

HARALD LESCH/JÖRN MÜLLER
Kosmologie für Fußgänger



GOLDMANN

Lesen erleben

Buch

Ein Spaziergang durchs Universum: Wenn Harald Lesch und Jörn Müller auf höchst unterhaltsame Weise die elementaren Vorgänge und Erscheinungen im Kosmos auf das Wesentliche reduziert erklären, werden auch komplexe astrophysikalische Zusammenhänge für den interessierten Laien anschaulich und verständlich.

Fragen und Probleme aus dem gesamten Spektrum der Astronomie stehen im Mittelpunkt dieser Einführung in die Materie. Alles Wissenswerte an Fakten und Zusammenhängen über unsere Erde, den Mond, die Sonne, unser Sonnensystem und die Sterne präsentieren die Autoren hier locker in allgemein verständlicher Sprache und mit spannenden Abbildungen. Sie erläutern nicht nur, was es mit den mysteriösen Schwarzen Löchern auf sich hat, sondern widmen sich in einem Kapitel auch den Verfahren zur astronomischen Entfernungsbestimmung. Ein faszinierender Streifzug durchs Universum für alle, die gerne mal über den Tellerrand hinausschauen. Für die Neuauflage haben die Autoren den Text nach neuestem wissenschaftlichen Kenntnisstand aktualisiert und durch viele neue Farbfotos ergänzt.

Autoren

Harald Lesch ist Professor für Theoretische Astrophysik am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität München, Fachgutachter für Astrophysik bei der DFG und Mitglied der Astronomischen Gesellschaft. Seine Sendereihe »alpha-Centauri«, die vom Bayerischen Rundfunk ausgestrahlt wurde, erreichte fast Kultstatus. Einem breiten Publikum ist er als Moderator der ZDF-Reihe »Abenteuer Forschung« bekannt. Für seine Verdienste um die Popularisierung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse wurde er vielfach ausgezeichnet, u. a. mit dem Communicator-Preis des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft und der Medaille für naturwissenschaftliche Publizistik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Jörn Müller hat auf dem Gebiet Festkörperphysik promoviert und ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität München tätig. Zusammen mit Harald Lesch hat er mehrere Sachbücher zum Thema Kosmologie veröffentlicht.

Im Goldmann Verlag ist von Harald Lesch
und Jörn Müller außerdem erschienen:

Big Bang, zweiter Akt
Kosmologie für helle Köpfe
Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt

Harald Lesch
und Jörn Müller

Kosmologie
für Fußgänger

Eine Reise
durch das Universum

Aktualisierte und erweiterte Neuausgabe

GOLDMANN

 Dieses Buch ist auch als E-Book erhältlich.



Verlagsgruppe Random House FSC® N001967
Das FSC®-zertifizierte Papier *Profibulk* von Sappi
für dieses Buch liefert Igepa 2-H-Papier.

1. Auflage

Aktualisierte und erweiterte Neuauflage September 2014

Wilhelm Goldmann Verlag, München,

in der Verlagsgruppe Random House GmbH

Umschlaggestaltung: UNO Werbeagentur, München

Umschlagfoto: © NASA/JPL/RPIF/DLR

Redaktion: Eckard Schuster

KF · Herstellung: Str.

Satz: Uhl + Massopust, Aalen

Druck und Einband: Těšínská tiskárna, a.s., Český Těšín

Printed in Czech Republic

ISBN: 978-3-442-15817-1

www.goldmann-verlag.de

Besuchen Sie den Goldmann Verlag im Netz



Inhalt

Vorwort	7
Die Erde	11
Der Mond	43
Die Sonne	81
Das Sonnensystem	117
Was ist ein Stern?	157
Kosmologie für Fußgänger	177
Schwarze Löcher	219
Entfernungsbestimmung im Universum	253
Extrasolare Planeten	293
Epilog	311
Dank	313
Bildnachweis	314
Register	317

Vorwort

»Der Weltraum, unendliche Weiten« – mit diesen Worten beginnen die Folgen der Serie *Raumschiff Enterprise*. In der Tat: Können wir uns die ungeheuren Entfernungen, mit denen wir in der Astronomie konfrontiert werden, vorstellen? Können wir ein Gefühl entwickeln für die enorme Zeitspanne von der Entstehung des Universums bis heute – gemessen an unserem relativ kurzen, bestenfalls 100 Jahre währenden Leben? Wer kann die gewaltige Energie einschätzen, die beispielsweise bei einer Supernova frei wird? Auch für Astronomen sind das meist Zahlen, deren Dimension sich jeglichem Vorstellungsvermögen entzieht. Der an Astronomie interessierte Laie sieht sich darüber hinaus mit einer Menge weiterer Verständnisprobleme konfrontiert. Dazu gehören Fragen wie: Was verbirgt sich hinter Schlagworten wie »Nukleosynthese«, »Schwarzes Loch« oder »Dunkle Materie«? Warum leben Sterne unterschiedlicher Masse unterschiedlich lang? Oder: Wie ist das Universum entstanden, wie hat es sich entwickelt? Wer darauf nur oberflächliche oder aber mit Fachchinesisch gespickte Antworten erhält, verliert rasch die Lust auf Astronomie.

Im Jahr 1998 startete der Bayerische Rundfunk in seinem Bildungsprogramm BR-alpha die Sendereihe *alpha-Centauri* mit dem Astrophysiker Harald Lesch. Ziel der Vortragsreihe war es, die elementaren Vorgänge und Erscheinungen im Universum auf das Wesentliche reduziert zu erklären und komplexe astrophysikalische Zusammenhänge zu veranschaulichen. Die erste Folge

der jeweils 15 Minuten langen Beiträge war der Frage gewidmet: »Warum betreiben wir Astronomie?« Als die Reihe 2007 beendet wurde, waren 215 Folgen ausgestrahlt worden. Die einzelnen Beiträge werden regelmäßig im Fernsehen wiederholt und sind via Internet bei BR-alpha abrufbar.

Drei Jahre nach der ersten Ausstrahlung erschien im Goldmann Verlag das Buch zur Sendereihe: *Kosmologie für Fußgänger*. Die Autoren Harald Lesch und Jörn Müller machten es sich darin zur Aufgabe, ausgewählte Folgen von *alpha-Centauri* in voneinander unabhängigen Kapiteln zusammenzufassen und inhaltlich zu vertiefen. Es sollte eine Orientierungshilfe sein für all diejenigen, die sich – vielleicht nach einem Blick zu den Sternen des nächtlichen Himmels – erstmals für »das da draußen« interessieren. Seither hat *Kosmologie für Fußgänger* neun Auflagen erlebt, und die Nachfrage hält unvermindert an.

Doch es war nicht zu übersehen: Das Buch hatte im Laufe der Zeit etwas Staub angesetzt. Die Wissenschaft bleibt nun mal nicht stehen! Gerade in den letzten Jahren hat man auf dem Gebiet der Astronomie viele neue Erkenntnisse gewonnen. Insbesondere die Entwicklung immer größerer und lichtempfindlicher, erdgebundener wie satellitengestützter Teleskope hat bahnbrechende Beobachtungen in nahezu allen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums ermöglicht. Stellvertretend sei hier die Entdeckung Tausender Planeten um andere Sonnen angeführt. Anhand von Computersimulationen kann man heute verstehen, wie Sterne entstehen, wie sie sich entwickeln und was bei ihrem Ableben geschieht. Im März 2013 hat die European Space Agency (ESA) die Daten der vom Planck-Weltraumteleskop mit höchster Präzision erneut vermessenen kosmischen Hintergrundstrahlung bekannt gegeben. Diese Strahlung gibt unter anderem Auskunft über Alter und Zusammensetzung unseres Universums sowie über die Geschwindigkeit, mit der es sich ausdehnt.

Aufgrund der neuen Erkenntnisse muss die Astronomie ihr Bild vom Universum in einigen Punkten korrigieren. Das betrifft natürlich auch die *Kosmologie für Fußgänger*. Der Text wurde deshalb auf den aktuellen Wissensstand gebracht, und das Buch ist nun durchgehend farbig bebildert.

In der Hoffnung, dass diese aktualisierte Neuauflage von *Kosmologie für Fußgänger* den Neugierigen den Einstieg in die Welt der Astronomie auch künftig kompetent erleichtert, wünschen wir viel Spaß beim Lesen.

Harald Lesch und Jörn Müller,
Sommer 2014

Die Erde

*Gaia! Dich Allmutter werd' ich besingen,
dich alte festgegründete Nährerin
aller irdischen Wesen.*

*Was die göttliche Erde begeht und was in den Meeren,
was in den Lüften sich regt,
genießen deine Fülle und Gnade.*

*Du hast Gewalt,
den sterblichen Menschen zu geben und zu nehmen.*

Homer

Bildet man die 4,6 Milliarden Jahre lange Geschichte unseres Planeten auf ein Jahr ab, so sind gerade einmal 17 Sekunden vergangen, seit der griechische Dichter Homer vor über 2500 Jahren der Erde als einer Göttin huldigte. Gaia, die Erde – das war die allmächtige Mutter, die beschützt und ernährt, der wir alles zu verdanken haben. Noch heute feiern wir im christlichen Kulturkreis einmal im Jahr Erntedank. In den Erdwissenschaften, der Geologie, der Geografie und der Geophysik, hat sich der Name Gaia bis heute erhalten. Aber Menschen erleben die Erde auch als gewalttätig und erbarmungslos, wenn Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Fluten und Stürme über sie hereinbrechen. Trotz allen technischen Fortschritts – wenn der Urgrund aller Dinge sich auftut, der Boden unter unseren Füßen sich schüttelt oder der Himmel über uns seine Schleusen aufreißt – sind auch wir modernen Menschen den Naturgewalten hilflos ausgesetzt. Kaum eine Kultur hat deshalb die Erde nur verehrt und bewundert. Man hat sie immer auch gefürchtet.

Diesem Materieklumpen, der mit über 100 000 Kilometern pro Stunde um die Sonne rast, verdanken wir unser Dasein. Wir sind die Erde. Unsere Knochen sind gebildet aus den Mineralien ihrer Gesteine, wir atmen ihre Luft, und wir bestehen zu großen Teilen aus ihrem Wasser. Was für ein Planet, der eine solche Vielfalt an Leben hervorgebracht hat! Für uns Erdlinge ist diese Lebensvielfalt der Normalfall. Doch auch in den eher lebensfeind-

lichen Nischen unseres Planeten, auf über 8000 Meter hohen Bergen, in Wüsten mit Spitzentemperaturen von über 70 Grad Celsius oder in den Polarregionen, den Gebieten des ewigen Eises mit Temperaturen um minus 50 Grad, hat sich Lebendiges angesiedelt. Auf die Spitze aber treiben es die Organismen tief im Meer, in der unmittelbaren Nachbarschaft von Vulkanschloten, den sogenannten *Black Smokers*, aus denen etliche hundert Grad heißes, mit Gasen und Mineralien gesättigtes Wasser austritt. Dort leben Einzeller ganz ohne Licht und Sauerstoff. Das Leben ist überall auf unserer Erdkugel. Möglicherweise »verdampft« unser Planet sogar Bakterien, die aus den höchsten Schichten der Atmosphäre in den Weltraum verschwinden.

Nun, was wissen wir denn von dem Boden, auf dem wir stehen, vom Wasser, das wir trinken, von der Luft, die wir atmen? Woher kommen die Bestandteile des Planeten? Wie entstand er denn, unser Planet? War er schon immer so? Nein, er war vielmehr – also, eigentlich war er ... Ach was, bevor wir uns zu kurz fassen, erzählen wir lieber die ganze Geschichte (Abb. 1).

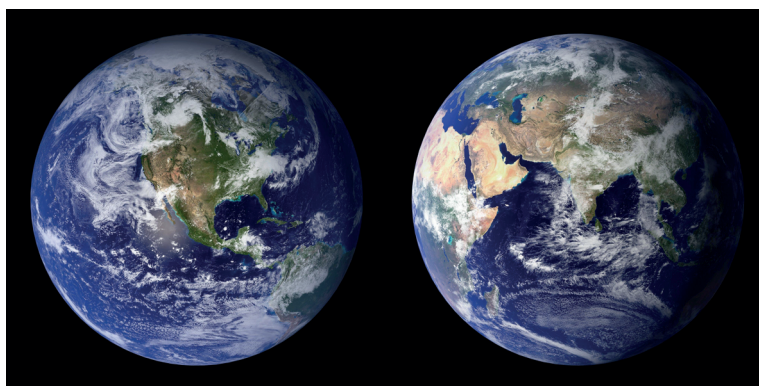


Abb. 1: Der Blaue Planet. Blick auf die westliche (links) und die östliche Hemisphäre der Erde.

Die Geburt der Erde

Wir wissen: Die Sonne, die Erde und die anderen sieben Planeten – ja sieben, da Pluto 2006 zum Zwergplaneten degradiert wurde – entstanden alle zur gleichen Zeit vor rund 4,6 Milliarden Jahren. Entsprechend dem heutigen Stand der Forschung begann die Geschichte der Erde mit der gewaltigen Explosion eines massereichen Sterns, einer sogenannten Supernova. Woher man das weiß? Vom Studium der Meteoriten, die bei der Entstehung des Sonnensystems übrig blieben. Besondere Bedeutung kommt hier der Untersuchung von Isotopen zu. Von was? Na, von Isotopen eben. Ach, Sie wissen nicht, was das ist? Also gut, machen wir einen Abstecher in die Kernphysik. Will man nämlich verstehen, was sich aus diesen uralten Meteoritengesteinen ablesen lässt, muss man wissen, wie Atomkerne aufgebaut sind und wie sie zerfallen.

Atome bestehen aus einem Atomkern und negativ geladenen Elektronen, die den Kern umkreisen. Jedes chemische Element – zum Beispiel Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Eisen usw. – verfügt über eine bestimmte Anzahl von Elektronen. Da Atome nach außen elektrisch neutral sind, muss der Atomkern selbst eine positive Ladung haben, die der Summe der negativen Ladungen aller Elektronen im Atom entspricht. Der winzige Atomkern seinerseits besteht aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen, also ungeladenen Neutronen. Könnte man beispielsweise ein Atom so stark vergrößern, dass dessen Elektronen auf den äußersten Rängen des Münchner Olympiastadions kreisen würden, dann wäre der Atomkern so groß wie ein Reiskorn am Anstoßpunkt im Mittelkreis – so ein Atom ist also ziemlich leer.

Zurück zu den Elementen. Wie gesagt: Jedes Element hat eine genau festgelegte Zahl an Protonen und Elektronen. So verfügt

Sauerstoff über acht Protonen im Kern und acht Elektronen, die den Kern auf verschiedenen Bahnen umkreisen. Normalerweise sind auch acht Neutronen im Kern, die dem Atom zwar eine größere Masse verleihen, aber an der elektrischen Ladung des Kerns nichts ändern. Ab und zu gibt es aber auch Sauerstoffkerne mit neun oder zehn Neutronen. Diese Abarten bezeichnet man als Isotope des Sauerstoffs. Die Isotope unterscheiden sich vom »normalen« Element nur durch ihre Masse, jedoch nicht in ihren chemischen Eigenschaften. Der »normale« Sauerstoff mit acht Neutronen im Kern wird mit dem Symbol ^{16}O (im folgenden Text immer O-16 geschrieben) gekennzeichnet, wobei die vor- beziehungsweise nachgestellte Zahl 16, die sogenannte Massenzahl, die Summe von Protonen und Neutronen angibt. Die massereicheren Isotope des Sauerstoffs mit einem oder zwei zusätzlichen Kernneutronen haben demnach die Bezeichnungen O-17 beziehungsweise O-18.

Im Allgemeinen findet man im Wasser der Ozeane pro 2600 O-16-Atomen je ein Atom O-17 und fünf Atome O-18. Untersuchungen an primitiven Meteoriten, sogenannten kohligen Chondriten, die als kleinteilige Überreste bei der Entstehung des Sonnensystems zeitgleich mit den Planeten aus derselben Gas- und Staubscheibe auskondensierten, zeigen jedoch ein anderes Bild. Da sich diese Körper seit ihrer Entstehung immer im kalten Weltraum aufgehalten haben, geht man davon aus, dass sich ihre ursprüngliche Zusammensetzung bis heute unverändert erhalten hat. In Einschlüssen dieser Meteoriten hat man nun Sauerstoff gefunden, der ausschließlich aus O-16-Atomen besteht. Für diesen Befund gibt es keine chemische Erklärung, weil wie gesagt alle Isotope das gleiche chemische Verhalten aufweisen. Erklären lässt sich das nur mit der Explosion einer Supernova, denn nur bei einer solchen entsteht reines O-16 ohne Beimischung anderer Sauerstoffisotope.

Da in unserer Milchstraße pro Jahrhundert etwa drei Super-

novae explodieren, ist das zunächst keine Überraschung. Irgend- ein massereicher Stern, der irgendwann explodierte, war der Ursprungsort des Meteoritenmaterials. Wir kennen zwar nicht den Stern, der für den Sauerstoff in den Meteoriten verantwortlich war, denn der hinterlässt, wenn überhaupt, nur einen sehr kleinen, ungefähr zehn Kilometer großen sogenannten Neutronenstern, der von einer sich rasend schnell ausdehnenden Gaswolke umgeben und nur für einige Millionen Jahre beobachtbar ist. Davon an anderer Stelle mehr. Aber wir wissen, dass der Stern mindestens 25 Sonnenmassen gehabt haben muss, da nur derart massereiche Sterne ausreichende Mengen an O-16 hervorbringen. Und wir wissen ebenfalls, wie lange vor der Entstehung des Sonnensystems dieser Stern explodiert ist: nur einige hunderttausend Jahre zuvor!

Woher wir das wissen? Ebenfalls von Isotopen, diesmal von Isotopen der Elemente Aluminium und Magnesium. Magnesium hat normalerweise 12 Protonen und 12 Neutronen im Kern. Viel seltener ist das Isotop Mg-26 mit 14 Neutronen. In etlichen Meteoriten fand man mehr Mg-26 als erwartet. Der Überschuss könnte vom radioaktiven Zerfall des Aluminiumisotops Al-26 herrühren, das nur bei einer Supernovaexplosion entstehen kann und mit einer Halbwertszeit von rund 720 000 Jahren zu Mg-26 zerfällt. Damit ergibt sich als theoretisches Modell folgendes Bild: Weniger als 100 000 Jahre vor der Entstehung des Sonnensystems fand in der Nähe eine Supernova statt, bei der Staubteilchen, die Al-26 enthielten, in die Gaswolke, aus der später das Sonnensystem hervorging, hineingeschleudert wurden. Das Aluminium wurde eingeschlossen in mineralische Gesteinsklümpchen, die sich zu kleinen Asteroiden vereinigten, und zerfiel dort zu Magnesium. Irgendwann prallte dann einer dieser Asteroiden mit einem anderen zusammen und zerbrach. 1969 fiel eines dieser Bruchstücke, der berühmte Allende-Meteorit, auf die Erde und damit Wissenschaftlern in

die Hände, die dem außerirdischen Stein diese Geschichte entlocken konnten.

Tja, so ist das mit der Astrophysik – winzige Atomkerne können eine wahrlich kosmische Geschichte erzählen, weil die Naturgesetze im Universum überall dieselben sind. Für einen Sauerstoff- oder einen Aluminiumkern gelten die Gesetze der Kernphysik überall in gleicher Weise. Dabei ist es völlig egal, ob diese Elemente auf der Erde oder irgendwo im Universum vorkommen.

Zurück zu unserer Gaswolke, aus der einmal die Sonne mit ihren Begleitern, den Planeten, werden sollte. Wir wissen nun, dass die Druckwelle, die von der Explosion der Supernova ausging, einige hunderttausend Jahre später an anderer Stelle auf eine riesige Gas- und Staubwolke traf und sie gehörig zusammenstauchte. Die bis dahin auf ein großes Volumen verteilten Wasserstoff- und Heliumatome der Wolke durchmischten sich mit all den schwereren Elementen, zum Beispiel dem lebenswichtigen Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Eisen, die in der Supernova erbrütet und bei deren Explosion in den Weltraum hinausgeschleudert wurden. Gleichzeitig zog sich die Wolke unter ihrer eigenen Gravitation mehr und mehr zusammen. Verwirbelungen innerhalb der Wolke sorgten für kleinere rotierende Fragmente, die losgelöst von der Umgebung weiter kollabierten und sich dabei wie ein Eiskunstläufer, der bei der Drehung um seine Achse die Arme anlegt, immer schneller drehten. Die dabei hervorgerufenen Zentrifugalkräfte sowie die zunehmende Gravitation verformten so das Wolkenfragment innerhalb etlicher Millionen Jahre zu einer dünnen Scheibe mit einem Durchmesser von rund 80 Milliarden Kilometern. Dies war der solare Urnebel, aus dem Sonne und Sonnensystem entstehen sollten.

Es vergingen wieder Zehntausende von Jahren, in denen die schweren Elemente wie Eisen und Nickel zum Zentrum des solaren Urnebels hin sanken. Während das Zentrum beim Kol-

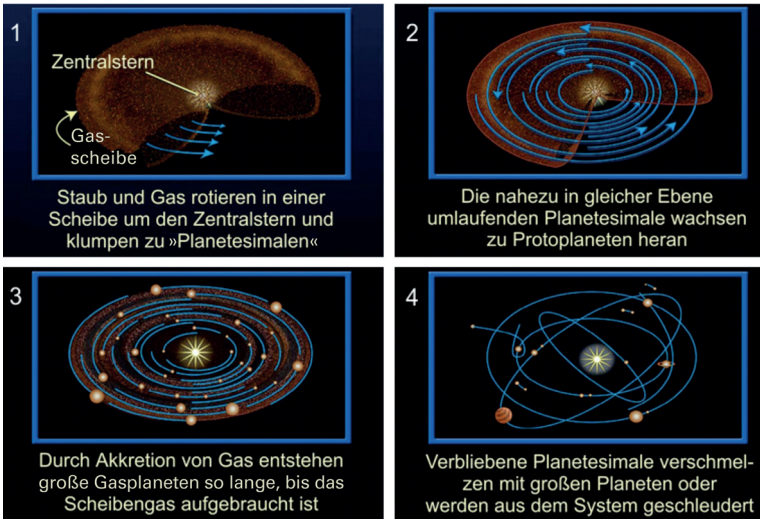


Abb. 2: Phasen der Ausformung von Planeten aus einer den zentralen Stern umgebenden planetaren Gas- und Staubscheibe.

laps immer heißer wurde, kühlte der Rand der Scheibe zunehmend ab. Dort stießen kleine Staubpartikel zusammen, wuchsen zu größeren Körnern heran, dann zu großen Gesteinsbrocken und schließlich zu sogenannten Planetesimalen von einigen Kilometern Durchmesser. Um die sich im Zentrum bildende Ursonne herum prallten unzählige Planetesimale aufeinander und verschmolzen zu Protoplaneten von etlichen hundert bis tausend Kilometern Durchmesser (Abb. 2). Im Zentrum des Nebels hatte sich die Ursonne nun schon so weit verdichtet, dass sie fast die gesamte Masse des einstigen Wolkenfragments auf sich vereinigte. Schließlich war es in ihrem Zentrum so heiß geworden, dass ihr thermonuklearer Reaktor »ansprang« und Wasserstoff zu Helium fusionierte. Die dabei freigesetzte Energie ließ die Sonne als hell leuchtenden Stern am Himmel erstrahlen. Doch die Planeten waren noch nicht vollständig »ausgereift«. Auch die Erde hatte ihre endgültige Form noch nicht gefunden, und

sie sollte noch einiges erleben, bis sie sich zum »Garten Eden« des Sonnensystems entwickelt hatte.

Zunächst sah sich unsere Uerde einem gewaltigen Bombardement durch Gesteinsbrocken ausgesetzt. Das junge Sonnensystem war durchsetzt von zahllosen Asteroiden, die auf chaotischen Bahnen die nahezu kreisförmigen Planetenbahnen kreuzten und ohne Unterlass auf die Planeten donnerten. Jeder Einschlag brachte Energie und neue kosmische Materie auf die Erde, wodurch die Uerde stark aufgeheizt wurde und sich ihre äußeren Schichten verflüssigten. Ihre Atmosphäre bestand zunächst fast nur aus Wasserstoff. Als die Sonne ihre volle Leuchtkraft erreicht hatte, entfachte sie auch einen Wind, den sogenannten Sonnenwind, der mit bis zu 2000 Kilometern pro Sekunde seine geladenen Teilchen über die Planeten fegte. Die Erde war zu leicht, um ihre Atmosphäre vor diesem Sonnensturm zu schützen. Auch das Gas aus dem inneren Scheibenbereich trieb der Sonnenwind weit nach draußen. Dort entstanden die großen, massereichen Gasplaneten.

Die Entwicklung auf der Erde stagnierte dann über viele Millionen Jahre. Als ziemlich toter Gesteinsbrocken umrundete sie die Sonne. Ihre heiße und flüssige Oberfläche kühlte sich ab, verfestigte sich, platzte wieder auf und schrumpelte zusammen. Die Schrumpfung heizte das Erdinnere weiter auf, bis selbst Metalle anfangen zu schmelzen. Die Erde begann zu »leben« – zumindest geophysikalisch betrachtet.

Doch die äußerlich ruhige Erde verbarg unter einer sehr dünnen Kruste ein sehr aktives Innenleben, das immer wieder durch die abgekühlte Oberfläche brach. Eingeschlossen im Material der Erde waren auch einige sehr schwere chemische Elemente, die in der mehrere Milliarden Grad heißen Hülle der explodierten Supernova erbrütet worden waren, nämlich Thorium und Uran. Diese aus mehr als 230 Kernbausteinen zusammengesetzten Atomkerne sind instabil und zerfallen radioaktiv, wo-

bei hochenergetische Teilchen und Gammastrahlung freigesetzt werden. Diese Energie heizte das Erdinnere nochmals so stark auf, dass es schmolz. Auch die noch immer auf die Kruste mit Geschwindigkeiten bis zu elf Kilometer pro Sekunde prallenden Meteoriten unterschiedlichster Größe trugen mit ihrer in Wärme umgewandelten Bewegungsenergie zur Aufheizung bei. Schließlich war das Erdmaterial so weit verflüssigt, dass es zu einer Trennung der schweren von den leichten Elementen kam. Die schweren Elemente Eisen und Nickel sanken aufgrund der Schwerkraft ins Zentrum und bildeten einen ersten einfachen Erdkern. Die immer noch sehr heiße, glühende Schlacke aus dem weniger dichten, leichteren Material, das hauptsächlich aus Silikaten (das sind Siliziumverbindungen wie Quarz) bestand, drängte in Richtung Erdkruste und bildete eine Kugelschale aus flüssigem Gestein, den Erdmantel.

Durch das Absinken der schweren Elemente in das Zentrum der Erde wurde Gravitationsenergie frei. Zusammen mit den radioaktiv zerfallenden Atomkernen Uran und Thorium wurde damit genügend Wärme erzeugt, um auch das Eisen im Erdinneren aufzuschmelzen. Auf diese Weise kam es zu einem bis heute anhaltenden Wärmeüberschuss im Erdkern, der zu sogenannten Konvektionsströmungen im geschmolzenen Gestein des Erdmantels führte. Wie ein Topf mit Tomatensauce auf einer heißen Herdplatte immer wieder aufkocht, so brach die Schmelze an den dünnsten Stellen der Erdkruste durch die Oberfläche. Es entstanden gewaltige Vulkankegel, das daraus hervorquellende geschmolzene Gestein überflutete die ursprüngliche Kruste und ebnete sie ein.

Diese Konvektionsströme flüssigen Gesteins kühlten die Erde langsam ab, und es bildete sich eine neue Erdkruste. Tief im Erdinneren aber wurden die Bestandteile des Erdkerns weiter getrennt. Der zunehmende Druck ließ den zentralen Bereich wieder erstarren, das Eisen des äußeren Erdkerns blieb jedoch

flüssig. Das Auf- und Abströmen des flüssigen Eisens setzte einen gigantischen elektromagnetischen Prozess in Gang. Es entstand ein »Dynamo«, eine Maschine, die, verursacht durch die Metallflüsse, starke elektrische Ströme erzeugte, die ihrerseits ein Magnetfeld hervorriefen, das bis heute den ganzen Erdkörper durchdringt und sogar bis in den Weltraum hinausreicht. Die Form des Erdmagnetfeldes gleicht exakt der eines gigantischen Stabmagneten. Das irdische Magnetfeld wirkt wie ein Schutzschild, der die Erdoberfläche von den energiereichen elektrisch geladenen Teilchen, die die Sonne mit hoher Geschwindigkeit verlassen, abschirmt.

Auch auf und über der Urerde kam es zu einschneidenden Veränderungen. Aus den heißen Lavaflüssen wurden große Mengen an Gasen förmlich ausgekocht. Diese Gase, vornehmlich Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Ammoniak, die aus dem heißen Erdinneren nach außen in die eiskalte Umgebung drangen, bildeten im Laufe der Zeit eine erste Atmosphäre um den jungen Planeten.

Vielleicht ist Ihnen aufgefallen, dass wir soeben eher beiläufig von Wasserdampf gesprochen haben. Das Wasser, das im Gestein des Erdmantels eingeschlossen war, drang als Dampf aus den glühenden Vulkansloten empor. Aber wie kam das Wasser auf die Erde? War es schon da, als sich die Erde bildete? Entstand es durch chemische Reaktionen auf der Planetenoberfläche, oder haben Meteoriten die ungeheure Menge an Wasser auf die Erde gebracht?

Wasser ist die häufigste chemische Verbindung auf der Erdoberfläche. Heute bedeckt es ungefähr 71 Prozent der Oberfläche unseres Planeten. Insgesamt wird der Wasserbestand auf 1,3 Milliarden Kubikkilometer Salzwasser und 4,2 Millionen Kubikkilometer Süßwasser geschätzt. Wo hatte es seinen Ursprung?

Wenn Wasserstoff und Sauerstoff als Elemente existiert haben,

ist es kein Problem, daraus Wasser zu machen. Ein Blitz, ein erster Funke würde ein solches Gemisch in Form einer Knallgasreaktion in Wasser umwandeln. Bei den in der Frühzeit der Erde herrschenden hohen Temperaturen hätte Wasser aber auch aus chemischen Reaktionen zwischen Kohlenwasserstoffverbindungen und dem Sauerstoff, der in den Silikatgesteinen und Eisenoxiden eingeschlossen war, entstehen können. Wasserdampf kondensierte zu Wasser. Die Erde hielt den kondensierenden Wasserdampf durch ihre Schwerkraft fest, und es begann zu regnen. So weit, so gut – aber war es wirklich so?

Tiefbohrungen lassen einen anderen Hergang wahrscheinlicher erscheinen: Die Erde hat ihr Wasser durch den Aufprall kosmischer Eisbrocken erhalten! In dem Fluid, einem zähen Gemisch aus Wasser, Salzen und Gasen, das bei Bohrungen aus mehreren tausend Metern Tiefe gefördert wurde, war ein »Stoff« enthalten, der keinesfalls irdischen Ursprungs sein konnte: Helium-3, ein Isotop des Elements Helium. Helium-3 kann nur aus dem Kosmos auf die Erde gelangt sein. In der Regel »reist« es eingeschlossen in Meteoriten. Vermutlich hat das Fluid Helium-3 als Überrest von Gesteinsbrocken aus der Frühzeit des Sonnensystems bewahrt, die das Wasser zur Erde gebracht haben könnten. Aus dem Ozean ist dieses Element längst wieder verschwunden. Aber wenige Kilometer unter uns gibt es diesen kosmischen Stoff noch in großer Menge. Es spricht alles dafür, dass das Wasser der Erde zum größten Teil aus dem Weltall kam und nicht hier entstanden ist.

Zurück zu unserer Urerde: Der Wasserdampf kondensierte, und es regnete und regnete und regnete. Es goss in Strömen, Tag und Nacht. Das Wasser sammelte sich in Vertiefungen und ebnete die Kraterränder ein, die vom anfänglichen Bombardement der Meteoriten übrig geblieben waren. Das Wasser begann die Erdoberfläche zu formen: Es glich Höhenunterschiede aus, löste Salze aus den Gesteinen und ließ die salzhaltigen Ozeane entstehen.

Noch während der Regen das Gesicht der Erde veränderte und formte, tauchte ein weiteres bereits erwähntes Reaktionsprodukt der Kohlenstoffchemie auf: Kohlendioxid. Da Kohlendioxid das Sonnenlicht problemlos passieren lässt, die längerwellige Wärmestrahlung des Planeten dagegen zurückhält, nahm dieses Gas als Bestandteil der Erdatmosphäre entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Planeten.

Eine dritte wesentliche Komponente der Erdatmosphäre ist der Stickstoff, dessen Anwesenheit höchstwahrscheinlich aus einer kosmischen »Verwechslung« resultiert. Während der Entstehung der Erde wurden Ammoniakmoleküle, die aus einem Stickstoff- und drei Wasserstoffatomen bestehen, gelegentlich anstelle der ähnlich großen Kaliumatome in die Struktur der die Erdkruste aufbauenden Silikatgesteine eingebaut. Später wurde dann nahezu der gesamte Stickstoff wieder freigesetzt und zum Hauptbestandteil der Erdatmosphäre.

Unter den regenschweren Wolken wuchsen einzelne Gewässer zu einem globalen Ozean zusammen. Nach zwei Milliarden Jahren hatte sich im Sonnensystem ein einzigartiger Wasserplanet gebildet. Umgeben war diese Wasserwelt von einer dünnen Atmosphäre, die im Wesentlichen aus Kohlendioxid bestand. Der Regen wusch jedoch einen großen Anteil des Kohlendioxids aus. Im Laufe der Zeit wurde es von den oberen Schichten des Meeres absorbiert und durch geologische Prozesse in kalzium- und magnesiumhaltigen Karbonatgesteinen chemisch gebunden und damit der Atmosphäre entzogen.

Die feste Erdkruste veränderte sich ebenfalls. Sie kühlte aus, wurde dicker und brach schließlich in ein riesiges Mosaik unterschiedlich großer Platten auf. Damit begann der für unsere Augen scheinbar unendlich langsame Tanz der verschiedenen Platten. Materieströmungen, vom heißen Erdkern angetrieben, durchkneten den Erdkörper und bringen Bewegung in die Platten, die wie Schiffe auf dem Ozean der heißen, flüssigen Erd-

materie schwimmen. An manchen Stellen prallen sie aneinander, anderswo öffnen sich Spalten, durch die frisches Magma aus den Tiefen aufsteigt und zu neuer Kruste erstarrt. Dieser Materie- und Energiestrom hält noch immer an und schiebt die Kontinente über die Erdoberfläche.

Während sich die Kontinente bildeten, wurde offenbar der Ozean zum Ursprung des Lebens. Kohlenstoffhaltige Moleküle verbanden sich zu immer differenzierteren Formen und Strukturen, die sich irgendwann selbst reproduzieren konnten. Mit dem Auftauchen der ersten Lebewesen in den Meeren vollzog der Planet Erde einen Phasensprung.

Wir aber wollen wieder ins Erdinnere abtauchen und dem lang anhaltenden Kreislauf der Gesteine nachgehen, der sich seit Jahrmilliarden vollzieht, der die Oberfläche des Planeten ständig verändert und letztlich für den Charakter unseres Heimatplaneten verantwortlich ist.

Der lebendige Felsen, oder: Der Tanz der Platten

Das hier nur kurz beschriebene Modell des Kreislaufs der Erdmaterie, der Bewegungen von Platten, angetrieben von Konvektionsströmungen im Erdinneren, ist das Ergebnis einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung, die sich über mehrere Jahrhunderte hinzog und deren – man kann sagen: geniale – Auflösung, die Plattentektonik, erst seit wenigen Jahrzehnten allgemein anerkannt ist.

Angefangen hat der Streit um das Innere der Erde bereits vor mehr als 200 Jahren. Durch den beginnenden Bergbau war einiges über das unmittelbar unter der Oberfläche liegende Erdreich bekannt geworden. Es wird heißer, je tiefer man in die Erde dringt. Gesteinsschichtungen unterschiedlicher Zusammensetzung wurden entdeckt, deren Erze und Mineralien sich

kommerziell nutzen ließen. Man denke nur an die verschiedenen Kohlen- und Edelmetallbergwerke. Der Schotte James Hutton hatte 1795 in seinem Buch *Theory of Earth* als Erster versucht, ein systematisches Bild der Erdgeschichte zu zeichnen. Er beschrieb die Erdoberfläche als das Resultat unendlich langsamer Vorgänge. Er vermutete eine Art Fließgleichgewicht, bestehend aus langsamer Erosion von Stein und Erde durch Wind und Wasser, allmählichen Klimaveränderungen und dem gelegentlichen Entstehen und Wiederverschwinden von Bergen. Er erkannte mit großer Weitsicht in gewöhnlichen Steinen die Spuren von Äonen: »Die Ruinen einer älteren Welt sind in der jetzigen Struktur der Welt sichtbar«, schrieb er. Es gibt eine berühmte Schnittzeichnung von Hutton, auf der über der Erde eine liebliche englische Landschaft zu sehen ist, davor eine geschlossene, von einem Pferd gezogene Kutsche, die gerade einem Reiter begegnet, während darunter ein Fries aus unterschiedlichen Gesteinsschichten abgebildet ist und wiederum darunter durchgeschmolzenes, das heißt metamorphes Gestein, durcheinander und verdreht – ein Stillleben einer sich langsam, aber stetig verändernden Welt.

Hutton hatte die englische Landschaft vor Augen, als er die Geschichte der Erde beschrieb – eine Szenerie aus sanften Hügeln und Flussauen ohne Anzeichen von Brüchen, Erdbeben oder Vulkanen. Deshalb gab es in Huttons Erdgeschichte keine Katastrophen, keine schnellen Veränderungen, sondern lediglich gemächliche, fast harmonisch anmutende Vorgänge, bei denen sozusagen Stein auf Stein gelegt, die Schluchten und Gebirge langsam, fast gemütlich geformt wurden. Aus Huttons Szenario, das auch als Uniformitarianismus bezeichnet wurde, erwuchs jedoch ein Problem: Wenn er nämlich recht hatte, dann konnten die von ihm beschriebenen langsamen Vorgänge nur dann die heutigen Gebirge und Kontinentformen erzeugt haben, wenn die Erde sehr, sehr alt war. »Wir finden«, schrieb er, »keine Anzei-

chen eines Beginns – keine Aussicht auf ein Ende.« Das mochte vielleicht mutig gewesen sein, aber auch rücksichtslos. Eine unendliche Vergangenheit ist viel problematischer als eine sehr lange; die Unendlichkeit ist eine starke und gefährliche Medizin und nicht nur eine große Zahl.

Fast 150 Jahre lang blieb Huttons Theorie das Standardmodell der Geologie. Es änderte sich erst, als man begann, die Ursachen von Erdbeben zu erforschen, als man mehr wissen wollte über das Innere der Erde, mehr als das, was sich über die wenigen hundert Meter Erdkruste sagen ließ, durch die man in den Bergwerken in die Tiefe vordringen konnte.

Infolge genauer Beobachtungen von Erdbebenwellen entstand Ende des 19. Jahrhunderts eine neue Wissenschaft, die Seismologie. An vielen Stellen in der Welt wurden Geräte, die Seismografen, aufgebaut, um Erdbebenwellen zu messen. Je mehr Daten zusammengetragen wurden, desto klarer wurde den Seismologen, dass die Wellen, die nach Erdbeben durch den ganzen Erdkörper liefen, mehr als nur ferne Echos weit entfernter Erschütterungen unseres Planeten waren. Sie gaben Auskunft über das Innere der Erde und ließen Einzelheiten einer Welt erkennen, die sich der direkten Beobachtung entzog. Die Aufzeichnungen eines Erdbebens beginnen mit der Wellenlinie der Primärwelle (P-Welle), einer Welle, die entlang ihres Weges Materie verdichtet und wieder auseinanderzieht, ähnlich einer Schallwelle in Luft. Kurze Zeit später treffen dann die Sekundärwellen (S-Wellen) beim Seismografen ein: Sie verscheren das Gestein senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Da sie viel heftiger in ihrer Wirkung sind, ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner als die der P-Wellen. Aus der Verzögerung zwischen P- und S-Wellen lässt sich der genaue Ort des Erdbebens, das sogenannte Epizentrum, bestimmen (Abb. 3).

Offenbar wurden die Erdbebenwellen auf ihrem Weg durch das Erdinnere von verschiedenen Gesteinen beeinflusst. 1902

wurde zum ersten Mal die Existenz eines Erdkerns postuliert, eines Kerns im Zentrum der Erde, der eine Art Schatten auf die dem Bebenherd gegenüberliegende Seite der Erdoberfläche wirft. Die seismischen Wellen werden ähnlich wie Lichtwellen beim Übergang von Luft in Wasser abgelenkt. Sie durchdringen den Kern nicht geradlinig, sondern werden so gebrochen, dass sich auf der anderen Seite des Planeten ein wellenfreier Bereich bildet.

Einige Jahre später hatten die Seismologen herausgefunden, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von P- und S-Wellen mit zunehmender Dichte des Materials erhöht. Plötzliche Sprünge in der Ankunftszeit verschiedener Wellen bedeuteten demnach, dass sich die Gesteinsdichte abrupt ändert. Ein Teil

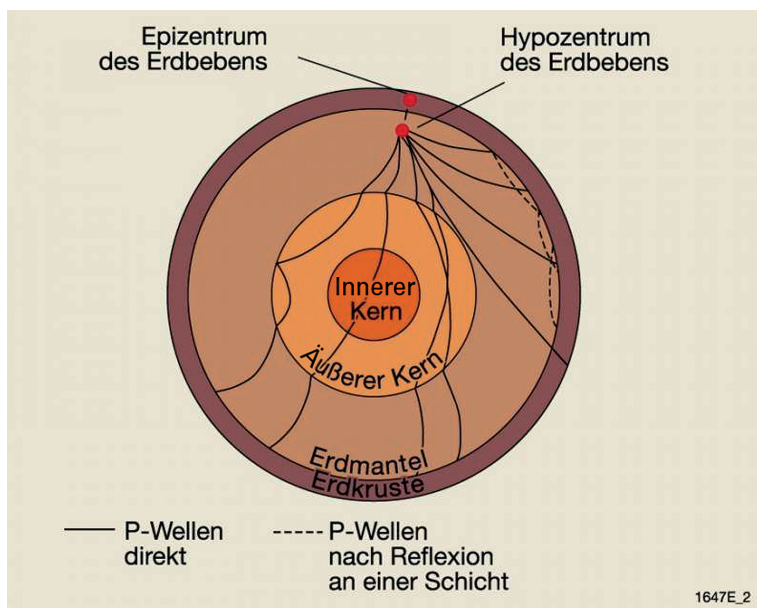


Abb. 3: Verlauf von Erdbebenwellen durch die Erde. Dichteänderungen im Material des Erdkörpers führen zu einer Brechung beziehungsweise Reflexion der Wellen.

der Wellen breitete sich innerhalb der Kruste mit normaler Geschwindigkeit aus, während der andere Teil abgelenkt wurde und sich im oberen Bereich des dichteren Gesteins mit größerer Geschwindigkeit fortpflanzte. Obwohl diese Wellen tiefer ins Erdinnere eindringen und bis zu den Seismografen eine längere Strecke zurückzulegen hatten, überholten sie die Wellen in der Kruste und erreichten die Messstation früher.

Unzählige Erdbeben lieferten im Laufe der Jahre so viele Daten, dass sich bald ein völlig neues Modell für das Erdinnere ergab, das sich deutlich von der einförmigen Vorstellung Huttons unterschied. Unser Planet bestand demnach aus einer Reihe konzentrischer Schalen. An die dünne, feste Kruste schloss sich nach innen die weichere, plastischere Asthenosphäre als Teil des ansonsten festen Erdmantels an. An diesen grenzte der große, äußere Kern aus geschmolzenem Eisen und anderen Metallen, während im tiefsten Inneren der Kern aufgrund des hohen Drucks wieder fest war (Abb. 4).

Dieses Modell veranschaulichte nicht nur die Ausbreitung der seismischen Wellen, sondern bot auch eine mögliche Erklärung für die Entstehung des irdischen Magnetfeldes. Man nahm an, dass die Rotation der Erde und die auf- und absteigenden Ströme des heißen, flüssigen Eisens den Erdkern in eine Art elektrischen Generator verwandeln könnten, in einen Dynamo, der das Magnetfeld der Erde erzeugt.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts glaubte man noch, dass die Erdkruste etwa vergleichbar sei mit der Schale eines vertrocknenden Apfels. Nach diesem Bild sähen die großen Formationen auf der Erde, das heißt die Kontinente und Ozeane, heute immer noch so aus wie zur Zeit ihrer Entstehung. Alle Berge, Täler und Schluchten wären dann einfach nur Ergebnisse des gewaltigen Schrumpfungsprozesses der Erde, die sich langsam abkühlte. Infolge der auftretenden horizontalen Spannungen wäre die Oberfläche der Erde in große Schollen zerbrochen. Dabei

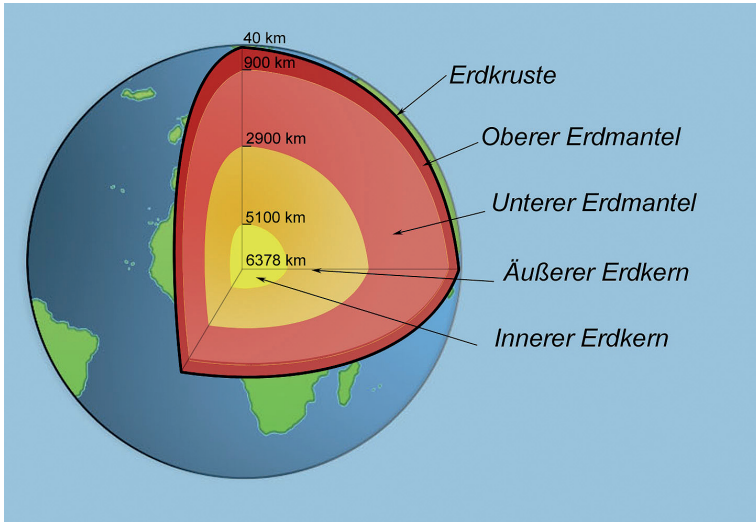


Abb. 4: Schalenförmiger Aufbau der Erde.

wären Gesteinskomplexe wie in einem Schraubstock verbogen, gestaucht, gefaltet und übereinandergeschoben worden. Aufgrund der durch Abkühlung bewirkten Schrumpfung wäre es im Wesentlichen zu vertikalen Bewegungen der Kruste gekommen. Faltungen und Übereinanderschiebungen wären dagegen nur Begleiterscheinungen.

Doch dann ließen Beobachtungen und von unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen durchgeführte Untersuchungen augenfällige Gemeinsamkeiten erkennen, die sich mit dieser statischen Schrumpfpfandvorstellung nicht erklären ließen. Warum traten Gebirgszüge immer als schmale Streifen auf, statt sich mehr oder weniger gleichmäßig über den gesamten Globus zu verteilen? Wie waren die übereinstimmenden Konturen der afrikanischen Westküste und der Ostküste Südamerikas zu erklären? Woher kamen die bemerkenswerten Ähnlichkeiten in der geologischen Vergangenheit dieser beiden Küstenbereiche?

Die Plattentektonik

1915 schlug der deutsche Meteorologe Alfred Wegener in seiner Schrift »Der Ursprung der Kontinente und Ozeane« eine radikale Antwort vor – die Kontinentalverschiebung. Er nahm an, dass die heutigen Kontinente ineinander passende Bruchstücke eines Urkontinents, Pangäa, sind, die vor etwa 250 Millionen Jahren allmählich auseinanderzudriften begannen. Er entdeckte, dass einige geologische Formationen, die an der Küste Südamerikas abrupt zu enden scheinen, sich in Afrika fortsetzen, wenn er die Kontinente wie Teile eines Puzzles zusammenfügte. Obwohl Wegener eine Menge geologische Daten zusammengetragen hatte, ließ er viele wichtige Details beiseite. Er stützte sich nur auf Fakten, welche seine Theorie untermauerten. Was er nicht in sein Modell einbauen und damit erklären konnte, ließ er weg. Deshalb wurde seine Hypothese lange Zeit nicht ernst genommen. Insbesondere die Eigenschaften der Oberflächen- und Krustengesteine ließen seine These von den verschiebbaren Kontinenten als sehr unwahrscheinlich erscheinen. Die Erdkruste ist eigentlich viel zu starr, als dass Kontinente wie Schiffe auf dem Meer umhertreiben könnten. Vor allem erhob sich die Frage, welche Kräfte hinter der Kontinentalverschiebung stehen sollten. Wegener dachte an Zentrifugalkräfte, die aber sind für diese Aufgabe viel zu schwach. Ohne eine treibende Kraft kann keine Kontinentalverschiebung stattfinden. Wegeners Idee verschwand in den Bibliotheken der geologischen Institute als ein interessanter, aber offensichtlich falscher Ansatz.

Entscheidend für die Wiedergeburt und den Durchbruch der Theorie der Plattenverschiebung waren die weltweiten Untersuchungen der mittelozeanischen Rücken, die Erforschung der Geschichte des Erdmagnetismus und die Aufdeckung des globalen Musters der Erdbebenherde.

Das Museum Meeresgrund

Die Wiederentdeckung der Ideen Wegeners verdanken wir der amerikanischen Marine. Sie wollte in den 50er- und 60er-Jahren so viel wie möglich über den Meeresboden in Erfahrung bringen. »Wir wissen mehr über die Oberfläche des Mondes als über den Meeresgrund«, war lange Zeit ein von Geowissenschaftlern vertretener Standpunkt. Die von der amerikanischen Marine finanzierte Meeresforschung brachte ungeheure Neuigkeiten aus den Tiefen der Ozeane zutage.

Der Grund der Meere war überhaupt nicht langweilig und eintönig, wie es vielleicht naiven Erwartungen entsprach. Man hatte sich eine Oberfläche vorgestellt, die durch Treibsand und Sedimente schichtweise angehäuft worden war. Eigentlich hätte dieses Bild schon stutzig machen müssen, denn die Dicke der übereinandergelagerten Sedimente wäre angesichts des Erdalters gigantisch gewesen. Aber dies war eben die vorherrschende Meinung, bis die ersten Echolote den Boden der Ozeane mit Schallwellen abtasteten. Die reflektierten Wellen offenbarten ein völlig anderes Bild: tiefe Gräben, große Vulkane, lange Steilhänge – und kaum flache, langweilige Sedimentbecken.

Der Mittelatlantische Rücken zum Beispiel trennt den Ozean ziemlich genau in der Mitte. Er liegt etwa zwei bis vier Kilometer über den tieferen Teilen des Meeresbodens, an seiner Nordspitze erhebt sich die Insel Island aus dem Nordmeer. Woher kommen die mehr oder weniger durchgehenden Gebirge, die sich wie eine lange aufgequollene Narbe durch die Meeresbecken um den ganzen Globus ziehen? Nun sind Gebirge ja ziemlich starre Gebilde, die kaum Bewegungsmuster erkennen lassen. Erst eine andere Entdeckung half, dem Ursprung dieser Auffaltungen und damit der Quelle der Dynamik des ganzen



Harald Lesch, Jörn Müller

Kosmologie für Fußgänger

Eine Reise durch das Universum

Überarbeitete und erweiterte Neuauflage

Taschenbuch, Klappenbroschur, 320 Seiten, 13,5 x 20,6 cm

ISBN: 978-3-442-15817-1

Goldmann

Erscheinungstermin: August 2014

Wie entstand der Mond? Woher bezieht die Sonne ihre Energie? Was weiß man über unser Sonnensystem? Wie leben und sterben die Sterne? Was ist ein schwarzes Loch? Und wie weit ist es nach Andromeda? Das sind nur einige Fragen, die Harald Lesch und Jörn Müller auf ihrer unterhaltsamen Reise durch das Universum allgemein verständlich beantworten. Garantiert ohne mathematischen Formelballast!