ab und strömt in Bodennähe zurück zum Äquator. Die Passate werden durch die Erdrotation, die so genannte Corioliskraft, abgelenkt. Diese beschleunigt polwärtige Bewegungen nach Osten und äquatorwärtige nach Westen. Daher wehen die Passate stets aus östlicher Richtung. In den mittleren Breiten dagegen herrschen Winde aus dem Westen vor, mit denen sich Tiefdruckgebiete nach Osten verlagern. Das dritte Luftdrucksystem befindet sich an den Polen: Von einem Hochdrucksystem über den Polkappen aus werden die abfließenden Luftmassen abgelenkt. Über diesen drei Systemen blasen in großer Höhe starke Westwinde (Jetstreams). Sie gleichen große horizontale Druckdifferenzen an der Grenze zwischen Warm- und Kaltluftmassen aus.

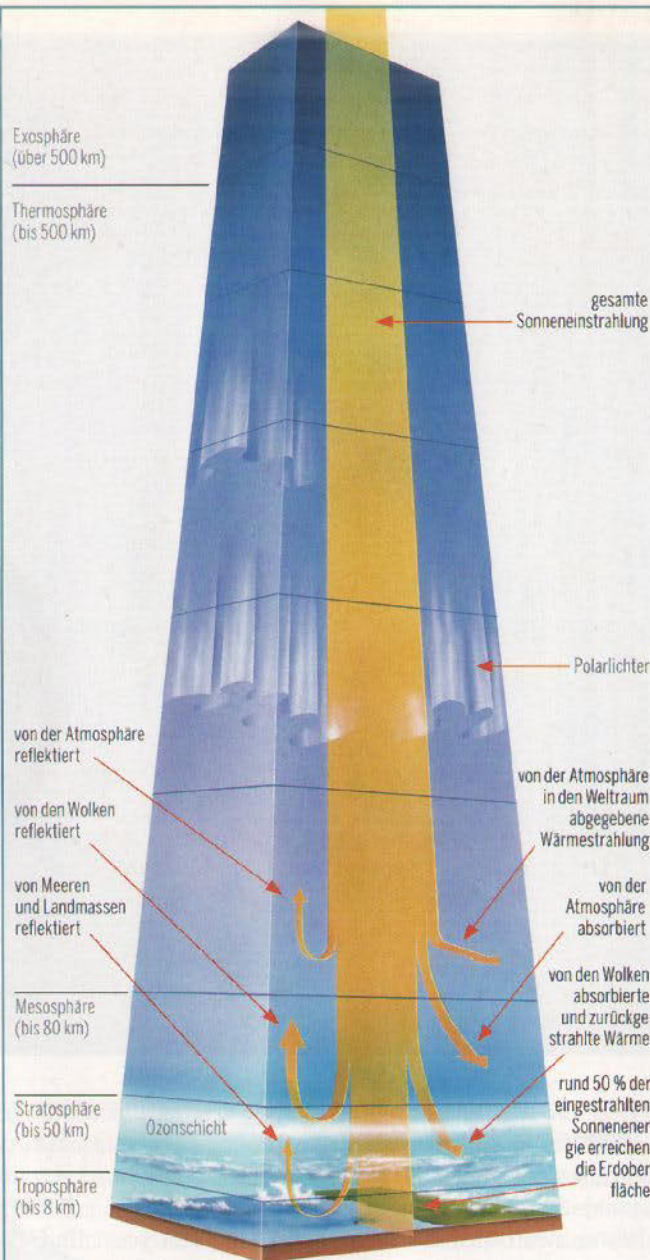


Denn die Einflüsse der anderen Erdsphären schwanken kaum in den kurzen Zeiträumen, in denen Wettervorgänge ablaufen. Bei Untersuchungen über Klimaveränderungen hingegen geht es manchmal um Jahrtausenden.

Da kann sich mancherlei verändern, was sich auf die Atmosphäre auswirkt: etwa die Wassertemperatur in verschiedenen Teilen der Ozeane; der Verlauf oder die Stärke von Meeresströmungen; die Verbreitung von Meereis oder Eis an Land; die Ausdehnung der Vegetationszonen. Auch die Entstehung oder die Abtragung von Gebirgen spielt eine Rolle – und sogar die Stellung der Kontinente zueinander, die mit Geschwindigkeiten von wenigen Zentimetern pro Jahr um die Erde driften.

„Das Klima“, so eine moderne Definition des Klimatologen Christian-Dietrich Schönwiese, „ist eine Folge der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Lithosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre der Erde. Neben diesen Wechselwirkungen unterliegt es externen Einflüssen.“ Als extern bezeichnen Klimatologen Faktoren, die das Klima einseitig, ohne Wechselwirkungen beeinflussen.

Als im 19. Jahrhundert Forscher erstmals Spuren einer **Eiszeit** entdeckten, mochten viele Wissenschaftler zunächst nicht daran glauben. Dabei waren die Hinweise eindeutig. Gletscherschutt ist noch nach Millionen oder gar Milliarden Jahren gut von Sedimenten zu unterscheiden, die von Wasser transportiert und abgelagert worden sind: Während von Wasser abgesetzte Sedimente meist geschichtet sind und innerhalb einer Schicht die Größe der einzelnen Teilchen in etwa überein-



Klimamaschine Sonne

Sämtliche Energie, die das irdische Klimageschehen antreibt, liefert die Sonne. Während ein großer Teil ihrer einfallenden Strahlung von Luftmolekülen oder Wolken zurück ins All geworfen oder absorbiert wird, erreicht etwa die Hälfte die Erdoberfläche – das meiste in Äquatornähe, weil da die Sonnenstrahlen senkrecht auftreffen. Abhängig von der Beschaffenheit (Wasser oder Land) sowie der Farbe der Erdoberfläche wird die Sonnenenergie dort unterschiedlich stark ins All zurückgestrahlt. Frischer Schnee reflektiert bis zu 95 Prozent der auf der Erdoberfläche eintreffenden Strahlung, Eis bis zu 60, trockener Sand bis zu 45. Wald und dunkle Böden reflektieren etwa 15 Prozent, Meeresflächen spiegeln je nach Einfallswinkel 4 bis 90 Prozent zurück. Der Rest der Strahlung wird jeweils an Ort und Stelle absorbiert und in Wärme umgewandelt. Diese wiederum erhitzt Luft, die aufsteigt und Winde verursacht. Schließlich lässt die gespeicherte Wärme Wasser verdunsten und treibt Meeresströmungen an.

stimmt, hinterlassen Gletscher nach dem Abschmelzen ein Durcheinander.

Bereits damals berichteten Wissenschaftler über Vereisungen aus weit zurückliegenden Erdzeitaltern. Eiszeiten, so wurde bald klar, hat es immer wieder gegeben, die ältesten, nach heutigem Forschungsstand, vor 2,3 Milliarden Jahren. Insgesamt sind in der Chronik der Gesteine mindestens sechs **Eiszeitalter** vor dem derzeitigen verzeichnet.

Besonders reichlich fündig wurden die Forscher in etwa 750 bis 580 Millionen Jahre alten Gesteinen. Die Spuren dieser nach einem norwegischen Fjord benannten „Varanger-Vereisung“ finden sich heute auf allen Kontinenten. Verblüfft registrierten die Wissenschaftler, wie mächtig die Ablagerungen aus Gletscherschutt teilweise sind: bis zu 700 Meter dick in Ostgrönland, bis zu 6000 Meter in Australien.

Vereist waren sogar Gebiete, die damals in der Nähe des Äquators lagen – und zwar selbst in Meereshöhe, während sich Eis in den Tropen heute nur in Höhen über 5000 Meter hält.

Dass das Varanger-Eis weltweit verbreitet war, konnte sich lange Zeit niemand vorstellen. Doch in den 1960er Jahren ergaben Klimamodellierungen, dass die Erde zwangsläufig zum Schneeball gefriert, wenn sich die polaren Eiskappen mit ihrer extrem starken Reflexion des Sonnenlichts über den nördlichen und südlichen 30. Breitengrad hinaus ausbreiten.

Die begonnene Abkühlung wird durch die Ausbreitung des Eises immer weiter verstärkt, bis sich der Prozess von einem bestimmten Punkt an, so das Ergebnis dieser Modellierungen, unaufhaltsam beschleunigt.

Kohlendioxid aus Vulkanen bewirkte einen gewaltigen Treibhauseffekt und taute die vereiste Erde wieder auf

Wie konnte, wenn dies zu- trifft, das Eis dann aber jemals wieder abschmelzen?

Diese Frage wurde erst in den 1990er Jahren durch eine Hypothese schlüssig erklärt – und die löste zugleich ein weiteres Rätsel: die Frage nämlich, weshalb unmittelbar über den Relikten einer extrem kalten Welt, ohne jeden Übergang und relativ schnell entstanden, dicke Schichten aus einem Kalkstein liegen, wie er heute in warmen, flachen Meeren abgesetzt wird, etwa bei den Bahamas.

Der Schlüssel zur Umkehr war Kohlendioxid – so das Szenario der US-Wissenschaftler Paul Hoffman und Daniel Schrag. Dieses Gas, mit dem die Menschheit heute durch ihre maßlose Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas den Treibhauseffekt verstärkt und so das globale Klima beeinflusst, wird auch von Vulkanen ausgestoßen. Es verbindet sich (über Zwischenschritte) normalerweise mit Kalzium – das durch Verwitterung von Gesteinen an Land freigesetzt und von Flüssen in die Ozeane gespült worden ist – zu Kalkstein. So wird das Kohlendioxid der Atmosphäre wieder entzogen.

Vulkane waren auch zur Zeit der Schneeball-Erde aktiv – und brannten sich durch den Eispanzer. Aber auf den eisbedeckten Kontinenten wurde kein Kalzium frei, mit dem sich das Kohlendioxid hätte verbinden können. So sammelte sich das Gas über viele Millionen Jahre in der Atmosphäre an. Berechnungen zufolge hat es irgendwann das 350fache des gegenwärtigen Kohlendioxid-Gehalts der Luft

erreicht – und einen solchen Treibhauseffekt bewirkt, dass das erdumspannende Eis wieder auftaute.

Danach ging alles schnell. Das Eis begann zu schmelzen, und je stärker die Eisfläche schrumpfte, desto weniger Sonnenenergie wurde ins All zurückgestrahlt. Wasserdampf, ebenfalls ein starkes Treibhausgas, stieg aus den Ozeanen auf und trieb zusammen mit dem Kohlendioxid die globale Temperatur auf fast 50 Grad Celsius. Der inzwischen freigelegte Gesteinsschutt von Jahrmillionen auf den Kontinenten gab jetzt so viel Kalzium her, dass sich innerhalb weniger tausend Jahre die beobachteten mächtigen Kalksteinablagerungen über dem Gletscherschutt bilden konnten.

Ungelöst ist jedoch die Frage, was denn nun den Anstoß zu mehreren Schneeball-Vereisungen in der Zeit vor 750 bis 580 Millionen Jahren gegeben haben könnte. Dass die Sonnenstrahlung früher schwächer war – um vermutlich sechs Prozent –, kann nach Einschätzung der Experten nicht der Grund dafür gewesen sein: Schließlich hat die Sonnenenergie ja auch *vor* und *nach* der Schneeball-Periode ausgereicht, die Erde eisfrei zu halten.

Aber was führte dann zu solch extremen Vereisungen?

Allein um die vergleichsweise kleinen Klima-Eskapaden im gegenwärtigen Eiszeitalter zu begründen, sind Dutzende von Theorien aufgestellt worden. Etwa: Ist unser Sonnensystem in eine kosmische Staubwolke geraten, die Son-

nenlicht abgeschirmt hat? Haben Vulkane extrem viel Asche in die Atmosphäre gespuckt? Hat eine Kollision der Erde mit Asteroiden oder Kometen zur Abkühlung geführt? War die Verschiebung der Kontinente, die Heraushebung Tibets, die Schließung einer mittelamerikanischen Meeresverbindung zwischen Atlantik und Pazifik die Ursache?

Keine dieser Erklärungen hat bislang allgemeine Anerkennung gefunden. Auch nicht die von dem serbischen Mathematiker Milutin Milanković in die Diskussion gebrachte These, geringfügige Veränderungen der **Erdbahnelemente** – also der Bahn der Erde um die Sonne, der Neigung ihrer Achse sowie deren Kreiselbewegung – hätten die jeweiligen Eisvorstöße ausgelöst.

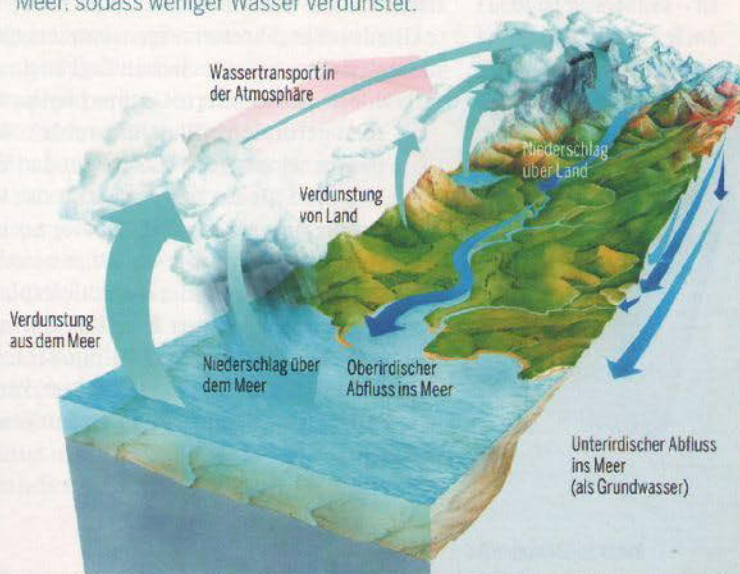
Am wahrscheinlichsten ist, dass mehrere Faktoren zusammengekommen sind. Denn Klima resultiert aus vielfältigen Prozessen und komplizierten Wechselwirkungen. Klimatologen, die sich mit den leistungsfähigsten Computern bemühen, die vergleichsweise bescheidenen Auswirkungen des vom Menschen verursachten Treibhauseffekts mit hinreichender Zuverlässigkeit vorherzusagen, wissen, wie ungemein komplex diese Prozesse ineinander greifen.

Auf absehbare Zeit muss also offen bleiben, weshalb die Erde einst zum Schneeball geworden ist. □

Die Illustration (Seite 134/135) von Tim Wehrmann, 29, entstand in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Gestaltung der Hamburger Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

Wasser, Wolken, Wärmestrahlung

Weil Feuchtigkeit beim Verdunsten Wärmeenergie aufnimmt und als Wasserdampf an andere Orte transportiert, ist der Wasserkreislauf ebenfalls wichtiger Teil des Klimageschehens. Dazu gehören unter anderem die Wolken. Sie reflektieren einerseits Sonnenstrahlung ins All, geben andererseits auch Wärmestrahlung dorthin ab und können deshalb abkühlend auf das Klima wirken. Wolken bilden sich, wenn Wasser verdunstet, als Dampf in die Atmosphäre aufsteigt und in der höheren, kälteren Luft so weit abkühlt, dass die Feuchtigkeit zu Regentropfchen kondensiert. Geht der Regen über einer Landfläche nieder, verdunstet ein Teil des Wassers wieder, ein Teil fließt an der Oberfläche über Bäche und Flüsse ins Meer zurück; der Rest versickert und läuft unterirdisch als Grundwasser in Richtung Meer. Eine starke Bewölkung wiederum vermindert die Sonneneinstrahlung an Land oder auf dem Meer, sodass weniger Wasser verdunstet.



Der Schatz vom Burgess-Pass

Ein Gesteinsbrocken, auf den der Geologe Charles Doolittle Walcott 1909 in den Rocky Mountains stößt, erweist sich als einer der bedeutendsten Funde der Paläontologie: Der Schiefer enthält Fossilien von Tieren, die vor über 500 Millionen Jahren gelebt haben – und erlaubt Eindrücke in die überraschende Artenvielfalt jener Epoche

Text: Hindeja Farah

Ein Felsblock versperrt den Pass, das Pferd kommt nicht weiter voran. Charles D. Walcott muss aus dem Sattel und das Hindernis beseitigen. Für den Geologen waren die letzten Tage ermüdend: die dünne Luft in den kanadischen Rocky Mountains, die harte Arbeit im Gestein, dauernder Regen, Schneeböen. Der 59-Jährige will das Hindernis zur Seite schieben. Aber der Brocken sieht anders aus als die übrigen Gesteine hier oben. Womöglich hat eine Lawine die Schieferplatte hierher geschoben.

An der Bruchkante entdeckt er den Abdruck eines merkwürdigen, etwa zwei Zentimeter großen, gut erhaltenen Fossils. Es ähnelt einem Krebs – doch eine höchst ungewöhnliche Panzerung, die aussieht wie ein nach hinten gedrücktes Geweih mit vier Enden, zieht sich vom Kopf her an den Flanken und am Rücken des Tieres entlang. Sein Körper setzt sich aus zahlreichen Segmenten zusammen, von denen je ein Paar so genannter Spaltbeine abgeht. Eines davon dient offenbar der Fortbewegung, das andere ist mit filigranen Kiemen besetzt.

Außer *Marella splendens* – Marella, die Prachtige –, wie Walcott das Tier später nennen wird, findet der Geologe mithilfe seiner Frau und eines seiner Söhne weitere gut erhaltene Versteinerungen in dem Schieferblock: bizarre Gliedmaßen, Facettenaugen, Panzersegmente. Am 31. August 1909 notiert er in sein Tagebuch: „Wir haben eine bemerkenswerte Gruppe phyllopoder Crustaceen gefunden“ (Blattfußkrebse). Neben diese Notiz zeichnet er Skizzen von den Wesen.

Eine Woche später zwingt das Wetter Walcott zum Abstieg. Der Geologe muss bis zum nächsten Sommer warten, um jene Formation zu finden, aus der die Schieferplatte und die merkwürdigen Fossilien darin stammen.

Sie liegt in einer Gesteinsschicht, ein paar Höhenmeter über dem Pass. Walcott nennt die Formation „Burgess Shale“, „Burgess-Schiefer“. Das wahre Alter seiner Funde ist ihm zunächst nicht bekannt. Erst als er sie entsprechend den Gesteins-

schichten, in denen sie lagern, dem Kambrium zuordnet – einer Periode vor etwa 542 bis 488 Millionen Jahren –, wird ihm deren Bedeutung bewusst.

Viele weitere Jahre vergehen, bis Forscher herausfinden, warum die Fossilien so gut erhalten sind: Schlammlawinen hatten diese im Flachwasser lebenden Tiere wohl einst mitgerissen – tief hinab in Becken, wo das Wasser keinen Sauerstoff mehr enthielt. Hier konnten sie weder gefressen werden noch verrotten. Begraben im Schlamm, wurden sie konserviert und versteinert, indem sich ihre Körper im Laufe der Zeit durch komplexe geochemische Prozesse in Kalzium-Aluminium-Silikate umwandelten.

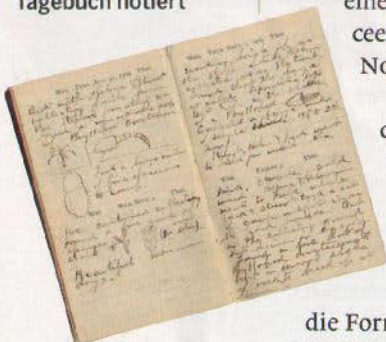
Charles Doolittle Walcott, Sohn eines Baumwollspinners aus Utica im US-Bundesstaat New York, hat schon als Kind Fossilien gesammelt. Mit 18 verlässt er die Schule, vermutlich ohne Abschluss, arbeitet zunächst ein Jahr lang in einer Eisenwarenhandlung, danach hilft er auf der Farm eines Fossilien-Sammlers aus. Mit 23 Jahren verkauft er eine erste Kollektion an den berühmten Zoologen und Paläontologen Louis Agassiz, den Gründer des Museums für vergleichende Zoologie in Cambridge/Massachusetts: krebisähnliche Trilobiten, eine seit 225 Millionen Jahren ausgestorbene Großgruppe des Tierreiches.

Mit Forschungsarbeiten über diese Tiere erringt Walcott die Achtung der einschlägigen Wissenschaftler. 1876 kann er den Beweis erbringen, dass Trilobiten dem Stamm der Arthropoden, der Gliederfüßer, zuzuordnen sind. Kurz darauf macht James Hall, ein bekannter New Yorker Paläontologe, ihn zu seinem Assistenten. In den folgenden Jahrzehnten wird Walcott Mitglied angesehener Wissenschaftsvereinigungen der USA. So leitet er von 1907 bis 1927 die Smithsonian Institution in Washington D. C.

Als er im Sommer 1910 an jenen Ort zurückkehrt, an dem er im Jahr zuvor die Fossilien gefunden hat, stößt er auf weitere Exemplare. Walcott ordnet sie den Krustentieren zu. Ihre Weichteile sind im Stein phosphatisiert – eine Seltenheit, denn meist sind nur



Marella splendens nennt Walcott dieses krebisähnliche Fossil – sein erster Fund am Burgess-Pass, den er sogleich im Tagebuch notiert



die Außenskelette zu finden, das Fleisch ist fast immer verrottet. Im Burgess Shale aber sind nicht nur die Därme der Urtiere zu erkennen, sondern sogar deren letzte Mahlzeit.

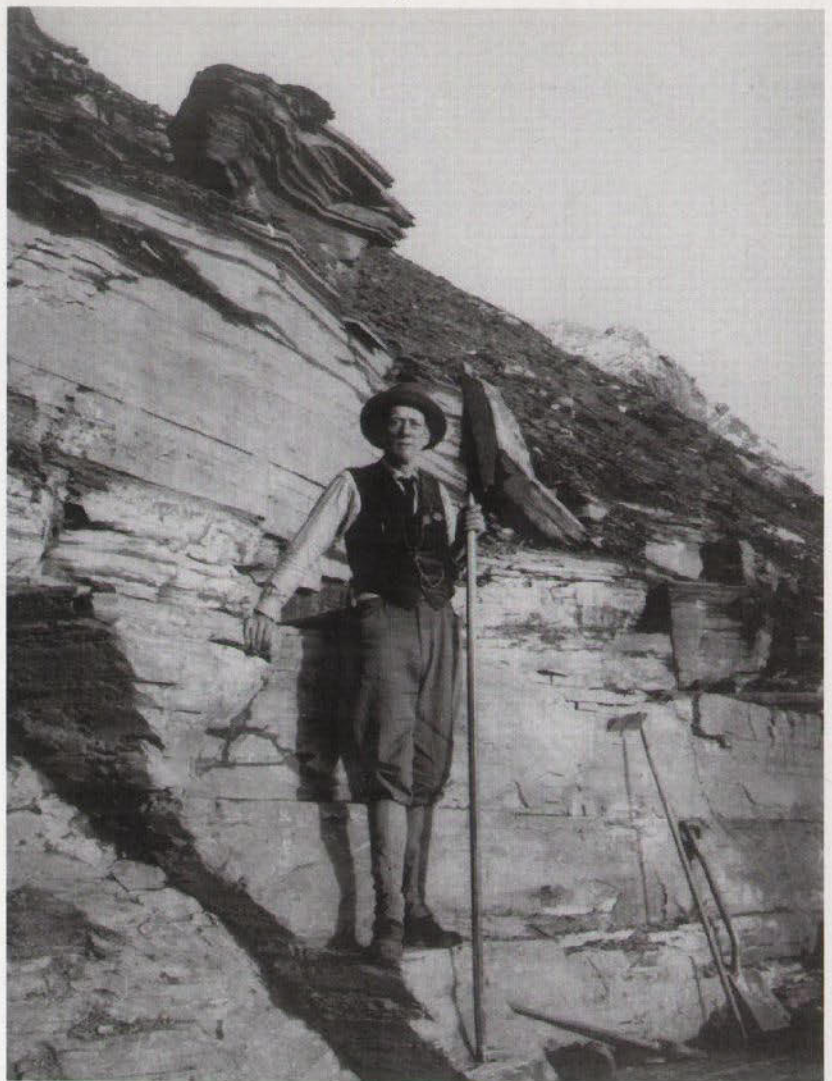
Wurmartige Tiere mit pelzigem Mantel und langen Stacheln kommen zum Vorschein. Quallenartige Wesen mit Tentakeln und einem gallertartigen Körper, entfernte Verwandte der Seesterne ohne deren grazile Form, wie man später herausfinden wird. Andere Tiere tragen schuppige Flossen oder Kiemen.

In den Jahren 1911 und 1912 veröffentlicht Walcott mehrere Arbeiten über den Fund. Er beschreibt *Sidneyia inexpectans* – ein etwa 13 Zentimeter langes garnelenförmiges Tier – als die am weitesten entwickelte Lebensform des Mittleren Kambriums. Er vermutet, dass es sich um ein räuberisches Tier gehandelt habe, auch wenn Fleisch fressende Arten im Kambrium bis dahin nicht für möglich gehalten wurden.

Sidneyia inexpectans zeugt, wie sich herausstellt, von einem Phänomen, das die Paläontologen später „Kambrische Radiation“ nennen werden: von einer Art evolutionärem Sprung (siehe Seite 142). Vor dem Kambrium hatten sich in den Urozeanen nur primitive Vielzeller getummelt. Aber dann entstanden erdgeschichtlich gemessen plötzlich – nämlich innerhalb einiger Millionen Jahre – komplexe Lebewesen: Tiere mit Augen, Beinen und festen Außenskeletten. Als Zünder dieser sprunghaften Ausformung gilt unter anderem der Anstieg des Sauerstoffgehalts in der Atmosphäre und in den Ozeanen.

Bis 1917 schickt Walcott insgesamt 67 000 Fundstücke aus dem Burgess Shale nach Washington, darunter Fossilien der Ahnen fast sämtlicher heute bekannter Tierstämme.

Die Entdeckungen sind eine Sensation. Bei ihrer stammesgeschichtlichen Auswertung vergleicht Walcott die von ihm entdeckten Fossilien stets mit der lebenden Fauna. Er ordnet sie deshalb nur den ihm bereits bekannten Gruppen zu – so zum Beispiel



Opabinia, ein fünfüßiges Tier mit langem Rüssel, den Gliederfüßern.

Damit behält er auch weitgehend Recht. Nur ganz wenige Tiere lassen sich bisher keinem der bekannten Stämme zuordnen. Die meisten dagegen sind tatsächlich entfernte Vorfahren der heutigen Fauna. Sie sind die Urahnen der Korallen, Quallen, Seeigel, Ammoniten, Fische sowie aller Landlebewesen wie Insekten, Reptilien, Vögel, Säugetiere – und der Menschen.

Als sicher gilt inzwischen auch, dass der Stammbaum des Lebens bereits im Kambrium viel weiter verzweigt war als zuvor geahnt.

Bis heute ist die Auswertung der Burgess-Fauna nicht abgeschlossen. Inzwischen sind vor allem im Westen Chinas weitere Fossilien gefunden worden, die von der großen Vielfalt des Lebens im Kambrium zeugen. Die Gesteinsformation, die Walcott 1910 gefunden hat, gilt indessen nach wie vor als eine der bedeutendsten Fossilienlagerstätten der Erde.

Sie trägt heute den Namen ihres 1927 gestorbenen Entdeckers: Walcotts Steinbruch.

Charles Doolittle Walcott (1850–1927) an der Ausgrabungsstelle am Burgess-Pass. Dort sammelt der Geologe insgesamt 67 000 fossile Funde aus einer besonders stürmischen Phase der Evolution

Hindeja Farah, 28, ist Journalistin in Tel Aviv.

Vielfalt wie aus dem Nichts

Text: Henning Engel; Illustrationen: Chase Studio

Nachdem jahrmilliardenlang nur Mikroorganismen die Meere bevölkert haben, erblüht in der erdgeschichtlichen Epoche Kambrium plötzlich eine Welt komplex gebauter Wesen. Und sie enthält bereits Vertreter all jener Tierstämme, die noch heute die Erde bevölkern. Doch was hat zu jener erstaunlichen Vielfalt geführt?

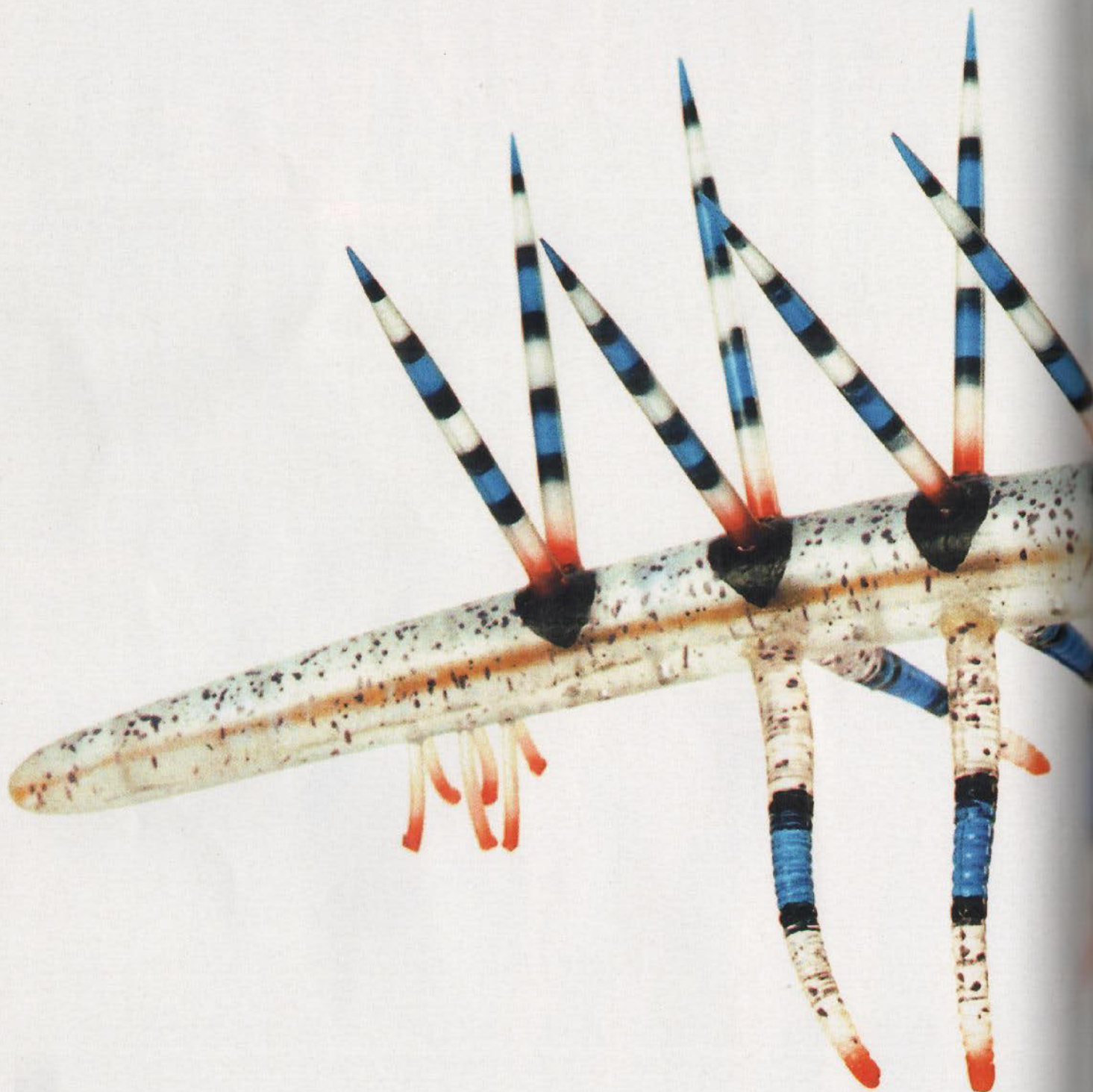




Canadapsis/ Krebstiere

Dieser ein bis fünf Zentimeter lange Urkrebs schwimmt mit Kiemen an den Beinen durch die Urmeere. Krebstiere sind am Beginn des Kambriums vor 542 Millionen Jahren schon weit entwickelt – also wahrscheinlich früher entstanden

Exot mit moderner Verwandtschaft





**Hallucigenia/
Vorfahr der
Stummelfüßer**

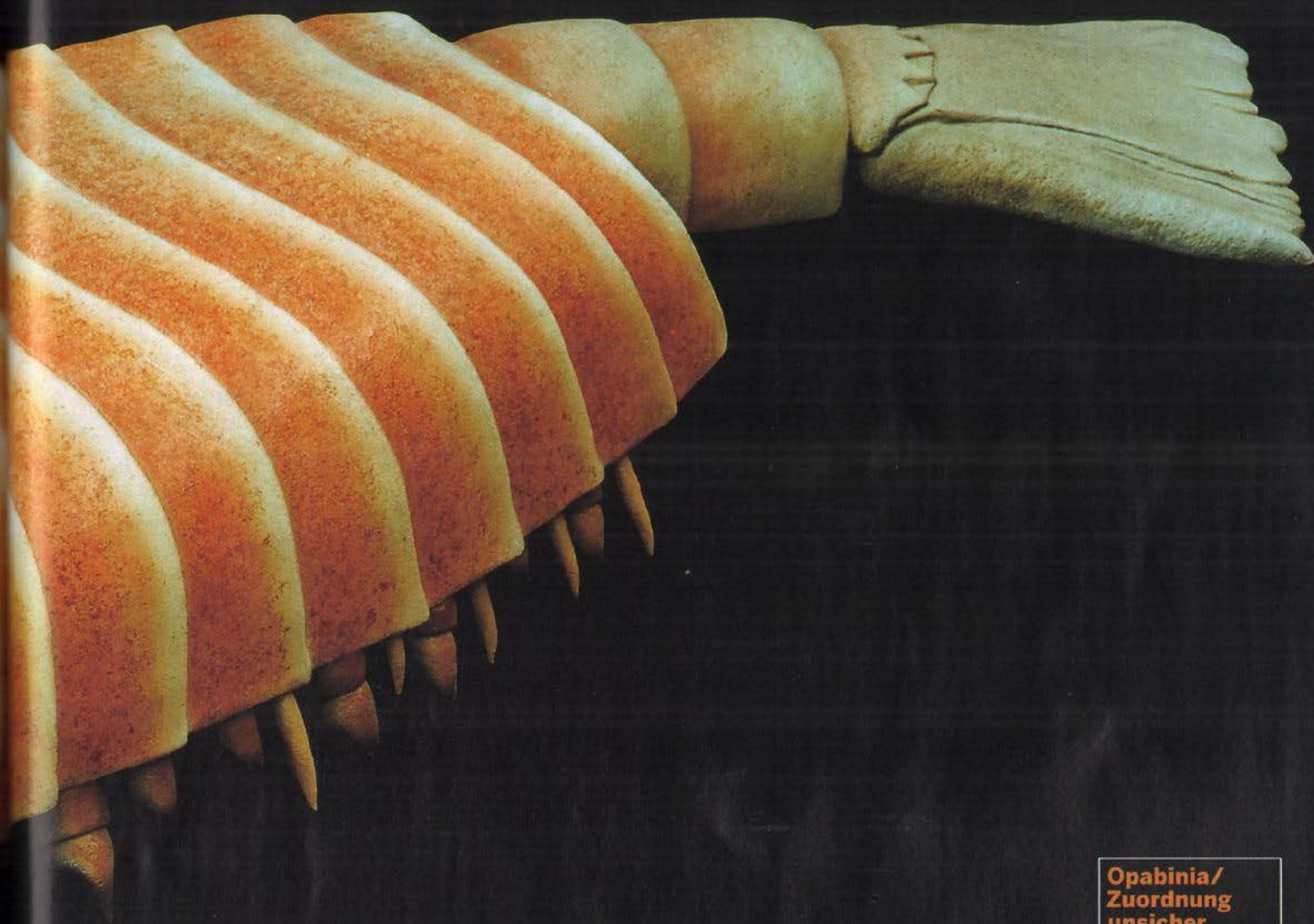
Mit spitzen
Stacheln
schützt sich
dieses Wesen
vor Räubern.
So bizarr es
wirkt – noch
heute leben licht-
scheue, aller-
dings stachellose
Stummelfüßer
in tropischen
Wäldern

**Sidneyia/
Gliederfüßer**

Dieser 5 bis 13 Zentimeter lange, am Boden lebende Räuber jagt kleine Krebstiere, »Dreilapper« (Trilobiten) sowie andere Beute, deren Reste sich rund 500 Millionen Jahre später in einem versteinerten Magen finden



Fressen und
gefressen werden



**Opabinia/
Zuordnung
unsicher**

Eines der eigenartigsten Tiere jener Zeit und Beispiel für die Experimentierfreudigkeit des damaligen Lebens. Bis heute ist nicht klar, ob Opabinia Krebstiere oder Ringelwürmer waren



The page features two scientific illustrations. In the upper left, two Nectocaris organisms are shown in profile, swimming towards the left. They have a green head with long, thin antennae, a dark green thorax, and a long, yellowish-green tail with a dark, segmented pattern. In the lower right, a large, detailed illustration of a crustacean tail (likely a shrimp or lobster) is shown, extending from the right edge. It has a segmented, orange-brown body with blue tips on the tail fan.

**Nectocaris/
Zuordnung
unsicher**

Rätselhaft ist dieser Schwimmer, dessen Vorderteil einem Gliederfüßer ähnelt und dessen hintere Hälfte an Chordatiere erinnert, aus denen später die Wirbeltiere hervorgehen – und auch der Mensch

Zahllose
Experimente
der Natur



Waptia/ Krebstiere

Dieses rund 7,5 Zentimeter lange, einer heutigen Garnele ähnliche Wesen stöbert im Sediment der Ozeane nach Nahrung. Krebstiere gehören zum Stamm der Gliederfüßer, der größten Tiergruppe im Kambrium

Amiskwia/ Zuordnung unsicher

Ein Pfeilwurm, ein Schnurwurm? Dieses seltsame Wesen scheint keine heutigen Verwandten zu haben. Vielleicht ein einmaliger evolutionärer Versuch in der kambrischen Experimentierzeit

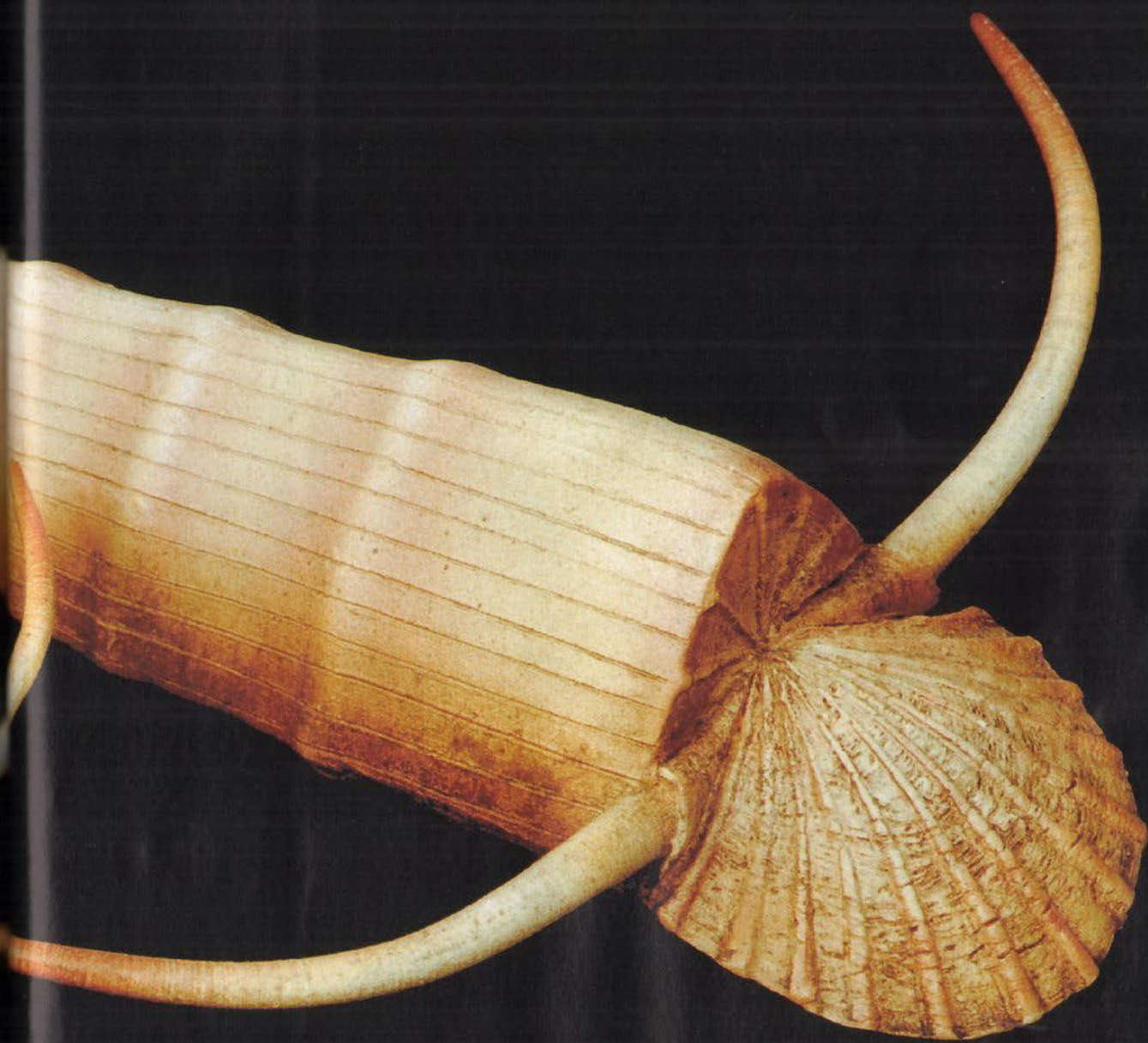


Schützende Panzer in einer Welt früher Räuber



Haplophrentis/ Weichtiere

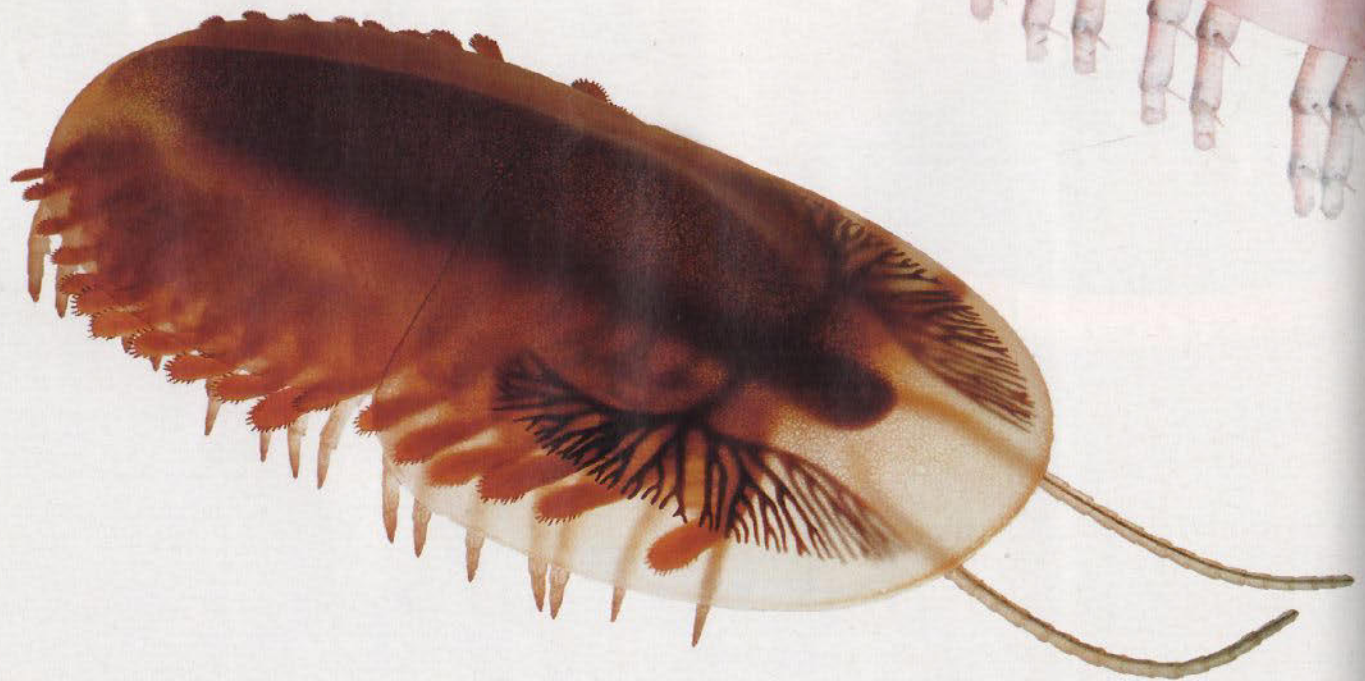
Kegelförmige Gehäuse. Deckel und seitliche Hörner bewahren diese Kreaturen vor den Zähnen mancher Angreifer. Sie sind wahrscheinlich Weichtiere, wie heute noch Schnecken, Muscheln oder Kopffüßer

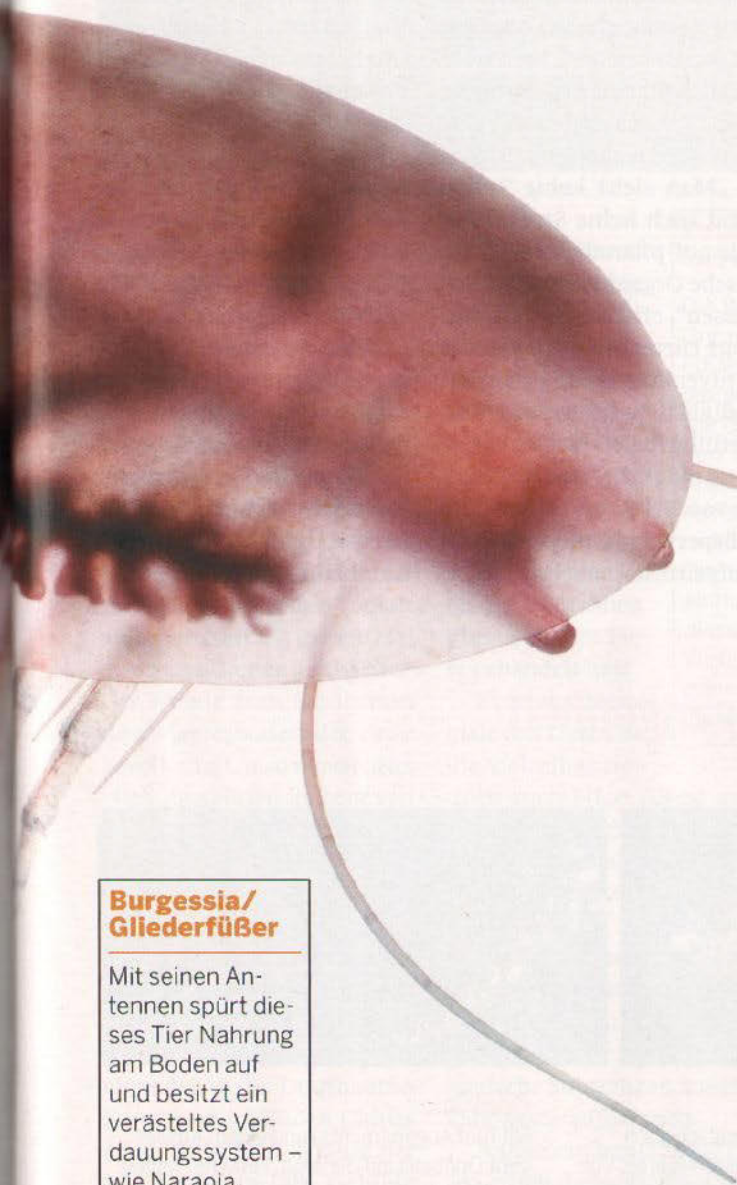


Nicht alle überdauern die Zeit

Naraoia/ Gliederfüßer

Dieses augenlose Wesen besitzt vorn verästelte Drüsen für Verdauungssäfte. Es wird von einigen Forschern den Trilobiten zugeordnet. Diese »Dreilapper« haben ihren Namen einerseits von dem dreifach gelappten Rückenpanzer, andererseits von der Unterscheidung in Kopf, Rumpf und Schwanz. Vor 250 Millionen Jahren sind sie ausgestorben





Burgessia/ Gliederfüßer

Mit seinen Antennen spürt dieses Tier Nahrung am Boden auf und besitzt ein verästeltes Verdauungssystem – wie Naraoia. Es ist mit dieser Gattung aber nicht nahe verwandt, sondern bildet eine eigenständige Gliederfüßergruppe

Als die Erde vor etwa 580 Millionen Jahren aus ihrem Kälteschlaf erwachte, wirkte sie öde und leer. Rund 50 Millionen Jahre lang hatte die letzte einer Serie gigantischer Vereisungen geherrscht. Dennoch war das Leben nicht untergegangen. Bakterien, Cyanobakterien und Einzeller mit Zellkern (Eukaryoten) hatten die Kälte überlebt und bevölkerten bald darauf die Meere.

Unter den im Urozean umherschwimmenden Einzellern mit Zellkern waren bereits die Vorläufer aller späteren Organismen-Reiche – der Pflanzen, Pilze, Tiere sowie der so genannten **Protoctista** (einer Gruppe von Algen und tierischen Einzellern).

Vor rund 1,5 Milliarden Jahren schon hatten sich jene Organismen abgespalten, die mithilfe von Sonnenlicht und Kohlendioxid Zucker und Sauerstoff herstellen konnten (Photosynthese) und später zu den grünen Pflanzen wurden.

Und wahrscheinlich zwischen 1,5 Milliarden und einer Milliarde Jahren vor unserer Zeit hatten die Pilzvorfahren eine eigene Richtung eingeschlagen.

Pilze mit Stil und Hut allerdings hätte ein menschliches Auge damals, vor 580 Millionen Jahren, genauso vergeblich gesucht wie Pflanzen mit Stängel und Blättern oder schwimmende, sich schlängelnde und krabbelnde Tiere: Denn immer noch bestanden alle Lebewesen nur aus wenigen Zellen.

Die Kontinente ragten als unbelebte Gesteinswüsten aus den Weltmeeren, und im Wasser dominierten unscheinbare einzellige Kleinstlebewesen – Cyanobakterien vor allem –, die den Meeresboden mit einer dichten gallertartigen Schicht überzogen.

Rund 40 Millionen Jahre später aber, zu Beginn der erdgeschichtlichen Epoche Kambrium, hatte sich das Bild gewandelt: Zwar waren die Landflächen nach wie vor unbewohnt, doch in den Meeren tummelten sich plötzlich Tiere – und zwar nicht nur einzelne, einfache Kreaturen, sondern eine bunte Schar, die bereits Vertreter all jener Gruppen enthielt, die noch heute die Erde bevölkern.

Einfach gebaute Schwämme waren darunter und Nesseltiere, deren Nachkommen etwa als Quallen oder Korallenpolypen auch heute vorkommen. Zahlreiche Arten von Gliederfüßern tummelten sich in den Gewässern, aus denen sich später Spinnen, Krebse und Insekten entwickelten. Stachelhäuter, die uns heute in Form von Seeigeln, Seesterne und Seegurken vertraut sind. Frühe Weichtiere, deren Nachfahren wir als Muscheln, Schnecken und Tintenfische kennen.

Und: Es gab schon ein Tier, dessen Körperform durch ein inneres Stützgerüst – die **Chorda** – stabilisiert war. Die wurde später zur Wirbelsäule und damit zum Kennzeichen der Wirbeltiere. Aus dieser Gruppe entwickelten sich viele Jahrmillionen später die Fische, dann die Lurche, die Kriechtiere, die Vögel, die Säugetiere und schließlich der Mensch.

Die Kenntnis all dieser kambrischen Wesen verdankt die Forschung Gesteinen, die viele Jahrmillionen überdauert haben. Und dem glücklichen Umstand, dass abgestorbene Organismen unter Sauerstoffabschluss im Sediment des Bodens eingeschlossen wurden und dort zu Fossilien versteinerten (siehe Seite 140).

Frappierend war der Gegensatz zwischen der Vielfalt dieser hoch entwickelten Tierwelt

Die ersten Tiere leben vermutlich bereits vor 580 Millionen Jahren

und jener aus der Epoche davor. Was dazwischen geschah, ist unklar; nur wenige Fossilien einfacher Tiere sind bislang bekannt. Die Vielfalt des tierischen Lebens schien derart abrupt aufzutauchen, dass von Wissenschaftlern zunächst der Begriff „Kambrische Explosion“ geprägt wurde.

Wie war diese Explosion zu erklären? Die vielzelligen Organismen konnten schließlich nicht dem Nichts entsprungen sein. Eine erste Fährte hatten Geologen bereits 1908 im heutigen Namibia gefunden: große Abdrücke in Sandstein aus der Zeit vor dem Kambrium, die man allerdings zunächst wenig beachtete.

Dann wurden im Süden Australiens ähnliche Fossilien entdeckt. Nach dem dortigen Fundort benannt, machten

sie in den 1950er Jahren als „Ediacara-Fossilien“ Furore: Schon bald wurde unter Wissenschaftlern diskutiert, ob es sich bei diesen präkambrischen Organismen um die Ahnen der **Metazoa**, der Tiere, handele.

Die Ediacara-Wesen waren sehr unterschiedlich in Form und Größe, manche einen Meter lang, und sie lebten offenbar in flachem Wasser. Sie besaßen kein Skelett oder andere harte Körperteile. Doch sobald sie tot zum Meeresboden sanken, wurden sie an manchen Orten durch riesige Bakterienmatten abgedeckt. Dadurch blieben sie im Sandstein als Fossilien erhalten.

Je intensiver die Forscher die Versteinerungen studierten, desto rätselhafter erschienen die Wesen. Keinerlei Mün-

der oder After waren an ihnen zu entdecken, und die Körperformen erinnerten so gar nicht an bekannte Tiere. Der Tübinger Paläontologe Adolf Seilacher ordnete sie deshalb einem völlig eigenen Reich von Organismen zu und nannte sie „Vendobionta“ – weder Tier noch Pflanze, sondern ein ausgestorbener Typ luftmatratzenähnlicher Wesen.

Doch Seilachers Spekulation ist heftig umstritten und das Rätsel um die Ediacara-Lebewesen noch immer ungelöst. Manche Forscher halten sie lediglich für eine Ansammlung von Cyanobakterien, für eine Art bakteriengefüllter Säcke.

„Man sieht keine Zellen und auch keine Strukturen, die auf pflanzliche oder tierische Organismen schließen lassen“, erklärt der Paläobiologe Dieter Waloßek von der Universität Ulm: „Man hat lediglich Abdrücke und sandgefüllte Reliefs im Gestein; es sind möglicherweise Überreste von Bakterien, welche die Körperwände dieser Wesen aufgefrassen haben.“

Weil keine der sonst bekannten inneren Strukturen zu erkennen sind, ist es bis heute unmöglich, zu sagen, um was es sich bei den Ediacara-Fossilien eigentlich handelt.

An jüngeren Fossilien des Kambriums lassen sich dagegen sehr wohl feinste Details nachweisen, die die genaue Einordnung im Tierreich ermöglichen. Dieter Waloßek und seine Mitarbeiter haben zum Beispiel Versteinerungen von Krebstieren (Crustacea) und anderen Gliedertieren (Arthropoda) aus Südschweden untersucht, die vor 515 bis 495 Millionen Jahren gelebt haben. An diesen ließen sich selbst feinste Poren und weitere Einzelheiten an Schale, Borsten, Antennen, Fressapparat und anderen Körperteilen erkennen.

Bis zu 30 aufeinander folgende Larvenstadien konnten die Forscher bei einer Krebsart nachweisen und daraus die frühe Evolution dieser Tiere nachzeichnen. Weil die Krebse schon zu Beginn des Kambriums derart weit ent-

FOSSILIEN

Steinerne Botschaften aus der Vergangenheit

Was Paläontologen aus uralten Abdrücken herauslesen



Hallucigenia

In den kanadischen Rocky Mountains sind viele Fossilien des Kambriums erhalten. Nachdem Paläontologen dieses Wesen rekonstruiert hatten, bot sich ihnen ein abenteuerlicher Fremdling, der auf Stelzen stolzierte und Tentakel auf dem Rücken trug. Ein Irrtum: Die Stacheln dienten zur Verteidigung, die Tentakel waren Beine.



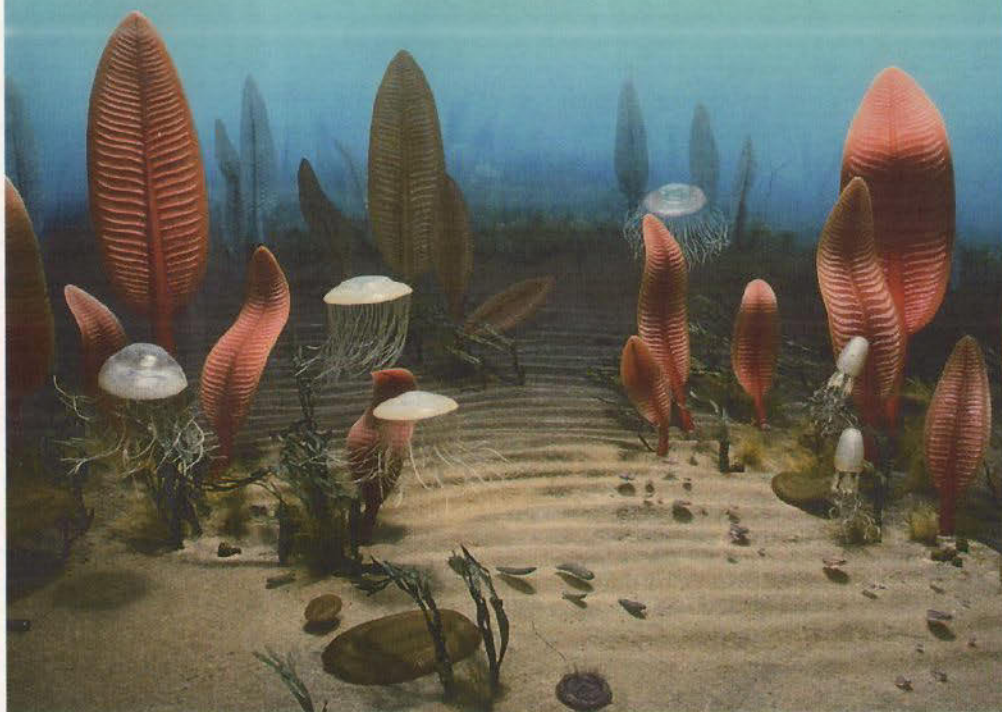
Sidneyia

Wie Hallucigenia lebte vermutlich auch Sidneyia im Flachwasser eines Meeres. Von dort wurden die Tiere offenbar von Schlamm lawinen fortgerissen und in tiefem Wasser begraben. Dort gab es kaum Aasfresser. Und keinen Sauerstoff: Die Überreste verrotteten nicht. Platt gedrückt unter dem Schlamm, versteinerten sie in komplexen Prozessen.



Opabinia

Mit fünf Augen (rechts) und einem Rüssel geht Opabinia auf die Jagd. Forscher haben das Tier wie alle anderen auch mit winzigen Bohrern aus Gesteinsplatten präpariert. Viele der Fossilien in den Rocky Mountains sind nur wenige Millimeter groß – bestehen aber zuweilen aus Hunderten von Teilen: winzigen Segmenten, Gliedmaßen und Gelenken.



wickelt waren, müsse, folgern sie, ihre Stammlinie bereits im Präkambrium gelebt haben.

Eine weitere bedeutende Lagerstätte, die immer wieder die verschiedensten Tierfossilien in exzellentem Erhaltungszustand preisgibt, liegt in der chinesischen Provinz Yunnan im Distrikt Chengjiang. Sie ist 520 Millionen Jahre alt und belegt die große Vielfalt an Lebewesen, die gerade mal gut 22 Millionen Jahre nach der Wende zum Kambrium den Meeresboden der Erde bevölkerte. Umso rätselhafter blieb, dass auch dort Reste von Tieren aus dem Präkambrium nach wie vor fehlten.

Doch dann verkündeten Wissenschaftler im Februar 1998 eine Sensation: Zwei Forscherteams berichteten unabhängig voneinander, in der Doushantuo-Formation im Süden Chinas etwa 580 Millionen Jahre alte winzige, kugelige Gebilde mit charakteristischem Muster gefunden zu haben. Sie erkannten in diesen Fossilien Embryonen kurz nach den ersten Zellteilungsschritten.

Sollte diese Interpretation richtig sein, so wäre damit klar belegt, dass Tiere bereits rund 38 Millionen Jahre vor dem Kambrium gelebt haben.

Aber woran erkannten die Forscher, dass es sich bei diesen Fossilien überhaupt um Tiere gehandelt hat?

Eines der Merkmale von Tieren ist die Vielzelligkeit – doch auch Pilze, Algen und höhere Pflanzen zeigen dieses Charakteristikum. Biologen definieren deshalb Tiere – die Metazoa – umfassender: Es sind Lebewesen, die einen Verband aus differenzierten Zellen bilden und ihre Energie gewinnen, indem sie organische Substanzen anderer Lebewesen aufnehmen.

Außerdem besitzen die Zellen einen doppelten Satz an Chromosomen. Und: Metazoa pflanzen sich in der Regel fort, indem sie mithilfe einer Reifeteilung Eizellen und Spermien bilden, die bei der Befruch-

Ediacara-Lebewesen

Die Weichkörper-Organismen der Ediacara-Epoche lebten – ebenso wie Quallen – vor den Tieren des Kambriums, waren aber wohl nicht deren Ahnen. Bis heute ist nicht einmal klar, ob diese seltsamen Wesen nun Tiere oder etwas ganz Eigenes waren

tung miteinander verschmelzen. Aus dieser entsteht durch charakteristische Teilungs- und Differenzierungsschritte der Zellen der eigentliche Organismus. Und genau dieses Zellteilungsmuster der frühen Embryonen verweist auf die tierische Herkunft der Fossilien von Doushantuo.

Wahrscheinlich, so glauben die Forscher, waren diese vor-kambrischen Tiere Schwämme. Das sind die am einfachsten organisierten heute bekannten Metazoa. Ihr Körper ist noch nicht aus verschiedenen Zellschichten (Gewebe) aufgebaut. Sie besitzen zwar eigene Zelltypen, aber keine spezialisierten Drüsen-, Sinnes-, Nerven- oder Muskelzellen.

Vor allem ist das Darmrohr mit Mund und After noch nicht ausgebildet sowie die zweiseitige Symmetrie, die für fast alle Tiere außer den Schwämmen und Nesseltieren typisch ist.

Sensationell ist daher möglicherweise die Ankündigung eines chinesisch-amerikanischen Teams vom Juni 2004: Die Forscher glauben, in der Doushantuo-Formation 580 bis 600 Millionen Jahre alte, zweiseitig symmetrische Tiere (Bilateria) nachgewiesen zu haben. Die Interpretation ist allerdings noch umstritten; Kritiker meinen, bei den beobachteten Strukturen handele es sich gar nicht um Lebewesen, sondern lediglich um gebänderte mineralische Krusten.

Für die Ulmer Arbeitsgruppe um Dieter Waloßek aber reicht allein schon der Nachweis der präkambrischen Embryonen: „Wir haben mindestens 30 Millionen Jahre vor dem Kambrium den definitiven Nachweis der Metazoa.“

Waloßek spricht, wie viele seiner Kollegen auch, statt von Explosion lieber von **Radiation**. Der erste Begriff zielt auf das plötzliche Auftauchen verschiedenster Stammlinien, der zweite auf die zügige Aufspaltung einer Stammart in mehrere Spezies.

Nach der Überzeugung des Wissenschaftlers hat sich diese Aufspaltung vor der Wende zum Kambrium ereignet. Dafür sprechen auch die Daten von Molekularbiologen, die anhand einer so genannten „molekularen Uhr“ errechnen können, wann etwa der letzte gemeinsame Vorfahr zweier Lebewesen existiert haben muss. Auch nach den Ergebnissen dieser Methode verliert sich der Ursprung der Metazoa in einer Epoche weit vor Beginn des Kambriums.

Warum aber präkambrische Fossilien, die Tieren zugeordnet werden können, so ungemein selten sind, bleibt indessen rätselhaft. Waren die Metazoa damals extrem rar, sehr klein oder so zart, dass ihre Körper nicht erhal-

ten blieben? Oder lebten sie im Verborgenen?

Das Letztere vermuten die Paläontologen Bernd-Dietrich Erdtmann und Michael Steiner von der TU Berlin. Seit 1977 sind heiße Quellen in mehreren tausend Meter Tiefe am Boden der Ozeane bekannt, die eine einzigartige, vom Sonnenlicht unabhängige Lebensgemeinschaft beherbergen. „Schon im Präkambrium gab es solche Tiefseequellen“, sagt Michael Steiner. „Auch dort könnten sich die Arten auseinander entwickelt haben.“ Selbst eine weltweite Vereisung hätten die frühen Metazoa dort im Verborgenen überdauern können. Ein Beweis für diese so genannte „Vent-Hypothese“ fehlt allerdings bislang.

Zudem war die Epoche zwischen dem Ende der letzten präkambrischen Eiszeit und dem beginnenden Kambrium – also vor etwa 580 bis 542 Millionen Jahren – eine Zeit dramatischer Veränderungen. Teile des rund 170

An der Wende zum Kambrium driftete ein Teil der Bruchstücke wieder zusammen und bildete den Superkontinent Gondwana. Solche Faktoren könnten die Evolution der Metazoa beschleunigt haben.

Noch sind nicht alle Rätsel jener kambrischen Wende gelöst, streiten Forscher um Hypothesen. In einem sind sie sich indes einig: Nie hat die Welt der Lebewesen eine größere Revolution erlebt als in jener Epoche, in der die Tierwelt sich so rasant entfaltete.

Und schon bald danach begann das Leben vom Meer aus das Land zu erobern. Den Anfang machten vor 425 Millionen Jahren Flechten und einfache Moose, die sich zu Farnen und schließlich zu Gefäß- und Blütenpflanzen weiterentwickelten. Den Pflanzen folgten bald Tiere; zu den Pionieren gehörten die Gliedertiere, etwa Spinnen, Tausendfüßer und erste Insekten.

Vor rund 360 Millionen Jahren dann hatten sich bei einem fischartigen Wirbeltier aus zwei Paar Flossen vier Beine entwi-

ckelt, und es krabbelte unbeholfen an Land. Dieser urtümliche, vielleicht salamanderähnliche Vierfüßer war der Urahn aller Landwirbeltiere und damit auch von uns Menschen. Und so verwandelte das Leben einstmals leblose Kontinente in grüne, blühende Landschaften mit Millionen von Arten. □

Die zum Teil metergroßen Nachbildungen aus Plastik, Fiberglas und anderen Materialien zu diesem Thema hat der amerikanische Paläontologe Terry L. Chase mit seinem Team konstruiert.

Wegweiser durch die belebte Welt

Millionen Jahre zuvor aufgebrochenen Superkontinents Rodinia drifteten innerhalb geologisch kurzer Zeit vom Südpol zum Äquator und spalteten kleinere Splitter ab. Warme und flache Meeresgebiete – Schelfe – bildeten sich. Die Meeresströmungen verlagerten sich und brachten nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe der Ozeane nach oben. Auf den Kontinenten setzte Erosion ein, welche die chemische Zusammensetzung des Wassers veränderte.

Ursprung des Lebens vor über 3,5 Mrd. Jahren

STAMMBAUM

Von der Urzelle bis zum Säugetier

Um Ordnung in die Fülle des Lebens zu bringen, weisen Biologen den Organismen Plätze in einem Stammbaum zu (hier vereinfacht und schematisiert), der die Verwandtschaften und die Stufen der Entwicklung zeigt. Zunächst entstanden aus den Urzellen Lebewesen ohne echten Zellkern, die Prokaryoten. Darunter werden die Echten Bakterien und die Archaeobakterien zusammengefasst. Ihre Verwandtschaft ist hier durch einen vertikalen Balken dargestellt – dieser Systematik folgt der gesamte Stammbaum: Die vertikalen schwarzen Balken stehen immer für eine Einheit, mit der Biologen Organismen mit gleichen Merkmalen erfassen. Durchgezogene Linien zeigen Verwandtschaftsverhältnisse an, die auf fossilen Funden beruhen, gestrichelte Linien geben die Ergebnisse molekularer genetischer Forschungen wieder.

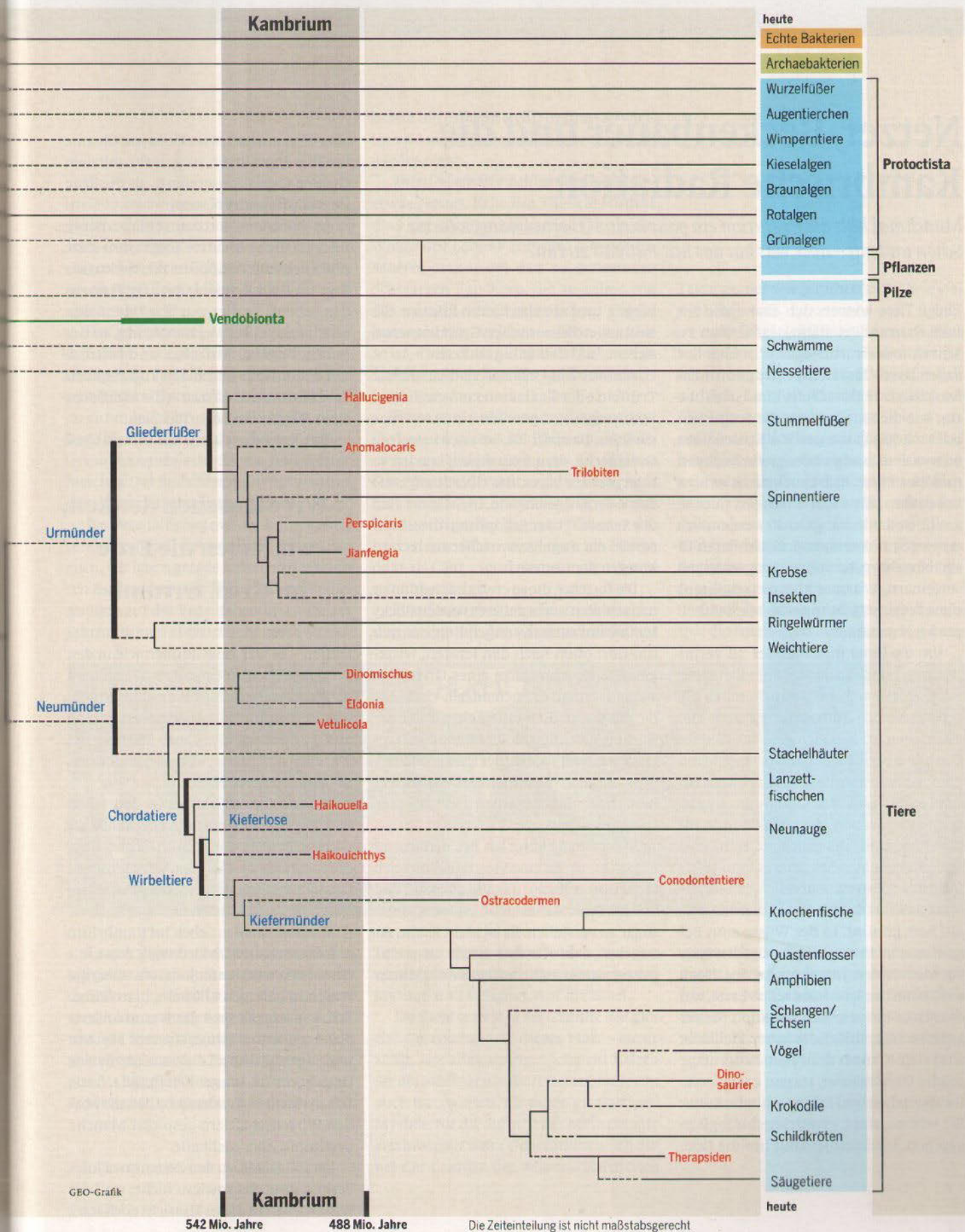
Danach sind die Archaeobakterien näher mit den Eukaryoten (Lebewesen mit echtem Zellkern) verwandt als mit Bakterien. Die Archaeen, die Bakterien sowie die Eukaryoten bilden die drei „Domänen“ des Lebens (hier in Braun, Grün und in Blau-tönen). Die Domäne der Eukaryoten wird ihrerseits in vier „Reiche“ unterteilt: in die der Pflanzen, der Pilze, der Tiere und der Protoctista (einer Sammelgruppe einzelliger wie auch mehrzelliger Algen sowie tierischer Einzeller).

In diesem Stammbaum nehmen die Tiere den größten Raum ein, da er besonders ihre Entwicklung illustrieren soll. Die Vielzeller entstanden vor ca. 1,5 Milliarden Jahren – vermutlich aus einer Linie einzelliger Eukaryoten. Kurz vor und während des Kambriums bildete sich dann eine Fülle hartschaliger Tiere, von denen viele noch in derselben Epoche wieder ausstarben (rote Schrift). Andere, wie die Trilobiten, verschwanden erst später. Jahrmillionen danach entwickelten sich unter anderem die Saurier und die Therapsiden, säugetierähnliche Reptilien. Von manchen präkambrischen Lebewesen aber sind Fossilien gefunden worden, die den heutigen Stämmen überhaupt nicht zugeordnet werden können. Ob es sich bei diesen „Ediacara“-Wesen um Tiere oder Vertreter anderer Reiche handelte, ist unbekannt. Nach einer umstrittenen Theorie könnte es sich dabei um ein ganz eigenes Reich handeln – um die „Vendobionta“, die mit keinem modernen Lebewesen verwandt sind.

Lebewesen ohne echten Zellkern

Lebewesen mit echtem Zellkern

Metazoa (tierische Vielzeller)





Netzer, Beckenbauer und die Kambrische Radiation

Manchmal hält die Evolution ein paar kleine Überraschungen bereit. Schön und gut – aber was hat das mit Fußball zu tun?

Einige Tiere können sich also ohne Sex fortpflanzen. Bei allem, was sich an Positivem oder auch Negativem über Sex sagen lässt – fest steht, er ist gut für das Aussehen. Sexlose Tiere sind schlabberrig, wie die Quallen und die Seegurken, oder schuppig, wie gewisse Echtenarten, oder extrem zwergwüchsig, wie Bakterien und Blattläuse. Es ist auch nicht so, dass Lebewesen, die nicht durch Sex oder sexuelle Gedanken abgelenkt werden, sich deswegen anderen, anspruchsvolleren Tätigkeiten hingeben und geistig-kulturell verfeinern. Würmer kommen meistens ohne Sex aus: Hat ihnen das intellektuell etwa gut getan?

Um die Gene miteinander zu vermischen, was ja der Sinn der Fortpflanzung ist, könnten sich auch ganz einfach die Weibchen untereinander paaren. Die Männchen, so habe ich gelernt, sind im Grunde überflüssig. Die Spermien sind eine Art Schmarotzer. Das heißt, wenn man sucht und sich Gedanken macht, findet man schon ein paar Gründe für die Existenz des männlichen Geschlechts, lesen Sie es ruhig nach, aber es klingt alles nicht furchtbar zwingend.

Wenn es im Kampf ums Überleben hart auf hart kommt, in der Wüste zum Beispiel oder im Hochgebirge, neigt die Natur zur Methode der Jungfernzeugung. Denn das Männchen ist schwach. Das Erste, was die Natur in extremen Situation für verzichtbar hält, sind die Männer. Vielleicht sind viele Männer deswegen heutzutage solche Großmäuler, tragen extrabreite Goldkettchen und fahren schnelle Autos: Sie wissen, dass, evolutionsbiologisch gesehen, jederzeit jemand um die Ecke

biegen und sie abschaffen könnte. Sie sind aus erdhistorischen Gründen verunsichert, und dies völlig zu Recht.

Andererseits: Männer sind Luxus wie Trüffeln oder Kaviar oder ein englischer Sportwagen – sagen wir: ein Aston Martin DB4, Baujahr '61. Mit dem zweiten Geschlecht, dem Männchen, betritt, so interpretiere ich es, das Überflüssige die Szene der Erdgeschichte. Die Männer sind der Schnörkel der Schöpfung, die Ehrenrunde, das Vogelgezwitscher am letzten Morgen der Genesis.

Die Forscher, die so etwas herausfinden, marschieren unter anderem in den Rocky Mountains umher, steigen Berge empor, um dort oben nach den letzten, winzigen Resten vom Darm eines Urtiers zu suchen. Einem Garnelendarm vielleicht. Es gab tatsächlich eine Zeit, zu der die Garnele das klügste Lebewesen unseres Planeten war! Jedem, der daran zweifelt, dass es in der Geschichte so etwas wie Fortschritt gibt, muss man diese Tatsache entgegenhalten.

In der Schule hatte ich in Chemie und Physik meistens eine Vier. Es ist für mich nicht immer leicht, das alles, was auf den Seiten dieses Heftes steht, zu lesen – oder sogar zu verstehen. Es ist nicht leicht, zuzugeben, dass offenbar die für unsereins geistig unzugängliche Chemie die Mutter

aller Wissenschaften ist. Denn mit Chemie hat alles angefangen, nicht wahr, mit dem Großen Oxidationsereignis, als die Erde ihren Luftmantel bekam.

Im Kambrium fand dann eine bis heute unerklärliche kreative Explosion statt, plötzlich entstanden in relativ kurzer Zeit unglaublich viele bizarre Formen des Lebens. Vorher war das Leben eine eher langweilige Veranstaltung, in der mäßig begabte Einzeller und luftmatratzenähnliche Wesen den Ton angaben. Lebende Luftmatratzen – die intellektuellen Wegbereiter der Garnelen.

Das Kambrium kann ich mir gut vor-

**»Wir Menschen denken,
wir haben die Erde
im Griff. Irrtum!«**

stellen – es war ganz ähnlich wie in den 1960er Jahren in England, als nahezu gleichzeitig die Beatles, die Rolling Stones, The Who, die Kinks und noch zwei Dutzend andere hoch begabte Bands auftauchten. Warum gerade dann, warum gerade dort – es bleibt ewig ein Rätsel.

Oder diese magische Ära im deutschen Fußball, als plötzlich Franz Beckenbauer, Günter Netzer und Paul Breitner über die Rasenplätze stürmten. Wir Menschen von heute können das Kambrium geistig durchaus nachvollziehen.

Wenn wir uns das Leben im Kambrium näher anschauen, finden wir Krebse mit Geweihen und Antennen, wurmartige Wesen in pelzigen Mänteln, blattfüßige Schalentiere. Es sind die Wesen unserer Science-Fiction-Filme, unserer Mythen und Sagen. Haben all die Autoren, die sich Ungeheuer und angeblich fremde, ferne Lebensformen ausdenken, bewusst bei den Wissenschaftlern gespickt? Manche bestimmt. Aber nicht alle.

Vor 150 Jahren, zu den Zeiten etwa Jules Vernes, ging das sowieso nicht, weil die Wissenschaft in dieser Hinsicht noch stark

im Dunkeln tappte. Dennoch hat er sich die irrsten Kreaturen ausgedacht. Kann es sein, dass irgendwo in uns drin eine Art erdgeschichtliche Erinnerung gespeichert ist, an Vorfälle und Wesen, die älter sind als der Mensch?

Das ist Spinnerei, sagen Sie. Ich halte mit einem Satz aus diesem Heft dagegen, einem Satz aus einem seriösen, wissenschaftlichen Text: „Alles hängt mit allem zusammen.“ Für mich klingt das nach Buddhismus. Es handelt sich aber um eine Grunderkenntnis der Klima- und Wetterforscher. Der Buddhismus hängt also mit der Wetterforschung zusammen!

Die Beschäftigung mit der Erdgeschichte lehrt generell Gelassenheit. Entspannt euch, wir leben gerade mitten in dem siebten Eiszeitalter. Die klimatischen Bedingungen auf der Erde haben im Laufe der Jahrmillionen eben extrem geschwankt.

haben die Erde im Griff. Irrtum! So wichtig und mächtig sind wir Menschen auch wieder nicht.

Wenn Gegensätze sich berühren, entsteht etwas Neues. Falls die Theorie stimmt, dass vor über 3,5 Milliarden Jahren die Wiege des Lebens auf dem Grund des Meeres stand, bei den so genannten Schwarzen Rauchern, die aussehen wie das missglückte Ergebnis eines Töpferkurses in der Toskana – wenn das also so ist, dann verdankt sich das Leben dem Aufeinandertreffen von heiß und relativ kühl, von sauer und alkalisch.

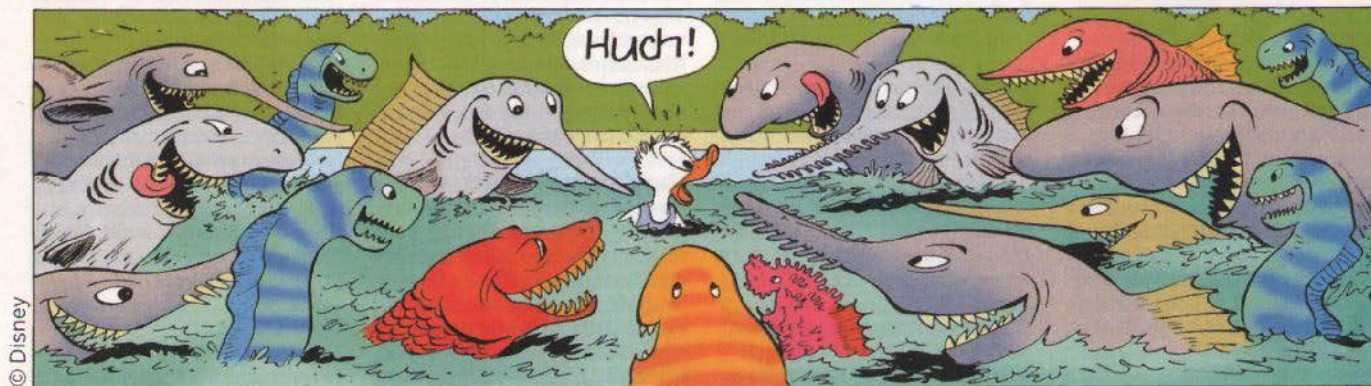
These plus Antithese ergibt Synthese, das kennen wir aus der Philosophie. Oder es war tatsächlich ein Funke. Eine Pfütze, Gas, Wasser, der Blitz schlägt ein, zack, die chemische Entwicklung des Lebens hin zum Einzeller beginnt. Dieses uralte literarische Bild – das Leben als Funke oder als Glut – wird also von der Wissenschaft bestätigt.

Eine Sache aber ist seltsam. Zwischen den Zeilen all der wissenschaftlichen

Texte immer wieder überrascht, wie viel die Bibel weiß.

In der Bibel steht, dass die ersten Menschen im Paradies vom Baum der Erkenntnis aßen und daraufhin sterblich wurden. Der Tod war der Preis, den sie fürs Erkennen zahlen mussten. Und was erzählt uns die Wissenschaft? Erst der Tod hat die Evolution so richtig in Schwung gebracht. Als die Organismen sterblich wurden und sich nicht mehr einfach nur teilten, konnten sich die Arten entfalten und entwickeln. Konnte der Weg zu etwas beginnen, was am Ende die menschliche Intelligenz war.

Ohne Tod keine Intelligenz, nicht einmal die Intelligenz einer Garnele – diese



Es gab gigantische Treibhauseffekte, ausgelöst durch Vulkanismus-Zeiten, in denen man am Südpol in leichter Sommerkleidung spazieren gehen konnte. Das, was wir Menschen heute mit der Erde anstellen, ist nichts, verglichen mit dem, was das All, die Sonne, das Erdinnere und so weiter tun können. Wir denken, wir

Texte auf diesen Seiten finde ich andauernd unwissenschaftliche Hinweise auf Mythen und Religion. Auf die Bibel.

Die Bibel erzählt ja im Grunde die gleiche Geschichte wie dieses Heft – sie erzählt, wie alles anfing. Vielleicht halten Sie die Bibel für das Wort Gottes, vielleicht auch nur, wie ich, für einen großartigen Mythos, für die Summe der Menschheitserfahrungen vieler Generationen. Ich bin bei der Lektüre der wissenschaftlichen

wissenschaftliche Erkenntnis formuliert auch die Bibel, in einem poetischen Gleichnis. Die Menschen (falls es Menschen waren und kein Gott, der die Bibeltexte schrieb) konnten das alles nicht wissen.

Sie fühlten es aber.

Kurz und knapp

Im Folgenden werden wichtige Fachbegriffe erklärt. Die Zahlen geben an, auf welchen Seiten im Heft sie vorkommen und wo sie (typographisch blau hervorgehoben) zum Verständnis eines Textes besonders wichtig sind

Aminosäuren

Organische Verbindungen, die eine Carboxylgruppe (-COOH) und eine Aminogruppe (-NH₂) enthalten. Aufgrund dieser Endgruppen verbinden sie sich miteinander leicht zu Aminosäureketten, den **Peptiden** und **Proteinen**. (20, 112, 113, 114, 115, 118, 119)

Archaeobakterien

Gruppe von **Bakterien**, die sich von den „klassischen“ Vertretern, den **Eubakterien** (**Echten Bakterien**), in wesentlichen Merkmalen unterscheiden. Markante Unterschiede bestehen etwa im Bau der Zellwände, im **Stoffwechsel** und in der Struktur der **RNS** in den Ribosomen, den Eiweißfabriken der Zellen. Viele Archaeobakterien besiedeln extreme Lebensräume wie heiße Quellen oder Salzseen. (29, 108, 109, 113, 114, 115, 117, 157)

Asteroiden (Kleinplaneten, Planetoiden)

Kleine Himmelskörper, die sich wie **Planeten** um die Sonne bewegen. Ihre Bahnen liegen überwiegend zwischen denen von Mars und Jupiter im „Asteroidengürtel“. Durch Störungen aus ihrer herkömmlichen Bahn geworfen, gelangen immer wieder Asteroiden in die Nähe der Erde. Im Laufe der Erdgeschichte ist es dabei zu zahlreichen, teils verheerenden Kollisionen gekommen. (13, 17, 44, 48, 49, 56, 110, 139, 169)

Asthenosphäre

Plastisch reagierende Zone im Oberen **Erdmantel**, auf der die **Lithosphären-Platten** gleiten. (17, 52, 78, 84)

Atmosphäre

1. Die Lufthülle der Erde, allgemein die gasförmige Hülle eines Himmelskörpers. Die Erdatmosphäre besteht in der Nähe der Erdoberfläche aus 78 Prozent **Stickstoff**, 21 Prozent **Sauerstoff** sowie geringen Mengen von Wasserdampf, Argon, Kohlendioxid und anderen Gasen.
2. Einheit des Drucks. Eine Atmosphäre (atm) entspricht dem mittleren Luftdruck auf Meereshöhe oder dem Druck, den eine 760 Millimeter hohe Quecksilbersäule ausübt. Eine Atmosphäre ist nahezu identisch mit einem Bar: 1 Atmosphäre = 1,0133 Bar. Offiziell gilt in der Bundesrepublik Deutschland seit 1978 die Einheit Pascal (1 Atmosphäre = 101 325 Pascal); aus Gründen der Anschaulichkeit wird in diesem Heft jedoch die alte Einheit benutzt. (17, 22, 24, 28, 29, 36, 50, 58, 72, 102, 110, 115, 118, 119, 122, 123, 125, 129, 132, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 169)

Äußerer Kern

siehe **Erdkern**

Bakterien

Einzellige Organismen ohne Zellkern. Mikrobiologen unterscheiden zwei große Gruppen: **Archaeobakterien** und **Eubakterien** (**Echte Bakterien**). (22, 26, 108, 109, 114, 116, 118, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 153, 158)

Basaltgestein

Feinkörniges dunkles **magmatisches Gestein**. Basalt bildet sich an der Erdoberfläche bei Vulkanausbrüchen. (74, 95)

Biofilm-Theorie

Theorie zur Entstehung des Lebens. Nach Überlegungen des

Münchener Chemikers Günter Wächtershäuser entwickelten sich an Kristalloberflächen von Pyrit (**Eisensulfid**) in **Vulkanzonen** in den Ozeanen aus einfachen **organischen Molekülen** allmählich immer kompliziertere und überzogen die Kristalle als dünnes Häutchen (**Biofilm**). (116)

Biosphäre

Der von Lebewesen besiedelte Teil der Erde. Die Biosphäre umfasst eine relativ dünne Schicht der **Lithosphäre** sowie die Meere und Binnengewässer. (136, 138)

Black Smoker (Schwarze Raucher)

Schornsteinartige Gebilde, aus denen am Boden der Tiefsee heißes, durch Verbindungen von Metallen und Schwefel (Metallsulfide) dunkel gefärbtes Wasser dringt. Bevor das heiße Wasser an die Oberfläche tritt, sind die Metallsulfide gelöst, doch beim Kontakt mit dem kalten Meerwasser werden sie ausgefällt. Die Sulfide bilden die meterhohen Schlote. In feiner Verteilung verwandeln sie das austretende Wasser in düstere Schwaden. (20, 21, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 159)

Chondrite

Millimeter- bis erbsengroße Kügelchen, die den Hauptteil der meisten Meteoriten ausmachen. Die in eine Grundmasse eingebetteten Kügelchen bestehen aus verschiedenen Silikaten mit unterschiedlichen Gehalten an Nichteisen. Die 4,5 Milliarden Jahre alten Chondriten gelten als Überbleibsel aus der Frühzeit des **Planetensystems**. (38)

Chorda dorsalis (Rückensaite)

Elastischer Stab, der als Stützorgan den Körper von Chordatieren vom Kopf bis zum Schwanzende durchzieht; Vorläufer der Wirbelsäule. Zu den Chordatieren zählen auch die Wirbeltiere einschließlich des Menschen, der im frühembryonalen Stadium noch eine Chorda dorsalis besitzt. (153)

Chromosomen

Stäbchenförmige, oft gekrümmte Gebilde im Zellinneren, die

aus kompliziert gepackter Erbsubstanz (**DNS**) bestehen. Sämtliche Zellen von **Eukaryoten** enthalten in ihrem Kern eine für jede Tier- oder Pflanzenart typische Anzahl von Chromosomen, die normalerweise im Zellkern ein wirres Netzwerk bilden, aber bei jeder Zellteilung klar hervortreten. (129, 155)

Cyanobakterien (Blaualgae)

Zu den **Eubakterien** zählende Gruppe von Einzellern, die zur **Photosynthese** fähig sind. Wegen dieser Fähigkeit ursprünglich als Algen angesehen, werden sie, da sie keinen Zellkern haben, heute zu den **Bakterien** gerechnet. Manche Cyanobakterien besitzen neben dem zur Photosynthese erforderlichen grünen Farbstoff Chlorophyll einen blauen Farbstoff (Phycocyanin) – daher der ursprüngliche Name. (22, 28, 121, 122, 123, 125, 153)

Deuterium

Schwerer Wasserstoff. Ein Deuterium-Atom ist etwa doppelt so schwer wie ein Atom von normalem Wasserstoff: Sein Kern enthält zusätzlich zu dem stets vorhandenen einzigen **Proton** ein **Neutron**. Etwa 0,015 Prozent des im Wasser gebundenen Wasserstoffs bestehen aus Deuterium. (33)

DNS

In allen Lebewesen vorhandener Träger der genetischen Information in Form einer Doppelhelix. **DNS** (Abkürzung für Desoxyribonukleinsäure) besteht aus zwei Ketten von **Nukleotiden**, die über jeweils zwei komplementäre **Nukleinsäurebasen** miteinander verbunden sind. Die Reihenfolge, in der die Nukleinsäurebasen in den beiden Strängen aufeinander folgen, bestimmt den genetischen Code. (20, 113, 114, 115, 119, 129)

Drehimpuls

Physikalische Größe zum Verhalten rotierender Körper, insbesondere auch von Himmelskörpern. Der Drehimpuls entspricht am ehesten dem Schwung im allgemeinen Sprachgebrauch. Je mehr Masse in Drehung versetzt wird,

ZEITLEISTE

Vor 13,7 Milliarden Jahren* Beim Urknall entstehen innerhalb von Sekundenbruchteilen Raum, Zeit und Materie. Der Kosmos dehnt sich explosionsartig aus. Protonen, Neutronen und Elektronen bilden sich und vereinen sich zu ersten Atomen (Elementen): zu Wasserstoff, Deuterium

* Einige der Jahreszahlen beruhen auf Modellrechnungen

und Helium. Aus diesen Atomen besteht das „Urgas“.

13,4 Mrd. Durch Gravitationskräfte verdichtet sich das Urgas stellenweise so stark, dass es zu Kernreaktionen kommt und die ersten Sterne zünden. Galaxien bilden sich. In den jungen Sternen verschmelzen die Atomkerne zu neuen Elementen: Sauerstoff, Kohlenstoff, Silizium, Magne-

sium und schließlich Eisen. Sterne mit großer Masse explodieren am Ende ihrer Existenz als Supernovae – manchmal schon nach wenigen Millionen Jahren. Dabei werden ihre Überreste aus Gas und Staub in den Raum geschleudert – als Baustoffe für neue Sternengenerationen. Bei den Explosionen entstehen zudem weitere Elemente, die mit ins All gejagt werden. Im-

mer wieder formen sich fortan neue Sterne und verlöschen.

12,4 Mrd. Aus dem Urgas und den Resten erloschener Sterne bildet sich die spätere Heimatgalaxie unseres Sonnensystems, die Milchstraße. Die entstehende Milchstraße kollidiert immer wieder mit anderen Galaxien. Dabei stoßen Gas- und Staubmassen zusammen und

ballen sich zu Dunkelwolken. In ihren Zentren verdichtet sich so viel Materie, dass sich dort nun ständig neue Sterne entzünden.

5 Mrd. Unsere Milchstraße gerät erneut unter den Schwerkreeinfluss einer anderen Galaxie. Bei dieser Kollision ballt sich unter anderem jene Dunkelwolke zusammen, in der nach und nach unser Sonnensystem entste-

je schneller dies geschieht und je weiter weg sich der Körper von der Drehachse befindet, desto größer ist der Drehimpuls. (34, 35)

Dunkelreaktion

Reaktionen der **Photosynthese**, die ohne Licht ablaufen. Während der Dunkelreaktion werden mithilfe der Energie aus der **Lichtreaktion** in einer Abfolge von Reaktionsschritten aus Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H) **Kohlenhydrate** aufgebaut. (123, 124)

Dunkelwolken

Verhältnismäßig dichte Ansammlungen interstellarer Materie. Die darin befindlichen Staubteilchen absorbieren das Licht von **Sternen**, die hinter ihnen liegen, sodass der Eindruck sternleerer Räume entsteht. (10, 31, 32, 34, 50)

Eisensulfid

Verbindung von Eisen und Schwefel. (20, 21, 110, 112, 113, 114, 115, 116)

Eiszeit (Glazial)

Abschnitt der Erdgeschichte, in dem die Temperaturen auf der Erde so stark absanken, dass große Gebiete auch außerhalb der Polarregionen dauerhaft von Eismassen bedeckt waren. (134, 135, 138, 168)

Eiszeitalter

Erdgeschichtliche Periode, in der aufgrund starker **Klimaschwankungen** **Eiszeiten** und bedeutend wärmere Zwischeneiszeiten mehrfach miteinander wechselten. (135, 138, 139, 159)

Eiweißstoffe

siehe **Proteine**

Eizellen

Weibliche **Keimzellen** der zweigeschlechtlichen mehrzelligen Organismen. (128, 129, 155)

Elektrizität

Sammelbezeichnung für alle Erscheinungen, die im Zusammenhang mit elektrischen Ladungen und den damit verbundenen elektrischen Feldern und **Magnetfeldern** auftreten. Die

verschiedenen Erscheinungsformen der Elektrizität beruhen auf der Bewegung oder der Ansammlung von Ladungsteilchen, zum Beispiel **Elektronen**, die sich in Metallen frei bewegen können. (100, 119)

Elektromagnet

Ein von Strom durchflossener Leiter, der ein **Magnetfeld** erzeugt, z. B. eine Spule. (100)

Elektron

Elektrisch negativ geladenes, kleines Elementarteilchen. In den Atomen bilden Elektronen eine Hülle um den Atomkern. Dabei entspricht die Anzahl der Elektronen jeweils der Anzahl der **Protonen**. (33, 100, 116, 123)

Endogene Kräfte

Kräfte, die aus dem Inneren der Erde heraus auf die **Erdkruste** einwirken. Angetrieben durch Wärmeenergie, führen diese Kräfte zur Bildung der **Lithosphären-Platten** und ihrer ständigen Bewegungen. Auswirkungen dieser Kräfte sind **Vulkan**-ausbrüche und **Erdbeben**, aber auch Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche bis zur Bildung von Gebirgen und Tiefseegräben. (95)

Endosymbiose

Zusammenleben von zwei verschiedenen Arten von Organismen zum gegenseitigen Nutzen, wobei der eine Partner innerhalb des Körpers des anderen lebt. So enthalten Korallen in ihrem Zellinneren einzellige Algen. Die Korallen bieten den Algen Schutz, diese wiederum liefern durch ihre Fähigkeit zur **Photosynthese** Nahrung. Nach der „Endosymbiontentheorie“ wird mit der Endosymbiose die Entstehung der **Eukaryoten** erklärt. Danach haben sich typische Bestandteile der Zellen von Eukaryoten, die **Mitochondrien** und – bei Pflanzen – die Chloroplasten, aus ursprünglich selbstständigen **Bakterien** entwickelt. (9, 125, 129)

Enzyme

Proteine, die als Biokatalysatoren wirken. Enzyme beschleunigen

biochemische Reaktionen oder machen sie überhaupt erst möglich. Dabei übt jedes Enzym nur eine ganz bestimmte Funktion aus. Fast alle **Stoffwechselvorgänge**, die in Lebewesen ablaufen, werden durch Enzyme katalysiert. (112, 114)

Erdbahnelemente

Merkmale der Erdbahn, die geringfügigen Schwankungen unterliegen. Nach Berechnungen des serbischen Mathematikers Milutin Milanković (1879–1958) sollen leichte Veränderungen der Bahn der Erde um die Sonne, der Neigung ihrer Achse sowie deren Kreisbewegung mit dem Kommen und Gehen der **Eiszeiten** in jüngster Erdvergangenheit in Zusammenhang stehen. (139)

Erdbeben

Heftige Erschütterungen der **Erdkruste** oder des Oberen **Erdmantels**, meist durch Bewegungen der **Lithosphären-Platten** ausgelöst. (56, 60, 76, 80, 83, 84)

Erdbebenwellen

Vom Herd eines **Erdbebens** ausgehende Wellen, die von empfindlichen Instrumenten noch in großer Entfernung registriert werden können. Durch die Auswertung der Laufzeiten von Erdbebenwellen wurden entscheidende Erkenntnisse über den inneren Aufbau der Erde gewonnen. (54, 56, 58, 60, 70, 71, 78)

Erdkern

Innerster Bereich der Erde. Der Erdkern besteht hauptsächlich aus Eisen und ist wiederum in einen festen Inneren und einen flüssigen Äußeren Kern unterteilt. Der Innere Kern reicht vom Erdmittelpunkt in 6230 Kilometer Tiefe bis etwa 5100 Kilometer Tiefe, der Äußere von dort bis 2900 Kilometer unterhalb der Erdoberfläche. (52, 54, 57, 58, 60, 61, 65, 70, 71, 82, 98, 101, 169)

Erdkruste

Äußere Erdschale. Geowissenschaftler unterscheiden **kontinentale Kruste** und **ozeanische Kruste**. (16, 48, 49, 56, 57, 58, 72, 74, 75, 78, 82, 83, 89, 97, 102, 122, 169)

Erdmantel

Die unter der **Erdkruste** gelegene Erdschale. Der Erdmantel reicht bis in etwa 2900 Kilometer Tiefe. Er besteht größtenteils aus **Silikaten**. (52, 56, 57, 60, 61, 62, 70, 71, 76, 169)

Erdrotation

Die Drehung der Erde um ihre Achse. Die Rotation von West nach Ost bewirkt den regelmäßigen Wechsel von Tag und Nacht. (44, 50, 98, 101, 137)

Erosion

Abtragung von Bodenmaterial und lockerem **Gestein** durch fließendes Wasser, Wind, Gletscher oder die Tätigkeit der Wellen. (28, 74, 96)

Erz

Gestein mit einem so hohen Anteil metallhaltiger **Minerale**, dass der Abbau lohnt. (95)

Eubakterien (Echte Bakterien)

Hauptgruppe der **Bakterien**. Als entscheidendes Merkmal zur Abgrenzung gegen **Archaeobakterien** gilt die Struktur der **RNS** in den Ribosomen, den Eiweißfabriken der Zellen. (108, 113, 114, 115, 117)

Eukaryoten

Lebewesen, deren Zellen einen Zellkern besitzen. Zu ihnen zählen sämtliche Organismen mit Ausnahme der **Bakterien**. (125, 129, 157)

Exogene Kräfte

Kräfte, die von außen her auf die **Erdkruste** einwirken. Wichtigste exogene Kraftquelle ist die Sonne, die durch ihre Strahlung die Luftbewegungen und den Wasserkreislauf antreibt. Die Folgen sind Verwitterung, Abtragung und Ablagerung der Verwitterungsprodukte und schließlich die Bildung neuer **Sedimentgesteine**. Zu den exogenen Kräften zählen auch die Gezeiten. (95)

Galaxie

Ein unserer **Milchstraße** ähnliches Sternsystem von meist Milliarden **Sternen** und großen Mengen interstellarer Materie.

hen wird. Im Zentrum dieser Dunkelwolke verdichtet sich die Materie zu einem Wolkenkern.

4,567 Mrd. Die Temperatur im Inneren des Wolkenkerns steigt auf eine Million Grad Celsius. Die ersten Deuterium-Atomkerne verschmelzen. Dabei wird Energie frei: Die Proto-Sonne beginnt zu glimmen. Zur gleichen Zeit formt sich eine

protoplanetare Scheibe. Sie besteht aus Gas und Staubteilchen, die um die Proto-Sonne rasen und sich zu Gesteins- und Eisbrocken verklumpen. So wachsen Abermilliarden kleiner Himmelskörper (Planetesimale) heran, die immer wieder kollidieren und zumeist zerplatzen. Einige werden dabei jedoch immer größer. So entstehen die neun Plane-



Asteroiden, hier ein computer-generiertes Bild, schlagen häufig auf der Erde ein

ten unseres Sonnensystems, darunter auch die Proto-Erde. Die Energie der auflaufenden Planetesimale verwandelt die wachsende Proto-Erde in einen glühenden Ball. Dem Bombardement der Himmelskörper ist die Erde gut 600 Millionen Jahre ausgesetzt. Schwere Bestandteile der Proto-Erde, hauptsächlich Eisen und Nickel, sinken in das Planeten-

innere. So formt sich nach und nach der Erdkern, der zunächst noch vollständig flüssig bleibt. Die heutige Schalenstruktur bildet sich erst nach der Entstehung des Mondes aus.

4,56 Mrd. Die Proto-Erde ist etwa marsgroß und erreicht damit gut ein Drittel ihrer heutigen Masse. (Diese Zahl beruht auf einer von vie-

Viele Galaxien haben die Form von scheibenförmigen Spiralen, andere sind elliptisch, linsenförmig oder irregulär. (10, 28, 31, 33, 35, 36, 38, 50, 51)

Geodynamo

Modell der Erde, um ihr **Magnetfeld** zu erklären. Danach wirken **Konvektionsströme** im flüssigen Eisen des Äußeren **Erdkerns** wie Spulen, durch die Strom fließt und die dadurch das irdische **Magnetfeld** erzeugen. (101, 102)

Geoid

Auf ungleichmäßiger Massenverteilung im Erdinneren beruhende, leicht unregelmäßige Figur der Erde. Das Geoid, auf das sich alle geodätischen Höhenangaben beziehen, wird in den von Meer bedeckten Gebieten durch die jeweils mittlere Höhe des Meeresspiegels bestimmt, auf den **Kontinenten** durch einen aus Schweremessungen errechneten fiktiven Meeresspiegel. (55)

Gestein

Gemenge aus **Mineralen**, aber auch aus anderen Gesteinen oder Resten von Organismen. Gesteine bilden die **Erdkruste** und den **Erdmantel**. Sie kommen aber auch außerhalb der Erde vor, so als Mond- oder Marsgestein. Geowissenschaftler unterscheiden drei große Gruppen: **magmatische Gesteine**, **Sedimentgesteine** und **metamorphe Gesteine**. (18, 36, 38, 46, 48, 49, 88, 89, 90, 92, 94, 95, 97, 100, 102, 110, 111, 117, 132, 135, 138, 140)

Gneis

Verbreitetes **metamorphes Gestein**. Typisch ist eine nur grobe Schieferung, eine lagenweise Trennung hell gefärbter und dunkler **Minerale**. Gneise entstehen sowohl aus **Sedimentgesteinen** als auch aus **magmatischen Gesteinen**. (75, 95, 96, 105)

Geosphäre

Erdhülle – der Raum, in dem sich **Lithosphäre**, **Hydrosphäre** und **Atmosphäre** berühren und durchdringen. Mit Leben erfüllt, erstreckt sich innerhalb der Geosphäre die **Biosphäre**. (136)

Granit

Grobkörniges, überwiegend helles **magmatisches Gestein**. Granit entsteht aus **Magma** einige Kilometer unter der Erdoberfläche durch langsames Abkühlen in einer Magmakammer. (74, 75, 94, 95)

Gravitation (Schwerkraft)

Die Kraft, die zwei oder mehrere Körper aufgrund ihrer Masse aufeinander ausüben. Durch diese Kraft ziehen die Körper einander an. (10, 17, 28, 31, 32, 35, 36, 48, 49, 50, 55, 56, 73, 95)

Gravitationsgesetz

Das von dem englischen Gelehrten Isaac Newton (1643–1727) aufgestellte physikalische Gesetz zum Berechnen der Kraft, mit der sich zwei Körper gegenseitig anziehen. In Worten bedeutet das Gravitationsgesetz: Zwei Körper ziehen sich mit einer Kraft an, die dem Produkt ihrer Massen proportional und dem Quadrat ihres Abstandes voneinander umgekehrt proportional ist. (54, 55)

Helium

Edelgas, leichtestes chemisches Element nach dem Wasserstoff. In der irdischen **Atmosphäre** und der **Erdkruste** ist es sehr selten, im **Universum** aber das zweithäufigste Element (nach dem Wasserstoff). (31, 33, 35, 36, 73, 43)

Horizontalverschiebung

Horizontale Verschiebung von zwei **Gesteinspaketen** oder größeren Teilen der **Erdkruste**, die sich entlang einer mehr oder weniger vertikalen Fläche in gegensätzlicher Richtung bewegen. Bekanntes Beispiel ist die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien, wo zwei **Lithosphären-Platten** aneinander entlangschrammen. Dabei kommt es immer wieder zu schweren **Erdbeben**. (85)

Hot Spot

„Heiße Stelle“ im Oberen **Erdmantel**, die darüber zu starkem, über Millionen Jahre anhaltendem **Vulkanismus** führen kann. Nach Meinung vieler Experten werden Hot Spots durch **Plumes** (Zufuhrkanäle) gespeist, die

an dieser Stelle bis tief in den Unteren Mantel reichen. Während Hot Spots ortsstabil sind, bewegen sich die **Lithosphären-Platten** darüber hinweg und tragen die entstandenen **Vulkane** einen nach dem anderen mit sich fort. Berühmtestes Beispiel für eine so entstandene Vulkankette sind die Hawaii-Inseln mit den anschließenden Emperor-Seamounts im nordwestlichen Pazifik. (67, 71, 78, 82)

Hydrosphäre

Das gesamte Wasser auf der Erde: Meere, Binnengewässer, Grundwasser sowie das in der **Atmosphäre** vorhandene und das im Gletschereis gebundene Wasser. Für Untersuchungen über das **Klima** wird das Eis als **Kryosphäre** abgetrennt. (136, 138)

Hydrothermalquelle

Stelle, an der heißes Wasser aus der Erde dringt. (108, 109, 110, 113, 115, 116, 117)

Infrarot-Teleskope

Teleskope, die anstelle von sichtbarem Licht unsichtbare Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) aufnehmen. Zahlreiche Objekte am Himmel, zum Beispiel kollidierende **Galaxien** und **protoplanetare Scheiben**, strahlen stark im infraroten Bereich, sodass mit solchen Teleskopen Strukturen von Himmelsobjekten untersucht werden können, die mit normalen Teleskopen nicht zu erkennen sind. (38)

Innerer Kern

siehe **Erdkern**

Interstellares Gas

Gas innerhalb der **Galaxien**, das eine sehr geringe Dichte von nur wenigen Atomen pro Kubikzentimeter hat. Interstellares Gas besteht hauptsächlich aus Wasserstoff, **Helium** und geringen Mengen schwererer Gase. (9, 31)

Isotope

Atomarten ein und desselben chemischen Elements, die sich durch ihre Massen unterscheiden. Die Atomkerne von Isotopen eines bestimmten Elements ent-

halten jeweils dieselbe Anzahl von **Protonen**, jedoch eine unterschiedliche Anzahl von **Neutronen**. Die Isotope eines Elements zeigen weitgehend dieselben chemischen Reaktionen, können jedoch aufgrund der unterschiedlichen Massen mit physikalischen Methoden voneinander getrennt werden. **Deuterium** ist zum Beispiel ein Isotop von Wasserstoff. (38)

Jets

Im astronomischen Sinne Fontänen aus heißem **Plasma**, die beidseitig aus einer **protoplanetaren Scheibe** hervorschießen. Jets entstehen bei der Bildung von **Sternen** und wenn Materie in das zentrale Schwarze Loch einer **Galaxie** einströmt. (34, 35)

Jungfernzeugung (Parthenogenese, eingeschlechtliche Fortpflanzung)

Eine Art der Fortpflanzung, bei der aus unbefruchteten **Eizellen** Nachkommen hervorgehen. Durch Jungfernzeugung vermehren sich zum Beispiel zeitweise die Blattläuse. (128, 158)

Kalkstein

Überwiegend aus Kalziumkarbonat (CaCO_3) bestehendes, weit verbreitetes **Sedimentgestein**. (74, 96, 139)

Katalysator

Stoff, der chemische Reaktionen beschleunigt, ohne selbst dabei verbraucht zu werden. (21, 110, 112, 113, 114)

Keimzellen (Geschlechtszellen)

Männliche und weibliche Zellen, die alle genetischen Informationen (Erbsubstanz) als einfachen **Chromosomensatz** enthalten und bei der Befruchtung miteinander verschmelzen. (128, 132)

Klima

Durchschnittliches Wetter in einem bestimmten Gebiet innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Im Gegensatz zum kurzfristig wirkenden Wetter wird das Klima – insbesondere über sehr lange Zeiträume

len Modellrechnungen, die das Tempo des Massenzuwachses zum Teil sehr unterschiedlich darstellen.)

4,557 Mrd. Im Inneren der Proto-Sonne verschmelzen Atomkerne des Wasserstoffs zu Helium. Das Wasserstoffbrennen setzt ein, das Zentralgestirn unseres Sonnensystems beginnt heller zu strahlen. Erst von diesem

Zeitpunkt an sprechen Astronomen von der „Sonne“.

4,547 Mrd. Die Proto-Erde erreicht (ebenfalls nach einer Modellrechnung) zwei Drittel ihrer heutigen Masse – nach wie vor durch den Einschlag von Planetesimalen.

4,5 Mrd. Ein marsgroßer Himmelskörper schlägt mit einer



Ohne die Schwerkraft des Mondes würde die Erde durchs All schlingern

Geschwindigkeit von 36 000 km/h in die Proto-Erde ein. Teile der Proto-Erde und des Einschlagkörpers werden ins All geschleudert und sammeln sich in einer Wolke. Die meisten ihrer Bestandteile stürzen schließlich zurück – einige verklumpen jedoch zu einem neuen Himmelskörper: dem Mond. In der Astronomie wird unser ramponierter Heimatplanet

erst von diesem Zeitpunkt an als „Erde“ bezeichnet.

4,45 Mrd. Die Schalenstruktur der Erde bildet sich nach und nach heraus. Sie besteht aus einer ersten Kruste, einem Mantel und einem einheitlichen Kern. Die Kruste wird jedoch durch Einschläge immer wieder zerstört und formt sich von neuem. Außerdem reißt emporquellen-

betrachtet – nicht allein von der Sonne und ihren Auswirkungen in der irdischen Atmosphäre bestimmt, sondern auch durch vielfältige Wechselwirkungen zwischen **Atmosphäre**, **Geosphäre**, **Hydrosphäre**, **Kryosphäre** und **Biosphäre** der Erde. Dazu kommen so genannte externe Faktoren, zu denen starke **Vulkan-**ausbrüche und die Einschläge großer **Asteroiden** oder **Kometen** zählen. (24, 28, 29, 135, 136, 138, 139, 159)

Kohlenhydrate

Große Gruppe von Naturstoffen, zu der die verschiedenen **Zuckerarten**, **Stärke** und **Zellulose** gehören. Ihre Namen haben die Kohlenhydrate von der inzwischen überholten Vorstellung, dass es sich chemisch um Hydrate, Verbindungen des Kohlenstoffs mit Wasser, handelt. (20, 112, 113, 114, 117, 123)

Kometen (Haarsterne, Schweifsterne)

In unregelmäßigen Zeitabständen auftauchende Himmelskörper mit einem leuchtenden Schweif. Bis zu mehrere hundert Kilometer große Brocken aus Eis und anderen leicht flüchtigen gefrorenen Substanzen sowie aus festen, **meteoritenähnlichen** Bestandteilen dringen aus ihren regulären Bahnen in der **Oort'schen Wolke** oder dem **Kuiper-Gürtel** in das **Planetensystem** ein. Auffällig werden die kleinen Himmelskörper erst, wenn sie sich der Sonne so weit genähert haben, dass ein Teil der gefrorenen Substanzen verdampft. Es bildet sich eine als Koma bezeichnete Hülle aus Gas- und Staubteilchen, in der sich das Sonnenlicht fängt. Unter dem Druck von **Sonnenwind** und Sonnenlicht verformt sich die Koma zu einem Millionen Kilometer langen Schweif, der stets von der Sonne wegzeigt. (18, 116, 118, 139)

Kontinent

Große zusammenhängende Landmasse einschließlich des von relativ flachem Meer bedeckten zugehörigen Kontinentalsockels und des zur

Tiefsee abfallenden Kontinentalhanges. (18, 71, 72, 74, 75, 86, 102, 138, 139, 168)

Kontinentale Kruste

Erdkruste unter den **Kontinenten** und den flachen Schelfmeeren. Sie ist im allgemeinen 30 bis 40 Kilometer und unter Hochgebirgen bis zu 70 Kilometer dick. (52, 78, 83)

Konvektion

Transport durch Strömung. Heißeres Material im Erdkern zum Beispiel steigt wegen seiner geringeren Dichte auf, während kühleres und damit dichteres absinkt. (70, 71, 82, 87, 102)

Konvektionswalzen

Durch Dichteunterschiede und die Rotation der Erde entstehen diese walzenartigen Strömungen, die Wärmeenergie aus dem festen **Inneren Kern** in den **Äußeren Kern** ableiten. Sie bewegen sich etwa parallel zur Erdachse. (101)

Körperzellen

Alle Zellen eines Organismus außer den zur Fortpflanzung bestimmten Geschlechts- oder **Keimzellen**. (128, 132)

Kraftlinien

Linien, die in einem Kraftfeld Stärke und Richtung der Kraft an jedem Punkt angeben. Die Kraftlinien in einem **Magnetfeld** sind gut sichtbar zu machen durch einen Stabmagneten, der unter einem Blatt Papier liegt: Auf das Blatt geschüttete Eisenfeilspäne ordnen sich in Linien an, die im Bogen von Pol zu Pol führen. (98, 99, 100, 101, 102, 103)

Kristall

Einheitlich zusammengesetzter Festkörper, dessen Bausteine eine regelmäßige Gitterstruktur bilden. (71, 95, 117)

Kryosphäre

Das gesamte Eis einschließlich Schnee auf der Erde. Wegen der starken Reflexion der Sonnenstrahlung durch Eis- und Schneeflächen wirken sich Veränderungen der Kryosphäre besonders stark auf das **Klima** aus. (136, 138)

Kuiper-Gürtel

Eine jenseits der äußersten **Planeten**-Bahn liegende Region, in der zahllose Kerne von **Kometen** die Sonne umkreisen. Sie ist nach dem niederländisch-amerikanischen Astronomen Gerard Peter Kuiper (1905–1973) benannt. (36, 44)

Lava

Geschmolzenes Gestein aus dem Erdinneren. **Magma**, das bei **Vulkan**ausbrüchen ausfließt, wird, sobald es die Erdoberfläche erreicht, Lava genannt. Beim Abkühlen entstehen aus der Schmelze vulkanische Gesteine. (17, 49, 67, 71, 74, 94, 102, 122)

Lichtreaktion

Der lichtabhängige Teil der sehr komplexen Vorgänge der **Photosynthese**. Während der Lichtreaktion wird die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie umgewandelt, Wasser gespalten und dadurch **Sauerstoff** produziert. (123, 124)

Lithosphäre

Der oberste Bereich der festen Erde. Die Lithosphäre besteht aus der **Erdkruste** und dem obersten **Erdmantel**. (71, 75, 78, 138)

Lithosphären-Platten

Die beweglichen Platten, welche die äußere Hülle der Erde bilden. Sie gleiten mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern pro Jahr dahin und prägen insbesondere bei Kollisionen miteinander maßgeblich die Oberfläche der Erde. (78, 82)

Magma

Geschmolzenes **Gestein** im Erdinneren. Beim Abkühlen entstehen aus der Schmelze **magmatische Gesteine**. (49, 62, 65, 67, 70, 71, 74, 75, 77, 82, 83, 84, 111)

Magmatische Gesteine

Aus abgekühltem **Magma** entstandene **Gesteine**. Nach dem Ausstoß der Schmelze aus **Vulkanen** bilden sich an der Erdoberfläche bei relativ rascher Abkühlung vulkanische Gesteine (Vulkanite). In unterirdischen Magmakammern hingegen entstehen

bei weitaus langsamerem Erkalten die größer kristallisierten Tiefengesteine (Plutonite). Das häufigste vulkanische Gestein ist **Basalt**, das häufigste Tiefengestein **Granit**. (95, 97)

Magnetfeld

Region, in der magnetische Kräfte wirken. Magnetfelder entstehen durch elektrischen Strom und durch zeitlich veränderliche elektrische Felder. Sie sind im **Universum** wie in der modernen Technik weit verbreitet. (35, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104)

Magnetsturm

Starke Störung des **Magnetfeldes** der Erde durch einen Strahlungsausbruch (Eruption) auf der Sonne. (103)

Mantelgestein

Gestein des **Erdmantels**. Mantelgestein ist im Durchschnitt schwerer als die **Gesteine der Erdkruste** und weist weitaus geringere Variationen auf. Der Obere Erdmantel besteht überwiegend aus meist grünlichem Peridotit mit Olivin als Hauptmineral. Mit zunehmender Tiefe ändert sich kaum etwas in der chemischen Zusammensetzung des Mantelgesteins, doch kristallisiert es unter dem wachsenden Druck um zu dichteren **Mineralen**. (48, 58, 70)

Mantel-Plume

siehe **Plume**

Meereis-Theorie

Theorie zur Entstehung des Lebens. Dem Hamburger Physiker Hauke Trinks zufolge könnte sich Leben zuerst in Meereis entwickelt haben, dessen poröse Struktur dafür ideale Bedingungen geboten habe. (116)

Meiose

Zellteilung zur Bildung von **Keimzellen**. Bei der Meiose wird der normalerweise doppelte **Chromosomensatz** halbiert. Die volle Chromosomenzahl wird wieder hergestellt, wenn bei der Befruchtung die Kerne zweier Geschlechtszellen miteinander verschmelzen. (128)

des Magma immer wieder die Kruste auf – ein einfacher, aber heftiger Vulkanismus herrscht auf der Erde. Dabei werden Gase ausgestoßen, überwiegend Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff. Daraus entsteht eine Uratmosphäre, die von der Erde mit ihrer inzwischen erreichten Masse – und damit einer entsprechenden Schwerkraft – gehalten werden kann. Dieses

ist nun die zweite Atmosphäre der Erde. Die erste bestand aus dem Urgas (Wasserstoff und Helium) und wurde zuvor durch heftige Sonnenwinde immer wieder weggeblasen. Schließlich verschwand sie bei der Kollision mit dem Himmelskörper, aus der der Mond hervorgeht.

4,4 Mrd. Die Erde kühlt weiter aus, und die erste langlebige

Kruste entsteht.

4,2 Mrd. Der Wasserdampf in der Atmosphäre kühlt allmählich ab und kondensiert zu Tropfen. Gewaltige Regenfälle lassen allmählich einen Ur-ozean heranwachsen. Mit dem Regen beginnt auch die Verwitterung der jungen Kruste.

4 Mrd. Die ersten Kontinente

entstehen in komplexen geologischen Prozessen; die ältesten Gesteine, die sich bisher auf der Erde finden, stammen aus dieser Zeit und liegen in Kanada. Mit der Bildung von Kontinenten setzen auch die Plattentektonik und damit der Gesteinskreislauf ein, die beide bis heute das Gesicht der Erde laufend – wenn auch sehr, sehr langsam – verändern.

3,8 Mrd. Im Zuge des Gesteinskreislaufs entstehen unter anderem immer wieder Sedimentgesteine – die ältesten bisher entdeckten stammen aus Grönland und sind 3,8 Milliarden Jahre alt.

> 3,5 Mrd. Spätestens jetzt gibt es auf der Erde ein Magnetfeld – das älteste bisher gefundene Gestein, das durch dieses

Metamorphe Gesteine

Gesteine, deren ursprünglicher **Mineralbestand** und deren Struktur durch hohe Temperaturen und Drücke umgewandelt worden sind. Die meisten metamorphen Gesteine sind aus **magmatischen Gesteinen** oder **Sedimentgesteinen** dadurch entstanden, dass diese im Laufe von plattentektonischen Bewegungen zeitweise in zehn oder mehr Kilometer Tiefe versenkt waren. Ein geringer Teil der metamorphen Gesteine war in der Nähe von Magmakammern hohen Temperaturen ausgesetzt. (95)

Metazoa (tierische Vielzeller)

Tierische Lebewesen, die im Gegensatz zu den **Protoctista** aus wenigstens zwei Schichten nicht gleichartiger **Körperzellen** bestehen. (154, 155, 156)

Meteoriten

Kleine feste Körper aus Stein, Eisen oder beidem, die aus dem All zur Erde gefallen sind. (28, 29, 38, 51, 56, 58, 112, 118)

Milchstraße

Ursprünglich eine Bezeichnung für das schwach leuchtende Band aus zahllosen **Sternen** am nächtlichen Himmel; heute Kurzbezeichnung für das Milchstraßensystem (Galaxis), dem neben unserer Sonne 100 Milliarden weitere Sterne angehören. Die Milchstraße ist eine Spirale mit einem Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren und einer Dicke von 3500 Lichtjahren. Ein Lichtjahr ist die Strecke, die Licht mit einer Geschwindigkeit von fast 300 000 Kilometern pro Sekunde in einem Jahr zurücklegt. (10, 31, 32, 33, 34)

Minerale (Mineralien)

In der klassischen Definition natürlich vorkommende, meist anorganische Substanzen, die einheitlich zusammengesetzt und kristallisiert sind. Die **Kristalle** können schon auf den ersten Blick erkennbar oder unsichtbar klein sein. In neuerer Zeit gelten als Minerale auch kristalline Substanzen, die bei

technischen Schmelz- und Kristallisationsprozessen hergestellt werden, sowie Substanzen organischer Herkunft, die Kristalle bilden. (38, 44, 88, 90, 92, 94, 97, 110, 111, 112, 117)

Mitochondrien

Organe innerhalb der Zellen („Organellen“) von Pflanzen, Tieren und Menschen, in denen aus Nahrungsstoffen Energie freigesetzt wird. Mitochondrien werden häufig als „Kraftwerke der Zelle“ bezeichnet. (128, 129)

Mittelozeanischer Rücken

Teil eines untermeerischen Gebirgssystems, das sich über 65 000 Kilometer durch die Ozeane zieht. Mittelozeanische Rücken markieren Grenzregionen, in denen zwischen zwei **Lithosphären-Platten** neue **ozeanische Kruste** gebildet wird. Typisches Merkmal ist ein 10 bis 50 Kilometer breiter Zentralgraben, in dem basaltische **Lava** die durch das Auseinanderweichen der Platten entstehenden Lücken füllt. (82, 83, 102, 111)

Mondperiode (Lunation)

Ablauf aller Mondphasen von einem Vollmond zum nächsten. (44)

Mutation

Sprunghaft auftretende erbliche Veränderung. (112, 114, 117, 128, 132)

Neutron

Elektrisch neutrales Elementarteilchen, das neben **Protonen** in unterschiedlicher Anzahl in den Kernen aller Atome außer normalem (leichtem) Wasserstoff enthalten ist. (38)

Nukleinsäuren

Langkettige organische Substanzen, die aus vielen **Nukleotiden** zusammengesetzt sind. Sie kommen in den Zellen aller Lebewesen als doppelsträngige **DNS** und als einzelsträngige **RNS** vor. Manche Viren enthalten lediglich **RNS**. (113, 114, 115, 119)

Nukleinsäurebasen

Bestandteile der **Nukleinsäuren**. **DNS** und **RNS** enthalten jeweils

vier verschiedene, sich vielfach wiederholende Nukleinsäurebasen. (20, 112, 113, 114, 115)

Nukleotide

Bausteine der **Nukleinsäuren**, die jeweils eine **Nukleinsäurebase**, eine bestimmte Art von **Zucker** und eine Phosphorsäure-Verbindung enthalten. (113, 114, 115)

Oortsche Wolke

Eine weit außerhalb der **Planeten** und des **Kuiper-Gürtels** liegende Region, in der Astronomen die ursprüngliche Heimat der meisten **Kometen** vermuten. Sie ist nach dem niederländischen Astronomen Jan Hendrik Oort (1900–1992) benannt. (36)

Organische Moleküle

Stoffe, die quasi als Skelett Kohlenstoffatome enthalten. Wegen der Fähigkeit dieser Atome, sich zu Ketten und Ringen zusammenzuschließen, bildet Kohlenstoff wesentlich mehr chemische Verbindungen als alle anderen chemischen Elemente zusammen. Organisch werden diese Moleküle genannt, weil viele von ihnen entscheidende Funktionen in Lebewesen ausüben und Naturforscher anfangs der Meinung waren, es bedürfe einer besonderen Lebenskraft, sie zu erzeugen. (109, 110, 114, 116, 117, 118, 119)

Ozeanische Kruste

Erdkruste unter der Tiefsee. Sie ist wesentlich dünner als die **kontinentale Kruste**: lediglich fünf bis zehn Kilometer dick. (52, 70, 75, 78, 111)

P-Wellen

Erdbebenwellen, die nach einem Beben als Erste bei den Observatorien ankommen und daher Primärwellen genannt werden. P-Wellen schwingen wie Schallwellen in der Richtung, in der sie sich fortpflanzen – das Gestein wird abwechselnd zusammengeschoben und gestreckt. (57, 58, 60, 61)

Paläomagnetismus

In **Gesteinen** früherer erdschichtlicher Epochen eingetragte Magnetisierung. Sie ermög-

licht den Forschern, die Intensität und Richtung des **Magnetfeldes** zur Zeit der Magnetisierung zu rekonstruieren und daraus Erkenntnisse unter anderem über die ehemalige Lage der **Kontinente** zu gewinnen. (102)

Panspermie-Theorie

Von dem schwedischen Physikochemiker und Nobelpreisträger Svante Arrhenius (1859–1927) aufgestellte Theorie zur Entstehung des Lebens auf der Erde. Danach kamen die ersten Lebewesen in Form von **Bakteriensporen** aus dem All, etwa mit **Meteoriten** oder **Kometen**. (116)

Peptide

Stoffe, die wie **Proteine** aus **Aminosäuren** aufgebaut sind, aber aus kürzeren Ketten bestehen. Ab einer Kettenlänge von 100 Aminosäuren spricht man von Proteinen. (112, 113, 114, 115)

Photosynthese

Prozess, bei dem Pflanzen, Algen und manche **Bakterien** die Energie des Lichts in chemische und damit für Lebewesen verwertbare Energie umwandeln. Dabei werden aus Kohlendioxid und Wasser mithilfe der Sonnenenergie energiereiche **Kohlenhydrate** aufgebaut. Der grüne Farbstoff Chlorophyll absorbiert das Sonnenlicht. Als Nebenprodukt entsteht **Sauerstoff**. Von der durch Photosynthese gewonnenen Energie leben nicht nur die Erzeuger selbst, sondern auch die Tiere, die Pflanzen fressen oder Pflanzenfresser jagen – alle Organismen außer vielen Bakterien und wenigen **Eukaryoten**, die ihre Energie aus anderen Prozessen beziehen. (22, 28, 96, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 129, 153, 169)

Planet

Um ein Zentralgestirn kreisender Himmelskörper, der nicht aus sich selbst heraus leuchtet, sondern lediglich das Licht dieses Gestirns zurückwirft. Um die Sonne kreisen die Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto – wobei heute umstritten ist,

Feld magnetisiert worden ist, stammt aus dieser Zeit. Wahrscheinlich aber existiert das Magnetfeld schon seit der Bildung des Kerns, der sich vor 4,567 Milliarden Jahren zu formen beginnt.

> **3,5 Mrd.** Das Leben entsteht. Echte Bakterien und Archaeobakterien bilden sich – womöglich an unterseeischen Quellen

wie den Schwarzen Rauchern. Beides sind Prokaryoten: Lebewesen ohne Zellkern.

3,2 Mrd. Schwefelpurpurbakterien betreiben als erste Organismen eine frühe Form der Photosynthese – allerdings noch ohne dabei Sauerstoff freizusetzen.

> **2,5 Mrd.** Die im Meer lebenden Cyanobakterien wandeln

Wasser, Kohlendioxid und Licht mithilfe der Photosynthese in chemische Energie um und erzeugen Zucker. Sie setzen dabei auch erstmals Sauerstoff frei. Der verbindet sich zum Beispiel mit Eisenionen zu Eisenoxiden, die sich im Ozean in mächtigen Schichten ablagern. Aber nicht nur die im Meer gelösten Eisenionen werden oxidiert. Der Sauerstoff



Photosynthese betreibende Cyanobakterien schichten Stromatolithen auf

verbindet sich vor etwa 2,3 Milliarden Jahren auch mit jenen Eisenionen, die im Gestein der Kontinente enthalten sind – und lässt sie „rosten“. Langsam reichert sich der Sauerstoff auch in der Atmosphäre an.

2,45 Mrd. Der erste bekannte Superkontinent entsteht: Kenorland, der nach gut

ob es sich bei Pluto wirklich um einen Planeten handelt. Der alte Ausdruck „Wandelsterne“ rührt daher, dass sich die Planeten wegen ihrer großen Nähe zur Erde viel schneller zu bewegen scheinen als die „Fixsterne“. (9, 13, 17, 24, 28, 29, 34, 35, 36, 43, 44, 46, 48, 49, 50)

Planetensystem

Aus einem zentralen **Stern** und mehreren **Planeten**, die diesen Stern umkreisen, bestehendes System. (36, 43, 99)

Planetesimale

Kleinkörper in der Frühzeit unseres **Planetensystems**. Sie waren die Bausteine zur Bildung der **Planeten**. (13, 14, 35, 36, 38, 43, 44, 45, 46, 48)

Planetoiden

siehe **Asteroiden**

Plasma

1. Im physikalischen Sinne ein Gas, das ganz oder teilweise aus elektrisch geladenen Teilchen besteht. Der gelegentlich als vierter Aggregatzustand – neben fest, flüssig und gasförmig – bezeichnete Plasmazustand ist im **Universum** sehr weit verbreitet: Gut 99 Prozent der atomaren Materie befinden sich in diesem Zustand.
2. Im biologischen Sinne die Substanz in den Zellen, worin die Zellbestandteile (oder Zellorganellen) eingebettet sind. Häufig wird das Plasma des Zellkerns (Kernplasma) vom übrigen Plasma (Zellplasma) unterschieden. (33, 34)

Plattentektonik

Geowissenschaftliche Lehre, nach der die äußere Hülle der Erde aus **Lithosphären-Platten** besteht, die sich unablässig gegeneinander verschieben. Die in den 1960er Jahren entwickelte Theorie der Plattentektonik erklärt durch die Plattenbewegungen bis dahin rätselhafte Erscheinungen wie die Konzentration von **Vulkanen** oder **Erdbeben** in bestimmten Gebieten, die Bildung von Hochgebirgen und von Tiefseegräben. (58, 75, 76, 78, 83, 87, 102, 169)

Plume (Mantel-Plume)

Aufwärts führende Zone im **Erdmantel**, in der besonders heißes zähplastisches **Gestein** wie in einem weiten Schlot aufsteigt. **Plumes** (englisch: Feder, Federbusch, auch Rauchwolke) gelten als Zufuhrkanäle für **Hot Spots**. (67, 71)

Polarlicht

Leuchterscheinung hauptsächlich in der Nähe von Nord- und Südpol. Polarlichter entstehen in der oberen **Atmosphäre**, etwa 100 Kilometer über der Erdoberfläche, wenn elektrisch geladene Teilchen von der Sonne auf **Sauerstoff-** und **Stickstoff-Moleküle** treffen und diese zum Leuchten anregen. (98, 101, 103, 138)

Polumkehr

Umpolung des **Magnetfeldes** der Erde: Der magnetische Nordpol wird zum Südpol und umgekehrt. Eine Umpolung findet in unregelmäßigen Zeitabständen, im Durchschnitt alle paar hunderttausend Jahre aus noch ungeklärten Ursachen statt. (103, 104)

Prokaryoten (Prokaryonten)

Einzellige Lebewesen, die keinen echten Zellkern besitzen. Prokaryoten sind nur die **Eubakterien** und **Archaeobakterien**. (114, 129, 157)

Proteine (Eiweißstoffe)

Große komplexe Moleküle, die in der Chemie des Lebens eine Schlüsselrolle spielen. Die menschlichen Proteine bestehen aus 20 verschiedenen **Aminosäuren**, die in unterschiedlicher Zusammensetzung aufeinander folgen und so eine unübersehbare Vielfalt von Proteinen bilden. (20, 112, 113, 114, 115, 118)

Protoctista

Überwiegend einzellige **Eukaryoten** mit Merkmalen von Pflanzen, Tieren oder beiden. Zu den Protoctista zählen einzellige Urtierchen (Protozoen), Algen und niedere Pilze. (153, 157)

Proton

Elektrisch positiv geladenes Elementarteilchen, das den Kern

des normalen (leichten) Wasserstoff-Atoms bildet. Protonen sind zusammen mit **Neutronen** die Bausteine für die Atome aller anderen Elemente. (38)

Protoplanetare Scheibe (Akkretionsscheibe)

Vorstufe zur Bildung eines **Planetensystems**. Um einen jungen **Stern** rotiert eine Gas- und Staubwolke in Form einer Scheibe. (34, 38, 56)

Proto-Erde

Entwicklungsstadium der Erde zwischen einem **Planetesimal** und dem fertigen **Planeten**. (14, 29, 43, 44, 46, 48, 49, 56, 168)

Proto-Sonne

Frühstadium in der Entwicklung der Sonne aus verdichteter interstellarer Materie. (33, 35, 36, 43, 45)

Proto-Zelle

Hypothetischer Vorläufer lebender Zellen. Da schon die einfachsten Zellen ungeheuer komplex sind, suchen Forscher anhand stark vereinfachter Modelle zu rekonstruieren, wie es zur Entwicklung von Zellen gekommen sein könnte. (113, 114)

Radiation

Im biologischen Sinne die relativ schnelle Aufspaltung in mehrere neue Arten. (26, 155)

RNS

Nukleinsäure, die in den Zellen aller Lebewesen enthalten ist. Drei Arten von RNS (Abkürzung für Ribonukleinsäure) erfüllen unterschiedliche Aufgaben bei der Produktion von **Eiweißstoffen**. (20, 112, 113, 114, 115, 117)

Rotationsellipsoid

Geometrischer Körper, Spezialfall eines Ellipsoids. Als Ellipsoid bezeichnen Mathematiker einen rundlichen Körper mit drei aufeinander senkrecht stehenden Achsen, dessen Schnittflächen ausnahmslos Ellipsen oder Kreise bilden. Um ein Rotationsellipsoid handelt es sich, wenn zwei der drei Achsen gleich lang

sind. Die Erde mit ihrer an den Polen leicht abgeplatteten Form ist keine Kugel, die drei gleich lange Achsen hätte, sondern ein Rotationsellipsoid. Weitere Unregelmäßigkeiten werden in der Beschreibung der Erde als **Geoid** berücksichtigt. (55)

Roter Riese

Ein in seinem Altersstadium bis zu 200fachem Sonnendurchmesser aufgeblähter **Stern**. Wegen seiner relativ niedrigen Außentemperatur leuchtet er rot. Er hat im Zentrum seinen Brennstoffvorrat an Wasserstoff aufgebraucht und erzeugt aus **Helium** schwere Elemente. (38, 169)

Rotsedimente (red beds)

Auf den **Kontinenten** entstandene **Sedimentgesteine**, die hauptsächlich durch das Eisenoxid Hämatit (Fe_2O_3) rot gefärbt sind. Rotsedimente zählen zu den wichtigsten **Klimazeugen** der Erdgeschichte, da sie nur bei tropischem oder subtropischem Klima entstehen. Das Erscheinen der frühesten Rotsedimente vor rund 2,3 Milliarden Jahren führte zu dem Schluss, dass die **Atmosphäre** erst um diese Zeit mit dem zur Bildung von Hämatit erforderlichen **Sauerstoff** angereichert wurde. (125)

S-Wellen

Erdbebenwellen, die nur gut halb so schnell durch die Erde laufen wie **P-Wellen** und deshalb später, als „Sekundärwellen“, bei den seismologischen Observatorien ankommen. Anders als P-Wellen schwingen sie wie Wasserwellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. (57)

Sauerstoff

Auf der Erde häufiges chemisches Element. Sauerstoff stellt nicht nur rund 21 Prozent der **Erdatmosphäre**, sondern ist auch in zahlreichen chemischen Verbindungen vorhanden. Mit Wasserstoff bildet er Wasser, mit Silizium und verschiedenen Metallen zahlreiche **Minerale**. Fast die Hälfte der **Erdkruste** besteht aus Sauerstoff. Unentbehrlich ist er

400 Millionen Jahren wieder in einzelne, auseinander strebende Kontinente zerfällt. Spätestens jetzt gibt es verschiedene Ozeane.

2,3 Mrd. Die früheste Eiszeit, die Forscher bisher ermitteln konnten, beherrscht das Klima auf dem Planeten.

2,1 Mrd. Die ersten Organismen

mit Zellkern, die Eukaryoten, breiten sich in den Ozeanen aus.

>2 Mrd. Die frühesten, sicher datierten Stromatolithen (Deckensteine) entstehen. Sie werden im Meer von in Kolonien lebenden Cyanobakterien gebildet.

2 Mrd. Der Mond kühlt völlig aus. Von nun an ist der Himmels-

körper ein erstarrter „toter“ Planet. Nur noch Einschläge von Asteroiden und Kometen verändern die Oberfläche.

2–1,5 Mrd. Für viele Bakterien ist der Sauerstoff giftig – doch einigen gelingt es, sich an das Element anzupassen. Sie können den Sauerstoff sogar zur Energiegewinnung nutzen – zum Beispiel, indem

sie Zucker oder Fette mithilfe des Sauerstoffs „verbrennen“. Eine Gruppe von anderen Einzellern verleiht sich diese Bakterien nun ein, ohne sie aber zu vernichten. Es kommt zu einer Endosymbiose – einer „Eingliederung“, die beiden Vorteile verschafft: Die verschluckten Bakterien sind durch eine zweite Hülle besser geschützt, die Einzeller, die

sie aufgenommen haben, können nun mit dem Sauerstoff leben und sogar davon profitieren. Heute existieren die Nachfolger dieser aufgenommenen Bakterien als chemische „Kraftwerke“ in fast allen Zellen mit Zellkern. Manche dieser so entstandenen Lebensgemeinschaften nehmen noch weitere Zellen

für die meisten Lebewesen, um aus Nahrungsstoffen Energie zu gewinnen. Durch die **Photosynthese** wird der Vorrat in der Luft ständig erneuert. (22, 28, 29, 31, 46, 58, 96, 110, 114, 115, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 129, 132, 140, 141, 153)

Schalenstruktur

Aufbau der Erde aus Schalen, die um einen gemeinsamen Mittelpunkt angeordnet sind. (54, 56)

Schwerkraft

siehe **Gravitation**

Seafloor Spreading

Das Auseinanderweichen der **Lithosphären-Platten** entlang der **mittelozeanischen Rücken**. In den sich ständig weitenden Spalten treten große Mengen **Lava** aus, die neue **ozeanische Kruste** bilden. Die Entdeckung des Seafloor Spreading Anfang der 1960er Jahre war ein wichtiger Baustein für das umfassende geowissenschaftliche Konzept der **Plattentektonik**. (102)

Sediment

Nicht verfestigtes **Gesteinsmaterial**, das durch Wind, Wasser, Eis, chemische oder biologische Vorgänge abgelagert worden ist. Der Begriff wird aber auch für verfestigte **Sedimentgesteine** gebraucht. (50, 74, 97, 102, 122, 138, 149)

Sedimentgesteine

Gesteine, die aus Produkten der physikalischen und chemischen Verwitterung entstehen. Unter dem Einfluss von Wasser und Wind, Hitze und Kälte zerfallen Gesteine an der Erdoberfläche, und die Zersetzungsprodukte werden nach mehr oder weniger langem Transport abgelagert. Die daraus resultierenden Sedimentgesteine werden in zwei Gruppen unterteilt: klastische **Sedimente** aus Gesteinstrümmern sowie chemische und biogene Sedimente aus gelösten Substanzen, die durch chemische und biochemische Reaktionen im Wasser ausgefällt worden sind. (74, 95, 96, 115)

Silikate

Große Gruppe von **Mineralen**, die meist neben Silizium und **Sauerstoff** verschiedene Metalle enthalten. Silikate sind nicht nur die wichtigsten Bestandteile der **Erdkruste** und des **Erdmantels**, sondern auch auf dem Mond sowie auf den **Planeten** Merkur, Venus und Mars weit verbreitet. Das einfachste von etwa 600 Silikaten ist Quarz (SiO_2). Weitere Beispiele: Feldspat, Glimmer, Olivin. (48, 56, 58, 117)

Sonnenflecken

Dunkle Stellen auf der Sonne, deren Anzahl in elfjährigem Rhythmus schwankt. Sonnenflecken sind mit extrem starken örtlichen **Magnetfeldern** verbunden, die den Energiestrom zur Sonnenoberfläche behindern, wodurch die Temperatur in den betroffenen Regionen um bis zu 2000 Grad Celsius sinkt und dunkler erscheint. (99, 168)

Sonnensystem

Unser **Planetensystem** mit der Sonne im Zentrum. (13, 28, 30, 32, 35, 36, 38, 46, 48, 50, 51)

Sonnenwind

Ein von der Sonne ausgehender ständiger Teilchenstrom, bestehend aus **Protonen** (Wasserstoffkernen) und **Elektronen** sowie geringen Mengen von Kernen schwererer Elemente. Er trifft im All mit einer Geschwindigkeit von mehreren hundert Kilometern pro Sekunde auf das **Magnetfeld** der Erde. (38, 73, 98, 99, 102, 103, 104)

Spermien (Samenzellen)

Männliche **Keimzellen**. (128, 129, 155, 158)

Stern

In der astronomischen Definition eine Gaskugel, die aus sich selbst heraus leuchtet. Danach ist die Sonne ein Stern, aber die **Planeten** sind keine. (9, 10, 13, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 38)

Stickstoff

Gasförmiges chemisches Element. Die **Erdatmosphäre** besteht zu rund 78 Prozent

aus Stickstoff. Stickstoff spielt auch in der Chemie des Lebens eine bedeutende Rolle. Er ist Bestandteil der **Aminosäuren** und der von ihnen gebildeten **Proteine** sowie der **Nukleinsäurebasen**. (17, 28, 29, 43, 74, 112, 114, 115, 122)

Stoffwechsel (Metabolismus)

Gesamtheit der biochemischen Vorgänge, die in den Zellen der Lebewesen ablaufen. Stoffwechselprozesse ermöglichen den Aufbau und Umbau der Körpersubstanz sowie die Gewinnung der Energie, die erforderlich ist, um die Lebensfunktionen aufrechtzuerhalten. Dementsprechend wird zwischen Bau- und Betriebsstoffwechsel unterschieden. (29, 112, 113, 114, 115)

Strahlungsgürtel (Van-Allen-Gürtel)

Zwei gürtelförmige Zonen innerhalb des **Magnetfeldes** der Erde, in denen elektrisch geladene Teilchen aus dem Weltall eingefangen und gespeichert werden. Der innere Gürtel reicht über dem Äquator 1000 bis 6000 Kilometer, der äußere 15 000 bis 25 000 Kilometer Höhe. Die Strahlungsgürtel wurden 1958 von dem amerikanischen Physiker James Van Allen entdeckt. (98)

Stratosphäre

Jene Schicht der **Atmosphäre**, die von 10 Kilometer bis in etwa 50 Kilometer Höhe reicht. In der Stratosphäre reichert sich unter dem Einfluss von UV-Strahlung der Sonne Ozon an: Ein Teil der **Sauerstoff-Moleküle**, die normalerweise aus zwei Atomen bestehen, wird gespalten, und jeweils eines der freigesetzten Atome vereinigt sich mit einem weiteren Sauerstoff-Molekül zu Ozon. Die stärkste Konzentration des dreiatomigen Sauerstoffs, der den größten Teil der für Lebewesen schädlichen UV-Strahlung absorbiert, findet sich in der „Ozon-schicht“ in 15 bis 25 Kilometer Höhe. (125, 138)

Stromatolithen

Von **Cyanobakterien** in flachen

Meeresgebieten aufgebaute säulen- oder knollenförmige Ablagerungen von schalig-blättrigem Aufbau. Die typische Struktur entsteht unter anderem dadurch, dass Ansammlungen von fadenförmigen Cyanobakterien bei ihrer **Photosynthese** Kalk ausfallen. Da Cyanobakterien Licht brauchen, besiedeln immer wieder neue Generationen den Kalk. Stromatolithen zählen zu den frühesten Zeugnissen des Lebens. Die ältesten sind über zwei Milliarden Jahre alt. (22, 121, 123)

Subduktion

Absinken einer **Lithosphären-Platte** unter eine andere. (78, 84, 85, 104, 105)

Subduktionszonen

Gebiete, in denen eine **Lithosphären-Platte** unter eine andere gleitet. Typisch für Subduktionszonen sind aktiver **Vulkanismus** auf der unterfahrenen Platte sowie häufige und starke **Erdbeben**. (71, 78, 82)

Superkontinent

Besonders großer **Kontinent**. Im Laufe der Erdgeschichte bildeten mehrmals sämtliche Landmassen einen einzigen Superkontinent. (84, 86, 156)

Super-Plume

Besonders starker **Plume**. (71)

Tethys

Einst großer Ozean zwischen Eurasien und den weiter südlich als heute gelegenen Landmassen Afrika, Arabien und Indien. Er verschwand, als sich die **Kontinente** immer weiter einander annäherten. Der Meeresboden tauchte durch **Subduktion** unter den eurasischen Plattenrand ab. Ein Rest der Tethys ist das östliche Mittelmeer. (75, 85)

Tonmineral-Theorie

Theorie zur Entstehung des Lebens. Der britische Geowissenschaftler Graham Cairns-Smith stellte Mitte der 1980er Jahre die Theorie auf, dass sich erste **organische Moleküle** an die **Kristalle** von **Tonmineralen**

auf: bestimmte, mit Cyanobakterien verwandte Bakterien. Diese produzieren für ihren „Wirt“ Zucker, der unter anderem als Energiequelle dient. Aus einer dieser Gemeinschaften gehen später die Pflanzen hervor. Die Nachfolger der Cyanobakterien entwickeln sich in den Zellen zu Chloroplasten, die in den Pflanzen die Photosynthese betreiben.

1,5 Mrd. Die Natur entwickelt den Sex – erstmals wird das Erbgut von Generation zu Generation weitergegeben. Der Mix des Erbguts macht die Individuen überlebensfähiger: Sie können sich schneller an veränderte Umweltbedingungen anpassen. Heute können sich über 99 Prozent aller Tier- und Pflanzenarten sexuell fortpflanzen.

1,5 Mrd. Die Vorfahren der Vielzeller entstehen. Viele unterschiedlich spezialisierte Zellen bilden einen gemeinsamen Organismus. Dies hat mehrere Vorteile: Der Organismus kann wegen seiner Größe nicht mehr so leicht gefressen werden. Außerdem übernehmen die unterschiedlichen Zellen verschiedene Aufgaben – so können sich die Vielzeller

im Laufe der Evolution zu komplexen Lebewesen entwickeln. Die Vorgänger der Pilze entstehen.

1 Mrd. Der flüssige Kern der Erde „friert“ zum Teil aus: Es gibt von nun an einen festen Inneren Kern, umgeben von einer flüssigen Schicht, dem Äußeren Kern. Das Magnet-

feld wird stärker. Diese Unterteilung des Kerns hat bis heute Bestand.

1 Mrd. Einzelne Kontinente schließen sich zum Superkontinent Rodinia zusammen.

750–580 Mio. Die Erde vereist mehrmals in Folge und friert mindestens einmal fast völlig zu.

angelagert haben und dadurch geordnet worden sein könnten. Das Tonmineral Montmorillonit erwies sich zudem als guter **Katalysator**. (117)

Universum (Weltall, Kosmos)

Die Welt als Ganzes. Das Universum enthält neben großen Mengen noch rätselhafter Energie und „Dunkler Materie“, die keine Strahlung aussendet und sich daher direkter Beobachtung entzieht (aber durch ihre Schwerkraftwirkung nachzuweisen ist), geschätzte 100 Milliarden **Galaxien** mit jeweils 100 Milliarden **Sternen**. (9, 28, 31, 33, 37, 38, 46, 48, 49, 50, 51, 98, 116, 122)

Uratmosfera

Atmosphäre im frühen Stadium der Erdentwicklung. Eine erste Uratmosphäre aus Wasserstoff und **Helium**, den extrem leichten Gasen des Sonnennebels, wurde schnell von den heftigen **Sonnenwinden** fortgeblasen. Danach bildete sich eine zweite Uratmosphäre aus Gasen, die bei den Kollisionen der **Planetesimalen** und bei **Vulkanausbrüchen** aus dem Inneren der Erde freigesetzt wurden. Sie bestand, wie vulkanische Gase noch heute, vor allem aus Wasserdampf, Kohlendioxid und **Stickstoff**. (73, 74, 118, 123, 125)

Urknall (Big Bang)

Beginn des **Universums**. Nach der Theorie vom Urknall gab es vor 13,7 Milliarden Jahren einen Zustand extrem hoher Materiedichte und Temperatur, bevor in einer gigantischen Explosion die gesamte kosmische Materie auseinander flog. Hauptargumente für den Urknall sind die beobachtete anhaltende Expansion des Universums und die kosmische Hintergrundstrahlung, gewissermaßen ein Nachglühen des Urknalls, das den Kosmos erfüllt. (31, 38, 50, 51)

Urnebel

Volkstümlicher Begriff für die **interstellare Materie**, aus der die Sonne und die **Planeten** hervorgegangen sind. (36, 43, 73)

Urozean

Frühe größere Ansammlung von Wasser auf der Erde. Voraussetzungen dafür waren eine hinreichende Abkühlung, sodass Wasser aus vulkanischen Gasen kondensieren konnte, sowie die Freisetzung von Wasser aus **Kometen**, die auf die Erde stürzten. (18, 72, 74, 75, 109, 110, 112, 116, 118, 122, 123, 141)

Ursuppen-Theorie

Theorie zur Entstehung des Lebens. Danach entwickelten sich die organischen Moleküle in warmem flachem Wasser aus anorganischen Molekülen. Großes Aufsehen erregte 1953 ein Experiment, bei dem der amerikanische Chemiker Stanley Miller in einer modellhaften Ursuppe **Aminosäuren** erzeugte. Zutaten waren lediglich Wasser und ein Gasgemisch, das Miller für die **Uratmosphäre** hielt. Als Energiequelle dienten elektrische Entladungen. (116, 119)

Vielzeller

Lebewesen, die meist aus sehr vielen Zellen bestehen. Diese Zellen teilen sich verschiedene Aufgaben, sind durch besondere Strukturen miteinander verbunden und tauschen unter anderem Informationen, Energie oder Speichermoleküle aus. Durch die Spezialisierung entstehen im Laufe der Evolution zum Beispiel die **Keimzellen**, welche schließlich der Fortpflanzung dienen. Zu den Vielzellern zählen unter anderem die **Metazoa** (vielzellige Tiere) und die **Metaphyta** (vielzellige Pflanzen). (130, 131, 132, 141)

Vulkan

Eine Stelle an der Erdoberfläche, an der **Magma** austritt. Die ausgeworfenen oder fließenden Massen bilden vielfach einen kegelförmigen Berg mit einem Krater an der Spitze. (18, 24, 62, 70, 74, 78, 82, 83, 94, 95, 110, 118, 139)

Vulkanismus

Alle Vorgänge, bei denen feste, flüssige oder gasförmige Stoffe aus dem Erdinneren an die Oberfläche gefördert werden. (28, 50, 82, 159, 168)

Weißer Zwerg

Endstadium in der Entwicklung eines **Sterns** von der Größe unserer Sonne. Ein im Alter zum **Roten Riesen** gewordener Stern stößt seine Hülle ab, der Rest schrumpft zu einem Weißen Zwerg von etwa Erdgröße, der die Masse einer Sonne enthält. Aufgrund seiner sehr heißen Oberfläche leuchtet er zunächst weiß, kühlt aber immer mehr ab. Am Ende wird daraus ein ausgebrannter Schwarzer Zwerg. (38)

Zellmembran

Hauchdünne zweischichtige Hülle, welche die Zellen aller Organismen umschließt. Als äußere Begrenzung vermittelt sie zwischen der einzelnen Zelle und ihrer Umwelt und erfüllt dabei vielfältige Funktionen, etwa beim Transport von Stoffen aus der Zelle heraus und in sie hinein. (20, 21, 115)

Zellwand

Starre Hülle außerhalb der **Zellmembran**. Bakterien-, Pflanzen- und Pilzzellen besitzen Zellwände aus unterschiedlichen Materialien. (20, 21, 113, 114, 115)

Zitronensäurezyklus

Kette chemischer Prozesse, mit denen Zellen in den **Mitochondrien** Energie gewinnen. Im Zitronensäurezyklus, der im **Zellstoffwechsel** eine zentrale Stellung einnimmt, laufen die Abbauewege der Energie liefernden **Kohlenhydrate**, Fette und **Proteine** zusammen. Zwischenprodukte des Zitronensäurezyklus dienen dem Aufbau wichtiger **organischer Moleküle**. (112)

Zucker

Im chemischen Sinne meist süß schmeckende **Kohlenhydrate**, die im Gegensatz zu den langkettigen Kohlenhydraten Stärke oder Zellulose aus eher kurzen Kettenmolekülen bestehen. (20, 22, 112, 113, 114, 115, 118, 123, 124, 153)

Erwin Lausch

600–543 Mio. In den Ozeanen breiten sich die so genannten **Ediacara-Wesen** aus. Sie besitzen kein Skelett oder andere harte Körperteile. Trotzdem gibt es heute an vielen Orten der Erde **Ediacara-Fossilien**, die nach einem Fundort in Australien benannt sind. Wie – und ob – die **Ediacara-Wesen** mit anderen Lebewesen verwandt sind, ist unbekannt.

580 Mio. Die ersten tierischen Vielzeller entstehen neben den **Ediacara-Wesen** – das früheste, bisher gefundene Fossil eines tierischen Vielzelllers, eines Schwamms, ist 580 Millionen Jahre alt.

550 Mio. Der Großkontinent **Gondwana** bildet sich. Die Landmasse liegt am Südpol und besteht unter anderem

aus Indien, Südchina, Arabien, Afrika, Südamerika, der Antarktis und Australien. **Gondwana** verbindet sich später mit anderen Kontinenten zum Superkontinent **Pangaea**.

542–488 Mio. In der Periode des **Kambriums** bevölkert – in geologischen Dimensionen fast plötzlich – eine Vielzahl komplex gebauter, gepanzer-

ter Tiere die Meere. Darunter sind die Vorfahren all jener Tierstämme, die noch heute auf der Erde leben.

425 Mio. Die ersten Pflanzen erobern das Land – Flechten und Moose besiedeln die Kontinente.

Jörn Auf dem Kampe,
Susanne Gilges



Die Astro-Sensation: Teleskope mit automatischer Suchfunktion



- Lichtstarke Maksutov-Cassegrain Optik
- Inkl. Stativ und AutoStar

ETX-90AT
ETX-105AT
ETX-125AT
ab 799,- €

Ganz einfach und doch so genial • kinderleicht zu bedienen • findet astronomische Objekte per GoTo-Knopfdruck!

EXKLUSIV:

Sie erhalten beim Kauf eines der oben genannten ETX-Teleskope diese 7 Super Plössl-Okulare mit Alu-Koffer für nur € 149,- statt € 783,-

Diese Aktion läuft bis zum 31.12.2004 bzw. so lange der Vorrat reicht.

Rufen Sie uns einfach an!



+++ Autorisierte Meade Fachhändler finden Sie unter www.meade.de +++



MEADE

D-46325 Borken/Westf. • Sternensstraße 6
Tel. (028 61) 93 17 0 • Fax (028 61) 22 94
Internet: www.meade.de • E-Mail: info@meade.de

Das Schicksal des Blauen Planeten

Was mit der Geburt der Proto-Erde vor rund 4,6 Milliarden Jahren begonnen hat, wird in etwa sechs Milliarden Jahren spektakulär enden: Der Todeskampf der Sonne lässt unseren Heimatplaneten verglühen. Doch das Antlitz der Erde wird sich schon lange zuvor dramatisch verändert haben

Text: Claus Peter Simon

Mit dem Menschen hat die Evolution eine Spezies hervorgebracht, die über Vergangenheit und Zukunft nachzudenken vermag – auch über die ihres Heimatplaneten. *Homo sapiens* hat erkennen müssen, dass nicht nur der Lebenszyklus jedes Organismus und jeder Tier- und Pflanzenart bereits den Keim des Todes in sich trägt. Gleiches gilt auch für Himmelskörper wie die Erde: In etwa sechs Milliarden Jahren wird sie den Hochrechnungen der Astronomen zufolge von der sich ausdehnenden Sonne verschlungen werden.

Was den Menschen angeht, so ist er heute zweifellos in der Lage, mithilfe des Atomwaffenarsenals, des von ihm mitverursachten Treibhauseffekts oder gefährlicher Experimente mit Viren und Bakterien zahlreiche irdische Lebensformen zu vernichten, inklusive seiner selbst. Doch nach allem, was wir heute wissen, vermag er weder das Leben an sich noch den Planeten selbst in dessen Existenz zu gefährden. Für die dramatischen Veränderungen, auf die unsere Erde zusteuert, spielt er keine wesentliche Rolle. Denn die haben vor allem drei Ursachen: klimatische, geologische und astronomische.

Das Klima

Nach Prognosen von Klimaforschern wird die mittlere Temperatur auf der Erde bis zum Jahr 2100 um 2,5 Grad Celsius steigen – was immerhin der Hälfte des Temperaturunterschieds zwischen einer Warmzeit und einer Kaltzeit entspricht. In Europa drohen dann im Winter Überschwemmungen und im Sommer Dürren. Eine Verschiebung der Klimazonen könnte das soziale Gefüge von Staaten auseinander brechen lassen.

Hauptursache für diese Erwärmung, für die auch die zyklische Sonnenflecken-Aktivität eine Rolle spielen mag, ist der Raubbau an den fossilen Rohstoffen, der die Atmosphäre mit dem Treibhausgas Kohlendioxid anreichert. In langfristiger Perspektive sind jedoch natürliche klimaverändernde Ursachen wichtiger: die Intensität des Vulkanismus, die Zirkulation der Meeresströmungen und vor allem astronomische Einflüsse.

So verändert sich im Verlauf von Jahrzehntausenden nicht nur die Erdumlaufbahn, sondern auch die Neigung der Erdachse. Dadurch gelangt mal mehr, mal weniger Sonnenstrahlung in die verschiedenen Regionen der Erde. Verstärken sich die menschengemachten und natürlichen Effekte gegenseitig, kommt es zu drastischen Klimawechsels.

Mit heutigen Modellrechnungen lässt sich allerdings nur grob abschätzen, wohin das Klima langfristig driftet: Demnach

wird in vielleicht schon 50 000 Jahren – ungeachtet der heutigen Eingriffe des Menschen in das Klima – eine neue Kaltzeit beginnen, die in vermutlich rund 100 000 Jahren ihr Maximum erreichen wird.

Noch viel schwieriger ist es, darüber zu spekulieren, wie sich das Klima und das Leben auf der Erde im Laufe von Jahrmillionen entwickeln werden. Entscheidend dafür ist zum Beispiel die unablässige Bewegung der Kontinente, denn Eiszeiten sind offenbar immer nur dann eingetreten, wenn die Landmasse eines Kontinents an zumindest einen Pol heranreichte, sich deshalb auf ihr Schnee halten und ein Eispanzer heranwachsen konnte.

Für die Zeit in etwa 200 Millionen Jahren haben Wissenschaftler in einem Szenario entfaltet, welche Organismen die Erde bevölkern: Fast sämtliche Säugetiere sind wegen der drastischen Klimawandel längst verschwunden, eine weitere Warmzeit ist angebrochen. In ausgedehnten Regenwäldern flattern „Waldfische“ umher, Nachfahren der Fische mit weiterentwickelten Brustflossen. „Kletterkalmare“ hangeln sich von Baum zu Baum. In der zentralen Wüste haben sich von heutigen Termiten abstammende „Gigamiten“ breit gemacht, die sich mit Wasser aus einem tief unter der Oberfläche verborgenen Höhlensystem versorgen. Und den Menschen gibt es wohl nicht mehr.

Die geologischen Veränderungen

Die Hitze aus dem Erdinneren, die seit etwa vier Milliarden Jahren Landmassen hin und her schiebt, wird auch in Zukunft die Lage der Kontinente verändern. Zwar langsam, aber stetig: In 250 Millionen Jahren werden sich die Landmassen nach der Meinung des US-Geologen Christopher Scotese wahrscheinlich wieder zu einem ähnlichen Superkontinent vereint haben wie vor etwa 350 Millionen Jahren – zu Pangaea Ultima. Anders als der Name vermuten lässt, hört die Bewegung der Kontinente zu dem Zeitpunkt aber nicht auf. Doch für die Zeit danach versagen alle prognostischen Möglichkeiten.

Voraussichtlich wird sich Nordamerika in rund 50 Millionen Jahren etwas gegen den Uhrzeigersinn gedreht haben, Eurasien hingegen mit dem Uhrzeigersinn. Der Atlantik weitet sich, England rückt näher an den Nordpol, Afrika kollidiert mit Europa. Ein Himalaya-ähnliches Gebirge reicht von Spanien bis weit in den Mittleren Osten. In der Folgezeit entsteht nach den Computer-Modellierungen Scoteses eine gewaltige Subduktionszone am Ostrand der beiden Amerikas, die den Meeresboden unter den Kontinenten abtauchen lässt – der Atlantik schließt

sich langsam wieder. Wo heute die Skyline von Manhattan in den Himmel ragt, werden sich riesige Berge türmen.

Nach 250 Millionen Jahren wird der Atlantik sich vollständig geschlossen, Nordamerika Afrika gerammt haben. Der Pazifik wird als neuer Superozean sämtliche Kontinente umschließen und der Indische Ozean zu einem Binnenmeer geworden sein.

Und irgendwann wird die Bewegung der Kontinente womöglich doch zum Erliegen kommen, weil das Erdinnere unmerklich abkühlt – um ein Prozent in 100 Millionen Jahren. Dadurch versiegen nach und nach die Konvektionsströme, welche die Plattentektonik in Gang halten.

Die astronomischen Einflüsse

Bis Pangaea Ultima Gestalt annimmt, wird die Erde – jedenfalls nach statistischen Berechnungen – zweimal von zehn Kilometer großen kosmischen Bomben aus dem All getroffen worden sein. Derartige Brocken könnten alles menschliche Leben auslöschen und sogar die Photosynthese zum Erliegen bringen. Kleinere Asteroiden mit einem Kilometer Durchmesser treffen die Erde im Schnitt einmal in einer Million Jahren – während der Menschheitsgeschichte statistisch gesehen bereits dreimal. Zumindest in mehreren hundert Kilometern Umkreis erlischt danach für einige Zeit praktisch alles Leben.

Astronomen der Nasa stufen von den heute bekannten möglichen „Erdbahnkreuzern“ über 600 als potenziell gefährlich für das Leben auf der Erde ein.

Aber selbst wenn die Menschheit von einem nahenden Einschlag wüsste, gäbe es derzeit keine Möglichkeit, die Kollision abzuwenden.

Kosmische Katastrophen zeugen jedoch nicht nur von Vernichtung, sie beschleunigen mitunter auch das Aufkommen neuer Lebensformen: Ohne den Asteroiden-Einschlag vor 65 Millionen Jahren bei der mexikanischen Halbinsel Yucatán würden womöglich noch immer Saurier die Erde beherrschen, und eine Spezies wie der Mensch hätte sich nicht entwickeln können.

Doch selbst wenn es Lebewesen gäbe, die allen klimatischen und geologischen Umwälzungen widerstünden und

das Bombardement aus dem All unbeschadet überdauern: Spätestens die Sonne würde auch ihr Schicksal besiegeln. Denn unser Zentralgestirn ist einer Entwicklung unterworfen, mit der das Los der Erde untrennbar verknüpft ist. In den kommenden Jahrmilliarden wird die Leuchtkraft der Sonne stark zunehmen. Ein natürlicher Treibhauseffekt von ungeheurer Dynamik kommt in Gang, der die Erde in eine Art Schnellkochtopf verwandelt: In 3,5 Milliarden Jahren wird alles Wasser verdampft sein, die Erdkruste ausgetrocknet und mürbe von der Hitze.

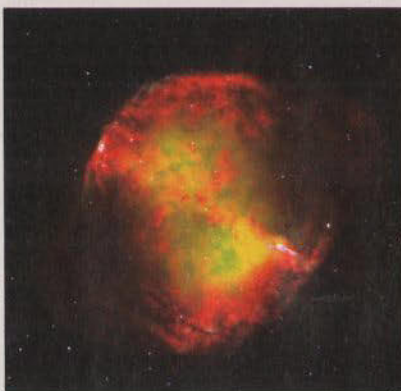
In etwa sechs Milliarden Jahren wird die Sonne den Wasserstoffvorrat in ihrem Kern weitgehend aufgebraucht haben. Dann bläht sie sich etwa auf das 160fache ihres Durchmessers auf und wird, wie das Schicksal anderer Sterne lehrt, zu einem Roten Riesen. Die Temperatur auf der Erde steigt auf etwa 1200 Grad Celsius, alles Leben ist dann längst vergangen.

Des weiteren wird der Mond vom Gas der ausgedehnten Sonne stärker als die Erde abgebremst. Schließlich wird er unserem Planeten so nahe kommen, dass er von dessen Gravitationsfeld in Stücke gerissen wird. Die Trümmer schlagen riesige Krater in die heiße Erdoberfläche.

Was danach mit der Erde geschehen wird, vermag niemand mit Sicherheit zu sagen. Wissenschaftler haben zwei Endzeit-Szenarien entwickelt: Entweder verschlingt die Sonne die Erde und lässt sie verdampfen. Der einst Blaue Planet verglüht, fast ohne Spuren zu hinterlassen – seine Masse würde den Gehalt an schweren Elementen in der äußeren Sonnenhülle lediglich um 0,01 Prozent erhöhen. Oder die Erde entkommt der Sonne knapp –

nur ihre Atmosphäre, ihre Kruste und ihr Mantel verdampfen. Der Erdkern aus Eisen und Nickel aber wird als erkalteter und dunkler Metallklumpen die zum Weißen Zwerg geschrumpfte Sonne umrunden.

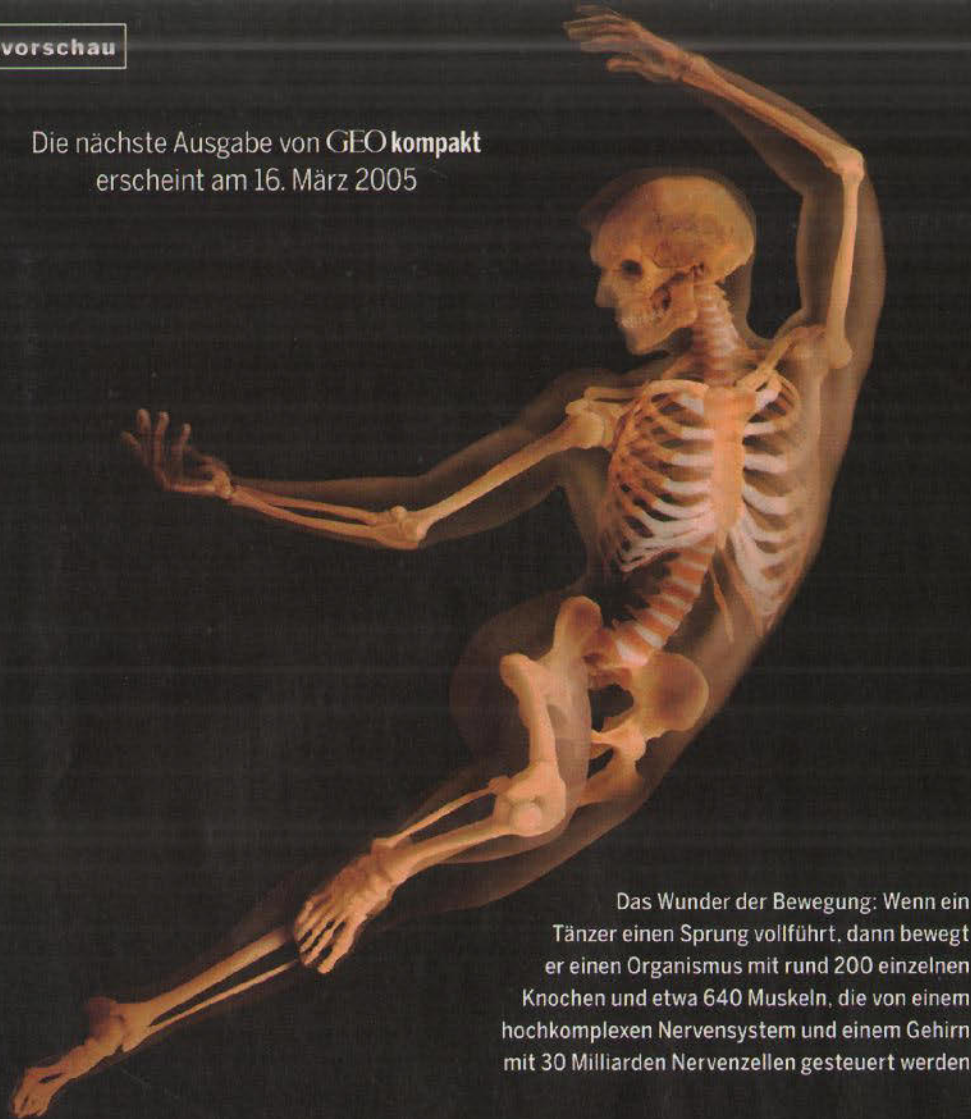
Falls es zu jener Zeit eine intelligente, der Erde entstammende Lebensform geben sollte, so müsste sie das Schicksal ihrer alten Heimat von weit außerhalb im Universum beobachten – von einem Planeten womöglich, der in ähnlich günstigem Abstand zu einer anderen Sonne steht und so lebensfreundlich ist wie heute noch die Erde. □



Wenn die Sonne zum Roten Riesen wird – wie auf diesem Bild ein anderer alternder Stern –, ist das Leben auf der Erde längst erloschen

Claus Peter Simon, 43, ist Geschäftsführender Redakteur der GEO-WISSEN-Reihe und hat an der Konzeption dieses Heftes mitgewirkt.

Die nächste Ausgabe von **GEO kompakt**
erscheint am 16. März 2005



Das Wunder der Bewegung: Wenn ein Tänzer einen Sprung vollführt, dann bewegt er einen Organismus mit rund 200 einzelnen Knochen und etwa 640 Muskeln, die von einem hochkomplexen Nervensystem und einem Gehirn mit 30 Milliarden Nervenzellen gesteuert werden

Expedition in den Körper des Menschen

Wenn nach neun Monaten aus einer einzigen befruchteten Eizelle ein Mensch mit seinen rund 100 Billionen Zellen herangewachsen ist, dann ist ein ungeheuer kompliziertes, sich selbst versorgendes System entstanden. Hunderte Knochen und Muskeln bewegen den Organismus, über den Verdauungstrakt versorgt er sich mit Energie und Baustoffen, mithilfe des Herz-Kreislauf-Systems transportiert er alle benötigten Stoffe im Blut zu jeder einzelnen Zelle. Dank Sinnesorganen, Nerven, Gehirn und Hormonsystem orientiert sich dieser Organismus in der Welt und steuert sämtliche Körperfunktionen. Nach außen grenzt er sich gegen Mikroben, schädliche Stoffe und Wärmeverlust durch eine Schicht aus Haut und Haaren ab, mit seinem Immunsystem wehrt er sich gegen Bakterien, Viren und Parasiten. Und wenn er durch eine Wunde oder einen Knochenbruch beschädigt wird, dann repariert er sich einfach selbst. **GEO kompakt** erkundet das Faszinosum Mensch.



Diese Zelle des Immunsystems gehört zu einem von über 200 Zelltypen im Körper eines Menschen

Die danach folgenden Ausgaben:

- **Technik, die unser Leben bestimmt:** Die Erfindungen der letzten 150 Jahre (15. Juni 2005)
- **Wie die Natur funktioniert:** Die Welt der Tiere und Pflanzen (14. September 2005)

Bildnachweis nach Seiten

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

TITEL: Chris Butler

EDITORIAL: Holde Schneider

INHALT: Jeff Hester & Paul Soewen/Arizona State University/NASA: 4 l. o.; Chris Butler: 4 r. o. + 5 l. o.; Mats Wibe Lund: 1 u.; Ronald Blakey: 4 m. u.; Karl Lounatmaa/SPL/Agentur Focus: 4 r. u.; Alfred Wegener Institut: 5 r. o.; Manfred und Christina Kage/Institut für wissenschaftliche Fotografie: 5 l. u.; Chase Studio/Photo Researchers, Inc.: 5 r. u.

VOM STAUB DER STERNE ZUR HEIMAT DES LEBENS: Chris Butler: 8-27

DAS WUNDER DER ERDE: Space-Graphics.com: 29

GEBOREN AUS GAS UND STAUB: J. Hester et al./Arizona State University/WFP2/HST/NASA: 30/31; J. Carpenter, T. H. Jarrett & R. Hur/2 MASS: 32/33; ESO/UT Borgeest: 34/35; Alfred Kamalain: 35 r.; NASA and the Hubble Heritage Team/STScI/AURA & Todd Boroson/NOAO/AURA/NSF/UT Borgeest: 36/37; ESA & H.E. Bond/STScI/NASA: 38, 39

EIN PLANETENTSTEH: JPL/NASA (Bildbearbeitung GEO): 42; Aigen Li/University of Missouri-Columbia: 44 o.; JPL/NASA: 44 u.; Gary Hincks: 45

DER TRABANT: Paul Geissler/Michael Benson/Kinetikon Pictures: 47; Hark Weidling: 48; JPL/NASA: 49

SOLLE, MOND UND STERNE – ALLES NUR UNFÄLLE! Gerd Ludwig/Visum: 50; Carl Barks aus Barks Library 3 „Donald Duck – Donaldchens Mondfahrt“, Seite 36, 1993, © Disney 51

ANATOMIE EINER GLUTKUGEL: Nora Nowatzyk nach einer Vorlage von Dorling Kindersley: 52/53; Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen: 54 l.; Heiner Müller-Elsner/Agentur Focus: 54 r.; 55 r.; Byron D. Tapley & Francis Condi/Center for Space Research, University of Texas at Austin: 55; Andreas Boock: 56 l.; Bernardo Strozzi „Eratosthenes lehrt in Alexandria“/Musée des beaux arts de Montréal: 57 o.; Helger Eberling: 57 u.; SPL/Agentur Focus: 58

DAS GEHEIMNIS DER P-WELLEN: Martina Kolb-Ebert: 60; Kort & Matrikelsteynson, Kopenhagen: 61 o.; Alexander Turnbull Library, Wellington: 61 m.; Los Angeles Examiner/Courtesy/Catch Archives: 61 u.

FEUER AUS DER TIEFE: Wladim Gypenrolter: 62/63; Christian Heeb/Look/eStockphoto: 64/65; G. Brad Lewis/SPL/Agentur Focus: 66/67; Klaus-D. Franke/Bilderberg: 68/69; Nora Nowatzyk: 71

DIE ERSTE SINTFLUT: Jim Zuckerman/Alamy Images: 72/73; Hark Weidling: 74; World Ocean Floor Panorama by Bruce C. Heezen & Marie Tharp, © 1977/2003 Marie Tharp Oceanographic Cartographer, South Nyack, NY, USA: 75

DIE DRIFT DER KONTINENTE: Mats Wibe Lund (Bildbearbeitung GEO): 76/77; Gary Hincks: 78/79; Jeff Schmaltz/MODIS Rapid Response Team/GSFC/NASA: 79 l.; Jacques Desclotres, MODIS Land Rapid Response Team/GSFC/NASA: 79 r. m.; 422-79 m.; Provided by the SeaWiFS Project/GSFC/NASA & ORBIMAGE: 79 r. m.; Jeff Schmaltz/MODIS Rapid Response Team/GSFC/NASA: 79 r.; James Balog/Getty Images: 80/81; Aus „Understanding Earth“, Frank Press/Raymond Siever, © 1994, 1998, 2001, 2004 bei W. H. Freeman and Company (deutsche Ausgabe: „Allgemeine Geologie“, erschienen bei Elsevier); 82, 83; Tasa Graphic Arts, Inc., aus „Essentials of Geology“ (8th edit. 2002) von Frederick Lutgens, Edward Tarbuck and Dennis Tasa, reprinted with permission of Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ: 84; Ronald Blakey: 85

UND SIE BEWEGEN SICH DOCH: Aus Alfred Wegener „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig: 86; Alfred Wegener Institut: 87 l. und r. u.; alky-images: 87 r. o.

VOM WERDEN UND VERGEHEN DER GESTEINE: Dirk Wiersma/SPL/Agentur Focus: 88-94; Aus „Understanding Earth“ von Frank Press/Raymond Siever, © 1994, 1998, 2001, 2004 bei W. H. Freeman and Company: 95; Jean-Paul Ferrero/ardea.com: 96 l. o.; Jon Wilson/SPL/Agentur Focus: 96 r. o.; Keith Kent/SPL/Agentur Focus: 97 o.; Ralf Gantziorn: 96 m. l.; Taxi/Alamy Images: 96 r. m.; Carol Cohen/Corbis: 97 m.; David Muendlich/Corbis: 96 l. u.; Erwin Lausch: 96 r. u.; Eberhard Grames/Bilderberg: 97 u.

DIE KRAFT AUS DEM KERN: David Pierce/infopict: 98/99; Andreas Boock (nach Freeman): 100 o.; G. Glatzmaier, Los Alamos National Library & P. Roberts, UCLA/SPL/Agentur Focus: 100 u. (3); Johnson Space Center/NASA (Bildbearbeitung GEO): 100/101; Hark Weidling (nach Freeman): 102 l.; Hark Weidling: 102 r.; SOHO/ESA/NASA: 103

ALLES FLIESST – AUCH EIN BASALTFELSEN: Carl Barks aus Barks Library Special Donald Duck 5 „Donald Duck – Das Land der Vulkane“ Seite 11, 1995, © Disney: 104

DAS WUNDER IN DER TIEFSEE: Aus „Volcanos of the Deep Sea“, ein Giant Screen Motion Picture, produziert von der Stephen Low Company und der Rutgers University: 108/109; William Hixon & Dennis Searcy, University of Massachusetts: 109 o.; Karl O. Sletten & Reinhard Rachel/Universität Regensburg: 109 u.; D. Yorgerk M. Elend: 110; Pierre Mion/National Geographic Image Collection: 111 o. und m. u.; William Bond/National Geographic Image Collection: 111 m. u.; Jayne Doucette/WHOI: 111 u.; Michael Russell/University of Glasgow: 112 l. o.; Tom Kleindienst/WHOI: 112 r.; Peter Herzog/IFM-GEOMAR: 112 l. u.; Gary Hincks: 113; Hark Weidling: 124 u.

DER MIX MACHT S: Karl Lounatmaa/SPL/Agentur Focus: 126/127; David Schall/P. Arnold, Inc./Olapia: 128; Aus Hans G. Schlegel „Allgemeine Mikrobiologie“, 7. Auflage, 1992, Verlag Georg Thieme: 129

DIE ERFINDUNG DER LEICHE: Manfred und Christina Kage/Institut für wissenschaftliche Fotografie: 130/131; Michael Abbey/Photo Researchers, Inc.: 131; James M. Reil/Photo Researchers, Inc.: 132

DER KLIMA-SCHOCK: Tim Wehrmann, betreut durch Reinhard Schulz-Schaeffer/Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg: 134/135; Don Foley/National Geographic Image Collection: 136/137; Oliver Renner aus „Discoveries: Weather“ © 1998 Weldon Owen Pty Ltd: 137; Brown Reference Group: 138; Gary Hincks: 139

DER SCHATZ VOM BURGESS-PASS: Smithsonian Institution: 140, 141

VIERTAL WIE AUS DEM NICHTS: Chase Studio/Photo Researchers, Inc.: 142-152, 155; Smithsonian Institution: 154; Andreas Boock: 156/157

NETZER, BECKENBAUER UND DIE KAMBRISCHE RADIATION: Carl Barks aus Barks Library 33 „Donald Duck – Ferienarbeit“, Seite 15, 1998, © Disney: 159

ZEITLEISTE-GLOSSAR: Space-Graphics.com: 161; JPL/NASA: 162; Julie Mowbray/Alamy Images: 164

DAS SCHICKSAL DES BLAUEN PLANETEN: George Jacoby/WV/NV/NSF: 169

VORSCHAU: Andreas Isaras/Anatomic Travelogue: 170 o.; Hybrid/SPL/Agentur Focus: 170 u.

PLAKAT: Vorderseite: J. Carpenter, T. H. Jarrett & R. Hur/2 MASS: Hintergrundmotiv von l. o. nach r. u.: Chris Butler (2); J. Hester et al./Arizona State University, WFP2/HST/NASA: JPL/NASA (Bildbearbeitung GEO); Nora Nowatzyk; Chris Butler; G. Brad Lewis/SPL/Agentur Focus; Chris Butler; Ron Miller; Tasa Graphic Arts, Inc.; Keith Kent/SPL/Agentur Focus; James Balog/Getty Images; David Pierce/infopict

Rückseite: K. Zommer/plainpicture: Hintergrundmotiv, von l. o. nach r. u.: Gary Hincks; Chris Butler; Jörg Kühn; Eye of Science: Chris Butler; Karl Lounatmaa/SPL/Agentur Focus: Aus „Allgemeine Mikrobiologie“/Verlag Georg Thieme; Manfred und Christina Kage/Institut für wissenschaftliche Fotografie; Tim Wehrmann; Don Foley/National Geographic Image Collection; Chase Studio/Photo Researchers, Inc. (3)

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.

© GEO 2004, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

Einem Teil der Auflage liegen folgende Beilagen bei: GEO kompakt, GEO, GEO Shop und G+J Marktforschung



Unsichtbarer Beitrag. Sichtbarer Erfolg.

Unsichtbarer Beitrag – Als Partner vieler Industriezweige entwickeln und optimieren wir Lösungen gemeinsam mit unseren Kunden. So stellen wir uns weltweit den unterschiedlichsten Herausforderungen, aber meist hinter den Kulissen.

Sichtbarer Erfolg – Die Ergebnisse unseres Beitrags können sich sehen lassen. Mal sind es verbesserte Prozesse, mal höhere Qualitäten, mal niedrigere Kosten für unsere Kunden. Oder wie hier beispielsweise wichtige Zusätze für hoch belastbare Materialien und den Schutz wertvoller Bausubstanz. So tragen wir zum Erfolg unserer Kunden bei. Und zu mehr Lebensqualität für alle.

www.basf.de/more

 **BASF**

The Chemical Company

Urknall:
vor 13,7 Mrd.
Jahren

**Supernova-
Explosionen:**
seit 13,4 Mrd.
Jahren



Bei einer Sternexplosion wird innerhalb weniger Wochen und Monate mehr Energie frei, als unsere Sonne in Jahrtausenden abstrahlt

Sterne explodieren

... und Bausteine für neue Gestirne entstehen

Rund 300 Millionen Jahre nach dem Urknall bilden sich erste Galaxien. Extrem massereiche Sterne, die aufgrund ihrer gewaltigen Energieerzeugung nur eine kurze Lebensdauer haben, zerreißen schon bald wieder in gewaltigen Explosionen; sie enden als so genannte Supernovae. Ihre Kerne fallen in sich zusammen. Die äußeren Schichten der Himmelskörper werden ins All geschleudert. Diese „Sternenasche“, die eine Vielzahl von Elementen enthält und sich mit dem Wasserstoff und dem Helium des interstellaren Gases vermischt, wird zum Baumaterial für die nächste Generation von Sternen und für Planeten.

Sterne kollidieren ... und bringen u

Neben Milliarden Jahren auch die etwa 100 Milliarden Jahre, die die Schwerfeld einer an zusammen. In einige Eis, Gas und Sternen diese Materie unter schießen ins All, und hell erleuchten. Daru heute Sonne nennen

Die Sonne zündet

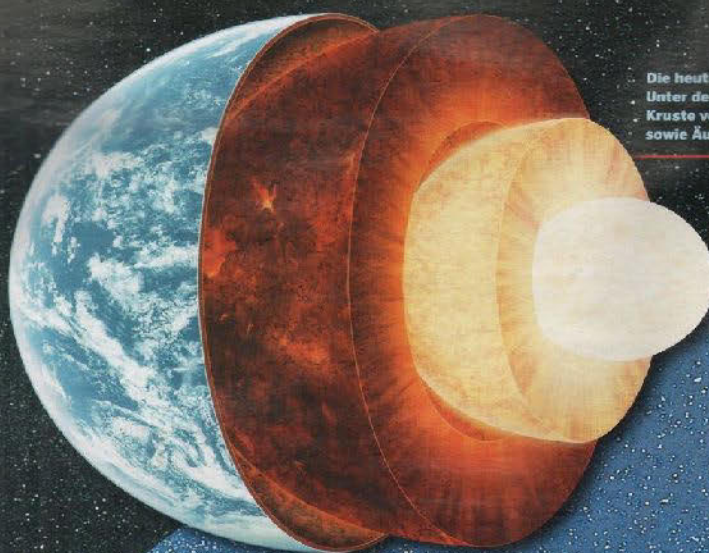
... und die Planeten des Sonnensystems werden geboren

In der Milchstraße ballen sich im Inneren einer Dunkelwolke Materiepartikel zu einem so genannten Wolkenkern. Dieses Gravitationszentrum zieht weitere Materie an, und eine „protoplanetare“ Scheibe formt sich, die um den Wolkenkern rotiert. Partikel reiben aneinander und heizen sich dadurch derart auf, dass erste Atomkerne verschmelzen: Die Proto-Sonne glüht auf. Die enorme Schwerkraft des Kerns zieht schließlich fast die gesamte Wolkenmasse in den Kern, nur ein kleiner Rest – bestehend aus Gas und Staub – kreist um das Zentrum. Die Partikel fallen gegeneinander, verschmelzen zu immer größeren Flocken, die schließlich zu Kleinplaneten (Planetesimalen) heranwachsen. Im Inneren der Proto-Sonne ist inzwischen derart viel Materie zusammengeballt, dass die Atomkerne des Wasserstoffs zu Helium verschmelzen: Die Sonne beginnt hell zu leuchten.



Auch heute noch entstehen – wie hier im Sternbild Schütze – in Dunkelwolken neue Sterne. Die Illustration (rechts) zeigt die protoplanetare Scheibe nach der Sonnenzündung

Die heutige Schalenstruktur der Erde:
Unter der nur 10 bis 70 Kilometer starken Kruste verborgen sich der Erdmantel sowie Äußerer und Innerer Kern



Die Schalenstruktur entsteht

... und hat in den Grundzügen bis heute Bestand

Kurz nach dem Einschlag, der den Mond hervorbringt, beginnt sich die glühende Erde in Schichten auszudifferenzieren: in eine dünne Kruste aus eher leichtem und einen Mantel aus schwerem Gestein sowie einen flüssigen Kern. 3,5 Milliarden Jahre später bildet sich ein fester Innerer sowie ein flüssiger Äußerer Kern. Die Erde ist keineswegs eine perfekte Kugel – nicht nur wegen der Gebirge, sondern auch wegen der ungleichmäßigen Verteilung verschieden dichter Gesteine im Erdinneren und der daraus resultierenden unterschiedlichen Stärke der Schwerkraft. Deshalb wird auch das Meerwasser unterschiedlich stark angezogen, in den Ozeanen entstehen Hügel und Täler. An den Polen ist unser Heimatplanet aufgrund der Rotation abgeplattet.

Scha
seit 4

Erdw
seit 4

Systeme ren

Unsere Sonne hervor

In anderen Galaxien entsteht vor ca. 5 Milliarden Jahren die Milchstraße – eine so genannte Spiralgalaxie aus Sternen und unzähligen Planeten. Als sie in das Zentrum einer anderen Galaxie gerät, stoßen Gas- und Staubmassen zusammen. In bestimmten Regionen bilden sich „Dunkelwolken“, in denen das Gas sehr dicht gepackt ist. Schließlich stürzt es unter seiner eigenen Schwerkraft zusammen. Gasfontänen entstehen, aus denen junge Sterne, die ihre Umgebung erhellen, entstehen. Jeder ist auch ein ganz gewöhnlicher Stern, den wir



Galaxien-crash:
vor ca. 5 Mrd. Jahren

Sonnenzündung:
vor 4,567 Mrd. Jahren

Gasfontänen schießen aus dem Zentrum der Milchstraße hervor, während in den Dunkelwolken viele neue Sterne geboren werden, wovon die rötlich gefärbten Gebiete rechts zeugen



So könnte die Proto-Erde ausgesehen haben: ein von Einschlägen zernarbter, glühend heißer Planet mit turbulenten Schmelzerumtönen

Schwere Elemente wie Eisen und Nickel beginnen ins Innere der Proto-Erde abzusinken, und ein zunächst flüssiger Kern entsteht. Eine erste Uratmosphäre besteht aus Wasserstoff und Helium, dem Urgas – doch der starke Sonnenwind pustet sie weg.

Proto-Erde:
vor ca. 4,56 Mrd. Jahren

Ein neuer Planet

... der später zur Erde werden wird

Einige der unzähligen Planetesimale wachsen durch Kollisionen und ziehen immer mehr Partikel und Materiekümpfen an – auf diese Weise entstehen nach und nach die Planeten unseres Sonnensystems. Darunter ist auch der Vorläufer der Erde: ein unscheinbarer, glühender Gesteinsbrocken von der Größe des heutigen Mars. Mehr als 600 Millionen Jahre ist diese Proto-Erde dem unablässigen Bombardement aufprallender Planetesimale ausgesetzt und wächst weiter.

Erd- und Mondentstehung:
vor ca. 4,5 Mrd. Jahren

Struktur:
4,5 Mrd. Jahren

Arme:
4,5 Mrd. Jahren



Zum Glück nur ein Streifschuss: Die Illustration (kleine Bilder rechts) zeigt, was nach dem Einschlag des marsgroßen Himmelskörpers mit der Proto-Erde geschehen ist

Der Einschlag

... der die Proto-Erde fast vernichtet

Fast wäre es um die Proto-Erde geschehen gewesen: Etwa 70 Millionen Jahre nach ihrer Entstehung trifft ein etwa marsgroßer Himmelskörper mit rund 36 000 km/h in spitzem Winkel auf den Erdvorläufer – ein Frontalaufprall hätte ihn zerfetzt. So aber sammeln sich ein großer Teil des Mantelgesteins und die Reste des Einschlagkörpers zu einer Materiewolke, die um die Erde rotiert. Aus der Wolke wird eine Scheibe, die darin kreisenden Partikel verklumpen und stürzen größtenteils auf den Planeten zurück. Der Rest vereint sich zu einem Gesteinsbrocken, der schließlich auf einer Umlaufbahn verbleibt: zum Mond. Zunächst kreist dieser Trabant in einer Höhe von nur 20 000 Kilometern um die Erde, setzt sich dann aber immer weiter ab, auf heute rund 384 400 Kilometer Distanz.



Die Geburt der Erde



Über die Hänge des Vulkans Kilauea auf Hawaii ergießt sich bei Mondlicht Lava – geschmolzenes Gestein, das aus großer Tiefe aufgestiegen ist.

Die Wärmemaschine

... läuft an und stülpt das Oberste zuunterst

Die Energie aus der Tiefe des heißen Planeten lässt die Erdkruste und den obersten Erdmantel nicht zur Ruhe kommen. Die aufsteigende Hitze entlädt sich durch Vulkanschlote und lässt die Erde seismisch erzittern, erstarrtes Magma aus dem Erdinneren türmt sich zu Gebirgen auf. Es kommt zu so genannten Konvektionsbewegungen: Wo das Mantelgestein besonders stark erhitzt wird, dehnt es sich aus, wird dadurch leichter als die Umgebung und drängt nach oben; kühleres Gestein sinkt hingegen ins Erdinnere. Die globale Wärmemaschine ist – energetisch versorgt vom noch immer heißen Erdkern wie auch durch radioaktiven Zerfall – noch heute in Gang: Sie zieht die großen Platten, in welche die äußerste Schale zerbrochen ist, in die Tiefe, lässt sie schmelzen und wieder aufsteigen.

Erdkruste:
vor 4,4 Mrd. Jahren



Sowohl sich die Kruste verfestigt, brechen immer wieder Magmaströme aus der Tiefe empor und lassen die Erdoberfläche wie vernarbt erscheinen.

Eine feste Kruste

... hüllt die Erde ein

Die Erdoberfläche kühlt langsam ab. Das aufgeschmolzene Gestein kristallisiert nach und nach zu einer nunmehr dauerhaften Kruste. Doch noch reißt sie an vielen Stellen auf, und Teile von ihr treiben auf der wallenden Glut. Gleichzeitig quellen Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff aus dem Erdinneren und bilden eine zweite Uratmosphäre, festgehalten von der Anziehungskraft der Erde. Die Gravitation des Mondes hingegen ist zu schwach, Gase an den Erdtrabanten zu binden.

Das erste Festland

... taucht auf und bildet Kontinente

Die äußere Schale der Erde ist in einzelne Teile zerbrochen. Am Meeresgrund aufgeschmolzenes Gestein formt sich zu Platten, die langsam abkühlen, emporsteigen, miteinander verschmelzen, sich verhaken und an anderer Stelle wieder auseinander reißen. Im Laufe der Erdentwicklung formen sich die Landmassen alle 500 bis 700 Millionen Jahre zu Großkontinenten. Heute bilden sieben größere und zahlreiche kleinere Platten die Schale unseres Planeten. In sie eingebettet sind: ein Kontinent oder ein Stück Meeresboden – oder beides. Die Platten schwimmen auf dem plastischen Teil des Erdmantels und gleiten auf ihm wie Flöße. Dort, wo sie aneinander stoßen, kommt es zu Erdbeben, es entstehen Vulkane und neue Gebirgskzüge.



Unter Kalifornien gleiten die Pazifische und die Nordamerikanische Platte aneinander vorbei: Dort ist die San-Andreas-Verwerfung entstanden. Beim Erdbeben von 1906 in der Region San Francisco verschoben sich die Platten ruckartig um sechs Meter.



Kontinentaldrift – dargestellt an einem Beispiel aus jüngerer Erdgeschichte: Vor 200 Millionen Jahren (ganz oben) sind alle Landmassen noch in dem Superkontinent Pangaea vereinigt. Der zerbricht in zwei Teile, schon vor 100 Millionen Jahren sind die heutigen Kontinente zu erkennen. In der Folgezeit bewegen sie sich voneinander weg – bis zu ihrer gegenwärtigen Lage.

Urozean:
vor 4,2 Mrd. Jahren

Das Magnetfeld der Erde ist wirksam gegen den so genannten Sonnenwind. Am stärksten ist es an den Polregionen – am schwächsten – Polarität.

Der Urozean

Vor rund fünf Milliarden Jahren ist das Sonnensystem entstanden. Eine Milliarde Jahre später kreisen Erde und Mond um die Sonne, ein Urozean hat sich gebildet, und ein Magnetfeld umspannt den jungen Planeten



So könnte es auf der Erde ausgesehen haben, als der Urozean entstanden ist: Blitze am Himmel und gewaltige Regenfälle sowie Vulkane, die aus dem Meer ragen und Gase ausstoßen

Der Urozean

... fällt vom Himmel und bedeckt die ganze Erde

Die Erdoberfläche hat sich auf weniger als 100 Grad Celsius abgekühlt. Der Wasserdampf in der zweiten Uratmosphäre stammt von Himmelskörpern, die auf die Erde geprallt sind, oder ist von Vulkanen ausgestoßen worden. Sintflutartige Regenfälle stürzen nun auf die Erde. Anfangs verdunsten die Tropfen noch im Fallen, doch nach einiger Zeit bilden sich heiße Pfützen, und schließlich steigt das Wasser überall gleichmäßig an, bis es den gesamten Globus bedeckt. Nur Vulkane ragen als Inseln aus dem Meer. Leben existiert im Urozean anfangs nicht, es ist ein totes, vermutlich aber schon salzhaltiges Meer.

Der Kreislauf der Gesteine

... beginnt und hält bis heute an

Nicht lange, nachdem die Erdkruste erkaltet ist, kommt ein bis heute andauernder Recycling-Prozess in Gang: Die Gesteine an der Erdoberfläche werden erodiert und lagern sich als Sedimente zunächst locker ab, etwa auf dem Meeresboden. Von immer mehr Material bedeckt, erhärten sie unter Druck – und tauchen schließlich ins Erdinnere ab. In zunehmender Tiefe und bei höherer Temperatur verwandeln sie sich in so genannte „metamorphe“ Gesteine. Geraten sie noch tiefer, beginnen sie zu schmelzen. Diese Schmelzen erstarren zu „magmatischem“ Gestein und geraten irgendwann wieder an die Erdoberfläche. Dort beginnt der Recycling-Prozess dann von neuem.

Plattentektonik:
seit mehr als 4 Mrd. Jahren

Gesteinskreislauf:
seit 4 Mrd. Jahren



Sandstein, wie hier in Arizona, ist aus mineralischen Körnern zusammengesetzt, die von Wasser oder Wind abgelagert wurden

Schützt den Planeten
vor den »Sonnenwind«
der Schutzschild
ist die Folge



Das Magnetfeld der Erde

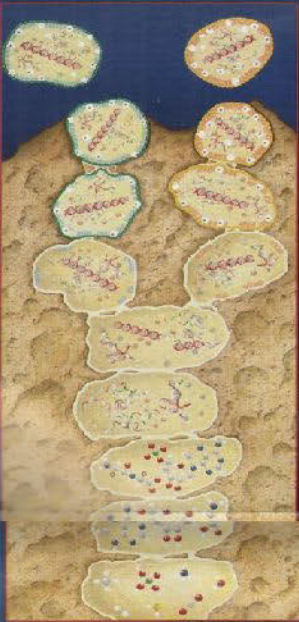
... bildet einen lebensfreundlichen Schutzschirm

Funde von magnetisiertem Gestein zeigen, dass vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren bereits ein Magnetfeld existiert. Später dann, seit etwa einer Milliarde Jahren, arbeitet im Inneren der Erde ein gigantischer Dynamo, der ein weitaus stärkeres Magnetfeld erzeugt, das sich um den Planeten spannt. Dieses schirmt vor allem den so genannten „Sonnenwind“ ab und begünstigt so die Entwicklung höheren Lebens. Der Dynamo funktioniert, indem Ströme aus flüssigem Eisen ständig um den festen Erdkern zirkulieren. Dabei wandelt sich Wärmeenergie in elektrische Energie um. Allerdings ist das Magnetfeld der Erde nicht stabil, sondern es schwankt. Manchmal können sich der nördliche und südliche Magnetpol sogar umpolen.

Magnetismus:
seit mehr als 3,5 Mrd.
Jahren

Lebensentstehung:
vor mehr als 3,5 Mrd.
Jahren

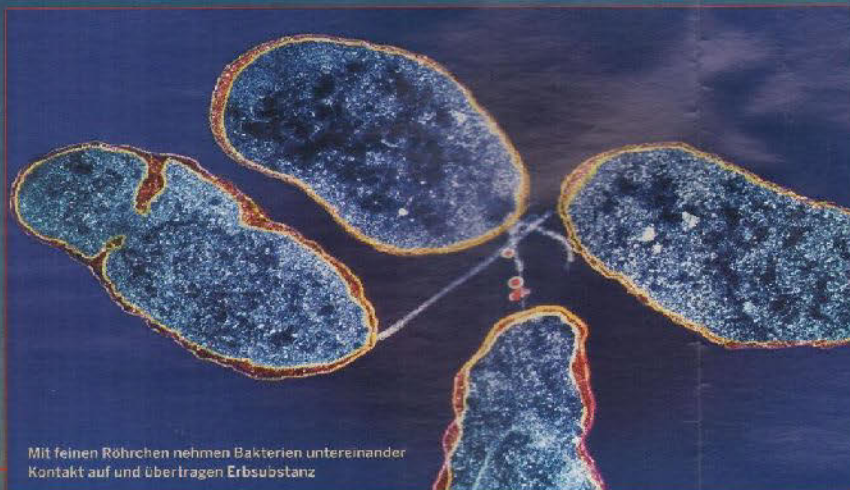
In den Wänden von »Schwarzen Rauchern«
am Meeresboden (rechts) haben sich
einer Theorie zufolge die ersten Bakterien
gebildet (unten)



Die ersten Lebensformen

... siedeln auf dem Grund der Ozeane

Die so genannten »Black Smoker«, schornsteinartige Gebilde am Grunde der Tiefsee, stoßen heiße Wasser aus dem Erdinneren aus, die mit reaktionsfreudigen Gasen und Mineralen angereichert sind. In den Wänden dieser Schwarzen Raucher entstehen, so eine Theorie, die frühesten Formen des Lebens. Der Prozess läuft möglicherweise folgendermaßen ab: Das angereicherte Wasser strömt durch die Schloten, und es bilden sich zunächst einfache organische Substanzen wie etwa Zucker, Aminosäuren und Nukleinsäurebasen – die Grundbausteine des Lebens. Daraus gehen infolge noch nicht vollständig geklärter chemisch-biologischer Vorgänge längere Molekülketten wie etwa Eiweiße und die Informationsspeicher RNS und DNA hervor. Schließlich formen sich Membranen und Zellwände. Es entstehen komplizierte Zellen, die sich von den Schlotwänden ablösen – die ersten Bakterien und Archaeobakterien.



Mit feinen Röhrchen nehmen Bakterien untereinander
Kontakt auf und übertragen Erbsubstanz

Die geschlechtliche Fortpflanzung

... verbessert die Überlebenschancen

Bakterien vermehren sich ungeschlechtlich. Dennoch können einige sich mit dünnen Auswüchsen an die Oberfläche anderer Bakterien heften und genetisches Material übertragen. Diese »Konjugation« (siehe mikroskopische Aufnahme oben) gilt als eine Vorform der Sexualität. Indem das Erbgut von Generation zu Generation neu kombiniert wird, erhöht sich die genetische Vielfalt. Dadurch können sich Lebewesen besser an veränderte Umweltbedingungen anpassen. In einem nächsten evolutionären Schritt entwickeln Organismen spezielle Fortpflanzungszellen – die Keimzellen. Schließlich spalten sie sich in zwei Geschlechter auf: Die einen bilden große unbewegliche Keimzellen aus, die Eizellen; die anderen erzeugen kleine bewegliche, die Spermien.

Vielzeller:
vor 1,5 Mrd. Jahren

Der Zellkern

... schützt das Erbgut

Wie sich in den Eukaryoten, die bislang noch ausschließlich die Erde bevölkern, die doppelte Hülle des Zellkerns entwickelt hat, ist noch ungeklärt. Bekannt ist nur, dass bei einem Teil der Organismen (den »Eukaryoten«) das Erbgut von diesem Zeitpunkt an in einem Kern geschützt ist. Dieser Schutz und andere Mechanismen gewährleisten, dass bei der Zellverdoppelung das Erbgut korrekt aufgeteilt wird – eine wesentliche Voraussetzung für die sich später entwickelnde sexuelle Fortpflanzung.



Bakterien haben
keinen Zellkern



In »Membranstapel« (grün) betreiben Schwefelpurpurbakterien Photosynthese

Die Photosynthese entsteht

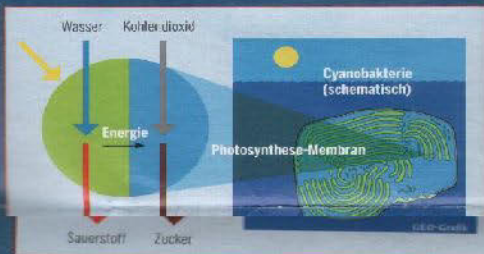
... aber es fällt noch kein Sauerstoff an

Schwefelpurpurbakterien im Meer sind die ersten Organismen, die eine frühe Form der Photosynthese betreiben – allerdings ohne dabei Sauerstoff abzugeben. Sie wandeln Lichtenergie in chemische Energie um. Die dafür benötigten Elektronen entnehmen sie – anders als spätere Bakterien und Pflanzen – nicht dem Wasser, sondern Schwefelverbindungen. Dementsprechend produzieren sie keinen Sauerstoff, sondern Schwefel und Sulfat.

Erste Schwefelbakterien:
vor 3,2 Mrd. Jahren



Zur Photosynthese fähige Cyanobakterien bauen in flachem Wasser Stromatolithen auf – Deckensteine, die vor allem aus Bakterienkolonien und Kalkablagerungen bestehen



Das Prinzip Photosynthese: Aus Wasser und Kohlendioxid entsteht mithilfe der Sonnenenergie Zucker – und als »Abfallprodukte« Sauerstoff

Sauerstoff:
vor mehr als 2,5 Mrd. Jahren

Zellkern:
vor 2,1 Mrd. Jahren



... keinen Zellkern, die so genannt...
... schützen ihr Erbgut hingegen in...
... mit Doppelmembran

Sauerstoff wird erzeugt ... und ändert die Lebensbedingungen

Cyanobakterien produzieren mithilfe der Photosynthese erstmals Sauerstoff. Anfangs steigt das Gas nicht aus dem Meer auf, weil es mit im Wasser gelösten Eisenionen und Schwefelverbindungen reagiert. Eisenminerale und Sulfate werden dadurch ausgefällt und sinken zu Boden. So entstehen im Laufe von Jahrtausenden Schichten aus Eisenerz, die heute als Rohstoff genutzt werden. Als aber immer mehr Sauerstoff produziert wird, beginnt das Gas vor rund 2,3 Milliarden Jahren in die Uratmosphäre aufzusteigen. Ein Teil davon wird von der energiereichen UV-Strahlung der Sonne gespalten, und Ozon entsteht – ein Gas, das später die Entwicklung des Lebens an Land vor der ultravioletten Sonnenstrahlung schützt.

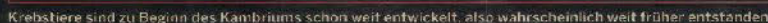
Das Leben entsteht



... und bezahlen dafür mit dem Tod

... besiedeln den Grund der Ozeane

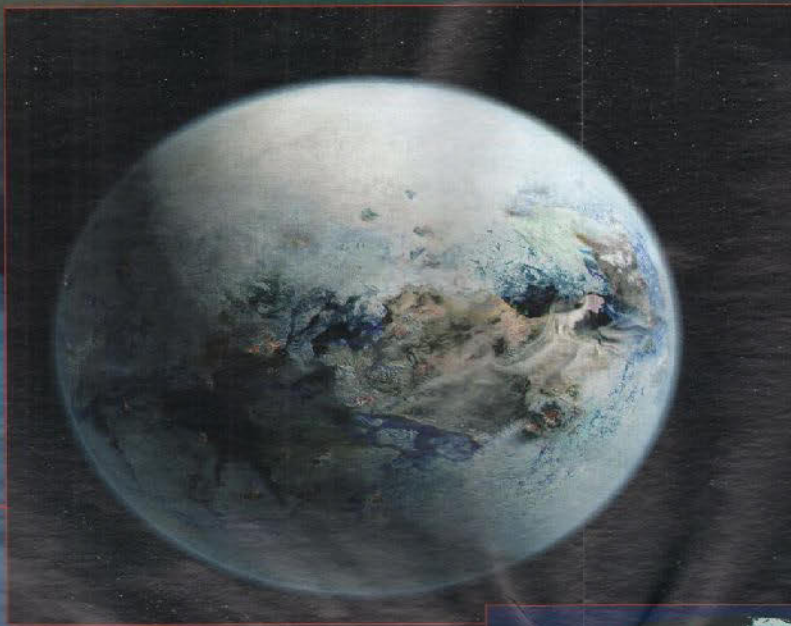
Neben den Ediacara-Wesen bevölkern auch Quallen vor 600 Millionen Jahren die Meere



... und die Artenvielfalt wächst sehr rasch

Die Zeitangaben auf dem Zeitstrahl sind nicht maßstabsgemäß

Aus einfachen chemischen Verbindungen entwickeln sich Bakterien – und seit etwa 580 Millionen Jahren bevölkern komplexe Lebewesen die Erde



Eisplanet:
vor 750 Mio.
Jahren

So könnte die fast völlig vereiste Erde aus dem All ausgesehen haben (oben). Heute spielen globale Meeresströme eine wichtige Rolle für das Klima (rechts).

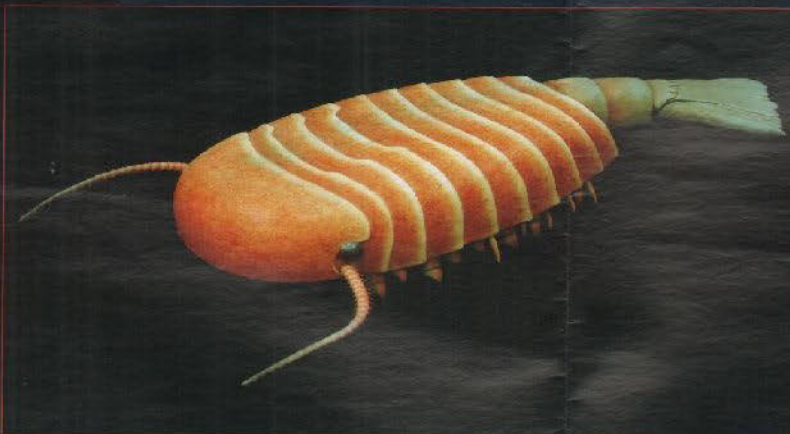


Die Erde vereist

... und dennoch erhält sich das frühe Leben

Für 170 Millionen Jahre ist die Erde mehrmals von einer dicken Eisschicht eingehüllt und zieht als gleißender Schneeball durchs All – wie schon früher in ihrer Geschichte. Selbst Australien ist vereist, und nur in Äquaturnähe gibt es noch einige offene Wasserflächen. Doch schließlich brennen sich Vulkane durch das Eis, blasen gewaltige Mengen Kohlendioxid in die Luft und lösen damit einen Treibhauseffekt aus, der das Eis in kurzer Zeit schmelzen lässt. Wasserdampf steigt aus den Ozeanen auf und verstärkt die Erwärmung. Vor etwa 580 Millionen Jahren erhöht sich die globale Temperatur von minus 50 Grad Celsius auf plus 50 Grad. Doch das frühe Leben übersteht diese Extreme.

Ediacara-Wesen:
vor 600 Mio.
Jahren



Beginn des Kambriums:
vor 542 Mio. Jahren

Ende des Kambriums:
vor 488 Mio. Jahren

Dieser 5 bis 13 Zentimeter lange, am Boden lebende Gliederfüßer jagt Krebstiere.

MAN BESCHLIESST NICHT,
HERAUSRAGEND ZU WERDEN, SONDERN
HERAUSRAGENDES
ZU LEISTEN.



29. Mai 1953, 11:30 Uhr. Sir Edmund Hillary und Sherpa Tenzing Norgay standen als erste Menschen auf dem Gipfel des Mount Everest. Aber die Spitze des Berges war erst der Anfang von Sir Edmunds Weg. Mehr als ein halbes Jahrhundert später hat sein ewiges Streben nach Herausforderungen zu der Erbauung von 27 Schulen, zwei Krankenhäusern, medizinischen Kliniken, Brücken und Süßwasserleitungen für die Menschen in Nepal geführt. Er mag seinen Fußabdruck nur auf einem Berg hinterlassen haben, aber die Welt hat er unauslöschlich geprägt. Das beweist nur wieder, dass

teigen.



OYSTER PERPETUAL EXPLORER II · WWW.ROLEX.COM
Rolex Deutschland GmbH, Postfach 10 30 41, 50470 Köln


ROLEX