

David E. Brody und Arnold R. Brody

# **Die sieben größten Rätsel der Wissenschaft**

... und wie man sie versteht

Aus dem Amerikanischen von Michael Zillgitt

Econ

Econ Taschenbücher erscheinen  
*im* Ullstein Taschenbuchverlag, einem Unternehmen der  
Econ Ullstein List Verlag GmbH & Co. KG, München  
4. Auflage 2001

© 2000 by Econ Ullstein List Verlag GmbH & Co. KG, München

© 1999 für die deutsche Ausgabe by Claassen Verlag in der  
Verlagshaus Goethestraße, München

© 1997 by David Eliot Brody and Arnold R. Brody, Ph. D.

Titel der amerikanischen Originalausgabe:

The Science Class You Wish You Had.

The Seven Greatest Scientific Discoveries in History and the People  
Who Made Them (Perigee Books, The Berkley Publishing Group,  
New York)

Übersetzung: Michael Zillgitt

Umschlagkonzept: Büro Meyer & Schmidt, München - Jörg Schmidt

Umschlaggestaltung: Hilden Design, München - Stefan Hilden

Titelabbildung: Ferenc B. Regös

Druck und Bindearbeiten: Ebner Ulm

Printed in Germany

ISBN 3-548-75030-3

*Unseren Familien und der Erinnerung  
an unseren Vater, den Pionier*

# Inhalt

Vorwort 9

Einführung 13

## **Teil 1: Gravitation und die Grundgesetze der Physik 21**

Kapitel 1: Von Umwälzungen und Umlaufbahnen 23

Kapitel 2: Die unbewegliche Erde 47

Kapitel 3: Die Principia 65

## **Teil 2: Der Aufbau des Atoms 77**

Kapitel 4: Die Chemie stimmt 79

Kapitel 5: Quantensprung 95

Kapitel 6: Der Schicksalsschlag 112

## **Teil 3: Das Relativitätsprinzip 133**

Kapitel 7: Philosoph und Wissenschaftler 135

Kapitel 8: Die vierte Dimension 150

## **Teil 4: Der Urknall und die Entstehung des Universums 177**

Kapitel 9: Das Kosmische Ei 179

Kapitel 10: Das Echo der Schöpfung 200

Kapitel 11: Der große Kollaps 208

## **Teil 5: Evolution und das Prinzip der natürlichen Auslese 219**

Kapitel 12: Der Fels der Schöpfung 221

Kapitel 13: Der unauslöschliche Stempel unseres Ursprungs 237

Kapitel 14: Gestalter der Landschaft 259

Kapitel 15: Die Kontinentalverschiebung 284

## **Teil 6: Zelle und Genetik 301**

Kapitel 16: Ursuppe 303

Kapitel 17: Perlen auf einer Schnur 330

## **Teil 7: Die Struktur des DNA-Moleküls 343**

Kapitel 18: Das Rückgrat des Lebens 344

Kapitel 19: Das menschliche Genom 369

## **Epilog 387**

Synthese 389

Danksagung 407

Bibliographie 412

# Vorwort

Die Naturwissenschaften sind ein wunderbares Gefüge aus verschiedenen Disziplinen, mit unterschiedlichsten Betrachtungsweisen, die immer wieder gemeinsame Merkmale aufweisen. Gleichzeitig demonstrieren sie - das macht das vorliegende Buch deutlich - die enorme Vielfalt der menschlichen Kreativität. Dieses Buch richtet sich sowohl an Leser, die mit Naturwissenschaften nur wenig vertraut sind, als auch an Wissenschaftler. Die beiden Autoren arbeiten in ganz unterschiedlichen Berufen: Arnold Brody ist Wissenschaftler, David Brody wirkt als Rechtsanwalt. Mit ihren breitgefächerten Kenntnissen, ihrem Gespür für soziale Verantwortlichkeit und mit sprachlicher Präzision enthüllen sie nicht nur den Verlauf wissenschaftlicher Entdeckungen, sondern auch die Ambitionen und Schwächen der Beteiligten sowie die gesellschaftliche und die moralische Bedeutung der Entdeckungen.

Sieben Grundpfeiler der Naturwissenschaften werden hier vorgestellt - Entdeckungen aus fünf Jahrhunderten, von der Renaissance bis zur Mitte unseres Jahrhunderts. Die Autoren schildern diese Entdeckungen in einer Weise, die Wissenschaft und ihre Geschichte wirklich durchschaubar macht. Wir lernen, daß unser Planet Erde nicht mehr als ein Staubkörnchen in einer unvorstellbaren Weite ist und daß die Sonne nur ein kleiner Stern unter Milliarden anderen ist. Vielleicht hat das Leben gar nicht auf dem Planeten Erde seinen Anfang genommen, denn Meteoriten, die durch den Weltraum trudeln, könnten Lebenskeime auf die Erde gebracht haben, bald nachdem diese sich aus Wolken heißer Gase gebildet hatte. Wir sind ein Produkt der zu-

fallsbestimmten Evolution, ein spätes Resultat der Entwicklung vielzelliger Organismen. Die Komplexität von Form und Funktion ist nicht allein dem Menschen eigen, aber sie hat sich bei uns so weit entwickelt, daß wir vernunftbegabt sind. Doch der Verstand und die Strenge wissenschaftlichen Denkens stellten sich in der Entwicklung zum Menschen erst spät ein, lange nachdem die ersten menschenähnlichen Wesen auf den Plan getreten waren.

Dies Buch entstand kurz vor dem Ende des zweiten Jahrtausends. Die jüngste der hier vorgestellten großen Entdeckungen ist die der DNA-Struktur, dicht gefolgt von der prinzipiellen Entschlüsselung des genetischen Codes. Seitdem wissen wir, daß die DNA alle Informationen für den Fortbestand der jeweiligen Art enthält. Die Molekularbiologen, Vertreter einer ganz neuen Wissenschaftsdisziplin, konnten bereits eine Fülle zuvor unbekannter Zusammenhänge klären:

In den letzten fünfzig Jahren weitete sich, unter anderem durch großzügige Förderung durch mehrere Regierungen, die biologische Forschung stark aus, wobei auch zahlreiche Physiker und Chemiker mitwirkten. Während der Naziherrschaft in Europa emigrierten Dutzende der bedeutendsten europäischen Biologen und Physiker nach Amerika. Unter anderem das National Institute of Health in den USA unterstützte und ermutigte viele Nachwuchsforscher. Man schuf hier ein Umfeld, das kreativem Denken und Handeln förderlich war. Es entstand eine bemerkenswerte Gruppe von Wissenschaftlern, die bestens ausgebildet waren und für die Biologie und Medizin einiges erhoffen ließen. Später zogen Westeuropa und Japan, vom Zweiten Weltkrieg schwer geschädigt, Nutzen aus der Ausbildung ihrer jungen Wissenschaftler an den amerikanischen Hochschulen. Aufgrund des gegenseitigen Informationsaustausches der Wissenschaftler auf der ganzen Welt, folgte nun die produktivste Periode in der Geschichte von Physik und Biologie. Wissenschaftliche Forschung findet heutzutage nur noch in internationaler Kooperation statt, und weder intellektuelle Restriktionen noch kulturelle Differenzen dürfen dabei eine Rolle spielen. Die weltweite Gemeinschaft der Wissenschaftler - mit den verschiedensten kulturellen und ethnischen Um-

feldern - verkörpert den wahren Geist der Suche nach Erkenntnis.

Paradoxerweise bewirkten die Erfolge dramatische Veränderungen im wissenschaftlichen Establishment und beim Fortgang der wissenschaftlichen Entdeckungen. In den hochentwickelten Ländern stagnieren oder sinken die öffentlichen Mittel zur Förderung der Wissenschaft. In diesem Buch wird auch deutlich, daß neue Entdeckungen heute nicht mehr von einzelnen Personen gemacht werden. Die Forschung im Verbund ist zur Regel geworden, teilweise erzwungen durch das Abnehmen der Fördermittel. Auch deswegen vollziehen sich wissenschaftliche Fortschritte nun eher in kleinen Schritten als in dramatischen Sprüngen. Die Wissenschaft sieht sich enormen Problemen gegenüber. Allein in meinem Fachgebiet - der biologischen Kommunikation - ergaben sich drastische Veränderungen aufgrund von Entdeckungen, die von relativ wenigen Wissenschaftlern gemacht wurden. Dadurch wurde die komplexe Natur des Kommunikationssystems in Zellen und Organen deutlicher, aber es wurde auch die fast entmutigende Aufgabe klar, die neuen Erkenntnisse zu integrieren und zu interpretieren. Das erfordert natürlich multidisziplinäre Bemühungen. Kein einzelner Wissenschaftler, und sei er noch so brilliant, wird klären können, wie die Kommunikationssysteme auf der Ebene von Zellen und Organen im einzelnen funktionieren. Mit vereinten Anstrengungen kann man vielleicht einige der geheimnisvollsten Aspekte des Lebens enthüllen: wie das Gehirn, die physische Basis unseres Geistes, arbeitet und wie die Kommunikation in Zellen und Organen mit genetischen Informationen zusammenhängt. Dann wird man Darwins Theorie der natürlichen Selektion noch besser untermauern können.

Neue Befunde auf solchen Gebieten wird man nur schrittweise erhalten, weil sich die Wissenschaftler den Grenzen der Erkenntnis nähern, die man bei komplexen Systemen erzielen kann. Das bedeutet jedoch nicht, daß das »Ende der Wissenschaft« nahe ist, wie mancher glaubt. Wahrheit kann kurzlebig sein, aber die Wissenschaft, die Blüte der Menschheit, wird fortbestehen, solange auf diesem Planeten menschlicher Geist existiert. Dieses Buch schildert auf brillante Weise die Entwicklung



und Entfaltung dieser Blüte. Dabei werden dem Leser die außergewöhnlichen Persönlichkeiten nahegebracht, die da/u beitragen, daß die Wissenschaft im 20. Jahrhundert solche Erfolge feiern konnte.

Martin Rodbell,  
Nobelpreisträger 1994  
für Medizin oder Physiologie

# Einführung

*Kann ein Normalbürger die Naturwissenschaften wirklich verstehen? Will er wirklich etwas über sie erfahren? Gehen uns die Naturwissenschaften überhaupt etwas an? Die Antwort darauf ist eindeutig JA!*

Viele von uns erinnern sich eher ungern an den Physik-, Chemie- und Biologieunterricht in der Mittel- und Oberstufe. Wir verlassen die Schule im Glauben, daß Naturwissenschaften langweilig und abstrakt sind und daß kein normaler Mensch sie verstehen kann. Daher ist es nicht gerade üblich, sich damit zu befassen, und diese Fächer scheinen für uns fast keinen Bezug zu unserem Leben zu haben. Doch wenn wir erwachsen werden und ins Berufsleben eintreten, haben wir mit immer komplizierteren Geräten zu tun, und wir lesen immer häufiger über naturwissenschaftliche Themen - sei es über die Erfassung der menschlichen Gene, über Retortenbabys oder (wie im August 1996) über die Vermutung, es könnte früher Leben auf dem Mars gegeben haben. Das sind nur einige wenige Aspekte unter vielen. Plötzlich wird ein Grundverständnis der Naturwissenschaften nicht nur akzeptabel, sondern zu einem nützlichen und wesentlichen Teil unseres Lebens.

Mancher war von Technik und Naturwissenschaft auf einmal fasziniert, als die damalige Sowjetunion 1957 den ersten Satelliten («Sputnik») in eine Erdumlaufbahn brachte oder als der Amerikaner Neil Armstrong 1969 als erster Mensch den Mond betrat. Nun war es offenkundig, daß die Menschheit durch die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse außeror-

deutliche Ziele zu erreichen vermochte. Das Interesse an den Naturwissenschaften wurde auch gefördert durch die schier endlose Serie wissenschaftlicher Leistungen und Entdeckungen in den 70er, 80er und 90er Jahren: einige Landungen von Raumsonden auf der Venus, die Glasfaseroptik, das Entziffern des DNA-Codes, die Entdeckung der Schwarzen Löcher, außerdem Raumstationen und Raumfähren, Mikrochips und Computer, Mikrochirurgie-Herztransplantationen und künstliche Herzen, supraleitende Materialien, schließlich die Entdeckung anderer Sonnensysteme und vieles andere mehr.

Man muß kein Physiker sein, um von der Erkundung des Weltraums fasziniert zu sein oder sich zu fragen, ob es Leben auf dem Mars gibt und wie das Universum entstand. Man muß auch kein Biochemiker sein, um sich für die fundamentalen Lebensvorgänge zu interessieren. Es ist unmöglich, sich solchen Fragen zu entziehen. Wissenschaftliche Erkenntnisse und Entdeckungen sind viel zu interessant und wichtig, als daß man sie den Wissenschaftlern allein überlassen könnte.

### **Die sieben bedeutendsten wissenschaftlichen Entdeckungen in der Geschichte...**

All die beeindruckenden Fortschritte und Erfindungen, deren Zeugen wir in den vergangenen Jahrzehnten waren, haben etwas gemeinsam: Sie wurden möglich durch die fundamentalen wissenschaftlichen Entdeckungen, die in Physik, Chemie und Biologie während der letzten vier Jahrhunderte gemacht wurden. In diesem Buch wollen wir uns die sieben größten Entdeckungen ansehen. Sie waren dermaßen bahnbrechend, daß fast alle weiteren Erkenntnisse auf ihnen aufbauen:

1. Die Gravitation und die Grundgesetze der Physik
2. Der Aufbau des Atoms
3. Das Relativitätsprinzip
4. Der Urknall und die Entstehung des Universums
5. Die Evolution und das Prinzip der natürlichen Selektion
6. Zelle und Genetik
7. Die Struktur des DNA-Moleküls

Die Entdeckungen betrafen das, was bereits ist. Das heißt, es wurde nichts erfunden, entwickelt oder modifiziert, wie dies beispielsweise bei Raumfähren, Insektiziden oder Antibiotika der Fall ist. Wir betrachten also keine technischen Vorrichtungen, etwa Mikrochips oder Computer, sondern schauen uns an, wie das Universum und alle Lebensformen entstehen konnten, wie in der Natur alles zusammenwirkt und woraus das Universum besteht, angefangen bei den kleinsten Elementarteilchen bis hin zu den unvorstellbar riesigen, unendlich weit entfernten Galaxien.

Es geht uns dabei nicht um die Frage, *warum* das Universum oder das Leben existiert. Wie der berühmte theoretische Physiker Stephen Hawking meinte, würde dies bedeuten, den »Geist Gottes« zu suchen. Wir fragen ebensowenig, was *sein sollte*, denn hiermit befassen sich nicht die Wissenschaftler, sondern die Philosophen.

Bei der Auswahl der sieben bahnbrechenden Entdeckungen ließen wir uns von mehreren Aspekten leiten und holten dazu auch die Meinungen von Forschern und Wissenschaftshistorikern ein. Die sieben genannten Entdeckungen stellen die Basis dar, auf der das beeindruckende Gefüge der wissenschaftlichen Erkenntnis heute gründet. Ohne ein Verständnis der physikalischen Grundgesetze hätte es niemals Venuslandungen oder Raumfähren gegeben. Wüßte man nichts über die Struktur und die Eigenschaften der Atome, gäbe es weder Kernkraftwerke noch eine Bedrohung durch Kernwaffen. Hätte man die Prinzipien der Genetik nicht gefunden, könnte man auf der ganzen Welt nicht so viele Nahrungsmittel produzieren. Ohne genaue Kenntnisse über das DNA-Molekül dürfte man nicht einmal hoffen, Krankheiten wie Morbus Parkinson, Sichelzellanämie oder Hämophilie vielleicht einmal heilen zu können. Jeder wissenschaftliche Durchbruch markierte eine neue Epoche, warf aber oft fundamentale ethische und philosophische Fragen auf und führte daher zu Kontroversen. Die sieben Entdeckungen erschlossen der modernen Welt nicht nur intellektuelle und materielle Reichtümer, sondern hatten und haben auch einschneidende Auswirkungen auf unser tägliches Leben.

Die ersten vier der sieben Entdeckungen gelangen in der Physik und der Astronomie, die letzten drei in der Biologie, ein-

schließlich verwandter Gebiete wie Medizin und Biochemie. Die Objekte dieser Entdeckungen kann man entweder nicht mit bloßem Auge sehen (Atome, Zellen und DNA-Moleküle), oder sie sind äußerst abstrakt (Gravitation und Relativitätstheorie); sie können aber auch in einem bestimmten Ereignis (Urknall) oder einem Prozeß von unglaublich langer Dauer (Evolution) bestehen. Und eben weil die Objekte der Entdeckungen nicht konkret faßbar sind oder zu große Räume oder Zeitspannen umfassen, sind sie so schwer vereinbar mit unseren Alltagserfahrungen und dem sogenannten gesunden Menschenverstand. Daher konnten zur betreffenden Zeit weder die wissenschaftliche Gemeinschaft noch die Öffentlichkeit erkennen, wie bedeutsam die jeweiligen Entdeckungen waren. Die neuen Erkenntnisse setzten sich oft erst durch, nachdem sie intensiv bekämpft und peinlich genau überprüft worden waren.

In jedem der sieben Fälle mußten einige bisher allgemeingültige Vorstellungen und Annahmen - eben der »gesunde Menschenverstand« - aufgegeben werden. Nur so konnte man wirklich verstehen, wie das Universum und das Leben auf dieser Erde entstanden waren und wie sie sich bis zum gegenwärtigen Zustand entwickelt hatten. Heute wird ein solches Verständnis am stärksten durch »althergebrachte Überzeugungen« behindert. Wir stoßen noch im 20. Jahrhundert auf Mythen und Halbwahrheiten, die aus früheren Jahrhunderten stammen, und wir begreifen unser Leben in komplexen sozialen und kulturellen Zusammenhängen, die sich in Jahrtausenden herausgebildet haben. Dieses Gefüge aus Glaubenslehren und Kulturen entstand *vor* den großen wissenschaftlichen Entdeckungen, also bevor irgend jemand fundamentale Fragen zur Entstehung des Universums und des Lebens beantworten konnte, außerdem bevor wir vom Urknall oder vom Evolutionsprinzip wußten und bevor wir klar zwischen solchen Begriffen unterscheiden konnten, die auf unsere Vorstellungskraft zurückgehen, und jenen, die auf der Realität beruhen.

Der Wissenschaft muß man sich unvoreingenommen nähern. Wir können den Begriff Gravitation nur dann ganz verstehen, wenn wir erkennen, daß es nicht nur eine Frage der Semantik ist, zwischen einem fallenden und einem von der Erde angezogenen

Gegenstand zu unterscheiden. Dieselbe Kraft, die unsere Füße auf den Erdboden drückt, hält die Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne. Wenn wir die zugrundeliegenden Prinzipien der Naturwissenschaften akzeptieren, wird dies unsere fundamentalen Auffassungen über das Leben, das Universum und die Menschheit beeinflussen. Beispielsweise eröffnet das Verstehen des Evolutionsprinzips eine neue Perspektive hinsichtlich der Konflikte, die zu allen Zeiten auf physische und kulturelle Differenzen zurückzuführen waren. - Eben diese neue Perspektive kann helfen, Grenzen zu überwinden.

### **... und die Menschen, die sie machten**

In diesem Buch werden auch Triumphe und Tragödien geschildert, ebenso Lebensumstände und Motive jener außergewöhnlichen Persönlichkeiten, die an den Entdeckungen beteiligt waren. Wir erkennen natürlich die Mitwirkung von Hunderten anderer Forscher an, schreiben aber die Hauptanteile zehn Persönlichkeiten zu:

1. *Gravitation und Physik*: Isaac Newton
2. *Atom*: Ernest Rutherford und Niels Bohr
3. *Relativitätstheorie*: Albert Einstein
4. *Urknall*: Edwin Hubble
5. *Evolutionstheorie*: Charles Darwin
6. *Zelle und Genetik*: Walther Flemming und Gregor Mendel
7. *DNA-Struktur*: Francis Crick und James Watson

Ihre Entschlossenheit und ihre Vorstellungskraft ließen sie zu ihren Entdeckungen kommen. Nikolaus Kopernikus publizierte im Jahre 1543 nur widerstrebend sein Buch, in dem er feststellte, daß sich die Sonne, und nicht die Erde, im Mittelpunkt des Universums befindet. Diese Auffassung löste eine Revolution im Denken sowie heftige Kontroversen aus, die sich bis ins nächste Jahrhundert hinzogen. Der italienische Mathematiker, Astronom und Physiker Galileo Galilei versuchte mehrere Jahre lang, die Richtigkeit der kopernikanischen Theorie zu beweisen. Im Jahre 1632 veröffentlichte er die Begründung in seinem Werk *Dialog*

über die beiden hauptsächlich Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische. Daraufhin beschuldigte ihn die katholische Kirche, er habe ihr Verbot mißachtet, das kopernikanische System zu lehren. Galileis Buch wurde daher als ketzerisch eingestuft, und er wurde gezwungen, seine Äußerungen öffentlich zurückzunehmen. Außerdem mußte er schwören, niemals wieder die kopernikanische Theorie zu vertreten; andernfalls würde er gefoltert oder gar bei lebendigem Leibe auf dem Scheiterhaufen verbrannt werden.

Isaac Newton, der Vater der Physik, führte die Welt in die nächste wissenschaftliche Epoche. Er wurde ein Jahr nach Galileis Tod geboren. Newtons Vater war kurz zuvor verstorben, und der kleine Isaac wurde in die Obhut seiner Großmutter gegeben. Jahre später, als die Universität wegen einer Pestepidemie in London geschlossen war, kehrte Newton in sein kleines Reich in Wools-thorpe zurück. Hier entwickelte er die Grundzüge der Infinitesimalrechnung und auch erste Vorstellungen über die universelle Gravitation. Aber er publizierte seine Arbeiten erst über 20 Jahre später. Newtons Gesamtwerk wurde schließlich 1687 in seinem Buch *Principia* veröffentlicht und gilt nach wie vor als die größte wissenschaftliche Einzelleistung in der Geschichte. Wie jeder fundamental neue Ansatz wurde auch Newtons seinerzeit neue Vorstellung über die Gravitation nur zögernd akzeptiert. »Sie haben nicht erklärt, warum die Gravitation wirkt«, warf man ihm vor. So mußte Newton - wie Kopernikus, Galilei und andere vor und nach ihm - versuchen, sich im Ringen um das rationale Denken zu behaupten.

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts entbrannten in der Biologie heftige Auseinandersetzungen, bei denen Charles Darwin eine führende Rolle spielte. Mit seiner einzigartigen Theorie betrat er wissenschaftliches Neuland: Nie zuvor waren das Wesen des Lebens selbst, sein Ursprung und seine Entwicklung wissenschaftlich untersucht worden. Hier ging es um Lebewesen anstatt um entfernte, leblose Himmelskörper, deren Umlaufbahnen von Kopernikus, Galilei und Newton erforscht worden waren. Die emotionalen Wellen schlugen hoch, und Darwin sah sich im Brennpunkt der größten wissenschaftlichen Kontroverse des 19. Jahrhunderts, die noch lange andauern sollte. Beispielsweise wur-

de 1925 der Lehrer John T. Scope verurteilt, weil er - einem Gesetz des US-Staates Tennessee zuwider - die Evolutionstheorie gelehrt hatte. Auch heute noch stehen sich Vertreter des Kreatianismus und des Evolutionismus unversöhnlich gegenüber; das wird wohl auch im 21. Jahrhundert noch der Fall sein.

Die sozialen und politischen Gegebenheiten verhinderten in vielen Fällen, daß die neuen Erkenntnisse anerkannt und angemessen gewürdigt wurden. Diese Gelehrten wurden nicht durch ihre Wissenschaft berühmt, sondern sie machten umgekehrt die Wissenschaft berühmt. Daher geht es hier sowohl um Geschichte als auch um Naturwissenschaft, denn beide Disziplinen sind unauflöslich miteinander verknüpft und unterliegen gleichermaßen dem Einfluß ökonomischer, politischer, militärischer und religiöser Gegebenheiten. All diese Faktoren sind ihrerseits Teil des kulturellen Gefüges.

Naturwissenschaft kann ungeheuer faszinierend sein. Die sieben großen Entdeckungen kulminieren heute in einer zuvor undenkbaren und umfassenden wissenschaftlichen und technischen Revolution. Ob wir sie billigen oder nicht, wir werden von ihr mitgerissen und müssen uns der aktuellen kulturellen Realität stellen - es sei denn, wir lebten als Einsiedler. Aber sogar dann können wir Telefon haben. Die Naturwissenschaften beeinflussen unser ganzes Leben. »Wir stehen in der gegenwärtigen Epoche an einem wichtigen Scheideweg für unsere Kultur und vielleicht für unsere Art«, schrieb Carl Sagan 1980 in seinem Buch *Unser Kosmos*. »Welchen Weg wir auch nehmen, unser Schicksal hängt zwangsläufig von der Wissenschaft ab. Es ist für unser Überleben entscheidend, daß wir sie verstehen.« Wissenschaft zu verstehen bedeutet, mehr über das Leben zu wissen. Das heißt, man kann den Alltag leichter bewältigen und mit Hilfe von Naturwissenschaft und Technik bestimmte Ziele erreichen. Die Wissenschaft ist unser Erbe und Teil unserer Kultur. Sie ist für alle da, nicht nur für die Intellektuellen im Elfenbeinturm.

Wir haben das große Glück, in dieser aufregenden Übergangsperiode zu leben, die in der Geschichte absolut einmalig ist. Wir schreiten fort - von der Unkenntnis zur Erkenntnis, von Fragen zu Antworten, vom Wandern zum Verstehen. Während wir dem



Ende des Jahrhunderts zusteuern, lichtet sich der Nebel und läßt uns Dinge erkennen, die noch niemand zuvor wissen konnte. In diesem Buch werden die Naturwissenschaften auf eine Weise beschrieben, wie wir es im Unterricht gern gehabt hätten. Wir schauen uns die bedeutendsten wissenschaftlichen Entdeckungen der Geschichte an und lernen außerdem die daran beteiligten Personen kennen. So werden die Naturwissenschaften auch für den Laien interessant und verständlich, und Aberglaube, Vorurteile und Irrlehren sollten endgültig der Vergangenheit angehören.

Noch einmal die Antwort auf die eingangs gestellte Frage: *Ein Durchschnittsbürger kann die großen naturwissenschaftlichen Entdeckungen tatsächlich verstehen.* In diesem Buch kommt nur eine einzige Gleichung vor, nämlich Einsteins berühmte Beziehung  $E = mc^2$ . Sie dient dabei eher zur Illustration, und wir müssen sie nicht anwenden. Es geht hier um Begriffe und Vorstellungen, nicht um Algebra und Integralrechnung. Einstein selbst sagte: »Die Wissenschaft ist im Grunde nicht mehr als eine Verfeinerung des alltäglichen Denkens.« Wissenschaftliche Entdeckungen gründen auf Prinzipien, die mathematisch formuliert werden können, aber es reichen Worte aus, um sie verständlich zu machen. Wenn man die sieben großen Entdeckungen, die in den folgenden Kapiteln dargelegt werden, richtig versteht und die Rolle der Wissenschaftler richtig einordnet, hat man eine Leistung vollbracht, die uns und unsere Lehrer in der Schule nur verblüfft hätte. Dies ist eine Art von naturwissenschaftlichem Unterricht, wie wir ihn alle gern gehabt hätten.

## TEIL 1

# Gravitation und die Grundgesetze der Physik

*In der Renaissance gingen die alten philosophischen Lehren langsam und gegen den Widerstand vieler Gelehrter unter. Wie Nikolaus Kopernikus, Tycho Brahe und Johannes Kepler nach und nach bewiesen, waren die aristotelischen und ptolemäischen Auffassungen über das Universum falsch. Man erkannte nun, daß die Erde nicht das Zentrum des Weltalls ist, sondern sich um die Sonne bewegt. Aber die Kräfte der Vernunft lagen im Widerstreit mit denen der politischen und religiösen Macht und forderten die Lehren der römisch-katholischen Kirche heraus, die am Weltbild des Aristoteles festhielt. Im Laufe dieser Auseinandersetzungen verloren Giordano Bruno sein Leben und Galileo Galilei seine Freiheit.*

*Gegen Ende des 17. Jahrhunderts vollbrachte Isaac Newton eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Einzelleistungen aller Zeiten : Er entdeckte das Gravitationsgesetz und formulierte die Grundzüge der klassischen Physik. Jedes Materieteilchen zieht infolge der Gravitation jedes andere Teilchen an, und für die Abhängigkeit der Anziehungskraft von den Massen und deren Abstand gilt Newtons Formel. Weil alle Körper aus Materieteilchen bestehen, zieht die Sonne in unserem Sonnensystem alle Planeten an, und ebenso zieht die Erde den Mond an. Auch an diesem Buch, das Sie gerade in den Händen halten, zieht die Erde mit der gleichen unsichtbaren Kraft.*

*Die Theorie der universellen Gravitation, die Bewegungsgesetze und die anderen Formeln, die Newton aufgestellt hatte, markierten den Beginn der modernen Physik und bilden das Paradigma, auf dem ein Großteil der modernen Wissenschaft aufbaut. Vernunft und Argumentation triumphierten, und die Anschauungen über die Welt änderten sich unwiderruflich.*

## KAPITEL 1

### Von Umwälzungen und Umlaufbahnen

*»jede Revolution (...) beginnt mit einer bestimmten Handlung, die korrupte Praktiken aus der Welt schaffen und das wiederherstellen soll, was manch wirklich Konservativer für einen erstrebenswerten Zustand hält.«*

Charles C. Gillispie, *The Edge of Objectivity* (1960)

*»Wenn Sie auf Reisen sind,(...) können Sie sich an markanten Geländeformationen orientieren - Bergen, Flüssen oder Bauwerken. (.. .)Aber (...) die Leere und Gleichförmigkeit des Meeres (...) zwang die Seefahrer, ihre Orientierungszeichen am Himmel zu suchen, nämlich bei Sonne, Mond und Sternen. (...) Sie suchten also Himmelszeichen, die ihnen als Seezeichen dienen sollten. Es ist kein Wunder, daß die Astronomie der Seefahrt diene und daß das Zeitalter des Kolumbus die Ära des Kopernikus einleitete.«*

Daniel J. Boorstin, *The Discoverers* (1983)

### **Die Pest tötete Millionen, und es drohte ein Rückfall ins frühe, finstere Mittelalter** *Perfekte Kreise und kristallene Sphären*

Im Sommer 1347 breitete sich die verheerendste Seuche aus, die Europa jemals heimsuchte: Die Beulen- und Lungenpest, hervorgerufen durch Bakterien, die von Rattenflöhen übertragen wurden. Man nannte die Pest auch Schwarzen Tod, weil die Haut der Opfer kurz vor dem Ableben durch Kapillarblutungen eine dunkle Färbung annimmt. Die Pest ging ursprünglich von China aus

und kam durch eine groteske frühe Version biologischer Kampfführung nach Europa: Der Mongolenstamm Kiptschak griff einen am Schwarzen Meer gelegenen Handelsposten der Genueser an und schleuderte mit Katapulten Pestleichen über die Befestigungsmauern der Stadt. In seinem Buch *The Black Death* (Der Schwarze Tod) beschrieb Philip Ziegler die nächsten tödlichen Schritte:

*»Sobald die verwesenden Leichen hineingeschleudert worden waren, trugen die Genueser sie sofort wieder heraus und warfen sie ins Meer. Aber nur wenige Orte sind so anfällig für Seuchen wie belagerte Städte. (...) Den Einwohnern (...) wurde bald klar, daß sie - selbst wenn sie die Krankheit überleben sollten - bei weitem zu wenige waren, um einem neuerlichen Ansturm der Tartaren widerstehen zu können. Also flohen sie in ihren Galeeren über das Schwarze Meer ins Mittelmeer. Mit ihnen kam die Pest nach Mitteleuropa.«*

Die Pest erreichte in den folgenden vier Jahren in einer ersten Welle die Mittelmeerhäfen, Sizilien, dann Nordafrika, Italien, Spanien und Frankreich, danach auch England und bald ganz Europa. Die ersten Symptome der Pest sind Frösteln, Erbrechen, Kopfschmerz, Schwindelgefühl, Lichtempfindlichkeit, Schmerzen in Rücken und Gliedern, schließlich Delirium. Nach Aufzeichnungen aus jener Zeit schilderte Ziegler das physische Erscheinungsbild und die Merkmale als Geschwüre, die »so groß wie ein Apfel werden können und in der Leistengegend oder in den Achselhöhlen« auftreten. Von dort »breiten sie sich bald auf den ganzen Körper aus, (...) ein Zeichen des nahenden Todes«. Wenn die Lungen infiziert wurden, starb das Opfer innerhalb weniger Tage. Andere Fälle zogen sich über etliche Wochen hin. Ziegler schrieb:

*»Alles am Kranken war so abscheulich, daß er eher Ekel als Mitleid erregte.(...) Alles, was sein Körper ausschied, stank unerträglich: Schweiß, Exkreme, Speichel, Atem - alles so übelriechend, daß es nicht auszuhalten war. Der Urin war trüb und dickflüssig, außerdem schwärzlich oder rot gefärbt.«*

Zu den Bemühungen, die Seuche einzudämmen, gehörten Feuer im Freien, mit denen man die Luft reinigen wollte, außerdem Bußprozessionen und auch die Verfolgung religiöser Minderheiten. Rund 25 Millionen Menschen kamen durch die Pest um, das war rund ein Viertel der europäischen Bevölkerung; in einigen Gebieten starben sogar fast zwei Drittel der Menschen. Aber das war noch nicht das Ende der Pest. Sie trat im 14. Jahrhundert noch fünfmal auf, und es dauerte danach zwei Jahrhunderte, bis die Bevölkerung Europas wieder auf 100 Millionen anstieg.

In den vorangegangenen Jahrhunderten, nach dem Untergang des Römischen Reiches um das Jahr 480, war die Kirche zum Zentrum der Christenheit geworden. Bis etwa 1300 hatte sie ihre Autorität in Europa etabliert. Sie beeinflusste die Einsetzung von Herrschern und war in internationale Konflikte und fast alle Aspekte des bürgerlichen Lebens involviert. In Italien war es der Kirche gelungen, die Ordnung in den Stadtstaaten wiederherzustellen, die sowohl politisch als auch ökonomisch zerfallen waren. Dieser Erfolg stärkte die päpstliche Autorität, und bis zur Zeit der ersten Pestepidemien hatte die Kirche ihre Macht gefestigt. Die Bevölkerung wurde frommer und wandte sich der Religion zu, um Trost und Erlösung zu finden. Gleichzeitig wurden die Moralvorstellungen strenger. Es gab bösartige politische und physische Angriffe gegen europäische Muslime und Juden, die oft nur die Wahl hatten, zum Christentum zu konvertieren oder getötet zu werden. Die meisten zogen es vor, Christen zu werden.

Mit der Ausbreitung des Schwarzen Todes endeten Wohlstand und Optimismus, die sich in Europa bis dahin herausgebildet hatten. Plötzlich herrschten Furcht und Angst, und eine Reihe sozialer und politischer Umwälzungen erschütterten den Kontinent. Die Türken verdrängten im östlichen Mittelmeerraum das Christentum, und in ganz Europa flammten lokale Konflikte auf. Nach der Pest fehlten viele Arbeitskräfte, so daß die Äcker vernachlässigt wurden. Viele Leibeigene entflohen ihren Herren. Die Arbeitskraft wurde teurer, so daß die Regierungen die Preise kontrollieren wollten. Die Auseinandersetzungen gipfelten im Bauernaufstand von 1381. Waren aller Art wurden knapp, und die Wirtschaft - weitgehend abhängig vom Ackerbau - fiel in eine Art mittelalterliche Rezession. Sie führte zu ökonomischem

und politischem Chaos. Europa drohte in Zustände des frühen Mittelalters zwischen 450 und 750 zurückzufallen.

Im Mittelalter waren sich die Gelehrten einig, daß das Universum von Prinzipien beherrscht wird, die der griechische Naturphilosoph Aristoteles (384-322 v. Chr.) und der ägyptische Astronom Claudius Ptolemäus (100-170 n. Chr.) formuliert hatten. Die Kirche unterstützte diese Ansichten mit der entsprechenden Interpretation der Bibel: *Gott hat dem Himmel und der Erde eine perfekte und ewig dauernde Kreisbewegung verliehen. Unsere Welt besteht aus vier Elementen (Erde, Luft, Feuer und Wasser) und befindet sich im Zentrum. Den Himmel bilden acht konzentrische Kristallsphären aus einer unveränderlichen Substanz, und die anderen Himmelskörper werden von diesen Sphären getragen oder gehalten. Eine Sphäre trägt die Sonne, eine den Mond, und fünf weitere Sphären tragen jeweils einen der Planeten Mars, Merkur, Jupiter, Venus und Saturn. (Die Erde galt ja nicht als Planet.) Die achte Sphäre trägt alle Sterne. Die Materie auf der Erde vergeht und stirbt, während alles andere im Universum unwandelbar bleibt.*

Die Vorstellungen von Aristoteles und Ptolemäus über das Universum gingen weit über die rein physikalische Beschreibung der Welt hinaus. Sie führten zu einem ausgeklügelten und tief verwurzelten Gefüge von kulturellen Überzeugungen, das unmittelbar auf dieser Sichtweise der Realität beruhte. Die Astrologie spielte dabei eine zentrale Rolle. Jahrhundertlang blickten die Astrologen - und die Herrscher, die ihren Rat suchten - zum Himmel, um den Stand, den »Einfluß« und den »Charakter« der Sterne zu bestimmen und ihr Leben danach auszurichten. So wurde das Leben von Millionen Menschen unter diesen Herrschern durch die Anschauungen von Aristoteles und Ptolemäus über das Universum beeinflusst.

Auch die recht willkürlich erscheinende Aufteilung der Zeit in Abschnitte von je sieben Tagen geht direkt auf die damals bekannten großen Himmelskörper zurück. Seit der Zeit des Römischen Reiches vor zwei Jahrtausenden wird jeder der sieben Wochentage nach einem Planeten benannt, zu denen früher allerdings auch Sonne und Mond gezählt wurden, aber nicht die Erde. Die Reihenfolge der Wochentage entsprach dem »Einfluß«

des betreffenden Planeten auf die weltlichen Dinge und nicht seinem scheinbaren Abstand von der Erde. Es geht also auf die Astrologie im alten Rom zurück, daß die Wochentage in den romanischen Sprachen weitgehend nach den Planeten benannt sind (der Mond heißt im Lateinischen *luna*):

»Planet«	französisch	italienisch	spanisch	deutsch	englisch
Sonne	Dimanche	Domenica	Domingo	Sonntag	Sunday
Mond	Lundi	Lunedì	Lunes	Montag	Monday
Mars	Mardi	Martedì	Martes	Dienstag	Tuesday
Merkur	Mercredi	Mercoledì	Miércoles	Mittwoch	Wednesday
Jupiter	Jeudi	Giovedì	Jueves	Donnerstag	Thursday
Venus	Vendredi	Venerdì	Viernes	Freitag	Friday
Saturn	Samedi	Sabato	Sábado	Samstag	Saturday

Diese eigentlich künstliche Gruppe von sieben Tagen hat keinerlei Beziehung zu den regelmäßigen Bewegungen der Himmelskörper, sondern entsprang allein der Vorstellungskraft. Und doch lag darin der Versuch, einen Zyklus zu finden, außerdem die Überzeugung, daß die Menschen von unsichtbaren Kräften beherrscht werden, die über große Entfernungen hinweg wirken. Aber dieser Ansatz, das Universum zu verstehen, entbehrte jeder sachlichen Grundlage.

Überall herrschte Aberglaube. Magie, Hexerei und Alchimie waren populär, und es gab (im heutigen Sinne) praktisch keine Wissenschaft.

### **Wirtschaftliche Notwendigkeiten führen zur wissenschaftlichen Revolution**

#### *Regiomontanus und die Epizyklen*

Im frühen 15. Jahrhundert zeigten sich in Europa erste Anzeichen für bevorstehende Veränderungen. Nach den Pestepidemien versuchte man, die Trostlosigkeit so schnell wie möglich zu überwinden, und schuf die Voraussetzungen für ein neues, helleres Kapitel in der Geschichte: die Wiedergeburt Europas - die Renaissance, die die Wiederentdeckung der klassischen Literatur und Kunst sowie ein großes Interesse an geistigen Auseinander-

Setzungen mit sich brachte. Mit der Renaissance begann eine Ära der Erneuerung der Künste und der wissenschaftlichen Revolution, darunter geographische Erkundungen. Es wurden noch nie dagewesene Anstrengungen unternommen, technische Vorrichtungen zu entwickeln, um ökonomische und kommerzielle Vorhaben zu erleichtern.

Italien erholte sich als erstes vollständig vom Schwarzen Tod. Die geographische Lage des Landes begünstigte den Austausch zwischen Europa und dem Nahen Osten, und die Italiener trieben seit dem frühen 14. Jahrhundert einen schwunghaften internationalen Handel. Sie importierten Gewürze, Duftstoffe, Seide und andere Waren aus dem Orient und lieferten sie an andere europäische Länder weiter. Bald entwickelten sich in Italien ausgeklügelte Handels- und Bankensysteme, und die Kaufleute wurden in Finanzdingen sehr versiert. Darauf beruhte die Überlegenheit Italiens im 15. Jahrhundert. Florenz war der zentrale Banken- und Handelsplatz, und Italiens ökonomische Blüte im ausgehenden Mittelalter förderte auch die wissenschaftliche Forschung. In Bauwesen, Navigation, Kartographie und Vermessung wurden zunehmend mathematische Methoden angewandt, und seit dem 15. Jahrhundert entwickelten sich Geometrie, Trigonometrie und Algebra rasant fort.

Schon sechzehn Jahrhunderte zuvor hatten einige griechische Naturphilosophen angenommen, daß die Erde eine Kugel sei. Diese Erkenntnis blieb aber während des gesamten Mittelalters verschüttet. Sie kam erst wieder auf, als Kolumbus mit Hilfe einer Karte des italienischen Kosmographen Paolo Toscanelli (1397-1482) seinen Weg fand und auch andere Expeditionen - unter anderem von Vespucci und Magellan - bestätigten, daß die Erde keine Scheibe ist. Sie wurde nun als eine weitgehend von Wasser bedeckte Kugel angesehen, von deren Festland der größte Teil bewohnbar sein sollte.

Mit der Anwendung der Mathematik im täglichen Leben und mit der Erkenntnis, daß die Erde kugelförmig ist, änderten sich auch die Vorstellungen über die Bewegungen des Mondes, der Erde und der anderen Planeten. Wenn man hier einen Ausgangspunkt annehmen kann, dann lag er wohl im Jahr 1463, allerdings nicht in Italien, sondern in Deutschland. Hier hatte der Astronom



Regiomontanus (eigentlich Johann Müller, 1436-1476) ein Werk mit dem Titel *Epytoma* mitverfaßt, das erst 1496 erschien, zwanzig Jahre nach seinem Tode. Hierin beschrieb er einige Schwächen der geozentrischen Theorie des Ptolemäus. Dieser hatte in seinem *Almagest* komplizierte »Epizyklen« angenommen, also kleine Schleifen in den Umlaufbahnen der einzelnen Planeten. Sie waren nötig, um deren zeitweise rückläufige Bewegungen relativ zu den Fixsternen zu erklären. Dabei sollte die Erde im Weltall stillstehen und dessen Zentrum bilden (daher spricht man vom geozentrischen System). Obwohl der *Almagest* über 1300 Jahre zuvor verfaßt wurde, war er noch um 1500 maßgebend für die Anschauungen vom Aufbau des Universums - ein gutes Beispiel für die unerschütterliche Ehrfurcht im Mittelalter vor den Ideen der antiken Philosophen. Die Arbeiten des Regiomontanus waren der erste Schritt zur Abkehr von dem Glauben, daß die Erde unverrückbar das Zentrum des Universums bildet. Er schuf damit die Grundlage für eine Revolution in der Astronomie.

## **Kopernikus stürzt das geozentrische System und entthront den Menschen**

*Aber wo ist der Wind?*

Wir wissen heute, daß ein Umlauf der Erde um die Sonne 365 Tage, 5 Stunden, 48 Minuten und 46 Sekunden dauert. Die Ägypter des Altertums setzten dafür 365,25 Tage an. Das sind 11 Minuten und 14 Sekunden zuviel. Nachdem Julius Cäsar im 1. Jahrhundert v. Chr. den ägyptischen Kalender für Europa übernommen hatte, liefen Kalenderdaten und Jahreszeiten allmählich immer weiter auseinander. Im 15. Jahrhundert war der Julianische Kalender dadurch schon um 10 Tage falsch. Das bemerkten außer den Astronomen vor allem die Bauern und die Seeleute. Auch die Kirche war betroffen, denn die Frühlings-Tag-und-Nachtgleiche (nach der sich das Osterdatum richtet) war auf den 21. März festgelegt, hatte sich inzwischen aber wegen der zunehmenden Diskrepanz auf den 11. März verschoben.

Im Jahre 1475 beauftragte Papst Sixtus IV. den Astronomen

Regiomontanus damit, die Ursache der Abweichungen zu ergründen. Das vermochte Regiomontanus jedoch nicht, denn die dafür nötigen exakten Daten konnten im Rahmen des aristotelisch-ptolemäischen Systems nicht ermittelt werden. Nach diesem geozentrischen Modell umrunden Mond und Sonne die ruhende Erde, und die acht kristallinen Sphären kreisen auf ewig um die Erde. Der beharrliche blinde Glaube an die antiken Naturphilosophen trug zwar zur sozialen Stabilität bei, behinderte aber nicht nur die genaue Festlegung des Osterdatums, sondern auch das Aufkommen der exakten Wissenschaft.

Zu jener Zeit wuchs Nikolaus Kopernikus (1473-1543) im polnischen Thorn als jüngstes von vier Kindern eines wohlhabenden Kaufmanns heran. Kopernikus hatte weitgefächerte Interessen und Talente. Er studierte an verschiedenen Orten in Italien: Astronomie in Bologna, Medizin in Padua und Jura in Ferrara. Später lehrte er an einigen europäischen Universitäten Mathematik, Astronomie und Medizin. Den größten Teil seines Lebens verbrachte er als Domherr im polnischen Frauenburg. Seine Ausbildung und sein Berufsweg waren weitgehend von der katholischen Kirche bestimmt, wie das bei den allermeisten Gelehrten jener Zeit der Fall war.

Um das Jahr 1506 begann Kopernikus, ein astronomisches System zu entwickeln, dessen Grundlage seine eigenen Beobachtungen und Berechnungen der Bewegungen von Himmelskörpern waren. Bald erkannte er, daß die geozentrischen Theorien des Ptolemäus mit den Beobachtungen nicht übereinstimmten, wie es zuvor auch Regiomontanus in seinem Buch *Epytoma* vermutet hatte. Andererseits wußte Kopernikus, daß die Schriften des Ptolemäus im Einklang mit der Bibel standen, ebenso mit einfachen Beobachtungen von der Erde aus. Diese lassen ja nicht vermuten, daß die Erde rotiert oder sich um die Sonne bewegt. Das Prinzip der Gravitation war noch nicht bekannt, und Kopernikus hatte kein überzeugendes Argument gegen den allgemeinen Glauben an die Deutung des Aristoteles. Danach fallen alle Gegenstände auf die Erde, weil sie vom Mittelpunkt des Universums - eben von der Erde - »auf natürliche Weise angezogen werden«. Kopernikus versuchte nicht zu erklären, warum Gegenstände nicht von der Erde weg auf die Sonne »fallen«, wenn diese

das Zentrum des Weltalls darstellt. Nur wenige Menschen waren damals für eine Theorie empfänglich, die die Erde und die Menschheit aus der Mitte des Universums verbannte. Es galt als unwiderlegbare Wahrheit, daß Gott den Menschen in das Zentrum und auf den größten aller Himmelskörper gestellt hatte. Zudem forderten Eitelkeit, Furcht und der Glaube an die Bibel die Sonderstellung der Erde.

Kopernikus wurde im Jahre 1514 von der päpstlichen Kurie damit beauftragt, das von Regiomontanus nicht gelöste Problem des ungenauen Kalenders zu bearbeiten. Dabei stand er vor dem Dilemma, seine Beobachtungen einzubringen, ohne den allgemeinen und geheiligten Vorstellungen seiner Zeit zu widersprechen. Überdies war die Kirche bei der Verteidigung ihrer Lehren inzwischen wachsamer geworden. Das erhöhte für Kopernikus die Gefahr, des Zweifels an der kirchlichen Autorität beschuldigt zu werden. Daher schlug er den Auftrag der Kirche aus mit der Begründung, daß er den Grund für die Diskrepanz nicht klären könne, bevor die Beziehungen zwischen Erde, Sonne und Mond vollständig verstanden seien. Aber er fuhr heimlich damit fort, seine Theorie zu entwickeln, während er verschiedene Ämter in Regierung und Kirche bekleidete: Von 1519 bis 1521 förderte er den Wiederaufbau von Ermland in Nordpolen, diente als bischöflicher Beauftragter der Diözese Ermland und richtete die medizinische Versorgung der Bevölkerung ein. Im Jahre 1522 legte er ein Konzept für eine Währungsreform vor.

Von der Genauigkeit seiner astronomischen Beobachtungen überzeugt und von Freunden ermutigt, ging Kopernikus 1530 schließlich an die Öffentlichkeit und präsentierte einen kurzen Abriß seiner heliozentrischen Theorie, nach der die Sonne den Mittelpunkt des Universums bildet. Sein *Commentariolus* (lateinisch: Aufsatz) mit Hypothesen über die Bewegungen am Himmel rief ein gemischtes Echo hervor. In den folgenden Jahren lehrte er weitgehend auf der Grundlage dieser neuen Prinzipien, während seine Kollegen ihn eindringlich aufforderten, die gesamte heliozentrische Theorie zu publizieren. Trotz dieses Rückhalts und obwohl Papst Clemens VII. die Theorie inoffiziell billigte, zögerte Kopernikus damit, denn er wollte die anerkannten Auffassungen über das Universum nicht grundsätzlich in Frage

stellen. Im Jahre 1540 war er schließlich damit einverstanden, daß Georg Joachim Rheticus, Mathematikprofessor an der Universität Wittenberg, eine umfassendere Darstellung des Planetensystems gemäß der neuen Theorie publizierte. Nach weiterem Drängen seiner Freunde erlaubte Kopernikus die Herausgabe seines gewaltigen Gesamtwerks *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Über die Kreisbewegungen der Himmelsphären), im folgenden kurz *De Revolutionibus* genannt. Das erste Exemplar dieses Werkes erhielt Kopernikus am 24. Mai 1543, als er nach einem Schlaganfall mit fortschreitender Lähmung im Bett lag. Noch am selben Tag verstarb er.

In sechs umfangreichen Teilen liefert *De Revolutionibus* eine detaillierte Beschreibung und einen Beweis für das heliozentrische System. Zunächst werden so grundlegende Aspekte untersucht wie die Kugelform der Erde (an der viele noch zweifelten) und die Unermeßlichkeit des Himmels, Danach wird ein System beschrieben, bei dem die damals bekannten sechs Planeten um die Sonne anstatt um die Erde kreisen und bei dem auch die Erde diesen »sichtbaren Gott« umrundet und sich außerdem um sich selbst dreht. Im kopernikanischen System sind die Umlaufbahnen der Planeten nach wie vor exakte Kreise auf den kristallinen Sphären. Heute wissen wir, daß es Ellipsen sind. Zu jener Zeit waren die Messungen noch relativ ungenau: Das Teleskop war noch nicht erfunden, und die Größen, Geschwindigkeiten und Abstände der Himmelskörper im Raum waren noch völlig unbekannt. Kopernikus gab die erste logische Erklärung für die Tatsache, daß jeder »Planet« (nach dem griechischen Wort für Wanderer) beim Umrunden der Sonne gegenüber den Fixsternen zeitweise zurückbleibt. Allerdings mußte auch er, wie Ptolemäus, einige Epizyklen zulassen, damit die Theorie den Beobachtungen entsprach. Das lag vor allem daran, daß - entgegen der Wirklichkeit - genau kreisförmige Bahnen vorausgesetzt wurden.

Das Werk *De Revolutionibus* erklärte das Kalenderproblem und zeigte, warum die Theorien des Ptolemäus falsch waren. Doch auch von den Astronomen übernahmen nur wenige Kopernikus' Theorie. Sie widersprach damals dem gesunden Menschenverstand, denn sie erklärte weder, warum die Bewegung der Erde keinen gewaltigen Sturm hervorruft, noch, warum keine

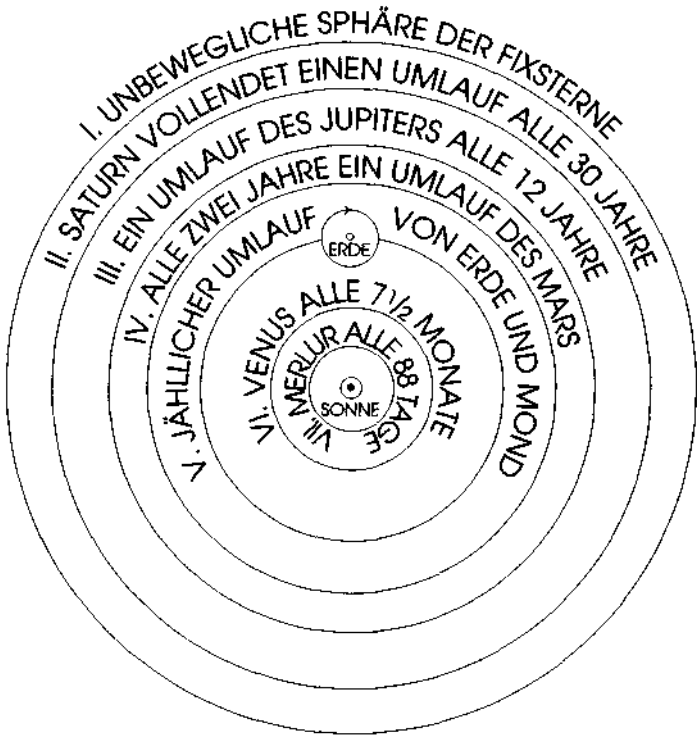


Abb. 1.1: Das Sonnensystem, wie es in *De Revolutionibus* beschrieben wird

Verschiebung der Sternpositionen erkennbar ist, noch warum Menschen, Tiere und Gegenstände nicht von der Erdoberfläche weggeschleudert werden. Zudem widersprach die Theorie der Bibel.

Obwohl die Kirche Kopernikus nicht offiziell kritisierte, nachdem *De Revolutionibus* erschienen war, reagierten viele führende Geistliche doch abweisend. Der deutsche Theologe Philipp Melancthon (1497-1560), der fest an Astrologie und Dämonen glaubte, hatte versucht, die Publikation des Werkes zu verhindern. Der schweizerische Reformator Johannes Calvin (1509-1564) wies darauf hin, daß sich die Erde gemäß der biblischen Lehre nicht bewegen könne, und Martin Luther (1483-1546) meinte,

»der Narr wird die ganze Lehre der Astronomie auf den Kopf stellen«. Selbst die einsichtigsten Gelehrten konnten nicht akzeptieren, daß die Menschheit entthront und die Erde vom Zentrum des Universums verdrängt, d. h. zu einem Planeten ohne besondere Bedeutung herabgestuft wurde. Trotz der Argumente des Kopernikus und ungeachtet seines Werkes *De Revolutionibus* beließ man die Erde vorläufig im Mittelpunkt des Universums. So blieb es anderen Astronomen und Mathematikern in der Renaissance vorbehalten, seine Theorie aufzugreifen, zu verfeinern und zu erweitern, bis sie letztlich unwiderlegbar wurde.

Das heliozentrische System des Kopernikus war ein mutiger Ansatz, die Astronomie von der Philosophie zu lösen und sie zu einer Naturwissenschaft zu machen. Kopernikus widerlegte die aristotelisch-ptolemäischen Lehren, nach denen Körper auf ihren »natürlichen Platz« zurückfallen, und entthronte die Menschheit und die Erde. Sein Werk führte schließlich zu grundsätzlich neuen Auffassungen über das Universum und leitete damit einen fundamentalen Wandel im Denken ein, den man heute zuweilen die Kopernikanische Revolution nennt. Fast am wichtigsten war dabei die erstmalig von ihm vertretene Auffassung, daß das Sonnensystem als ein von den Sternen unabhängiges Gebilde betrachtet und untersucht werden kann.

In seiner Rede zum 410. Todestag von Kopernikus sagte Albert Einstein im Jahre 1953:

*»Kopernikus bahnte nicht nur der modernen Astronomie den Weg, sondern half auch, die Haltung des Menschen gegenüber dem Kosmos entscheidend zu ändern. Sobald erkannt war, daß die Erde nicht das Zentrum des Weltalls darstellt, sondern nur einer der kleineren Planeten ist, wurden die Täuschungen unhaltbar, die man sich über die zentrale Bedeutung des Menschen machte. Durch sein Werk und durch die Größe seiner Persönlichkeit lehrte Kopernikus den Menschen, bescheiden zu sein.«*

Und wirklich stellte Kopernikus, wie Luther vorhergesagt hatte, die Astronomie auf den Kopf. Aber er war alles andere als ein Narr.

## **Tycho Brahe, der erste große beobachtende Astronom, kartographiert den Himmel** *Nachfrage nach Kompassen und Uhren*

Kopernikus' Werk *De Revolutionibus* blieb unter den zeitgenössischen Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Astronomie ein »Außenseiter«. Das Buch wurde von führenden Geistlichen kritisiert, aber von der römisch-katholischen Kirche nicht offiziell zensiert, denn diese hatte noch nicht begonnen, konsequent gegen Häretiker und Protestanten vorzugehen. Es folgten einige Ereignisse, die den Ruhm des Kopernikus festigten und dem heliozentrischen System eine größere Bedeutung verliehen, als es sein Urheber beabsichtigt hatte. Das erste Ereignis war die partielle Sonnenfinsternis vom 21. August 1560, volle 17 Jahre nach Kopernikus' Tod. Sie war aufgrund der astronomischen Tabellen vorhergesagt worden und daher an sich nichts Besonderes, abgesehen davon, daß der Däne Tycho Brahe (1546-1601) sie beobachtete. Er war gerade 13 Jahre alt und studierte an der Universität Kopenhagen.

Diese Sonnenfinsternis beeindruckte Brahe dermaßen, daß sein Lebensweg von da an eine völlig neue Wendung nahm. Brahe hatte unter anderem Jura, Rhetorik und Philosophie belegt und wollte gemäß der Tradition seiner aristokratischen Familie Staatsmann werden. Nun war er aber so fasziniert von der Möglichkeit, Ereignisse wie jene Sonnenfinsternis vorauszusagen, daß er sich fortan hauptsächlich mit der Beobachtung der Planeten beschäftigte. Aber seine Familie und einige Geistliche tolerierten seinen unkonventionellen Zeitvertreib nicht und zwangen ihn, das Jurastudium an mehreren Universitäten fortzusetzen. Unterdessen widmete er sich aber die meiste Zeit heimlich seiner Leidenschaft, der Planetenbeobachtung.

Sein Wunsch nach einer genauen Messung der Bewegungen von Himmelskörpern deckte sich mit dem Wunsch der dänischen Flotte nach genaueren Positionsbestimmungen und mit einer in ganz Europa steigenden Nachfrage nach exakten Kompassen und Uhren. Angesichts der zunehmenden gesellschaftlichen Akzeptanz von Mathematik, Technik und Astronomie konnte Brahe sich bald ganz seinen Neigungen widmen, ohne daß dies von

seiner Familie und seinen Standesgenossen weiter mißbilligt wurde.

Er schloß seine umfangreichen Studien 1572 im Alter von 26 Jahren ab. Im selben Jahr beobachtete er am Abend des 11. November ein anderes astronomisches Ereignis, und diese Beobachtung hatte sehr großen Einfluß auf die wissenschaftliche Astronomie: Brahe bemerkte ein helles Objekt nahe dem Sternbild Cassiopeia, das dort erstmals auftauchte. Es war so ungewöhnlich hell (noch heller als die Venus), daß es sogar am Tage sichtbar war. Im Dezember begann es zu verblassen, blieb aber noch bis Ende März 1573 sichtbar. Zwar gab es einige ältere Berichte über das Auftreten neuer leuchtender Himmelskörper, aber man hielt immer noch an der aristotelischen Doktrin fest, nach der nur die Region zwischen Erde und Mond sich verändern oder vergehen könne, aber die Himmelsregion dahinter unveränderlich sei. Mit anderen Worten: Es könnten keine neuen Sterne entstehen. In früheren Zeiten sah man solche neuen hellen Objekte als Kometen an, denn diese befänden sich, so glaubte man, nur im Gebiet zwischen der Erde und dem Mond, also innerhalb der Sphäre von Verändern und Vergehen; damit bestand kein Widerspruch zu den Lehren des Aristoteles. Daher war beim neuen Objekt von 1572 die entscheidende Frage, ob es sich bewegte. Wenn ja, dann war es nur ein neuer Komet. Wenn es sich aber nicht bewegte, dann war etwas faul im Staate Dänemark oder vielmehr im Universum, wie man es sich damals vorstellte.

Während der wenigen Monate, in denen der neue Himmelskörper sichtbar war, richteten die Astronomen in ganz Europa ihre nach heutigen Maßstäben recht ungenauen Geräte auf diese Lichtquelle und meinten schließlich, daß sie stillstehe. Auch Brahe beobachtete und vermaß das Phänomen mit seinem neuesten Sextanten, einem für die damaligen Verhältnisse hochentwickelten Meßinstrument. Er kam gleichfalls zu dem Ergebnis, daß hier ein neuer Stern und kein Komet zu sehen sei. Das bedeutete jedoch, daß das Prinzip der Unwandelbarkeit des Himmels falsch sein mußte. Dennoch beeilten sich Alchimisten und Astrologen, ihre eigenen Deutungen für den neuen Stern (eine Nova, wie wir heute wissen) zu liefern: ein Komet, kondensiert



aus den aufsteigenden Dämpfen menschlicher Sünden, bestehend aus giftigem Staub, der auf die Köpfe der Menschen rieselt; die Ursache von Bösem sowie schlechtem Wetter und Seuchen.

Zu jener Zeit vollzog sich der lange und schwierige Übergang vom Mittelalter zur Renaissance, und Brahe beklagte sich über die »blinden Beobachter des Himmels«. Er verfaßte ein Buch, in dem er seine detaillierten Beobachtungen der Nova beschrieb. Er wagte es aber nicht, Vermutungen darüber anzustellen, wie der Stern entstanden sei, und es sollte noch Jahrhunderte dauern, bis die Forscher den explosiven Prozeß identifizieren konnten, durch den eine Nova gebildet wird. Brahe beschränkte sich darauf, die Beobachtungen präzise zu beschreiben. König Frederik II. von Dänemark war so beeindruckt von seiner Arbeit, daß er ihm im Jahre 1576 auf der 800 Hektar großen, rund fünf Kilometer langen Insel Hven im Sund vor Kopenhagen ein Grundstück überließ, auf dem er auf Kosten des Staates ein Observatorium errichten konnte. Brahe machte es zu einem Monument, das seinem anspruchsvollen Stil entsprach. Er errichtete außer dem Observatorium ein großes Wohnhaus, ein chemisches Laboratorium, Uhren, Sonnenuhren, Himmelsgloben, eine Kornmühle, zahlreiche Fischteiche, Blumengärten, einen Baumgarten (Arboretum), eine Papiermühle, eine Druckerei und Buchbinderei zur Verarbeitung seiner Manuskripte, eine Windmühle mit Wasserpumpe sowie verschiedene Vorrichtungen zur Beobachtung des Himmels, die damals fast Weltwundern gleichkamen. In dem extravaganten Komplex, den er *Uraniborg* (himmlisches Schloß) nannte, arbeiteten Handwerker am Aufbau der Instrumente, Astronomen zeichneten die Bewegungen der Himmelskörper auf. Außerdem gab es verschiedene Bedienstete, die den Betrieb der kleinen Gemeinschaft aufrechterhielten. Brahe verbrachte zwanzig Jahre an diesem Observatorium und wurde zum ersten bedeutenden Beobachter, der wissenschaftlich methodisch arbeitete - stets mit bloßem Auge, denn das Teleskop war noch nicht erfunden.

Brahe konnte die Vorstellungen des Kopernikus niemals uneingeschränkt akzeptieren, und seine eigene Auffassung von den Bewegungen der Himmelskörper war eine modifizierte Version

des geozentrischen Systems mit Epizyklen ähnlich denen des Ptolemäus. Er war kein kreativer Genius, aber er wandte als erster die höhere Mathematik auf die beobachtende Astronomie an, als er entdeckte, daß ein 1577 von ihm entdeckter Komet sich außerhalb der Mondbahn bewegte.

Brahes Bedeutung als Astronom beruht vor allem auf seinen Sternen- und Planetentafeln. Diese Tabellen gaben die Positionen und die Bewegungen viel genauer an als alle früheren, denn sie gingen auch aus einer Durchsicht und Überarbeitung fast aller damaligen astronomischen Tafeln hervor. Brahe erkannte, daß die Astronomie genaue Daten benötigt, ob diese nun dem Kalender, der Navigation oder einfach dem Erweitern der Erkenntnisse zustatten kommen. Das mag im 20. Jahrhundert banal erscheinen, aber im 16. Jahrhundert war es eine ungewöhnliche Auffassung. Selbst Kopernikus hatte die Wichtigkeit dieses Prinzips nicht erkannt, sondern sich auf die von Hipparch, Ptolemäus und anderen übernommenen Daten verlassen, die Jahrhunderte alt und ziemlich ungenau waren. In sein Werk *De Revolutionibus* sind nur 27 eigene Beobachtungen eingegangen. Dagegen führte Brahe Zehntausende von Beobachtungen durch. Bis dahin hatte man die qualitativ-philosophische Theorie betont und keinen Wert auf exakte Messungen gelegt. Brahes Arbeiten wurden von Bauern, Seefahrern und Uhrmachern unmittelbar genutzt und galten als teilweise Enthüllung von Gottes Schöpfungsplan.

Aber um Brahes Bedeutung in Astronomie und Physik als wichtigem Mittler zwischen Kopernikus und Newton zu erkennen, war zunächst eine neue Bewertung seiner Datensammlung nötig. Es bedurfte eines genialeren Geistes, um mit seinen Daten die tieferen Geheimnisse zu ergründen, die darin verborgen waren. Bei diesem nächsten Schritt sollte das vollendet werden, was Brahe unwissentlich beschrieb, als er mit seinen einzigartigen Instrumenten die Bewegungen von Erde, Planeten und Sternen vermaß.

## **Kepler sucht Gottes großen Plan des Universums und entdeckt die Gesetze der Planetenbewegung**

*Wie ein rüddiger Hund...*

»Laßt uns alle schweigen und Brahe zuhören«, schrieb der brillante und exzentrische Johannes Kepler (1571-1630). »Auf Brahe allein achte ich; er wird mir die Ordnung und das Gefüge der Bahnen erklären. (...) Brahe hat die besten Beobachtungsdaten. (...) Er braucht nur einen Architekten, der alles zusammenfaßt.« - Kopernikus hatte sich von Aristoteles und Ptolemäus abgewandt und richtete seinen Blick auf die Zukunft, die neues Licht in die Wissenschaft bringen sollte. Brahe zeigte, daß Kopernikus zu Recht an der Schwelle zur Zukunft stand. Kepler sollte sie nun überschreiten. Er wurde in Weil der Stadt (nahe Stuttgart) geboren, ein Jahr bevor Brahe die Nova entdeckt hatte. Kepler wuchs als Sohn eines verantwortungslosen Vaters in einer armen Familie auf, war aber ein guter Schüler, und seine Ausbildung wurde vom Staat gefördert. Er hinterließ der Menschheit ein großes Erbe, vor allem den Historikern und den Naturwissenschaftlern. Von seinen wegweisenden Schriften ist der größte Teil erhalten geblieben. Seine Notizen, Tagebücher und Abhandlungen enthalten Äußerungen über alle Aspekte seines Lebens, einschließlich detaillierter Schilderungen seiner Kindheit und seiner Krankheiten.

»Ich wurde vorzeitig geboren, nach 32 Wochen.

1575 ... Ich starb beinahe an den Pocken, war sehr krank, und meine Hände waren fast gelähmt.

1577...An meinem Geburtstag verlor ich einen Zahn; ich brach ihn mit einer Schnur heraus, an der ich mit meinen Händen zog.

1585/86 ... In diesen beiden Jahren hatte ich ständig Hautleiden, oft schwere Entzündungen, an meinen Füßen chronische Wunden, die schlecht heilten und wieder aufbrachen. Am Mittelfinger der rechten Hand hatte ich eine Wurmkrankheit und an der linken ein großes Geschwür.

1587 ... Am 4. April bekam ich heftiges Fieber.

1589 ... Ich begann, an schrecklichen Kopfschmerzen und Bewegungsstörungen zu leiden. Die Räude hatte mich ergriffen.

1591 ••• Die Erkältung führte zu weiteren Geschwüren.«

»Dieser Mann hat (...) eine hundeähnliche Natur«, schrieb er von sich selbst in der dritten Person, »seine Erscheinung gleicht der eines kleinen Schoßhundes. Sein Körper ist agil, drahtig und gut proportioniert. (...) Er ist so gefräßig, daß er nach allem greift, was seine Augen erblicken. (...) Er sucht stets das Wohlwollen der anderen. (...) Er langweilt sich bei Gesprächen, begrüßt Besucher aber fast so freudig wie ein kleiner Hund. Doch wenn ihm auch nur das Geringste weggenommen wird, braust er auf und knurrt. (...) Er ist gehässig und verletzt die Menschen mit seinem Sarkasmus.« Keplers Neigung zur Selbstbeobachtung war so extrem, daß es so wirkt, als habe er eher in diesen schriftlichen Selbstbespiegelungen gelebt als in der Realität. Seine Tagebucheinträge waren ein privates, geheimes Ritual und vermutlich ein Schutzschild gegen die Erinnerungen an das große Unglück seiner teilweise vaterlosen, unerfreulichen und unsteten Kindheit. Die daraus hervorgegangene Unsicherheit spornte ihn zu einem turbulenten und intensiven Leben an, das er als eine endlose Folge von Herausforderungen, Fragen und Problemen verstand und auch gestaltete.

Sein geringes Selbstwertgefühl und seine Verletzlichkeit verbargen sich hinter einem aggressiven, arroganten, feindseligen Gebaren: »Dieser Mensch war dazu geboren, einen Großteil der Zeit mit schwierigen Aufgaben zu verbringen, vor denen andere zurückschrecken«, sagte er über sich selbst. »In der Philosophie las er Texte von Aristoteles. (...) Er erforschte verschiedene Gebiete der Mathematik, als wäre er der erste, der das tut.(...) Er stritt sich mit Vertretern anderer Fächer, um für seinen Geist davon zu profitieren (...) [und] verteidigte die Ansichten des Kopernikus.«

Kopernikus' Werk *De Revolutionibus* war ein halbes Jahrhundert zuvor erschienen und überzeugte inzwischen immer mehr Wissenschaftler von einem sonnenzentrierten Universum. Dennoch folgte die große Mehrheit noch weitgehend den Vorstellungen von Aristoteles und Ptolemäus, als das letzte Jahrzehnt des 16. Jahrhunderts anbrach: unwandelbarer Himmel, perfekte Kreise, himmlische Harmonie, mathematische Harmonie und gleichförmige Bewegung. Kepler sollte aber bald entscheidend an der Wi-

derlegung dieser Grundauffassungen mitwirken. Für ihn war die Geometrie besonders bedeutsam, weil sie »vor der Schöpfung bestand. Sie ist ebenso ewig«, meinte er, »wie der Geist Gottes. (...) Die Geometrie gab Gott ein Modell für die Schöpfung in die Hand. Die Geometrie ist Gott selbst.« Diese Kombination des alten griechischen Bildes vom Universum gemäß den Prinzipien der Geometrie bildete den Eckpfeiler von Keplers Theorie.

Schon in frühen Jahren schrieb Kepler, er sei überzeugt, daß seine Arbeit dazu bestimmt sei, große Wahrheiten zu enthüllen. Das von ihm selbst prophezeite Rendezvous mit dem Schicksal tritt in vielen Teilen seiner umfangreichen Werke zutage, aber es gab keinen realen Grund für seine Voraussage, Großes zu leisten. Andere Astronomen und Mathematiker seiner Zeit waren intelligenter, besser ausgebildet und bekleideten höhere Ämter, und viele hatten aufgrund ihres sozialen Status und ihres gewinnenderen Wesens sicherlich eher Aussicht, berühmt zu werden. Aber am 9. Juli 1595 erkannte Kepler während einer seiner Astronomievorlesungen in Graz plötzlich, daß er das Geheimnis des Universums entschlüsselt hatte: »Die Freude, die mir meine Entdeckung bereitete«, schrieb er später, »werde ich nie in Worte fassen können«.

Seine Idee bestand in einer Weiterführung eines Konzepts, das in den Jahrhunderten zuvor entwickelt worden war. Danach besteht das Universum aus bestimmten symmetrischen geometrischen Figuren. Kepler begann mit zweidimensionalen Gebilden: »Das Dreieck ist die grundlegende Figur der Geometrie. Also versuchte ich, im nächsten Zwischenraum (zwischen Jupiter und Mars) ein Quadrat einzusetzen, zwischen Mars und Erde ein Fünfeck, zwischen Erde und Venus ein Sechseck.« Er erweiterte die Theorie auf jene fünf Körper, die im dreidimensionalen Raum als einzige so konstruiert werden können, daß alle ihre Flächen identische regelmäßige Vielecke sind. Man nennt sie auch die pythagoräischen Körper: Tetraeder, Würfel, Oktaeder, Dodekaeder und Ikosaeder (mit 4, 6, 8, 12 bzw. 20 Flächen). Zu Keplers Zeit waren nur sechs Planeten im heutigen Sinne bekannt: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn. Nach seiner Theorie waren die Sphären zwischen diesen Planeten von je einem der genannten Körper erfüllt.

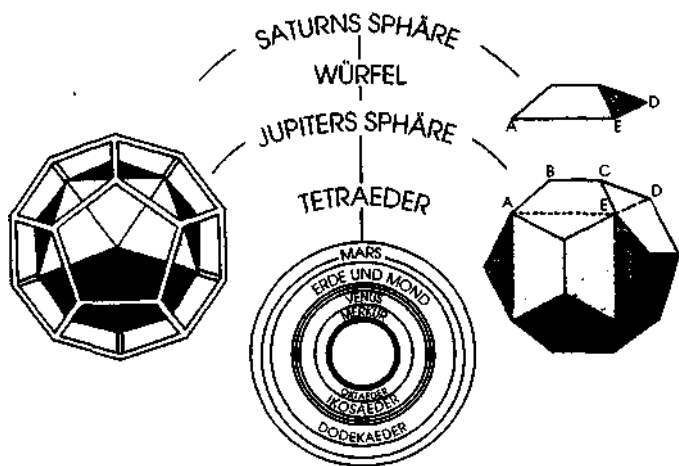


Abb. 1.2: Keplers geometrische Harmonie, aus seinem Werk  
*Epytoma der kopernikanischen Astronomie*

Nach seiner Entdeckung der geometrischen Harmonie war Kepler mehr denn je davon überzeugt, daß er hinsichtlich seines Schicksals recht gehabt hatte:

*»Seit (...) die Sonne meine wundervollen Überlegungen bescheint, hält mich nichts zurück. (...) Ich wage offen zu bekennen, daß ich die goldenen Gefäße der Ägypter gestohlen habe, um ein Tabernakel für meinen Gott zu errichten. (...) Der Würfel ist gefallen, und ich schreibe das Buch, das jetzt oder von der Nachwelt gelesen wird. (...) Es kann hundert Jahre lang auf einen Leser warten, so wie Gott sechstausend Jahre auf einen Zeugen wartete.«*

Nun war Kepler darauf versessen, seine Auffassung vom Sonnensystem mathematisch zu beweisen, indem er die fünf idealen Körper in die Räume zwischen den sechs Planeten zeichnete. Er betrachtete diesen Beweis als die tiefste Einsicht in Gottes Plan des Universums und war ganz sicher, daß es »einen Grund für die Anzahl der Planeten« gab. Jetzt begann seine fieberhafte Suche nach der Wahrheit. Dabei hielt ihn die Vision von einer mathe-

matisch-geometrischen Harmonie im Himmel aufrecht. Er konnte sich nicht vorstellen, daß die fünf idealen Körper rein zufällig zwischen die sechs Planeten paßten oder daß es mehr als sechs Planeten geben könnte. Sein hartnäckiges Festhalten an dieser Theorie trieb ihn zu einer wilden Jagd, die viele Jahre seines Lebens dauern sollte, denn die von ihm zugrundegelegte Theorie war schlicht und einfach falsch.

Kepler begann im Jahre 1600, für Brahe zu arbeiten. Kurz vor seinem Tod 1601 vermachte Brahe Kepler alle seine präzisen, umfangreichen Aufzeichnungen der Planetenbewegungen. Nach Keplers Schilderung lag Brahe auf dem Sterbebett und wiederholte ständig: »Laßt mich nicht vergeblich gelebt haben... Laßt mich nicht vergeblich gelebt haben.« Und tatsächlich machte Kepler später mit Hilfe von Brahens Daten bedeutende Entdeckungen. Kepler faßte sie zu drei Prinzipien zusammen, die er zwischen 1609 und 1618 veröffentlichte. Wir nennen sie heute die drei Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung. Sie lauten (in moderner Formulierung):

1. Jeder Planet umrundet die Sonne auf einer elliptischen Bahn, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet.
2. Ein (gedachter) Strahl, der einen Planeten mit der Sonne verbindet, überstreicht in gleichen Zeitspannen gleiche Flächen.
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer ellipsoförmigen Umlaufbahnen.

Mit Hilfe dieses dritten Gesetzes konnte Kepler exakte Zeitafeln für die Planetenbewegungen aufstellen, so daß man die Position jedes Planeten zu jedem beliebigen Zeitpunkt errechnen konnte.

Man hatte stets von einer unsichtbaren Kraft gesprochen und geschrieben, die die Bewegungen der Himmelskörper antreiben sollte. Normalerweise stellte man sich darunter Gottes Wirken vor. Aber noch nie hatte jemand eine mechanistische, mathematische Interpretation oder Erklärung gegeben, wie es Kepler jetzt tat. Mit Bezug auf seine drei Gesetze schrieb er:

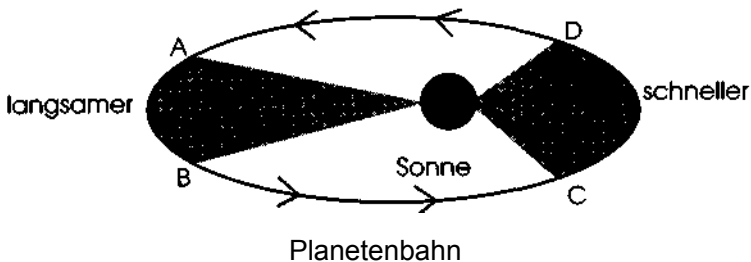


Abb. 1.3: Das zweite Keplersche Gesetz: Die Zeitspanne zwischen den Positionen A und B ist dieselbe wie die zwischen C und D. Die Flächen 1 und 2 sind gleich.

*»Entweder sind die animae motrices [bewegenden Geister oder Kräfte der Planeten] schwächer, wenn die Planeten weiter von der Sonne entfernt sind, oder es gibt im Zentrum aller Umlaufbahnen, also in der Sonne, nur eine [Kraft], die einen Körper um so stärker antreibt, je näher er ist, und bei weiter entfernten Körpern viel schwächer ist.«*

Bei seinem ausdauernden Bemühen, Gottes Plan in Kategorien von geometrischen Formen und Harmonien zu verstehen, stieß Kepler auf mathematische Prinzipien für die Beziehung zwischen den Abständen der Planeten von der Sonne und ihren Umlaufdauern (ihrer Jahre). Kepler war der erste, der kosmische Aspekte mit physikalischen Kräften anstatt mit göttlichem Wirken zu erklären versuchte. Durch die Keplerschen Gesetze entstand erstmals eine Verbindung zwischen Astronomie und Physik. Ironischerweise bewiesen Keplers Gesetze der Planetenbewegungen, daß seine ursprünglichen Theorien über die geometrische Harmonie unmöglich zutreffen konnten. Die perfekt kreisförmigen Bahnen, die er selbst für heilig hielt, gibt es nicht. Vielmehr bewegen sich die Planeten auf Ellipsen (erstes Gesetz). Sie laufen also nicht gleichmäßig um die Sonne, sondern ihre Geschwindigkeit ändert sich mit dem Abstand von der Sonne (zweites Gesetz). Außerdem schien es Kepler, als zeige sich hierin die göttliche Macht der Sonne. Dies war natürlich unvertretbar, und Kepler war geradezu beschämt über sein erstes Gesetz, weil es dem festen Glauben an Kreisbewegungen widersprach. Doch war er



klug und aufrichtig genug, seine Entdeckungen *so* zu publizieren, wie er sie gemacht hatte, obwohl sie mit seiner großen geometrischen Theorie unvereinbar waren.

Aber auch nachdem Kepler seine drei Gesetze aufgestellt hatte, bestand die alte griechische Philosophie fort und behinderte den wissenschaftlichen Fortschritt. Daher nahm er seine Suche nach den geometrischen Figuren und den perfekten Kreisbahnen wieder auf, fast so, als traute er seinen eigenen Entdeckungen nicht. Sein subjektiver Glaube verleitete ihn immer noch, zu den idealen Kreisbahnen und den kristallinen Sphären von Aristoteles und Ptolemäus zurückzukehren. Keplers 1618 erschienenes Werk *Harmonices Mundi* (Weltharmonien) enthält beinahe nebenbei das dritte Gesetz über die Planetenbewegungen. Aber im gleichen Atemzug bemühte sich Kepler weiterhin, das kosmische Geheimnis mit Hilfe der regelmäßigen dreidimensionalen Körper zu lösen, jetzt aber in Kombination mit zweidimensionalen Formen, die in die Bahnkreise einbeschrieben wurden. Eingewoben in das umfassende Schema, ist Keplers »Harmonie« des Universums ein wörtlicher Bezug auf die Musik. In *Harmonices Mundi* schreibt er: »Die extrem unterschiedlichen Abstände von Saturn und Jupiter machen etwas mehr als eine Oktave aus, und die enger zusammenliegenden entsprechen dem Mittelwert von kleiner und großer Sexte.« Das Werk enthält sehr viele derartige musikalische Deutungen, und Kepler beschreibt eine sorgfältig ausgearbeitete mathematische Beziehung zwischen den Planetenbewegungen und den Tonleitern der Musik, also ein Bild vom Universum, das eine Synthese aus alter griechischer Philosophie, Astrologie, Astronomie, Geometrie und Musik darstellt. Doch verborgen hinter seiner ausgeklügelten Begriffsbildung sowie den zahlreichen falschen Axiomen und Lehrsätzen finden wir in Keplers Werken die drei heute unumstößlichen Gesetze der Planetenbewegung. Es erscheint paradox, daß Kepler bis zu seinem Tode die volle Bedeutung dieser Prinzipien nicht erkannte, auf denen Newton siebzig Jahre später wichtige Aspekte seiner Arbeiten gründen sollte.

Obwohl Kepler von den »Harmonien« überzeugt blieb, konnte er aufgrund seiner brillanten Beobachtungen und zahlreichen mathematischen Berechnungen den Stab des Kopernikus weiter-

geben. Das tat er eigentlich unwissentlich, und er überbrückte zwei Welten, wobei er versuchte, zwei Denkrichtungen, die der alten und die der neuen Welt, miteinander zu vereinbaren.

Im Laufe der folgenden Jahrzehnte wurde immer klarer, daß sich die Wissenschaftler an die Tatsachen halten und jegliche unbewiesene Spekulation vermeiden mußten, wenn sie die physikalische Welt untersuchten. Dennoch hielten mächtige Kräfte an jahrhundertealten Mythen und mystischen Lehren fest. Wer wollte da klare Grenzen ziehen zwischen Astrologie und Astronomie, Alchemie und Chemie, Metaphysik und Physik, Glaube und Vernunft? In Italien gab es gegen Ende des 16. Jahrhunderts zunehmend ernsthafte Bemühungen, sozusagen beide Füße auf eine Seite der Trennlinie zu stellen. Die Unvereinbarkeit dieser Sichtweisen war weit mehr als ein intellektuelles Dilemma: Sie wurde zu einer Frage von Tod oder Leben.

## KAPITEL 2

### Die unbewegliche Erde

*»Ein großer Teil der menschlichen Geschichte kann als allmähliche und zuweilen quälende Befreiung von rückständigem Denken angesehen werden, als aufkommendes Bewußtsein der Tatsache, daß in der Welt mehr ist, als es unsere Vorfahren allgemein glaubten.«*

Carl Sagan, *Broca's Brain* (1974)

### **Giordano Bruno stirbt auf dem Scheiterhaufen, weil die Kirche ihre Autorität bedroht sieht** *Ein Mord in Rom*

Die Abfolge der Ereignisse, die schließlich zur Hinrichtung von Giordano Bruno (1548-1600) führen sollten, begann 1575, als er heimlich zwei verbotene Abhandlungen des Erasmus von Rotterdam (um 1466-1536) las. Dieser holländische Humanist und Gelehrte hatte zur Zeit der Renaissance großen Einfluß. Brunos ungestümes Wesen und seine Verachtung für dogmatische Zwänge machten sein Schicksal vielleicht unvermeidlich. Doch schon die Kenntnis der Schriften des Erasmus, der manche kirchlichen Lehren in Frage stellte, stempelte Bruno zum Ketzer und beschleunigte seinen Untergang. Er focht aber bis an sein Lebensende für die Freiheit des Denkens und Lehrens.

Im Juli 1575 beendete Bruno, der drei Jahre zuvor zum Priester geweiht worden war, seine theologischen Studien am Dominikanerkonvent von Santa Dominica Maggiore in Neapel. Bis dahin hatte er den Dominikanerorden oder die Kirche nicht öffentlich

kritisiert. Seine unorthodoxen theologischen Ansichten waren jedoch bekannt, und seine Gegner berichteten, daß er die indizierten Werke des Erasmus gelesen hatte. In seinen frühen Jahren als theologischer und philosophischer Denker ging es Bruno nicht darum, schreibend oder lehrend der Kirche gegenüber ungehorsam zu sein. Doch nach dem paranoiden Prinzip, mit dem die Kirche versuchte, Denken und Moral zu steuern, genügte schon die bloße Beachtung oder Diskussion der verwerflichen Ansichten des Erasmus für eine Anklage wegen Ketzerei. Daher mußte Bruno im Februar 1576 von Neapel nach Rom fliehen. Dort wurde er unberechtigtweise des Mordes beschuldigt und sah sich nun einem zweiten Verfahren zur Exkommunikation ausgesetzt. Im April 1576 flüchtete er erneut und ließ sich in Genf nieder. Hier wurde er verhaftet und exkommuniziert, weil er in einem Artikel einen calvinistischen Professor kritisiert hatte. Er durfte den Artikel jedoch zurücknehmen. Damit war er rehabilitiert und konnte die Stadt verlassen.

Zwischen 1580 und 1585 wurde er zu einem bekannten Autor auf den Gebieten der Theologie, Astronomie und Philosophie. Er wirkte als Professor in Paris, London und Oxford, wo man neuen Gedanken gegenüber aufgeschlossen war. In jenen Jahren schrieb er ausführlich über die kopernikanische Theorie des Sonnensystems und deutete an, daß das Universum unendlich ausgedehnt sei. Er vertrat die Ansicht, daß man der Bibel wegen ihrer moralischen Lehren und nicht wegen ihrer astronomischen Aussagen zu folgen habe. Die aristotelische Physik lehnte Bruno ab. Ebenso kritisierte er das calvinistische Prinzip der Erlösung durch den Glauben allein.

Aber ab 1585 wurde aufgrund der politischen Entwicklungen der Spielraum für sein Wirken immer kleiner. Im Jahre 1586 forderte er die Machthaber in Paris mit mehreren Artikeln heraus, in denen er einen hohen Regierungsbeamten beleidigte und seine Angriffe auf die Lehren des Aristoteles wiederholte. Deshalb mußte er aus Paris fliehen. Diesmal ging er nach Deutschland, wo er an verschiedenen Universitäten lehrte und etliche Schriften herausgab. Gegen Ende des Jahrzehnts wurde er in Helmstedt durch die örtliche Kirche erneut exkommuniziert.

Im August 1591 schließlich, 15 Jahre nachdem er sein Heimat-

land verlassen hatte, kehrte Bruno nach Italien zurück. Dieser Entschluß sollte sich letztlich als verhängnisvoll erweisen, entsprach jedoch seinem hartnäckigen Festhalten an seinen Prinzipien. Als der venezianische Patrizier Giovanni Mocenigo ihn einlud, hielt Bruno es für unbedenklich und vernünftig, der Aufforderung zu folgen. Venedig war seinerzeit der liberalste der italienischen Staaten und schien ein sicherer Zufluchtsort für Vertreter unorthodoxer Ansichten zu sein. Die religiösen Spannungen in Italien und den Nachbarländern hatten nach dem Tod des unnachgiebigen Papstes Sixtus V. im Jahre 1590 nachgelassen, und man glaubte an eine Tendenz zur religiösen Befriedung. Ein anderer Anreiz zur Rückkehr nach Italien war Brunos Hoffnung auf den vakant gewordenen renommierten Lehrstuhl für Mathematik an der Universität Padua. So begann er im Spätsommer 1591 in Padua zu lehren. Aber schon bald kehrte er in die Nähe von Venedig zurück, denn Anfang 1592 wurde offensichtlich, daß Galilei den Lehrstuhl erhalten würde.

Im Frühjahr 1592 wandte sich Mocenigo unerwartet von seinem Gast ab und denunzierte ihn bei der venezianischen Inquisition als Ketzer. Während der Haft und des Prozesses hatte Bruno wieder die Möglichkeit, sich zu verteidigen oder seine Lehren zurückzuziehen. Er gab Irrtümer zu, blieb jedoch dabei, daß seine Theorien philosophischer und nicht theologischer Art seien und daher die kirchliche Autorität nicht in Frage stellten. Aber an höherer Stelle in Rom erinnerte man sich noch der Vorgänge um Bruno von vor 17 Jahren, und die römische Inquisition verlangte seine Auslieferung. Am 27. Januar 1593 wurde Bruno Gefangener des Heiligen Offiziums in Rom, und es begann ein Prozeß, der sieben Jahre dauern sollte. Die Anklagen gegen ihn stützten sich vor allem auf seine Schriften, in denen er behauptete, daß die Erde sich nicht im Mittelpunkt des Universums befinde, das Universum unendlich ausgedehnt sei und die Sterne nicht auf einer Kristallkugel fixiert seien.

Die Inquisitoren machten ihm klar, daß nur eine bedingungslose Rücknahme aller seiner Theorien ihn retten könne. Vor die Wahl gestellt, entweder mit eindeutigen Lügen seine intoleranten Ankläger zu beschwichtigen oder an seinen Prinzipien festzuhalten und damit sein Leben zu verlieren, erklärte er, er habe

nichts zu widerrufen. Papst Clemens VIII. verhängte am 8. Februar 1600 das Todesurteil, das neun Tage später auf dem Campo dei Fiori vollstreckt wurde. Giordano Bruno wurde, gefesselt und geknebelt, auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Damit wurde der fortschrittliche Denker zu einem Märtyrer der Freiheit des Denkens. Brunos Schriften beeinflussten unter anderem auch Galilei und waren noch lang nach seinem Tode wichtige wissenschaftliche Quellen.

## **Galileis verbessertes Teleskop enthüllt den Himmel** *Eine Kontroverse entsteht*

Galileo Galilei wurde am 15. Februar 1564 (zwei Monate vor Shakespeares Geburt) in Pisa geboren. Er war das älteste von sieben Kindern und wuchs in einer Familie auf, in der die Künste geachtet und neue Ideen begrüßt wurden. Sein Vater Vincenzo, von Beruf Tuchhändler, war auch ein bekannter Musiker und Komponist. Im Jahre 1574 zog die Familie nach Florenz, und Galileo besuchte ab 1576 die berühmte Jesuitenschule im nahegelegenen Vallombrosa. Mit 17 immatrikulierte er sich an der Universität Pisa im Fach Medizin und wurde bald bekannt durch seine kritische Auseinandersetzung mit den überlieferten Lehren des Aristoteles und des griechischen Arztes Claudius Galenus, der etwa von 129 bis 199 gelebt hatte.

Galilei gab seine medizinischen Studien schließlich auf und wandte sich der Mathematik, der Mechanik und der Hydrostatik zu. Sein Erfolg in diesen Fächern ist wohl weitgehend seinem Mentor und Lehrer an der Universität Pisa, Ostilio Ricci, zuzuschreiben, der großen Wert auf die praktische Anwendung mathematischer Prinzipien legte. Das kam Galilei sehr entgegen, der damals erste eigene Ansichten über das Universum entwickelte und überragende konstruktive Fähigkeiten zeigte. In seinem ersten Jahr an der Universität beobachtete er einmal eine Lampe, die an der Kette hin und her baumelte. Es schien ihm, als benötigte sie stets dieselbe Zeit für eine vollständige Schwingung - gleichgültig, wie weit sie sich dabei aus der Senkrechten entfernte. Nachdem Galilei seine Beobachtung experimentell bestätigt

hatte, meinte er, diese regelmäßige Bewegung könne zum Konstruieren sehr genau gehender Uhren genutzt werden. Auf der Basis desselben Prinzips erfand er ein Gerät zum Messen der Pulsfrequenz.

Weil ihm ein beantragtes Stipendium versagt wurde, verließ Galilei 1585 die Universität Pisa und setzte seine Studien selbständig fort. Bald kehrte er nach Florenz zurück und wurde Physiklehrer an der dortigen Akademie. 1586 veröffentlichte er eine Beschreibung der von ihm erfundenen Waage zum genauen Bestimmen der Dichte von Körpern. Das machte ihn in ganz Italien bekannt. Er hatte jedoch noch keine Stelle mit regelmäßigem Einkommen finden können. Aber 1589, mit gerade 25 Jahren, erhielt er den Lehrstuhl für Mathematik an der Universität Pisa, wohl nicht zuletzt wegen eines Aufsatzes, den er 1587 über den Schwerpunkt von Körpern publiziert hatte. In Pisa schrieb und lehrte er in den folgenden zwei Jahren über verschiedene Themen, darunter die Gesetze der Bewegung.

Es wird berichtet, daß Galilei zwei unterschiedlich schwere Kugeln vom Schiefen Turm in Pisa fallen ließ, um zu beweisen, daß beide mit derselben Beschleunigung auf die Erde fallen. Diese Aussage widersprach den Lehren des Aristoteles, nach denen die schwere Kugel eher als die leichte unten auftreffen sollte. Die Historiker sind sich einig, daß Galilei dieses Experiment niemals durchführte. Sie vermuten, daß er entweder am Schiefen Turm eine Demonstration (des ihm schon bekannten Ergebnisses) arrangierte oder zum Beweis ein »Gedankenexperiment« etwa folgender Art beschrieb: Wir stellen uns zwei Kugeln unterschiedlichen Gewichts vor, die wir gleichzeitig vom Turm fallen lassen. Wir nehmen nun an, Aristoteles habe recht, und die schwere Kugel falle schneller. Jetzt ändern wir das Experiment ein wenig ab: Die beiden unterschiedlich schweren Kugeln werden durch eine Schnur oder einen Draht miteinander verbunden. Wenn die schwere Kugel wirklich schneller und die leichte langsamer fiele, dann müßte die leichte Kugel die schwere beim Fall bremsen. Nach der Lehre des Aristoteles erreichten die beiden miteinander verbundenen Kugeln den Boden daher weniger schnell als die schwere Kugel allein. Wenn wir annehmen, daß die Schnur oder der Draht zwischen den Kugeln ebenso wirkt, als läge eine einzi-

ge Kugel vor, die *schwerer* als jede der beiden Kugeln ist, dann müßten die miteinander verbundenen Kugeln schneller fallen als jede einzelne. Das ist aber ein Widerspruch zum vorigen Ergebnis. Ob Galilei nun ein reales Experiment oder ein Gedankenexperiment vornahm - seine Arbeiten führten zum Beweis folgender Tatsache: In einem Vakuum, in dem bekanntlich kein Luftwiderstand wirkt, fallen alle Körper gleich schnell, beispielsweise eine Feder genauso schnell wie eine Eisenkugel.

Galilei mußte im Sommer 1592 die Universität Pisa verlassen. Die Historiker vertreten unterschiedliche Theorien über die Gründe hierfür. Manche meinen, daß seine Vorlesungen über die Bewegung fallender Körper die anderen Mitglieder der Fakultät befremdeten und beunruhigten. Denn diese hielten noch an den Lehren des Aristoteles fest und sahen nun ihre Belange durch Galilei bedroht. Zudem stand Galilei den Vorschriften der Universität recht kritisch gegenüber. Stillman Drake, Biograph von Galilei und Übersetzer seiner Schriften, meinte dagegen, daß auf Galilei politischer Druck durch einen Sohn des Großherzogs der Toskana ausgeübt wurde, den er beleidigt hatte. Aus welchem Beweggrund auch immer, Galilei verließ Pisa und die heimatische Toskana. Er übernahm den Lehrstuhl für Mathematik an der Universität in Padua, das damals zur Republik Venedig gehörte. Bei der Besetzung dieser begehrten Position wurde Galilei, wie schon kurz erwähnt, dem 16 Jahre älteren Giordano Bruno vorgezogen. Galilei blieb 18 Jahre lang (von 1592 bis 1610) in Padua und lehrte Mathematik und Astronomie. Hier entstand der größte Teil der Arbeiten, die seinen Ruhm als Wissenschaftler und Erfinder begründeten und auf denen später Isaac Newton aufbaute, als er die Grundlagen der modernen Physik schuf. Während der Jahre in Padua lebte Galilei mit Marina Gamba zusammen. Das Paar bekam drei Kinder: zwei Töchter (1600 und 1601) und einen Sohn (1606).

Galileis wissenschaftliche Leistung als Wegbereiter der modernen Physik war bedeutender als seine Arbeiten zur Astronomie oder seine Erfindungen. Seine physikalischen Forschungen und Entdeckungen wurden später von Newton genutzt. Die Meilensteine waren folgende:



- 1585-87: Essays über die Bewegung und den Schwerpunkt bestimmter Körper.
- 1588: Wegweisender Artikel *De motu* (Über die Bewegung).
- 1589: Artikel über die Logik und über Beweise in der Wissenschaft.
- 1591: Gedanken über die Rotation der Erde.
- 1593: Zusammenfassung der Erkenntnisse über einen Zweig der Physik, der von da an Mechanik genannt wird.
- 1595: Erklärung der Gezeiten aufgrund der kopernikanischen Theorie der Erdbewegung.
- 1601: Abschluß des Werkes *Das Weltsystem* und Analyse der Keplerschen Daten.
- 1602: Beginn der Untersuchungen über den Magnetismus und die Pendelbewegung.
- 1603-04: Theorien über die Bewegung und über fallende Körper.
- 1612: Erscheinen seines Buches über die Bewegung von Körpern im Wasser.
- 1623: Abhandlung *Il Saggiatore* (Der Prüfer mit der Goldwaage) über die wissenschaftliche Methodik.
- 1624: Arbeiten über die Gezeiten.
- 1625-31 Weitere Schriften über Bewegung, Gezeiten und fallende Körper.
- 1632: Erscheinen des *Dialogo sopra i due massimi sistemi* (Dialog über die zwei hauptsächlichen Weltsysteme); gemeint sind das ptolemäische und das kopernikanische.
- 1638: *Discorsi e dimostrazioni matematiche* (Unterredungen und mathematische Beweise) über zwei neue Wissenschaftszweige.

Von allen seinen Entdeckungen und Erfindungen ist das Teleskop am berühmtesten. Aber ähnlich wie die Legende über die vom Schiefen Turm in Pisa herabfallenden Kugeln wurde auch die Geschichte von der Erfindung des Teleskops mythisch verklärt. Galilei selbst schrieb: »Wir sind sicher, daß der erste Erfinder des Teleskops ein einfacher Brillenmacher war, der zufällig mit verschieden geformten Glasstücken hantierte und, ebenfalls zufällig, durch zwei Stücke hindurchblickte, von denen eines konvex

und das andere konkav war und die unterschiedlich weit vom Auge entfernt waren. Er notierte die unerwarteten Resultate und erfand so dieses neue Instrument.« Die Erfindung des Teleskops wird allgemein dem holländischen Brillenmacher Hans Lippershey zugeschrieben. Er bot im Jahre 1608 seine Erfindung der holländischen Armee an, die gerade im Krieg gegen Spanien eingesetzt war. Eine eigens eingerichtete Kommission empfahl den Ankauf. Kurz danach brach in Europa unter mehreren Personen ein Streit über die Rechte an dieser Erfindung aus. Galilei gehörte aber nicht zu denen, die Anspruch darauf erhoben.

Teleskope waren in Europa ungefähr seit Ende des Jahres 1608 verbreitet, und man nutzte sie für die Navigation, für militärische Zwecke und in der Astronomie. Auch der Senat der Republik Venedig wollte das neuartige Gerät für die Kriegsmarine anschaffen. Ein Regierungsbeamter, der von Galileis Kenntnissen auf diesem Gebiet wußte, forderte ihn auf, hierfür ein Teleskop nach eigenen Entwürfen anzufertigen. Im Juli 1609 begann Galilei mit Versuchen zur Herstellung von Linsen. Schon einen Monat später hatten seine Teleskope eine dreimal so hohe Vergrößerung wie jedes andere bis dahin gebaute. Eines dieser Geräte schenkte er dem Senat von Venedig. Bis zum Ende desselben Jahres fertigte er sogar ein Teleskop mit 30facher Vergrößerung an. Es war damit dreimal stärker als seine eigenen bisherigen Geräte. Vermutlich gilt Galilei aufgrund dieser besonderen Leistungen als Instrumentenmacher, vielfach auch als Erfinder des Teleskops. Er richtete das neue Gerät natürlich sogleich auf den Himmel, was seinen Ruhm als Astronom begründen und seinen Namen noch stärker mit der Erfindung des Teleskops verknüpfen sollte. Andererseits führten seine Beobachtungen auch zu den dramatischen Vorgängen, die sein Leben noch überschatten sollten.

»Mit unseren eigenen Augen«, schrieb er im März 1610 nach astronomischen Beobachtungen mit dem Teleskop, »sehen wir vier Satelliten, die um Jupiter kreisen wie der Mond um die Erde, während das ganze System in weiter Bahn die Sonne umrundet.« Dieser Auszug aus seiner Abhandlung *Sidereus Nuntius* (Sternenbote) ist der erste schriftliche Beleg über Beobachtungen von Himmelskörpern durch ein Teleskop. Außer den Jupitermonden beschrieb Galilei auch die Gebirge auf unserem Mond. Ferner er-

klärte er, daß die Milchstraße aus vielen Sternen bestehe und nicht aus einer weißen, trüben Substanz, wie man bis dahin meinte. Seine Arbeiten mit dem Teleskop brachten ihm sehr bald eine Anstellung als »Erster Philosoph und Mathematiker« des Großherzogs der Toskana. Er verließ also seinen Lehrstuhl an der Universität Padua, um diesen lukrativen Posten anzutreten, bei dem er mehr Zeit für die Forschung haben sollte. Galilei wurde von allen Seiten mit Lob überschüttet. Er wurde nach Rom eingeladen und am 1. April 1611 durch eine Audienz beim Papst geehrt. Hier führte er sein Teleskop vor, und am 14. April 1611 veranstaltete eine wissenschaftliche Gesellschaft in Rom ein Bankett zu seinen Ehren. Für einige Jahre genoß Galilei nun die Freiheit, seine Beobachtungen veröffentlichen zu können, ohne sich darum sorgen zu müssen, ob sie den gefestigten Überzeugungen jener Zeit widersprachen. Später sollten seine Erkenntnisse jedoch Anlaß zu Kontroversen und Tragödien werden.

### **Galilei unterstützt öffentlich das heliozentrische System - und die Kirche warnt** *Der Brief an Christina von Lothringen*

Bereits am 4. April 1597 hatte Galilei an Kepler geschrieben, daß er sich »schon vor vielen Jahren den Überzeugungen des Kopernikus zugewandt habe«. Aber er lehrte in den 18 Jahren an der Universität Padua weiter das Ptolemäische System, weil er meinte, es seien noch weitere Beweise nötig. Nachdem er jedoch 1610 seine eigenen Beobachtungen mit dem Teleskop gemacht hatte, wurde das kopernikanische System für ihn eine zweifellos vertretbare und objektive Wahrheit. Diese Überzeugung deutete er in seiner Schrift *Sternenbote* an, schreckte aber noch davor zurück, das kopernikanische System insgesamt zu vertreten. Seine Entdeckung der Jupitermonde, der Saturnringe und der Venusphasen ergab ein neues Bild vom Sonnensystem, das sich Kopernikus noch nicht vorgestellt haben konnte.

Die römische Kurie wies Galilei darauf hin, daß sie mit den Interpretationen und Schilderungen im *Sternenboten* nicht einverstanden sei. Doch sie beließ ihm das Recht, seine Ansichten zu

vertreten und seine Beobachtungen fortzusetzen. Dann aber begann der Konflikt, der Galileis weiteres Leben bestimmen sollte. Im Jahre 1613 beschritt Galilei sozusagen neue Ufer, die Giordano Bruno entdeckt hatte, und begann, öffentlich das heliozentrische System zu propagieren. Dies sei eine neue Theorie, sagte Galilei, von der »mein ganzes Leben und Sein von nun an abhängt«. Giordano Brunos Tod auf dem Scheiterhaufen lag zwar 13 Jahre zurück, aber das politische Klima in Italien, in dem das Feuer damals entfacht wurde, hatte sich seit damals kaum verändert. Galileis Vorlesungen, Schriften und Theorien bewegten sich hart an der Grenze der kirchlichen Toleranz und wurden nicht länger stillschweigend hingenommen.

Im Dezember 1613 verwickelte die Mutter des Großherzogs der Toskana, Christina von Lothringen, Galileis Freund und Schüler Benedetto Castelli bei einem abendlichen Mahl am Hofe in eine Diskussion. Es waren zahlreiche Würdenträger zugegen, darunter der Großherzog, nicht aber Galilei. Castelli, Mathematiker und Benediktinerabt, fühlte sich im Laufe des Gesprächs bedrängt. Er glaubte, Galileis Entdeckungen gegen die althergebrachten Überzeugungen der anderen verteidigen zu müssen. Nachdem Galilei in einem Brief von Castelli davon erfuhr, verfaßte er den ersten einer Reihe von Briefen, die heute *Briefe über die Sonnenflecken* genannt werden. Darin ging es um die Beziehung zwischen Wissenschaft und Religion. Galilei folgte dem unseligen Vorbild Brunos und schrieb, man müsse der Bibel wegen deren Morallehren folgen, diese gebe aber keine Antworten auf die Rätsel der Natur. Galilei sandte Castelli das Schreiben, von dem er hoffte, es könnte künftig in einer ähnlich mißlichen Lage hilfreich sein.

Während des größten Teils des Jahres 1614 formierten sich im stillen die Gegner Galileis und seiner öffentlich geäußerten Ansichten. Die Gegenseite bestand aus neidischen akademischen Kollegen und aus Vertretern der katholischen Kirche. Den ersten öffentlichen Angriff der Geistlichkeit auf Galilei startete Pater Caccini am 21. Dezember 1614 auf der Kanzel von Santa Maria Novella in Florenz. Er bezog sich auf die Passage in der Bibel, in der Josua Gott anfleht, die Sonne anzuhalten, damit die Israeliten noch bei Tageslicht die Schlacht fortsetzen und die Amoriter

schlagen können. Davon ausgehend, fragte Caccini: »Wenn Gott die Sonne anhielt, wie kann es dann sein, daß sich die Sonne nicht um die Erde auf deren zentralem Platz bewegt?« In seiner heftigen und langatmigen Rede beschränkte sich der Priester nicht auf die Verurteilung des kopernikanischen Systems, sondern beschuldigte Galilei persönlich und alle Mathematiker der religiösen und politischen Ketzerei.

Im Februar 1615 erhielt ein einflußreicher Dominikaner namens Niccolo Lorini eine Abschrift von Galileis privatem Brief an Castelli und berichtete dem Heiligen Offizium in Rom von Galileis »ketzerischen Ansichten«. Galilei erfuhr davon. Beunruhigt wegen der Probleme, die der besagte Brief hervorrufen könnte, erstellte er eine geänderte Fassung und sandte sie seinem Freund Piero Dini in Rom mit der Bitte, sie dem Kardinal Roberto Bellarmino vorzulegen, dem führenden Theologen der Kurie. In einem Begleitschreiben vom 16. Februar 1615 spielte Galilei einige der Punkte in der ursprünglichen Version herunter, die der Heiligen Schrift widersprechen könnten. Doch Castelli schrieb Galilei am 12. März 1615, daß der Erzbischof von Pisa verlangt hatte, daß er (Castelli) ihm das Originalschreiben übergebe. Der Erzbischof sollte gesagt haben: »Es wird Zeit, (...) Galilei klarzumachen, (...) daß all diese Vorstellungen töricht sind und Verdammung verdienen.« Die Fronten waren nun klar. Während sich die Gegnerschaft Galileis verbündete, gab es auch eine wachsende Zahl von Anhängern, darunter etliche Jesuiten. Der Priester Paolo Antonio Foscarini hatte gerade ein Buch herausgegeben, in dem er das kopernikanische System gegen den Vorwurf verteidigte, es widerspreche der Bibel. Er hatte ein Exemplar an Kardinal Bellarmino gesandt und ihn um eine Stellungnahme gebeten. Kurz zuvor hatte Bellarmino die revidierte Fassung des Galilei-Briefes an Castelli erhalten. Bellarmino lehnte Foscarinis Buch öffentlich ab und deutete schwerwiegende Konsequenzen für jene an, die die Ansichten von Kopernikus und Galilei unterstützten.

Als im Frühjahr 1615 die Kontroverse begann, stand Galilei vor der Wahl, seine Haltung völlig aufzugeben oder zu beweisen, daß die kopernikanische Theorie mit der Bibel vereinbar sei. Galilei hatte ja niemals angenommen, daß beide unvereinbar seien (was seine Gegner behaupteten). Er wollte sich auf überlegen und

vorsichtige Weise verteidigen. Gottes Wahrheit, so schrieb er, werde uns in der Bibel und durch die Natur auf zweierlei Art mitgeteilt. »Keine der physikalischen Wirkungen, die wir (...) mit unseren eigenen Augen erkennen, (...) sollte jemals (...) durch Passagen der Heiligen Schrift in Zweifel gezogen werden, die eine abweichende wörtliche Bedeutung zu haben scheinen. Zwei Wahrheiten können niemals einander widersprechen.« Galilei vertrat diese Position in einer verbesserten und erweiterten Fassung des Briefes, den er seinem Freund Benedetto Castelli seinerzeit gesandt hatte. Der neue Brief vom Juni 1615, heute meist *Brief an Christina von Lothringen* genannt, trägt den Untertitel *Über die Anwendung von Bibelzitat in der Wissenschaft*.

*»Vor einigen Jahren (...) entdeckte ich am Himmel viele Dinge, die vor unserer Zeit noch niemals sichtbar waren. Die Neuheit dieser Dinge und auch manche Konsequenzen, die sich daraus ergeben und die den physikalischen Vorstellungen widersprechen, die die akademischen Philosophen allgemein vertreten, brachten viele Professoren gegen mich auf - gerade so, als hätte ich jene Dinge mit eigenen Händen am Himmel angebracht, um die Natur durcheinanderzubringen und die Wissenschaften zu stürzen. (...) Mehr den eigenen Überzeugungen als der Wahrheit zugehan, versuchten sie, die neuen Dinge zu leugnen und zu widerlegen, die ihre Bedeutung selbst enthüllt hätten, wenn die Gelehrten nur selbst danach geschaut hätten. Also erhoben sie verschiedene Anklagen und veröffentlichten zahlreiche Schriften voller nichtiger Argumente und unterstellten mir Verbrechen, die mir noch abscheulicher erscheinen sollten und auch erscheinen als selbst der Tod. (...)*

*Ich meine, daß die Sonne unbeweglich im Zentrum der Umdrehung der Himmelskugel ruht, während die Erde sich um ihre Achse dreht und die Sonne umrundet. Sie (...) entschlossen sich, ihre Irrtümer mit einem Schutzschild zu umgeben, verfertigt aus dem Mantel der vorgeschobenen Religion und der biblischen Autorität. (...) Sie hatten keine Mühe, Leute zu finden, die von ihren Kanzeln über die Verwerflichkeit und Ketzerei der neuen Lehre predigten.«*

Die Auseinandersetzungen erregten die Gemüter der Europäer. Aber die aristokratischen und kirchlichen Mächte waren nicht bereit, ihr Denken über das Universum grundsätzlich zu ändern. Noch wichtiger war, daß sie ihre unumschränkte Autorität um jeden Preis wahren wollten; dazu gehörte auch das alleinige Recht der Kirche, die Bibel auszulegen. Die Wissenschaft als Institution war neu und unsicher, vor allem in den Bereichen Physik und Astronomie. Andererseits waren die Religion und die Autorität der Kirche zu jener Zeit fest in den Köpfen und in der Kultur verankert. In seinem Brief an Christina berief sich Galilei auf die Logik, die über dem Gefühl stehe:

*»Ich fühle mich nicht verpflichtet zu glauben, daß derselbe Gott, der uns Sinne, Verstand und Urteilsvermögen verlieh, uns deren Anwendung nicht erlauben, sondern uns auf anderem Wege jene Erkenntnisse vermitteln will, die wir doch mittels jener Eigenschaften selbst erlangen können. (...) Die Absicht des Heiligen Geistes ist es, uns zu lehren, wie wir in den Himmel kommen, und nicht, was am Himmel vor sich geht.«*

Ehe er eine lange Reihe von Beispielen dafür anführte, daß die Bibel nicht wörtlich interpretiert werden könne und daß vieles in ihr abweichende Interpretationen zuließe, warnte Galilei vor den gravierenden Folgen für die Gesellschaft und die Bürger, wenn niemand solche abweichenden Interpretationen vorschlagen dürfte. »Wer aber will die Grenzen für die menschliche Findigkeit festsetzen?« fragte Galilei. »Wer will behaupten, alles im Universum Wahrnehmbare sei schon entdeckt und bekannt?«

Es kam aber nicht darauf an, ob Galileis Argumentation im Brief an Christina zwingend war oder ob ein Normalbürger seinen Beweis der Planetenbewegungen verstehen konnte. Galilei konnte keine Unterstützung für seine Ansichten finden, weil das Aufkommen einer modernen Wissenschaft durch die zweitausendjährige Geschichte und ein System unzutreffender Überzeugungen verhindert wurde, das von der übergroßen Mehrheit getragen wurde. Die römisch-katholische Kirche setzte ihre heftigen Attacken gegen die im 16. Jahrhundert so erfolgreiche Reformation fort. Zudem kämpften weltliche Kräfte, katholische

Kirche und Protestanten in ganz Europa immer heftiger um die Macht. Dabei wurden Galileis Ansichten allmählich eher ein Maßstab dafür, welchen von zwei politischen Standpunkten man vertrat, als daß sie die Entwicklung von Astronomie und Mathematik widerspiegeln. Mit anderen Worten: Es ging eher um die individuelle Freiheit, seine Ansichten auszudrücken, als um die Richtigkeit des kopernikanischen Systems. Viele Details in Galileis Beweisen waren zu kompliziert für jene, die nicht recht zuhören wollten. Aber sogar als er die Jesuitenpater durch sein Teleskop blicken und die Jupitermonde selbst beobachten ließ, blieben sie bei ihrer Ablehnung. Sie monierten nach wie vor, daß Galilei die Richtigkeit seiner Thesen nicht »exakt beweisen« könne, wo es doch für jeden Menschen so offensichtlich sei, daß die Erde stillstehe.

### **Galilei vor Gericht wegen Eintretens für das kopernikanische System** *... Und die Erde bewegt sich doch*

Gegen den Rat seiner Freunde bestand Galilei darauf, im Dezember 1615 nach Rom zu reisen, um sein Werk zu verteidigen. Kardinal Bellarmino war überzeugt, daß Galileis Ansichten dem Kampf der katholischen Kirche gegen den Protestantismus schaden würden. Daher erließ er am 5. März 1616 eine Verfügung, nach der der Kopernikanismus »falsch und irrig« sei. Ferner wurden die Schriften des Kopernikus verboten, denn »Gott hatte die Erde nach seiner Schöpfung gegründet, auf daß sie sich niemals bewege«. Ungefähr zur selben Zeit wurde Galilei von Kardinal Bellarmino davor gewarnt, an der kopernikanischen Lehre festzuhalten, die nur als eine rein »mathematische Vermutung« diskutiert werden dürfe. Danach vergingen einige Jahre ohne besondere Vorfälle, und Galilei lebte ruhig in seinem Haus in Belosguardo nahe Florenz.

Doch die Kirche veröffentlichte 1620 ihre »Korrekturen« an Kopernikus' Werk *De Revolutionibus*, und 1622 gründete sie das Institut für die Verbreitung des Glaubens. Trotz der deutlichen Warnzeichen, die Galilei diesen Entwicklungen hätte entnehmen



müssen, reiste er 1624 wieder nach Rom. Er hoffte, eine Aufhebung des Dekrets von 1616 zu erreichen. Das gelang ihm zwar nicht, doch der neue Papst Urban VIII. (ein Freund Galileis, Mitglied der Familie Barberini) erlaubte ihm, über »die Weltsysteme« zu schreiben. Das wertete Galilei als Genehmigung, einen fairen Dialog zu veröffentlichen, in dem die ptolemäische und die kopernikanische Sichtweise untersucht und verglichen wurden. Galilei kehrte nach Florenz zurück und versuchte nun, den geringen Spielraum zu nutzen, den ihm die kirchliche Autorität beließ. In den folgenden Jahren arbeitete er an seinem berühmtesten Werk, dem *Dialogo sopra i due massimi sistemi* (Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme). Am 21. Februar 1632 in Florenz erschienen, wurde es von Gelehrten in ganz Europa mit großem Beifall aufgenommen und galt bald als literarisches und philosophisches Meisterwerk - dennoch sollte es Galilei fast das Leben kosten.

Bald nach dem Erscheinen des Buches setzte Papst Urban VIII., Galileis ehemaliger Freund und Förderer, eine besondere päpstliche Kommission ein, die Galileis Schriften gründlich unter die Lupe nahm. Aufgrund ihres Ergebnisses wurde Galilei vor die Generalkommission des Heiligen Offiziums in Rom zitiert. Hier befaßten sich zehn Richter der Inquisition mit seinem Eintreten für die kopernikanische Theorie vom Aufbau des Universums, also mit dem Verstoß gegen die Verfügung von 1616. Galilei erhielt kein Exemplar der Anklageschrift oder der Beweisführung und hatte auch keinen Rechtsbeistand.

Galilei, zu jener Zeit der berühmteste europäische Wissenschaftler, vertraute auf die Beweiskraft seiner Prinzipien und bat die kirchlichen Würdenträger, das Dogma und die Autorität der Heiligen Schrift beiseite zu lassen, auf die sie die Anklage gründeten. Aber trotz seines Alters, seiner angegriffenen Gesundheit und der offensichtlichen Wahrheit seiner Ausführungen wurden Galileis Ansichten, wie jene des Kopernikus, als »falsch und irrig« beurteilt. Er mußte seine Äußerungen öffentlich zurücknehmen und durfte niemals wieder die kopernikanische Theorie lehren. 33 Jahre nach Giordano Brunos Tod auf dem Scheiterhaufen hatte Galilei nun dieselbe Wahl zwischen Tod und Leben wie jener. Galilei entschied sich für das Leben - ein Verhalten, das manche

als schädlich für die Wissenschaft kritisierten. Am 22. Juni 1633 verlas er den langatmigen öffentlichen Widerruf, in dem es auszugsweise hieß:

*»Ich, Galileo Galilei (...) siebzig Jahre alt (...) knie vor Euch Eminenzen und Kardinälen. (...) Ich (...) schwöre, daß ich immer geglaubt habe, auch jetzt glaube und mit Gottes Hilfe auch in Zukunft glauben werde alles, was die heilige katholische und apostolische Kirche für wahr hält, predigt und lehrt. Es war mir von diesem Heiligen Offizium auferlegt worden, daß ich die falsche Meinung völlig aufgeben müsse, daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt ist und daß sie sich nicht bewegt, und daß die Erde nicht der Mittelpunkt der Welt ist und daß sie sich bewegt. Es war mir weiter befohlen worden, daß ich diese falsche Lehre nicht vertreten dürfe, sie nicht verteidigen dürfe und daß ich sie in keiner Weise lehren dürfe. (...) Trotzdem habe ich ein Buch geschrieben und zum Druck gebracht, in dem ich (...) diese Lehre behandle. (...) Daher bin ich der Ketzerei in hohem Maße verdächtig befunden worden. (...) Ich möchte mich (...) von jenem schweren Verdacht (...) reinigen. (...) Daher schwöre ich aufrichtig ab, verwünsche und verfluche jene Irrtümer und Ketzereien und darüber hinaus ganz allgemein jeden irgendwie gearteten Irrtum, jede Ketzerei oder Sektiererei, die der Heiligen Kirche entgegen ist. (...) Ich habe (...) abgeschworen, (...) versprochen und mich verpflichtet, wie ich eben näher ausführte.«\**

Nach der Legende soll Galilei, als er sich von den Knien erhob, gemurmelt haben: »E pur, si muove« (und sie bewegt sich doch). Damit er den Richterspruch auch wirklich erfüllte, waren ihm die Folterinstrumente gezeigt worden. Für den Rest seines Lebens blieb er unter strengem Hausarrest in seiner Villa in Arcetri bei Florenz. Er schrieb hier sein letztes und für die Entwicklung der Physik besonders wichtiges Werk: *Discorsi e dimostrazioni matematiche* (Unterredungen und mathematische Beweise) über zwei neue Wissenschaftszweige. Weil die Inquisition ihm die Publikation von Büchern verboten hatte, war das Manuskript nach

\* Hemleben, Johannes, *Galilei*, Hamburg 1969, S. 7

Frankreich geschmuggelt worden. Im Jahre 1638 erblindete Galilei vollständig, noch bevor er ein Exemplar dieses Werkes erhielt. Immer noch unter Arrest, starb er am 8. Januar 1642.

Erst 1757 strich die katholische Kirche den *Dialogo* aus dem Index, dem Verzeichnis der verbotenen Bücher. Am 31. Oktober 1992 schließlich - 359 Jahre nach der Verurteilung Galileis und seinem erzwungenen Widerruf - erkannte der Vatikan formell seinen Irrtum an. In einer Erklärung von Papst Johannes Paul II. an die päpstliche Akademie der Wissenschaften hieß es: »Die Theologen, die Galilei verurteilten, erkannten nicht die formale Unterscheidung zwischen der Bibel und ihrer Interpretation. Dadurch verquickten sie in unzulässiger Weise (...) eine Frage mit dem Glauben, die in Wahrheit die wissenschaftliche Forschung betrifft.«

Ungeachtet dieses verspäteten Eingeständnisses ist die Kontroverse zwischen Galilei und der römisch-katholischen Kirche immer noch eines der historisch bedeutsamen Symbole des Konflikts zwischen Vernunft und Dogma oder zwischen Wissenschaft und Glauben.

Während der ungefähr hundert Jahre, in denen Brahe, Kepler und Galilei lebten, wurde das aristotelische Universum mit seinen kristallinen Sphären und perfekten Kreisbahnen zu einem mit Wehmut betrachteten Bild, und die ptolemäischen Epizyklen sowie die geozentrische Theorie vom Universum wurden widerlegt. In den folgenden Jahrzehnten verlor die katholische Kirche an Macht über weltliche Herrscher und über die Menschen. Die drei hier genannten Wissenschaftler legten den Grundstein für das Aufblühen der Astronomie und für das Aufkommen der Physik im 17. Jahrhundert. Die wissenschaftliche Methodik der Forschung und ihr Kriterium der Wahrheit, ebenso die moderne Vorstellung von wissenschaftlichem Experimentieren gehen vor allem auf Galilei zurück. Seine Verbesserung des Teleskops, seine Beobachtungen und zahlreichen Schriften, seine Verknüpfung von Theorie und Experiment und nicht zuletzt seine Anwendung der Mathematik auf die Physik - all das trug zu den bedeutenden wissenschaftlichen Entdeckungen der Folgezeit bei. Galileis Leben und Werk beeinflussten vor allem einen anderen bedeuten-

den Wissenschaftler: Isaac Newton, der ein Jahr nach Galileis Tod geboren wurde. Newton sollte den Entdeckungen von Galilei und anderen Vorreitern eine unerhörte Bedeutung verleihen. Er sollte sie alle bestätigen und auf der Grundlage ihrer Ergebnisse eine der fundamentalsten wissenschaftlichen Entdeckungen der Geschichte machen.

## KAPITEL 3

### Die Principia

*»Die Folgerung erschien ihm vernünftig, daß diese Kraft sich viel weiter erstreckte, als man gewöhnlich annahm. Warum nicht auch bis zum Mond? (...) Er überlegte, (...) wenn der Mond durch die Kraft der Gravitation auf seiner Bahn gehalten wird, dann müssen die Hauptplaneten zweifellos durch die gleiche Kraft um die Sonne geführt werden.«*

Henry Pemberton,  
*A View of Sir Isaac Newton's Philosophy* (1728)

*»Ich weiß nicht, wie ich der Welt erscheinen mag; aber mir selbst komme ich nur wie ein Junge vor, der am Strand spielt und sich damit vergnügt, ein noch glatteres Kieselsteinchen oder eine noch schönere Muschelschale als gewöhnlich zu finden, während das große Meer der Wahrheit völlig unerforscht vor mir liegt.«*

Isaac Newton (1727)

In Italien wurde 1657 eine Akademie für experimentelle Wissenschaften gegründet und in London 1660 die Royal Society. Einige Jahre später erschienen erstmals wissenschaftliche Artikel in England und Frankreich. Europa wandte sich allmählich von den alten Methoden und Ansätzen ab und näherte sich dem modernen wissenschaftlichen Denken. Daher wuchs Isaac Newton, geboren Anfang 1643, in einer intellektuell bewegten Zeit auf, in der er schon in jungen Jahren führend werden sollte.

**Newton entdeckt die Bewegungsgesetze,  
publiziert sie aber erst zwei Jahrzehnte später**  
*Der Apfel und der Mond*

Isaac Newton wurde am 4. Januar 1643 geboren (nach dem alten englischen Kalender am Weihnachtstag des Jahres 1642), und zwar in einem Bauernhaus bei Colsterworth im englischen Lincolnshire County. Das Haus steht übrigens heute noch und gehört zu dem kleinen Dorf Woolsthorpe. Isaacs Mutter erzählte später, das einige Wochen zu früh geborene Baby sei außergewöhnlich klein gewesen. Der Kleine war schwach und kränklich, und man glaubte anfangs, er würde nicht überleben. Sein Vater, der ebenfalls Isaac hieß, war drei Monate vor der Geburt des Jungen verstorben und hatte seiner Frau Hannah das zweistöckige Häuschen mit vierzig Hektar Land hinterlassen. Zu jener Zeit stand in dem kleinen Garten an der Westseite des Hauses auch ein Apfelbaum, der noch bedeutsam werden sollte.

Einen Monat nach Isaacs drittem Geburtstag heiratete seine Mutter den Pfarrer Barnabus Smith aus North Witham, einem Dorf, das knapp zwei Kilometer von Woolsthorpe entfernt lag. Aus Gründen, die der junge Isaac nie verstand und die auch den Historikern nicht klar sind, ließ die Mutter ihren Sohn in der Obhut ihrer Mutter, als sie in das Haus von Smith umzog. In den nächsten Jahren sahen sich Isaac und seine Mutter selten. Sie hatte drei Kinder aufzuziehen, die sie ihrem zweiten Mann gebar. Als Isaac alt genug war, um auf Bäume zu klettern, konnte er von Woolsthorpe bis nach North Witham sehen und aus der Entfernung auch den Turm der Kirche von Pfarrer Smith erkennen. Das machte ihm den schmerzlichen Verlust immer wieder deutlich. Smith starb 1653, und Isaacs Mutter zog nach Woolsthorpe zurück; da war er gerade 10 Jahre alt. Während des folgenden Jahrzehnts schrieb er gelegentlich über die für ihn schwere Zeit. Er erinnerte sich beispielsweise daran, daß er sich zuweilen so gefühlt hatte, als »drohe [ich] meinem Stiefvater und meiner Mutter damit, ihnen das Haus über dem Kopf anzuzünden«. Das Gefühl der Verlassenheit könnte auch seine Empfindlichkeit erklären, die er später oft an den Tag legte.

Als er 12 geworden war, ging er zur King's School in Grant-

harn, zehn Kilometer von seinem Vaterhaus entfernt. Er erwies sich als hervorragender Bastler, zeichnete sich aber in der Mathematik oder den Naturwissenschaften noch nicht aus. Schon damals faszinierten ihn die Kräfte des Windes und des fließenden Wassers. Er sah sich oft Windmühlen an und baute Modelle. Sorgfältig beobachtete er den Lauf der Sonne, konstruierte Sonnenuhren und entwarf auch eine Wasseruhr. Ähnlich wie Leonardo da Vinci und Benjamin Franklin zeigte Newton schon als Jugendlicher eine außergewöhnliche physikalische Begabung, verbunden mit einem guten Verständnis für die Geometrie.

Im Alter von 18 Jahren schrieb sich Newton am berühmten Trinity College an der Universität Cambridge ein. Hier lernte er bald den begabten Mathematiker Isaac Barrow kennen, der ihn ermutigte, Mathematik und Optik zu studieren. Newton schloß 1665 sein Studium in Cambridge ab, mußte aber noch im selben Jahr in sein kleines Haus in Woolsthorpe zurückkehren, weil London gerade von einer großen Pestepidemie heimgesucht wurde. Ihr fielen insgesamt rund 75000 Menschen zum Opfer, ein Sechstel der Bevölkerung von ganz London. Damals mußte auch die Universität Cambridge geschlossen werden, weil man eine Ausbreitung der Beulenpest bis hierhin befürchtete. Diese Pestwelle hatte im Spätherbst 1664 in einem Londoner Vorort begonnen und ihren Höhepunkt Mitte 1665 erreicht. Allein in diesem Jahr starben in London über 68000 Menschen daran. König Charles II. floh mit seinem Hofstaat, und das britische Parlament mußte eine Sitzungsperiode in Oxford abhalten. Im Jahre 1666 waren noch 2000 Tote zu beklagen, und die Universität Cambridge wurde erst wieder im Frühjahr 1667 geöffnet.

Während die Pest wütete, verbrachte Newton 18 Monate zu Hause. Er war damals erst 23 Jahre alt und legte schon den Grundstein für sein Werk, das die Wissenschaft revolutionieren sollte. Die berühmte Geschichte von dem Apfel, der vom Baum herabfiel, hat sich in jener Zeit zugetragen. Newton wollte daraufhin die physikalischen Gesetze ergründen, nach denen der Mond auf seiner Bahn um die Erde gehalten wird. Am 16. Mai 1666 saß er gerade in dem schon erwähnten Garten in Woolsthorpe und sah zufällig, wie ein Apfel sich vom Ast löste und zu

Boden fiel. In diesem Augenblick wurde ihm klar, daß dieselbe zentrale Anziehungskraft der Erde auf beide Körper einwirkt, auf den Apfel wie auf den Mond. Weiterhin erkannte er zweierlei:

- *Stände der Mond still, wie der Apfel am Baum, so fiel er ebenso auf die Erde herunter.*
- *Es ist die Anziehungskraft der Erde, wenn auch geschwächt durch die große Entfernung zwischen Mond und Erde, die den Mond daran hindert, aus seiner Bahn nach außen wegzufiegen.*

Aus diesen Hypothesen entwickelte Newton das Gravitationsgesetz, das er auch mathematisch formulierte. Danach wird die Anziehungskraft der Erde auf einen Körper um so schwächer, je weiter dieser von ihr entfernt ist. Newton stellte fest, daß diese Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands vom Erdmittelpunkt ist: »Um die Kräfte bei zwei Abständen zu vergleichen, muß man diese quadrieren und die erhaltenen Werte vertauschen.« Wenn ein Planet beispielsweise zweimal so weit von der Sonne entfernt ist wie ein anderer Planet mit gleicher Masse, dann macht die Anziehungskraft  $(1/2)^2$ , also ein Viertel derjenigen beim anderen Planeten aus. Mit anderen Worten: Die Sonne und der weiter entfernte Planet ziehen einander mit einem Viertel der Kraft an, die zwischen der Sonne und dem näheren Planeten herrscht. Bei dreifachem Abstand sinkt die Kraft auf  $(1/3)^2$ , also auf ein Neuntel; siehe Abbildung 3.1.

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für die Menge an Materie, aus der er besteht, sei es ein Planet, ein anderer Himmelskörper oder auch ein Apfel. Wie wir heute wissen, wird die Masse von der Anzahl der Elementarteilchen (vor allem der Protonen und der Neutronen) in den Atomen bestimmt, aus denen der Körper zusammengesetzt ist; siehe hierzu Kapitel 5. Im Gegensatz dazu ist das Gewicht bzw. die Gewichtskraft diejenige Kraft, mit der ein Körper von der Erde (oder auch vom Mond) angezogen wird. Also hängt das Gewicht eines Körpers vom Abstand von der Erde (oder vom Mond) ab, aber seine Masse - die Materiemenge - nicht. Deshalb ist in der Mechanik die Masse eine wichtigere Größe als das Gewicht.



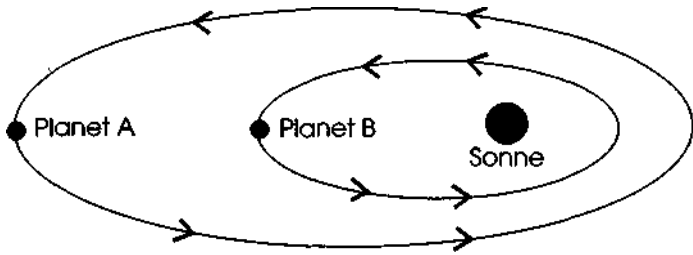


Abb. 3.1: Newtons Gravitationsgesetz, nach dem die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ist. Die Anziehungs- oder Gravitationskraft zwischen dem Planeten A und der Sonne beträgt ein Viertel der Kraft zwischen dem Planeten B und der Sonne.

Während seines Aufenthalts in Woolsthorpe stellte Newton auch die drei grundlegenden Bewegungsgesetze auf. Man nennt sie auch die drei Newtonschen Axiome:

1. *Trägheitsgesetz: Ein ruhender Körper wird in Ruhe verharren, bis eine Kraft auf ihn einwirkt, so daß er sich bewegt. Entsprechend wird ein Körper, der sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf gerader Linie bewegt, diesen Bewegungszustand beibehalten, bis eine Kraft auf ihn einwirkt und den Bewegungszustand ändert.* Legt man beispielsweise einen Ball auf eine waagerechte Tischplatte, dann bleibt er in Ruhe, wenn keine äußere Kraft auf ihn einwirkt. Wenn eine Kraft ihn einmal ins Rollen gebracht hat, so wird er (in der Richtung dieser Kraft) auf ewig weiterrollen, wenn ihn keine Reibungs- oder anderen Kräfte bremsen oder aus der Richtung bringen.
2. *Definition der Kraft: Die Beschleunigung (die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit) ist direkt proportional zur einwirkenden Kraft.* Wenn zum Beispiel ein Automotor mehr Kraft abgibt, wird der Wagen stärker beschleunigen, also eine bestimmte Geschwindigkeit früher erreichen. Eine doppelt so große Kraft bewirkt eine doppelt so hohe Beschleunigung derselben Masse.
3. *Prinzip von Aktion und Reaktion bzw. von Kraft und Gegenkraft: Jede Aktion ist mit einer entgegengesetzten Aktion verknüpft.* Wenn die Aktion beispielsweise das Abfeuern einer Gewehrkuugel ist, dann ist die Reaktion der Rückstoß der Waffe.

Mit diesen fundamentalen Bewegungsgesetzen begründete Newton die wissenschaftliche Mechanik und legte den Grundstein für das, was wir heute als »klassische Physik« bezeichnen. Newtons Axiome und sein Gravitationsgesetz erscheinen den heutigen Physikern als offensichtlich und einfach. Aber zu Newtons Zeit war ein grundsätzlich neues Denken erforderlich, um exakte, mathematisch formulierte Gesetze zu finden, die den Beobachtungen und Messungen entsprechen. Newton konnte bei der Entwicklung des Gravitationsgesetzes und der Bewegungsgesetze weitgehend auf Keplers und Galileis Arbeiten aufbauen. Dies erkannte er ausdrücklich an, als er sagte, daß er »auf den Schultern von Giganten stünde«. Aber das Prinzip von der universellen Gravitationskraft und insbesondere dessen mathematische Formulierung stellten einen gewaltigen Fortschritt dar. Man konnte aus Galileis astronomischen Entdeckungen und Keplers Gesetzen der Planetenbewegungen ja nur folgern, daß die Planeten die Sonne auf bestimmten regelmäßigen Bahnen umrunden, deren Merkmale vom Abstand von der Sonne abhängen. Obwohl Kepler eine »zentrale Kraft« ahnte, erlauben seine Gesetze keinen Einblick in die Dynamik des Sonnensystems oder in die prinzipielle Funktionsweise und die Existenzbedingungen derartiger Strukturen.

Newtons neue Idee bestand darin, daß eine unsichtbare Kraft existiert, die die Materie beeinflusst, ohne daß die Körper einander berühren müssen. Das war im Jahre 1666 eine kühne Vorstellung. Newton drückte erstmals in mathematischen Formeln das Konzept aus, das Kopernikus vor Augen hatte: wie das Sonnensystem als eine dynamische Struktur zu verstehen ist, deren einzelne Körper wechselseitig voneinander abhängen.

Newton war in den 18 Monaten, die er damals in Woolsthorpe verbrachte, physisch und intellektuell weitgehend isoliert. In dieser Zeit befaßte er sich intensiv mit den Bewegungen der Himmelskörper. »Das Problem war mir ständig präsent, und ich wartete nur darauf, daß die erste Morgendämmerung allmählich in das volle Tageslicht übergang«, schrieb er später. Newton entwickelte - gleichzeitig mit J. Gregory und G. W. Leibniz - auch einen neuen Zweig der Mathematik, nämlich die Infinitesimalrechnung, also die Differential- und die Integralrechnung.

Außerdem begann er damals mit Arbeiten zur Optik. »All das geschah in den beiden Pestjahren 1665 und 1666, denn seinerzeit war ich im besten Alter, Neues zu erfinden, und widmete mich der Mathematik und der Philosophie [gemeint sind die Naturwissenschaften] intensiver als jemals zuvor oder danach«. Er stellte in jenen anderthalb Jahren die grundlegenden Bewegungsgesetze auf, bestätigte ihre Gültigkeit für alle Himmelskörper, entdeckte das fundamentale Gravitationsgesetz, entwickelte die Infinitesimalrechnung und erzielte wesentliche Fortschritte in der Optik. Aber er war mit der Publikation seiner Entdeckungen äußerst zögerlich, weil er spürte, daß weitere Experimente und Beweise nötig waren. Manche Berechnungen erschienen ihm nicht exakt genug, denn er verwendete den allgemein akzeptierten (jedoch ungenauen) Wert für den Erddurchmesser. Daher mußte sich die wissenschaftliche Welt noch eine Weile gedulden, bis Newton dieses und andere Probleme gelöst haben würde. Er korrespondierte mit mehreren Wissenschaftlern, unter anderem über Farben, Licht und allgemeine Optik, ferner über Teleskope und das Schleifen von Linsen. Er legte seine Notizen dann beiseite und wandte sich vorübergehend von der Wissenschaft ab, um sich anderen Dingen zu widmen. Zwei Jahrzehnte lang hielt er seine Erkenntnisse freiwillig unter Verschuß.

## **Newton enthüllt die Gesetze des Universums** *Eine gewaltiges Werk in lateinischer Sprache*

Newton kehrte 1667 nach Cambridge an die nun wieder geöffnete Universität zurück und wurde Mitglied des Lehrkörpers am Trinity College. Im folgenden Jahr gab sein Mentor Isaac Barrow seine Mathematikprofessur auf. Er konnte es einrichten, daß der damals gerade 25jährige Newton sein Nachfolger auf diesem renommierten Lehrstuhl wurde (den übrigens heute der berühmte theoretische Physiker Stephen Hawking innehat).

Noch 16 Jahre später, 1684, hatte Newton keines der Prinzipien veröffentlicht, die er in Woolsthorpe erarbeitet hatte. Nun stellte er aber seine Berechnungen der Planetenbewegungen und der elliptischen Umlaufbahnen einem Freund und Kollegen vor, näm-

lich dem bedeutenden Astronomen und Mathematiker Edmond Halley (1656-1742). Dieser hatte die Bahn eines alle 76 Jahre wiederkehrenden Kometen bestimmt, der dann nach ihm benannt wurde. Halley erkannte sofort die enorme Bedeutung von Newtons Arbeiten und drängte ihn zur Publikation. Newton konnte jetzt seine Aufzeichnungen erst einmal nicht finden. Dann aber strukturierte er das Material neu und erstellte ein kohärentes System von Theorien und mathematischen Beweisen. Halley bat die Royal Society um finanzielle Unterstützung für die Veröffentlichung des Werkes. Der Zuschuß wurde abgelehnt, und Halley bezahlte die Druckkosten selbst, verhandelte mit den Druckern, verfaßte das Vorwort und kümmerte sich um alle Details der Publikation. Im Grunde hat es die Welt Halley zu verdanken, daß - über zwanzig Jahre nach Newtons Aufenthalt in Woolthorpe - die Abhandlung erschien, die heute als eines der bedeutendsten wissenschaftlichen Werke aller Zeiten gilt: *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Mathematische Prinzipien der Naturlehre), heute meist kurz *Principia* genannt.

Die *Principia* sind in drei »Bücher« unterteilt, doch bestand die Erstausgabe von 1687 aus einem einzigen Band. Hierin prägte Newton den Begriff »Gravitation« abgeleitet vom lateinischen Wort *gravitas* (Schwere, Gewicht). Das erste Buch behandelt die Mechanik und erklärt die Art und Weise, in der sich Körper im leeren Raum bewegen. Im zweiten Buch geht es um die Bewegung von Körpern in Umgebungen, die ihnen Widerstand entgegensetzen, beispielsweise Luft oder Wasser. Im dritten Buch schildert Newton - ausgehend von den in den ersten beiden Büchern aufgestellten Prinzipien - die Struktur und die Vorgänge im Sonnensystem, darunter die Bewegungen der Monde von Jupiter, Saturn und Erde sowie die Bewegungen der Planeten um die Sonne. Die Angaben sind so genau, daß in den folgenden 200 Jahren nur wenige bedeutsame Verbesserungen nötig waren. Newton stellt auch die Formeln vor, mit denen die Massen von Sonne und Planeten aus der Erdmasse und den Umlaufdaten berechnet werden können, und er berechnet die Kraft, die die Sonne auf die Kometen ausübt. Schließlich erklärt er die Mondbewegung im einzelnen und deutet die Gezeiten durch das Zusammenwirken der Anziehungskräfte von Mond und Sonne auf die Erde.

Newtons *Principia* gelten als eines der eindrucksvollsten wissenschaftlichen Werke aller Zeiten. Sie sind ganz sicher das wichtigste Einzelwerk, das je in der Physik geschrieben wurde. Es machte Newton sehr schnell berühmt. Im Jahre 1687 schrieb die französische Wissenschaftszeitschrift *Journal des Savants*: »Newtons Werk ist die perfekteste Abhandlung über Mechanik, die man sich vorstellen kann; es ist keine exaktere und deutlichere Beweisführung möglich als die hier gegebene.« In der deutschen Zeitschrift *Acta Eruditorum* (Berichte für Gelehrte) erschien im selben Jahr eine zwölfseitige Rezension der *Principia*, in der Newton als bedeutendster Mathematiker seiner Zeit bezeichnet wird. Die Nachfrage nach den *Principia* stieg in den folgenden Jahren stark an, und sie wurden auch in anderen Ländern publiziert, meist in der lateinischen Originalfassung. Newton überarbeitete das Werk 1713 für die zweite Auflage und 1726 für die dritte; dies war die letzte, die zu seinen Lebzeiten herauskam. Erst kurz nach seinem Tod im Jahre 1727 erschienen die *Principia* erstmals in englischer Sprache. Später wurden sie auch in zahlreiche andere Sprachen übersetzt.

Zwar wurden die *Principia*, wie gesagt, sofort als äußerst bedeutendes Werk anerkannt. Aber sie sind sehr umfangreich, komplex und schwierig zu verstehen, auch wegen der lateinischen Sprache. Daher dauerte es volle fünfzig Jahre, bis das Newtonsche System des Universums so durchgängig akzeptiert wurde, daß es in Schulen und Universitäten gelehrt wurde. Sogar in Cambridge lehrten die Professoren noch sechs Jahre nach dem Erscheinen der *Principia* das sogenannte cartesische System. Es beruhte auf den weitgehend unzutreffenden Theorien, die der französische Mathematiker und Philosoph Rene Descartes im frühen 17. Jahrhundert aufgestellt hatte. Die zweite Auflage der *Principia* von 1713 enthielt neue Angaben über die Bewegungen von Mond, Kometen und anderen Himmelskörpern sowie über den Widerstand von Flüssigkeiten gegen die Bewegung von Körpern in ihnen. Trotzdem konnte Newtons Kollege Roger Cotes die Kritiker nicht davon überzeugen, daß Descartes' Theorien zugunsten der Newtonschen Physik aufgegeben werden müßten.

## **Newton wendet sich von der Wissenschaft ab und erweitert seine Interessen**

### *Die Prophezeiungen Daniels*

In den Jahren unmittelbar nach der Publikation der *Principia* interessierte sich Newton kaum für wissenschaftliche Fragen. Die lange, ermüdende Prozedur bis zur Herausgabe des Werkes hatte ihn erschöpft, so daß er der Wissenschaft nun gleichgültig gegenüberstand, ähnlich wie in einer früheren Periode, als er Mitte dreißig war und an einen Freund schrieb, sein Interesse an der Wissenschaft sei »erloschen«. 1689 war er ins Parlament gewählt worden und kam daher oft nach London. Hier freundete er sich mit dem großen Philosophen John Locke und vielen Wissenschaftlern an, die ihn in seinen späteren Jahren noch stark beeinflussen sollten. In dieser Zeit nach dem Erscheinen der *Principia* schrieb er ausführlich über die Bibel und korrespondierte mit Locke über die Prophezeiungen Daniels.

Nachdem er mit seinen Bewerbungen um einige höhere Regierungsämter gescheitert war, wurde er 1696 Münzmeister und 1699 schließlich Vorsteher der königlichen Münze in London. Es gelang ihm, das durch Falschmünzer ernsthaft gefährdete britische Münzwesen zu sanieren, und er erntete für seine administrativen Fähigkeiten viel Anerkennung. Newton behielt diese Stellung bis zu seinem Tode 1727. Ungefähr seit der Zeit seines Amtsantritts 1699 hatte er erneut Interesse an der Wissenschaft gezeigt und wurde 1703 zum Präsidenten der Royal Society gewählt, einer der angesehensten wissenschaftlichen Vereinigungen Europas. Auch diese Position behielt Newton für den Rest seines Lebens. Er war seit zwanzig Jahren der erste herausragende Wissenschaftler, der dieses Amt bekleidete, nach dem Astronomen und Baumeister Christopher Wren (1632-1723), der übrigens auch die Saint-Paul's-Kathedrale in London entworfen hatte.

Im Jahre 1704 veröffentlichte Newton ein weiteres bedeutendes Werk, die *Optik*, mit dem Untertitel *Eine Abhandlung über Reflexionen, Brechungen, Beugungen und die Farben des Lichts*. Das Buch enthielt zwei mathematische Betrachtungen, die er etliche Jahre zuvor zur Untermauerung seiner Theorien zur Optik verfaßt hatte. Ähnlich wie bei den *Principia*, deren Herausgabe

sich lange verzögert hatte, waren die Aufzeichnungen zur *Optik* schon abgeschlossen, bevor Newton 1689 nach London kam. Wie er im Vorwort schrieb, stammten sie zu großen Teilen aus dem Jahre 1675. Die *Optik* mehrte Newtons Ansehen in der wissenschaftlichen Welt noch weiter. Er wurde 1705 zum Ritter geschlagen, eine Ehre, die zuvor noch nie für wissenschaftliche Leistungen verliehen worden war.

Anders als bei den meisten anderen bedeutenden Physikern gab es, wie bereits erwähnt, bei Newton öfter längere Perioden, in denen er sich nicht für die Physik interessierte. In diesen Zeiten widmete er sich der Chemie und der Alchemie, ferner seinen Pflichten als Vorsteher der Münze und auch religiösen Fragen. Ein großer Teil seiner religiösen Schriften wurde nach seinem Tode zusammengestellt und veröffentlicht, darunter historische Betrachtungen zu zwei bemerkenswerten Verfälschungen der Bibel, zur Chronologie der alten Königreiche sowie zu den Prophezeiungen Daniels und zur Apokalypse des Heiligen Johannes. Newton hinterließ auch umfangreiche Schriften zu Chemie und Alchemie. Er korrespondierte intensiv mit dem englischen Chemiker Robert Boyle, mit dem er auch befreundet war. Dabei ging es vor allem um chemische Verbindungen und die Durchführung von Experimenten. Vor allem wegen seines verschlossenen Wesens hat Newton den Zweck und das Ergebnis seiner eigenen chemischen Experimente nie veröffentlicht.

Natürlich sind auch bedeutende Menschen nicht perfekt. Newton war leicht reizbar und äußerst empfindlich gegen die leiseste Kritik an seiner Arbeit. Er war unversöhnlich gegenüber seinen Widersachern (echten wie eingebildeten) und intolerant im Umgang mit Leuten, die wenig talentiert oder motiviert waren. In den Jahren 1690 bis 1692, nach seiner Zeit als Parlamentsmitglied, als sein Interesse an der Wissenschaft wieder einmal stark nachgelassen hatte, beschuldigte er seine Kollegen und engen Freunde John Locke und Charles Montagu mehrmals, ihn zu betrügen und seinem Ansehen schaden zu wollen. Von diesen paranoiden Verdächtigungen rückte er 1693 wieder ab. Nun schien er seine öffentlichen Dispute mit anderen Wissenschaftlern zu genießen, darunter die mit dem englischen Astronomen John Flamsteed, der Newtons Arbeiten über Optik und Astronomie ange-

griffen hatte, und mit dem deutschen Mathematiker Gottfried Wilhelm Leibniz. Ihn bezichtigte Newton des Plagiats an seiner *Optik*, außerdem stritt er heftig mit ihm um den Prioritätsanspruch auf die Entwicklung der Infinitesimalrechnung. In seinem ersten Jahr als Präsident der Royal Society schrieb Newton: »Unsere Gesellschaft zerfällt und produziert nichts Bemerkenswerthes. (...) Sie wird beherrscht von Personen, die entweder nur den eigenen Nutzen im Sinn haben oder außer von Gemüse nichts verstehen.« (Das bezog sich auf den Naturkundler Sir Hans Sloane, den Sekretär der Royal Society.) Derartige Streitigkeiten durchzogen Newtons Leben und waren teils die Ursache, teils die Folge seiner Verbitterung.

In diesem Buch soll nicht versucht werden, die sieben größten wissenschaftlichen Entdeckungen der Geschichte oder deren Urheber in eine Rangfolge zu stellen. Aber es ist angemessen, Newton an erster Stelle zu nennen. Er war nicht nur chronologisch der erste (fünf der übrigen sechs großen Entdeckungen vollzogen sich im 20. Jahrhundert), sondern vieles, was nach ihm erforscht wurde, wäre ohne sein Werk nicht möglich gewesen. Die Auswirkungen von Newtons Erkenntnissen reichen in vielen Gebieten der Wissenschaft bis in unser Jahrhundert hinein. Die Wellentheorie des Lichts baut auf Newtons Bewegungsgesetzen auf, ebenso die kinetische Theorie der Wärme. Newtons Theorien waren bedeutsam für die Entwicklung unseres Verständnisses der Elektrizität und des Magnetismus, außerdem für die Arbeiten von Faraday und Maxwell zur Elektrodynamik und zur Optik. Newtons Physik war für die Naturwissenschaftler über zweihundert Jahre lang richtungsweisend, auch noch in unserem Jahrhundert - bis Einstein bewies, daß die Physik über das Newtonsche System hinausgehen muß. Auf Isaac Newtons Prinzipien baute ein großer Teil der Naturwissenschaften auf, und Newton leitete die Veränderungen ein, durch die die moderne Wissenschaft möglich wurde. Sein Name steht daher weiterhin für die Überlegenheit des menschlichen Geistes, der die Vernunft und die wissenschaftliche Methodik auf die Art und Weise anwendet, in der das physikalische Universum wirkt.



## TEIL 2

### Der Aufbau des Atoms

*Einhundert Millionen Wasserstoffatome ergäben aneinandergereiht eine Länge von nur einem Zentimeter. Stellt man sich ein einzelnes Atom auf einen Durchmesser von hundert Metern vergrößert vor, dann wäre sein Atomkern (der aus Protonen und Neutronen besteht) nur gut einen Millimeter groß, und die Elektronen umrundeten ihn in der äußersten Schale mit einer Geschwindigkeit von mehreren tausend Kilometern pro Sekunde.*

*Praktisch die gesamte Masse eines Atoms ist in seinem Kern konzentriert, denn ein Proton ist, wie auch ein Neutron, gut 1800mal schwerer als ein Elektron. Diese elektrischen Ladungen haben also auch ein Gewicht! Aber die subatomaren Teilchen oder Elementarteilchen, aus denen die Atome aller chemischen Elemente (beispielsweise Wasserstoff, Sauerstoff, Gold, Silber, Aluminium oder Uran) bestehen, sind farblos, geschmacklos, geruchlos und haben auch keine bestimmte Gestalt. Die Elementarteilchen sind weder hart noch weich, weder matt noch glänzend. Und doch ergeben sie die ganze Vielfalt der 92 natürlich vorkommenden Elemente, aus denen alle Substanzen bestehen, sei es im Boden, in der Luft, in den Meeren oder auch in den Pflanzen, in den Tieren oder in uns Menschen. Die Festigkeit und alle anderen Merkmale von Substanzen, Gegenständen oder Lebewesen gehen letztlich auf die elektrischen Kräfte zurück, durch die die Elementarteilchen aufeinander einwirken.*

*Alle Materie besteht im Prinzip aus den elektrischen geladenen Elektronen und Protonen und den ungeladenen Neutronen. Daß Substanzen sozusagen aus dem Nichts entstehen, wenn elektrische Ladungen sich zu den Atomen der Elemente und diese sich*

zu den Molekülen der Verbindungen zusammenfügen, wirkt sehr seltsam, aber es ist Realität.

Der Teil 2 dieses Buches beschreibt, wie Wissenschaftler die unglaubliche Komplexität der physikalischen Welt enthüllten, und bringt uns die Personen näher, denen diese dramatischen Entdeckungen gelangen. Er erzählt auch die Geschichte der Freisetzung unvorstellbarer Energiemengen, die im Atomkern schlummern.

## KAPITEL 4

### Die Chemie stimmt

*»Zunächst müssen wir untersuchen, ob die Elemente [Erde, Luft, Feuer und Wasser] ewig bestehen oder erzeugt werden und vergehen. (...) Es ist unmöglich, daß die Elemente aus irgendeiner Art von Körpern gebildet werden. Das bedeutete nämlich, daß ein Körper beteiligt wäre, der sich von den Elementen unterscheidet und vor ihnen existierte.«*

Aristoteles, *Über den Himmel* (um 330 v. Chr.)

In seinem Buch *The Ascent of Man* (Der Aufstieg des Menschen) schrieb Jacob Bronowski: »Der Genius von Menschen wie Newton und Einstein bestand darin, daß sie einfache, unschuldige Fragen stellten, deren Antworten aber gravierende Auswirkungen auf die Gesellschaft und den Einzelnen hatten«. Solche Fragen wurden erstmals im antiken Griechenland gestellt, das seit rund 8000 Jahren besiedelt ist. Hier bildete sich die erste dauerhafte europäische Kultur heraus. Aristoteles prägte im 4. Jahrhundert v. Chr. für die Erforschung der Natur den Begriff »Physik«, der sich vom griechischen Wort *physis* (Natur) ableitete. Der größte Teil der Lehren und Theorien von Sokrates, Platon und Aristoteles erwies sich später als ungenau und wurde während der Renaissance aufgegeben. Dennoch liegen die Wurzeln unserer Wissenschaft im antiken Griechenland - jedoch nicht, weil die eben genannten oder andere griechische Naturphilosophen vor über 2000 Jahren wissenschaftliche Entdeckungen gemacht hätten, sondern weil sie glaubten, daß die physikalische Welt und das Universum durch rationales Denken zu erklären sei. Dieses Vertrauen auf Logik und Überlegung - von Newton so unvergleich-

lich verkörpert - wurde kennzeichnend für die heutige Naturwissenschaft. Zu Newtons Zeit begannen auch andere Wissenschaftler damit, die Beschaffenheit der Materie bis ins letzte zu ergründen. Diese Forschungen sollten aber erst nach dem 17. Jahrhundert Früchte tragen; letztlich gehen sie alle auf die »Physik« der alten Griechen zurück.

## **Die moderne Atomtheorie hat ihre Wurzeln im antiken Griechenland** *Schall und Seelen aus Atomen*

Im 5. Jahrhundert v. Chr. befaßte sich der griechische Philosoph Anaxagoras mit der Frage, woraus die Materie besteht. Er stellte sich vor, was geschähe, wenn man beispielsweise eine Silberkugel in zwei Hälften teilt, dann eine Hälfte wieder teilt, und so weiter. Anaxagoras kam zu dem Schluß, daß man das im Prinzip beliebig weit treiben könnte. Nach seiner Überzeugung war jegliche Materie unendlich teilbar.

An der Nordküste des Ägäischen Meeres liegt die Stadt Abdera (heute Avdhira). Hierhin waren im Jahre 540 v. Chr. zahlreiche Griechen vor dem Einmarsch der Perser in Lydien geflohen. In Abdera ließ sich um 480 v. Chr. ein Mann namens Leukipp nieder. Er stellte über den Aufbau der Materie eine Theorie auf, die sich grundlegend von der des Anaxagoras unterschied, ebenso von allen anderen Vorstellungen, die bis dahin vertreten wurden. Von Leukipps Schriften sind nur Fragmente erhalten, und wir können uns daher nur auf die Schriften seines Schülers Demokrit verlassen, der seine Lehren verbreitete, außerdem auf Aristoteles' Charakterisierung der Philosophie des Leukipp. Auf diese bezog sich Aristoteles in seinem umfangreichen Werk häufig.

Leukipps Theorie besagt, daß im Universum zwei Dinge und nur diese zwei Dinge existieren: Atome und Leere. Danach ist alles, was wir sehen, aus Atomen zusammengesetzt (griechisch *átomos*, unteilbar), die sich durch den leeren Raum bewegen. Diese hypothetischen Materieportionen sind gemäß Leukipps Theorie zu klein, als daß man sie sehen kann, aber so fest, daß man sie weder teilen noch verändern oder zerstören kann. Sie

kommen in verschiedenen geometrischen Formen vor (das erklärt ihre Fähigkeit, sich zu jeglichen unterschiedlichen Dingen auf der Welt zu kombinieren), und schließlich sind sie unaufhörlich in Bewegung. Sie bilden bei ihren Zusammenstößen und Umgruppierungen die Formen der Materie, die wir sehen. Leukipp konnte sich nicht vorstellen, daß dieses großartige Universum aus formlosen »Nichtigkeiten« ohne eigene Identität besteht. Wie könnten denn Dinge aus Materie ihre Einzigartigkeit behalten, und wie könnten lebende Organismen ihr komplexes Erscheinungsbild an ihre Nachkommen weitergeben, wenn es keine unwandelbaren und unzerstörbaren Materiestücke gäbe ?

Mit Hilfe von Leukipps Atomtheorie erklärten andere Philosophen später die verschiedensten Phänomene. Beispielsweise sollte der Schall durch Schallatome erzeugt werden, die auf Luftatome stoßen, die ihrerseits auf das Ohr treffen. Sogar die menschliche Seele sollte aus Atomen zusammengesetzt sein. Wie fast alle derartigen Prinzipien, die im antiken Griechenland aufkamen, beruhte auch Leukipps Atomtheorie vollkommen auf Spekulation. Das gleiche gilt für die Anwendung dieser Theorie durch andere. Im Grunde trieben die Griechen Philosophie und keine Naturwissenschaft. Aber zu Leukipps Ehre sei gesagt, daß er ein Konzept vorstellte, das rund 2400 Jahre später bei der Aufklärung des Atombaus wiederbelebt wurde.

Natürlich dachten auch andere Naturphilosophen im antiken Griechenland, vor und nach Leukipp und Anaxagoras, über das Wesen der Materie nach und versuchten, unsere physikalische Umgebung zu ergründen und zu erklären. Empedokles (um 495-435 v. Chr.) vermutete als erster, daß Erde, Luft, Feuer und Wasser elementare Substanzen seien. Thales von Milet (um 625-547 v. Chr.) meinte, das Wasser sei der Ursprung aller Materie. Anaximander von Milet (ca. 610-546 v. Chr.) sprach vage von einer »Ursubstanz«, die alle Arten von Materie und deren Eigenschaften (heiß, kalt, naß, trocken usw.) in sich trage. Anaximenes von Milet (ca. 585-526 v. Chr.) war überzeugt, daß die Luft die ursprüngliche Substanz sei und sich in andere Materialien umforme. Platon und Aristoteles übernahmen von Empedokles die Vorstellung der vier Elemente und kombinierten sie mit ihren persönlichen Auffassungen darüber, wie Materie und phy-

sikalisches Universum zusammenwirken. Zwar glaubten die Menschen noch im gesamten Mittelalter an die vier Elemente, aber Leukipps Atomtheorie sollte sich letztlich durchsetzen.

## **Methoden und Apparate der Alchimie legen den Grundstein für die moderne Chemie**

*Noch hält sich die Theorie der vier Elemente*

Schon vor Jahrtausenden schätzte man das Gold als eine seltene und schöne Substanz. Ebenso erkannte man schon früh, daß es eine einzigartige Beständigkeit aufweist. Es gab lange Zeit keine Säure und kein anderes Mittel, Gold zu zersetzen. Daher schrieb man ihm eine Dauerhaftigkeit zu, die auf den Menschen übertragbar sein sollte. Jede Medizin gegen das Altern enthielt deshalb Gold als wesentliche Zutat, und die Ärzte ließen ihre Patienten aus Goldbechern trinken, um das Leben zu verlängern.

Das große Verlangen nach Gold brachte im 1. Jahrhundert n. Chr. die Alchimie als eigenes Fachgebiet hervor, zuerst bei den griechischen Gelehrten. Dann breitete sie sich in den östlichen Mittelmeerländern aus und gelangte im 12. Jahrhundert nach Spanien und Italien. Der ursprüngliche und wichtigste Zweck der Alchimie war die Herstellung von Gold aus anderen Substanzen. Doch im Mittelalter versuchten etliche europäische Ärzte und Alchimisten auch, Arzneien herzustellen, die nichts mit Gold zu tun hatten. Bei ihren Bemühungen, medizinische Essenzen beispielsweise aus Kräutern zu gewinnen, verbesserten sie die Methoden zum Trennen der Substanzen durch Destillation. So erkannte schon im 13. Jahrhundert Thaddeus von Florenz den medizinischen Nutzen alkoholischer Tinkturen, die getrunken oder äußerlich angewandt wurden. Der deutsch-schweizerische Arzt, Alchimist und Philosoph Paracelsus (1493-1541) vereinigte als erster Medizin und Chemie. Er wandte unter anderem Mittel an, die Quecksilber und Schwefel sowie Eisen- und Kupfersulfat enthielten. Er erfand auch die Wasserdampfdestillation und verbesserte die chemischen Geräte weiter.

Die verfeinerten Möglichkeiten, Substanzen zu destillieren oder zu zersetzen, schufen die Grundlage für eine wissenschaftli-

che Chemie. Während sich in der Renaissance eine wirkliche Naturwissenschaft herauszubilden begann, wurde das Aufkommen der modernen Chemie noch durch die alchimistischen Experimente behindert. Francis Bacons Lehren über die wissenschaftliche Methodik führten die Menschen von der griechischen Philosophie weg, hin zum Anerkennen empirischer Beweise. Danach galt nur das, was wirklich beobachtet oder gemessen werden konnte. Trotzdem hielt man noch an den vier Elementen (Erde, Luft, Feuer und Wasser) fest und erkannte noch immer nicht, daß diese vier Substanzen aus Kombinationen wirklich elementarer Stoffe bestehen.

**Die griechische Philosophie wurde von der  
wissenschaftlichen Methodik verdrängt, als die  
Elemente entdeckt wurden**  
*Phlogiston und Guillotinen*

In der Chemie untersucht man die Gesetze, die das Verhalten von Elementen und Verbindungen bestimmen. Diese Wissenschaft trennte sich endgültig von der Alchimie, als der in Irland geborene britische Chemiker Robert Boyle (1627-1691) im Jahre 1661 sein Werk *The Skeptical Chymist* herausgab. Hierin zeigte er, daß Erde, Luft, Feuer und Wasser keine elementaren Substanzen sind. Boyle, der 1660 die Royal Society in London mitbegründete, entwickelte die Analysenmethode durch Flammenfärbung, außerdem die Tüpfelanalyse, das Fällungsverfahren und andere analytische Hilfsmittel. All dies ergab sich bei seinen Bemühungen, die Elemente zu finden, aus denen Mineralien und andere Substanzen zusammengesetzt sind. 1662 stellte er fest, daß das Volumen eines Gases umgekehrt proportional zum Druck ist. Beispielsweise bewirkt eine Verdopplung des Drucks, daß sich das Volumen halbiert, und bei halbem Druck steigt das Volumen auf das Doppelte. Diese Beziehung, die heute nach ihm Boylesches Gesetz genannt wird, ließ ihn vermuten, daß Gase aus winzigen »Korpuskeln« (Teilchen) bestehen, zwischen denen viel leerer Raum ist. Dieser leere Raum ist der Grund für die leichte Komprimierbarkeit der Gase.

Isaac Newton stimmte Boyles Korpuskeldeutung zu. Er beschrieb die Atome »als die kleinen Teilchen der Körper mit bestimmten Energien, Eigenschaften oder Kräften«, durch die die Atome aufeinander einwirken könnten. Boyle erklärte, daß Leukipp recht gehabt haben mußte und daß diese Korpuskeln mit Leukipps Atomen vergleichbar sein müßten. Boyle hatte also Leukipps Vorstellung von den unteilbaren Teilchen übernommen. Er wurde damit einer der ersten bedeutenden Wissenschaftler, die sich von Anaxagoras' und Aristoteles' Lehren abwandten. Nach diesen galt die Materie noch als unbegrenzt teilbar, und Erde, Luft, Feuer und Wasser sollten die fundamentalen Bestandteile des Universums sein.

Joseph Black (1728-1799), geboren in Frankreich und aufgewachsen in Schottland, arbeitete seit 1750 daran, die Zusammensetzung der Luft zu ergründen. Seine Arbeiten führten zur Entdeckung des Kohlendioxids und des Stickstoffs. Nach ihm wandten sich zahlreiche europäische Chemiker den seltsamen Eigenschaften der Gase und deren Zusammensetzungen zu. Bald erkannte man, daß es eine Gruppe gasförmiger Substanzen gibt, die sich voneinander unterscheiden und Bestandteile der Luft sind. Also mußte die Auffassung von der Luft als einem Element aufgegeben werden. Man sah die Gase nun als einen Zustand der Materie an, neben dem flüssigen und dem festen Zustand. Schließlich wurde auch klar, daß alle Stoffe aus Kombinationen verschiedener fundamentaler Substanzen, d.h. von Elementen, bestehen.

Im Jahre 1729 hatte Georg Ernst Stahl, Leibarzt des preußischen Königs, die sogenannte Phlogistontheorie aufgestellt. Danach war das Phlogiston ein mysteriöses, unsichtbares, farbloses sowie geruch- und geschmackloses Gas, dem ein »negatives Gewicht« zugeschrieben wurde. Stahl postulierte die Existenz des Phlogistons, um zu erklären, warum bestimmte Substanzen beim Verbrennen schwerer werden. Außerdem versuchte er damit, einige offensichtliche Schwächen der aristotelischen Theorien zu beheben, an denen viele Forscher noch festhielten. Unterstützt von etlichen führenden Chemikern, blieb die Phlogistontheorie einige Jahrzehnte erhalten. Der englische Chemiker Joseph Priestley (1733-1804) konnte 1774 erstmals den Sauerstoff iso-



lieren und beschrieb dessen Rolle bei Verbrennungsvorgängen und bei der Atmung. Aber er bezeichnete ihn als »dephlogistonierte Luft«, verkannte also die Bedeutung seiner eigenen Entdeckung.

Der Franzose Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), Sohn eines reichen Pariser Anwalts, folgte der Familientradition und eröffnete 1764 eine eigene Kanzlei. Aber schon nach knapp zwei Jahren interessierte er sich mehr für die Naturwissenschaften, denen er sich schon in seiner frühen Studienzeit gewidmet hatte. Er hatte neben Jura auch Mathematik, Astronomie, Chemie und Botanik belegt. Bis 1772 konnte er schon einige der von den griechischen Naturphilosophen übernommenen Prinzipien über Erde, Luft, Feuer und Wasser widerlegen. Er wurde bald bekannt für seine exakten quantitativen Verfahren und seine brillanten Experimente. Lavoisier hatte genügend Phantasie und den nötigen Scharfblick, um die Phlogistontheorie als falsch zu erkennen. Dazu bestimmte er sorgfältig das Gewicht der Substanzen und deren Veränderungen beim Verbrennen. So kam er zu dem Schluß, daß eine Substanz nur dann als elementar anzusehen ist, wenn sie sich durch chemische Behandlung nicht in einfachere Substanzen zerlegen läßt. Er erweiterte die Liste der bekannten Elemente auf 33. Allerdings unterliefen ihm dabei einige Irrtümer. Zwischen 1776 und 1782 nahm Lavoisier etliche Experimente vor, bei denen er den Sauerstoff der Luft isolierte. Er führte damit Priestleys Arbeiten über die Rolle des Sauerstoffs bei Verbrennung und Atmung weiter. Die Bezeichnung Sauerstoff (lateinisch *oxygenium*, Säurebildner) verwendete Lavoisier erstmals in einer Abhandlung vom 5. September 1777. Im Jahre 1783 publizierte er in französischer Sprache einen Artikel mit der Überschrift *Über die Natur des Wassers und über Experimente, die zu beweisen scheinen, daß diese Substanz kein Element ist, sondern zersetzt und rekombiniert werden kann*. Darin berichtete Lavoisier der französischen Akademie der Wissenschaften, daß Wasser durch Kombination von Wasserstoff und Sauerstoff entsteht. In einer späteren Schrift für die Akademie stellte Lavoisier eine eingehende Abhandlung über den Sauerstoff vor. Wichtigstes Instrument bei seinen Experimenten war eine hochempfindliche Waage. Mit seinem scharfen Intellekt konnte Lavoisier durch in-

duktive Schlüsse letztlich Boyles Bemühungen abschließen und die Auffassungen der antiken griechischen Philosophen widerlegen, daß Erde, Luft, Feuer und Wasser Elemente seien. Außerdem legte er ein für allemal die zuweilen noch hartnäckig vertretene Phlogistontheorie ad acta. Wegen dieser und auch anderer Arbeiten gilt Lavoisier als Begründer der modernen Chemie.

Lavoisier nahm stets Anteil an der Politik und bekleidete mehrere Regierungsämter, darunter zwischen 1768 und 1790 in den Bereichen Wirtschaft, Landwirtschaft, Ausbildung und Wohlfahrt. Trotz seiner bedeutenden Beiträge als Reformers und seiner liberalen Haltung, ja sogar trotz seines Eintretens für die Revolution wurde Lavoisier in den Wirren nach der Französischen Revolution von 1789 als reiches Mitglied der französischen Aristokratie angefeindet. Der Hauptgrund dafür war, daß er 1768 Generalpächter der Steuerverwaltung gewesen war. Ab 1793 griff der Terror um sich, und im Zuge des Kampfes gegen die Französische Akademie der Wissenschaften und andere Gelehrtenvereinigungen wurde Lavoisier verhaftet. Er wurde, gerade fünfzig Jahre alt, am 8. Mai 1794 nach nur eintägigem Prozeß in Paris auf der Place de la Concorde hingerichtet. Damit endeten die Hoffnungen auf weitere bedeutende Beiträge, die Lavoisier für die Wissenschaft und das rationale Denken sicher geleistet hätte. Mit ihm starben 27 andere ehemalige Steuerpächter durch die Guillotine.

### **Dalton entwickelt die erste moderne Atomtheorie, und Mendelejew entwirft ein System der Elemente**

#### *Kleinste Teilchen und Lücken in der Tabelle*

Der Sohn eines armen Quäkers, der sich als Weber in England durchschlug, sollte schließlich die Theorie des chemischen Atomismus ausarbeiten. Im Oktober 1803 reichte John Dalton (1766-1844), damals Professor für Mathematik und physikalische Wissenschaften am New College in Manchester, bei der dortigen literarischen und philosophischen Gesellschaft eine Abhandlung ein, die sich mit der Mischung und der Löslichkeit verschiedener Gase befaßte. Darin hieß es: »Die Verhältnisse

hängen vom Gewicht und der Anzahl der kleinsten Teilchen der einzelnen Gase ab. (...) Soweit mir bekannt, ist die Untersuchung der relativen Gewichte der kleinsten Teilchen ein völlig neues Unterfangen. In letzter Zeit habe ich mich diesem mit bemerkenswertem Erfolg gewidmet.« Einen Monat zuvor hatte er eine Tabelle der relativen Atomgewichte aufgestellt (siehe Tabelle 4.1), die weitgehend auf Berechnungen von Lavoisier und anderen beruhte.

Wasserstoff	1,0	Stickstoffoxid	13,7
Stickstoff	4,2	Schwefel	14,4
Kohlenstoff	4,3	Salpetersäure	15,2
Ammoniak	5,2	Schwefelwasserstoff	15,4
Sauerstoff	5,5	Kohlensäure	15,3
Wasser	6,5	Alkohol	15,3
Phosphor	7,2	Schweflige Säure	19,9
Phosphorwasserstoff	8,2	Schwefelsäure	25,4
Nitrose Gase	9,3	Kohlenwasserstoff	6,3
Ether	9,6	ölbildendes Gas	5,3
Kohlendioxid	9,8		

Tab. 4.1: Daltons Tabelle von 1803 mit den relativen Gewichten der kleinsten Teilchen (soweit möglich, mit den modernen Substanznamen)

Wir haben nun einen weiten Bogen geschlagen: von Leukipp in Griechenland im 5. Jahrhundert v. Chr. bis zu John Dalton in England zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Nun gab es eine Theorie, die eine wesentliche Verbesserung von Boyles Korpuskeltheorie darstellte und auf chemischen Experimenten im Laufe von zwei Jahrhunderten basierte. Dalton kam zu folgenden Schlüssen:

- Die Elemente bestehen aus unteilbaren Teilchen (er nannte sie »Atome«, wie Leukipp und Demokrit, die das Konzept des Unteilbaren entwickelt hatten).
- Die Atome eines jeden Elements gleichen sich, aber sie unterscheiden sich von den Atomen aller anderen Elemente.
- Eine chemische Verbindung entsteht, wenn die Atome zweier oder mehrerer Elemente miteinander »eine feste Bindung« eingehen.

bis 1700	1700-1799	1800-1849	1850-1899
Antimon	Beryllium	Aluminium	Actinium
Arsen	Chlor	Barium	Argon
Bismut	Chrom	Bor	Caesium
Blei	Cobalt	Brom	Dysprosium
Eisen	Fluor	Cadmium	Gadolinium
Gold	Mangan	Calcium	Gallium
Kohlenstoff	Molybdän	Cer	Germanium
Kupfer	Nickel	Erbium	Helium
Phosphor	Platin	Iod	Holmium
Quecksilber	Sauerstoff	Iridium	Indium
Schwefel	Stickstoff	Kalium	Krypton
Silber	Strontium	Lanthan	Neodym
Zink	Tellur	Lithium	Neon
Zinn	Titan	Magnesium	Polonium
	Uran	Natrium	Praseodym
	Wasserstoff	Niob	Radium
	Wolfram	Osmium	Rubidium
	Yttrium	Palladium	Samarium
	Zirkon	Rhodium	Scandium
		Ruthenium	Thallium
		Selen	Thulium
		Silicium	Xenon
		Tantal	Ytterbium
		Terbium	
		Thorium	
		Vanadium	

Tab. 4.2: Die Entdeckung der natürlichen Elemente

Kepler und Newton hatten sich keine Atome vorstellen müssen, um die Gesetzmäßigkeiten der Gravitation oder der Bewegung zu finden. Aber die Wissenschaftler, die zu Beginn des 19. Jahrhunderts die innerste Struktur der Materie ergründen wollten, erkannten allmählich, daß sie auf bestem Wege waren, dieses Geheimnis zu verstehen und zu entschlüsseln. Der schwedische Arzt und Chemiker Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) begann seine Forschungen in analytischer Chemie, kurz nachdem er von Daltons Atomtheorie erfahren hatte. Er war einer der ersten Wissenschaftler, denen die enorme Bedeutung dieser Idee klar wurde. Ab 1810 leistete Berzelius wichtige Beiträge zur möglichst genauen Bestimmung von Atomgewichten. Er schuf auch die ehe-

mische Nomenklatur mit den heute noch üblichen Elementsymbolen. Besonders bedeutsam ist das von ihm entdeckte Gesetz der konstanten Proportionen.

In den nächsten Jahrzehnten wurde Daltons Atomtheorie von den Wissenschaftlern allmählich akzeptiert. Zudem wurde das Verständnis der »festen Bindungen« oder Moleküle durch die Arbeiten zweier italienischer Forscher vertieft. Dies waren der Physiker Amedeo Avogadro (1776-1856) und der Chemiker Stanislao Cannizzaro (1826-1910). Ihre Ansätze und Verfahren ermöglichten es, Gewicht und Größe der Moleküle zu bestimmen. Avogadros 1811 vorgelegte Hypothese besagte: (1) *Die kleinsten Teilchen sind nicht unbedingt Atome, sondern können auch Atomgruppen sein, die sich zu Molekülen vereinigen.* (2) *Gleiche Volumina von Gasen enthalten (bei denselben äußeren Bedingungen) gleich viele Moleküle.* Obwohl sie korrekt und sehr nützlich ist, stimmte Avogadros Hypothese nicht mit den zu jener Zeit anerkannten Prinzipien überein. Daher blieb sie lange weitgehend unbeachtet, bis Cannizzaro zusätzliche Beweise dafür erbringen konnte. Er präsentierte die Theorie auf einem Chemikerkongreß in Karlsruhe erst 1860, einige Jahre nach Avogadros Tod und fast fünfzig Jahre nach der ersten Publikation. Nun wurde die Chemie sehr schnell zu einer immer exakteren Wissenschaft, und die Elemente wurden in ein neues begriffliches Schema eingeordnet.

Bis 1869 waren 63 Elemente entdeckt worden. Der Russe Dimi-trij Mendelejew (1834-1907), geboren im sibirischen Tobolsk als jüngstes von 17 Kindern eines Lehrers, versuchte, die Elemente anhand ihrer Eigenschaften zu ordnen. Dazu legte er für jedes Element eine eigene Karte an und notierte auf ihr das Atomgewicht, das spezifische Gewicht, die Wertigkeit, die spezifische Wärme usw. Nach längerem Probieren fand er schließlich heraus, daß sich die Eigenschaften periodisch wiederholen, wenn die Karten nach steigendem Atomgewicht angeordnet werden; siehe Tabelle 4.3.

Den Wasserstoff ordnete Mendelejew separat von den ihm im Atomgewicht folgenden Elementen an. Außerdem ergab sich die Periodizität der Eigenschaften nur, wenn er an bestimmten Stellen Lücken ließ. Das konnte nur bedeuten, daß Elemente mit

			K = 39	Rb = 85	Cs = 133	-	-
			Ca = 40	Sr = 87	Ba = 137	-	-
			-	?Yt = 88?	?Di = 138?	Er = 178?	-
			Ti = 48?	Zr = 90	Ce = 140?	?La = 180?	Th = 231
			V = 51	Nb = 94	-	Ta = 182	-
			Cr = 52	Mo = 96	-	W = 184	U = 240
			Mn = 55	-	-	-	-
			Fe = 56	Ru = 140	-	Os = 195?	-
			Co = 58	Rh = 104	-	Ir = 197	-
			Ni = 59	Pd = 105	-	Pt = 198?	-
H = 1	Li = 7	Na = 23	Cu = 63	Ag = 108	-	Au = 199?	-
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 66	Cd = 112	-	Hg = 200	-
	B = 11	Al = 27,3	-	In = 113	-	Tl = 204	-
	C = 13	Si = 28	-	Sn = 118	-	Pb = 207	-
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	-	Bi = 208	-
	O = 16	S = 32	Se = 78	Te = 125?	-	-	-
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	-	-	-

Tab. 4.3: Mendelejews Tabelle der Elemente aus dem Jahre 1869

Atomgewichten im betreffenden Intervall noch nicht entdeckt waren. Die Eigenschaften dieser Elemente konnte Mendelejew anhand der Nachbarn in der Tabelle voraussagen. Beispielsweise bestand eine Lücke zwischen den Atomgewichten 40 und 48. Und wirklich entdeckte der schwedische Chemiker Lars Frederik Nilson (1840-1899) im Jahre 1879 das Element Scandium mit dem Atomgewicht 45. Mendelejews Tabelle wurde später erweitert zum periodischen System der Elemente (kurz Periodensystem genannt), wie wir es heute kennen; siehe Abbildung 4.1. Es ist eines der wichtigsten Hilfsmittel der Chemiker. Die Spalten des Periodensystems enthalten die Gruppen, und die Zeilen geben die Perioden der Elemente wieder. Die Ordnungszahl eines Elements ist gleich der Anzahl seiner Protonen im Atomkern, und die Summe von Protonen- und Neutronenzahl entspricht ungefähr dem Atomgewicht.



OZ	Name	Symb.	Atom gew.	OZ	Name	Symb.	Atom- gew.
1	Wasserstoff	H	1,0079	47	Silber	Ag	107,8682
2	Helium	He	4,0026	48	Cadmium	Cd	112,411
3	Lithium	Li	6,941	49	Indium	In	114,818
4	Beryllium	Be	9,0122	50	Zinn	Sn	118,710
5	Bor	B	10,811	51	Antimon	Sb	121,760
6	Kohlenstoff	C	12,011	52	Tellur	Te	127,60
7	Stickstoff	N	14,0067	53	Iod	I	126,9045
8	Sauerstoff	O	15,9994	54	Xenon	Xe	131,29
9	Fluor	F	18,9984	55	Caesium	Cs	132,9054
10	Neon	Ne	20,1797	56	Barium	Ba	137,327
11	Natrium	Na	22,9898	57	Lanthan	La	138,9055
12	Magnesium	Mg	24,3050	58	Cer	Ce	140,115
13	Aluminium	Al	26,9815	59	Praseodym	Pr	140,9077
14	Silicium	Si	28,0855	60	Neodym	Nd	144,24
15	Phosphor	P	30,9738	61	Promethium	Pm	[145]
16	Schwefel	S	32,066	62	Samarium	Sm	150,36
17	Chlor	Cl	35,4527	63	Europium	Eu	151,965
18	Argon	Ar	39,948	64	Gadolinium	Gd	157,25
19	Kalium	K	39,0983	65	Terbium	Tb	158,9253
20	Calcium	Ca	40,078	66	Dysprosium	Dy	162,50
21	Scandium	Sc	44,9559	67	Holmium	Ho	164,9303
22	Titan	Ti	47,867	68	Erbium	Er	167,26
23	Vanadium	V	50,9415	69	Thulium	Tm	168,9342
24	Chrom	Cr	51,9961	70	Ytterbium	Yb	173,04
25	Mangan	Mn	54,9381	71	Lutetium	Lu	174,967
26	Eisen	Fe	55,845	72	Hafnium	Hf	178,49
27	Cobalt	Co	58,9332	73	Tantal	Ta	180,9479
28	Nickel	Ni	58,6934	74	Wolfram	W	183,84
29	Kupfer	Cu	63,546	75	Rhenium	Re	186,207
30	Zink	Zn	65,39	76	Osmium	Os	190,23
31	Gallium	Ga	69,723	77	Iridium	Ir	192,217
32	Germanium	Ge	72,61	78	Platin	Pt	195,08
33	Arsen	As	74,9216	79	Gold	Au	196,9665
34	Selen	Se	78,96	80	Quecksilber	Hg	200,59
35	Brom	Br	79,904	81	Thallium	Tl	204,3833
36	Krypton	Kr	83,80	82	Blei	Pb	207,2
37	Rubidium	Rb	85,4678	83	Bismut	Bi	208,9804
38	Strontium	Sr	87,62	84	Polonium	Po	[209]
39	Yttrium	Y	88,9059	85	Astat	At	[210]
40	Zirkon	Zr	91,224	86	Radon	Rn	[222]
41	Niob	Nb	92,9064	87	Francium	Fr	[223]
42	Molybdän	Mo	95,94	88	Radium	Ra	[226]
43	Technetium	Tc	[98]	89	Actinium	Ac	[227]
44	Ruthenium	Ru	101,07	90	Thorium	Th	232,0381
45	Rhodium	Rh	102,9055	91	Protactinium	Pa	231,0359
46	Palladium	Pd	106,42	92	Uran	U	238,0289

Tab. 4.4: Die natürlich vorkommenden Elemente mit der Ordnungszahl (vor dem Namen), dem chemischen Symbol und dem Atomgewicht. Wenn ein Element kein stabiles Isotop hat, dann ist das Atomgewicht des stabilsten Isotops in eckigen Klammern angegeben.



Im Periodensystem sind die Elemente in einer Weise tabellarisch zusammengefaßt, die die zusammengehörigen »Familien«, d. h. die Gruppen, erkennen läßt. Innerhalb einer Gruppe ändern sich die Eigenschaften der Elemente (Atomgewicht, Dichte, Atomdurchmesser oder Ionisierungsenergie) entsprechend der Ordnungszahl. In Tabelle 4.4 sind die natürlich vorkommenden Elemente in der Reihenfolge ihrer Ordnungszahlen aufgeführt. Das Atomgewicht (eigentlich müßte man korrekt von der relativen Atommasse sprechen) gibt an, wievielfach schwerer ein Atom des betreffenden Elements ist als  $1/12$  eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops C-12. Von Isotopen spricht man, wenn Atome dieselbe Ordnungszahl haben (also im Atomkern gleich viele Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen). Dann gehören diese Atome zum selben Element. Zahlreiche Elemente haben verschiedene Isotope, und das in der Tabelle angegebene Atomgewicht ist dann der Durchschnittswert, der sich aus der relativen Häufigkeit der Isotope im natürlich vorkommenden Element ergibt.

Die Wissenschaftler erkannten bald, daß für ein besseres Verständnis der physikalischen Grundlagen der chemischen Gesetzmäßigkeiten das Verhalten der einzelnen Atome bekannt sein muß. Daran war gegen Ende des vorigen Jahrhunderts natürlich nicht zu denken. So hielten viele Physiker vor gut hundert Jahren Daltons Beschreibung des Atoms für unzureichend, weil sie weder in das Newtonsche System der physikalischen Prinzipien hineinpaßte noch die elektrischen Charakteristika der Materie erklärte.

Eine Forschungsrichtung befaßte sich mit elektrischen Vorgängen, vor allem mit den Eigenschaften von Gasen unter hoher elektrischer Spannung. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts experimentierten zahlreiche Physiker und Chemiker mit solchen Phänomenen. 1879 berichtete der englische Chemiker und Physiker William Crookes (1832-1919) über die Ergebnisse seiner umfangreichen Versuche mit elektrischen Entladungen in Gasen unter geringem Druck. Er hatte dazu eine besondere Röhre entwickelt, die heute Crookes-Röhre genannt wird. In ihr wird zwischen Kathode (negativer Elektrode) und Anode (positiver

Elektrode) eine elektrische Spannung angelegt, so daß ein Strom durch das Gas fließt, also eine elektrische Ladung transportiert wird. Crookes bemerkte, daß dabei Strahlen unbekanntem Ursprungs aus der Röhre austraten. Unter anderem stellte er fest, daß sich die Strahlen geradlinig ausbreiten und bei einigen Substanzen Phosphoreszenz und Erwärmung bewirken. In den nächsten 15 Jahren versuchten etliche Forscher, Art und Wirkung dieser sogenannten Kathodenstrahlen zu ergründen.

Um die Jahrhundertwende interessierte man sich besonders für den Zusammenhalt und das Wesen der Materie. Nie zuvor in den rund 2500 Jahren seit Leukipps erster, grober Atomtheorie hatten sich die Forscher so intensiv mit diesen Fragen beschäftigt. Als klar wurde, daß allen Atomen bestimmte Charakteristika gemeinsam sind und daß die Atome ihrerseits aus kleineren Bausteinen bestehen, konnten Physiker und Chemiker auf den Erkenntnissen vom Ende des vorigen Jahrhunderts aufbauen. Innerhalb weniger Jahre erzielte man beeindruckende Fortschritte bei der Erforschung des Atombaus. Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, führte die Deutung der Kathodenstrahlen direkt zur Enthüllung des Atombaus. Man beobachtete indirekt das Verhalten der Atome und fand nach intensiver Suche »Stücke« von ihnen. Nun konnten die Wissenschaftler mit viel Intuition die im Mikrokosmos gültigen seltsamen und speziellen Gesetze finden.

## KAPITEL 5

### Quantensprung

*»Das Atom gab seine Geheimnisse nur allmählich preis, wie ein raffiniertes Schauspiel, bei dem Einzelheiten der Handlung nur bruchstückhaft enthüllt werden. Die Aufeinanderfolge von Szenen und Hinweisen ließ die volle Wahrheit erst am Ende erkennen, nachdem viele Zuschauer es schon aufgegeben hatten, die Zusammenhänge zu verstehen.«*

Robert P. Crease/Charles C. Mann,  
*The Second Creation* (1986)

Aus der Ferne betrachtet, scheint ein Sandstrand aus einem homogenen Material zu bestehen. Aber obwohl das menschliche Auge die einzelnen Sandkörner aus der Entfernung nicht erkennen kann, würde niemand behaupten, der Strand sei ein zusammenhängendes Stück oder eine Masse ohne separate Bestandteile. Ebenso bleiben die Atome unseren Blicken verborgen, aber wir dürfen daraus ohne nähere Beweise noch nicht folgern, daß keine teilchenartige Konfiguration vorliegt. Sehen ist also nicht gleichbedeutend mit glauben. Wenn uns der gesunde Menschenverstand sagt, daß Atome aus Materie bestehen, dann müssen wir weiter fragen: Sind solche winzigen Materiestücke beliebig teilbar, wie Anaxagoras meinte? Warum? Und was sind die Teilstücke? Gibt es ein kleinstes Teilchen der Materie?

## **Die zufällige Entdeckung der Röntgenstrahlen leitet die Suche nach den Elementarteilchen ein**

### *Strahlung aus Gestein*

Wenn man den Geburtstag der Kernphysik angeben sollte, müßte man wohl den 8. November 1895 wählen. An jenem Tag hatte der Würzburger Physikprofessor Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) das ultraviolette Licht untersucht, das von einer Kathodenstrahlröhre emittiert wurde. Dazu lenkte er es auf Kristalle aus Bariumcyanoplatinat, die daraufhin fluoreszierten. Das bedeutet, sie absorbierten das UV-Licht und gaben Licht anderer Wellenlänge ab.

Bei seinen Experimenten bemerkte Röntgen, daß die aus der Röhre entweichenden Strahlen verschiedene Substanzen oder Gegenstände durchdringen konnten, so daß noch in einigen Metern Entfernung von der Röhre die Kristalle fluoreszierten. Röntgen konnte in den folgenden Wochen ausschließen, daß irgendwelche anderen Ursachen diese Effekte hervorriefen. Er lenkte die Strahlen dann auf eine eingewickelte photographische Platte, wobei seine Frau ihre Hand dazwischen hielt. Nach dem Entwickeln waren auf der Platte die Handknochen zu erkennen. Die Strahlen (die er X-Strahlen nannte; sie heißen im Englischen heute noch X-rays) hatten also das weiche Gewebe der Hand leichter durchdrungen als die Knochen. Diese erste Röntgenaufnahme wurde zu einer der berühmtesten wissenschaftlichen Abbildungen überhaupt - nicht nur als Vorläufer der medizinischen Anwendung der Röntgenstrahlen, sondern auch, weil sie einen wichtigen Schritt zur Aufklärung des Atombaus und zur Entdeckung der Elementarteilchen darstellte. Röntgen erhielt 1901 für die Entdeckung seiner Strahlen den ersten Physik-Nobelpreis.

Am 7. Januar 1896, rund zwei Monate nach Röntgens epochalem Experiment, erhielt der große französische Mathematiker und Naturwissenschaftler Henri Poincaré einige Röntgenaufnahmen. Er war so begeistert, daß er sie zwei ihm bekannten Ärzten zeigte und sie fragte, ob sie Gleiches zustandebringen könnten. Schon am 23. Januar desselben Monats reichten die beiden Doktoren bei der Französischen Akademie der Wissenschaften ei-

nen Artikel über das neue Phänomen ein. Der Physiker Antoine Henri Becquerel (1852-1908) war zugegen, als die Aufnahmen vorgeführt wurden. Er hatte, wie auch früher sein Vater und sein Großvater Becquerel, den Physiklehrstuhl am naturgeschichtlichen Museum in Paris inne. Die Röntgenaufnahmen interessierten ihn vor allem deshalb, weil er die Phosphoreszenz verschiedener Gesteine untersucht hatte, die im Dunkeln ein leichtes Glimmen zeigten. Becquerel wollte nun überprüfen, ob zwischen Röntgenstrahlen und Licht ein Zusammenhang besteht. In den nächsten Wochen experimentierte er mit verschiedenen Materialien. Am 24. Februar 1896 war er sich seiner Ergebnisse sicher und berichtete der Akademie, daß bei der Phosphoreszenz von Mineralien, die ultraviolettem Licht aus dem Sonnenlicht ausgesetzt waren, ebenfalls diese mysteriösen »X-Strahlen« emittiert wurden. Nachdem aber später auch einige empfindliche Photoplaten Schwärzungen aufwiesen, obwohl sie stets in einer dunklen Schublade aufbewahrt worden waren, erkannte er, daß er unrecht hatte. Becquerel stellte bald fest, daß in derselben Schublade ein Stück Kalium-Uran-Sulfat gelegen hatte. Also mußte das Uran in dieser Substanz eine Strahlung aussenden, ohne daß zuvor Sonnenlicht auf das Mineral eingewirkt hatte. Becquerel untersuchte dieses Phänomen näher und publizierte im Verlauf des Jahres 1896 insgesamt sieben Abhandlungen darüber.

Als die erwähnten Effekte bekannt geworden waren, untersuchten die Physiker die Röntgenstrahlen und die vom Uran emittierte Strahlung noch intensiver. Ursache und Beschaffenheit dieser Emissionen, die man Alphastrahlen nannte, waren noch völlig unklar. Die Vorstellung, daß ein Stückchen Mineral Strahlen aussendet, die stark genug sind, durch die Verpackung hindurch Photoplaten zu belichten, widersprach allem, was die Wissenschaftler wußten, insbesondere dem Gesetz von der Energieerhaltung. Dieses besagt, daß Energie weder entstehen noch verschwinden kann. Anders als die Röntgenstrahlen, die in den Kathodenstrahlröhren durch den elektrischen Strom erzeugt wurden, schienen Becquerels Strahlen aus dem Nichts zu kommen. Also befaßten sich die Physiker näher mit dem Uranatom, um die Quelle der Alphastrahlen ausfindig zu machen.

Joseph John Thomson (1856-1940) war um die vorige Jahr-

hundertwende Direktor des Cavendish Laboratory in Cambridge, der seinerzeit wohl berühmtesten Forschungseinrichtung Europas, vielleicht auch der ganzen Welt. Anfang 1897 entdeckte J. J. Thomson als erster, daß zumindest eine Art der von Röntgens Kathodenstrahlröhre emittierten Strahlung aus einem Strom kleiner, negativ geladener Teilchen bestand, die er Korpuskeln nannte. Heute wissen wir, daß es sich um Elektronen handelte. In seiner am 29. April 1897 bei der Royal Society eingereichten Abhandlung erklärte er, diese Teilchen seien Bestandteile der Materie und kleiner als alle bekannten Objekte, einschließlich der Atome. Diese Feststellung erregte gewaltiges Aufsehen, denn die Wissenschaftler konnten noch nicht glauben, daß irgend etwas kleiner als ein Atom sein könnte. Thomson nahm an, daß Becquerels vom Uran emittierte Alphateilchen ebenfalls Elektronen waren. Aber es gab keinen Beweis für diese Vermutung. Zu der Zeit, als J. J. Thomson seine Experimente durchführte, berichtete der Bonner Physikprofessor Heinrich Hertz (1857-1894), daß Metalle wie Zink nach negativer elektrischer Aufladung ihre Ladung wieder abgeben, wenn sie ultraviolettem Licht ausgesetzt werden. Die Arbeiten von J. J. Thomson, Heinrich Hertz und anderen führten dazu, daß die Wissenschaftler die Existenz der Elektronen allmählich akzeptierten.

Nach der Entdeckung der Elektronen postulierten einige Physiker, daß es in den Atomen auch positiv geladene Materieteilchen geben müsse, wenn die Elektronen negativ geladene Teilchen in den Atomen sind; andernfalls könnten die Atome nicht elektrisch neutral sein. Weil aber kaum experimentelle Indizien vorlagen, auf denen man eine Theorie hätte gründen können, blieben die Überlegungen hinsichtlich der positiven Teilchen noch sehr vage, und niemand konnte ein schlüssiges oder gar überzeugendes Bild vom Aufbau der Atome anbieten. So gab es in der Physik zum Ende des Jahres 1897 unterschiedliche Auffassungen: Einmal glich das Atom einem »summenden Bienenkorb mit Tausenden von Elektronen, die irgendwie von einer positiven Ladung zusammengehalten werden«, ein andermal war es »ein schwammiges oder teigiges Klümpchen« oder - wie J. J. Thomson vorschlug - ein »Plumpudding«, in dem Elektronen im Kern eingebettet sind, wie die Rosinen im Teig.

## **Marie Curie identifiziert Alphateilchen und findet radioaktive Elemente**

*Von Säure angegriffene Hände und undichte Dächer*

Marie Curie (1867-1934), geborene Marya Sklodowska, verließ 1891 ihr Heimatland Polen und kam in Paris am *Gare du Nord* an. Der Eiffelturm, Prunkstück der Weltausstellung von 1889, überragte die Stadt und galt als Symbol der modernen Technik, ebenso wie die elektrische Beleuchtung und die Autos auf den großen Boulevards. Marya wollte nahe bei ihrer Schwester Bronya wohnen. Diese hatte teilweise mit finanzieller Hilfe von Marya studiert, die dazu ihre bescheidenen, hart erarbeiteten Ersparnisse angegriffen hatte. Marya hatte ihre Familie in Warschau verlassen und strebte eine Karriere in Mathematik und Naturwissenschaften an. Als sie an der Sorbonne im Institut von Gabriel Lippmann chemische Experimente durchführte, verfärbten sich nach einiger Zeit ihre Hände infolge der Säureeinwirkung.

Im Jahre 1895 heiratete sie den Physiker Pierre Curie und hieß nun Marie Curie. 1896 schloß sie ihre Ausbildung als Oberstufenlehrerin ab und strebte nun eine naturwissenschaftliche Promotion an, was bis dahin noch keine Frau in Europa erreicht hatte. Sie war fasziniert von den gerade bekanntgewordenen Entdeckungen der Röntgenstrahlen durch Röntgen und der Alphastrahlen durch Becquerel. Daher wählte sie als Thema für ihre Dissertation die Alphateilchen. Woher kam die Energie, die Becquerels Photoplatten geschwärzt hatte ? Welche Art von Strahlen emittierte das Uran ? Vielleicht war es ein Strom von Elektronen, wie J. J. Thomson annahm; aber man wußte nichts Genaues. Marie widmete sich diesen Fragen, weil das Gebiet noch völlig unerschlossen war und zudem experimentelle Arbeit im Labor erforderte, die ihr sehr lag. (Dagegen saß sie nicht gern in Bibliotheken, um Literaturrecherchen zu betreiben.) Außerdem war das Thema recht gut definiert und eingegrenzt. Viele Physiker forschten inzwischen nach mehr Details über die Atome. Marie Curie trat nun mit Henri Becquerel in einen freundschaftlichen Wettkampf, ebenso mit dem Physiker Ernest Rutherford. Dieser klärte als erster Herkunft, Art und Eigenschaften der Alphateil-

chen, die Becquerel entdeckt hatte. Die damit zusammenhängenden Fragen sollten den Werdegang der Marie Curie von nun an beherrschen, und ihr Name wird für immer mit der Geschichte der Kernphysik verknüpft bleiben.

Marie Curies Arbeiten begannen in einem ungeheizten und feuchten verlassenen Schuppen mit undichtem Dach. Weil es in Paris nicht allzu selten regnet, tropfte es entsprechend oft in ihr Labor. Die ersten Aufzeichnungen über ihr Forschungsthema machte sie am 16. Dezember 1897. Sie verwendete ein Piezoquarz-Elektrometer, das ihr Ehemann Pierre und dessen Bruder Paul Jacques, ein Mineralogieprofessor, entwickelt hatten. Mit diesem Gerät wurden die schwachen elektrischen Ladungen gemessen, die beispielsweise von Uranverbindungen oder von anderen Substanzen emittiert wurden. Pierre leitete das neu gegründete Institut für industrielle Physik und Chemie in Paris und wirkte an den Arbeiten seiner Frau mit. Aber ihr gelang es, eine Theorie aufzustellen, nach der die Emission der Strahlen ein Phänomen sein muß, das aus dem Uranatom selbst herrührt. Das bedeutete, die Alphastrahlen waren Teil der Materie, im Gegensatz zu den X-Strahlen bzw. Röntgenstrahlen, von denen man heute weiß, daß sie zu den elektromagnetischen Strahlungen gehören. Also waren die Alphastrahlen nichts, was absorbiert und bei der Phosphoreszenz wieder emittiert wird. Marie Curie prägte den Begriff »Radioaktivität«, abgeleitet vom lateinischen Wort *radius* für Strahl. Ihre im Grunde einfache Hypothese wurde ihr bedeutendster wissenschaftlicher Beitrag, denn darauf konnten andere aufbauen, um schließlich zu Beginn unseres Jahrhunderts den Atombau zu entschlüsseln.

Marie Curie legte schon am 12. April 1898 ihren ersten Bericht vor, nur wenige Monate nach dem Beginn ihrer Forschungen und ohne frühere Arbeiten, auf die sie sich beziehen konnte. Der Titel der Publikation lautete »*Die Strahlung, die von Uran- und Thorium-Verbindungen emittiert wird*«. Professor Lippmann legte die Arbeit in ihrem Namen der Französischen Akademie der Wissenschaften vor, weil nur Mitglieder der Akademie Abhandlungen einreichen durften. Am 18. Juli 1898 entdeckten Marie und Pierre ein neues Element. Sie nannten es Polonium, nach Maries Heimatland Polen. Am 26. Dezember desselben Jahres, also nur



zwölf Monate nach Beginn der Experimente, gab das Paar die Entdeckung eines weiteren Elements bekannt, nämlich des Radiums. Marie Curie stellte fest, daß dessen Radioaktivität eine Million mal stärker ist als die des Uranminerals, das die Erforschung dieser Strahlungen ausgelöst hatte. Mit diesen Ergebnissen erwarb Marie Curie problemlos ihren Dokortitel. 1903 erhielt sie für die Entdeckung der Radioaktivität den Physik-Nobelpreis, zusammen mit ihrem Mann Pierre und mit Henri Becquerel.

### **Rutherford zeichnet das neue Bild vom Atom** *Goldfolie und Alphateilchen*

Der Neuseeländer Ernest Rutherford (1871-1937) kam 1895 nach England und war der erste ausländische Wissenschaftler, der am Cavendish Laboratory zugelassen wurde. 1898 verließ er Cambridge, um den Physiklehrstuhl an der McGill University in Montreal anzutreten. Dort setzte er sein Lebenswerk fort, nämlich die Erforschung der Alphastrahlen. Während seiner neun-jährigen Tätigkeit in Montreal arbeitete er 18 Monate lang mit Frederick Soddy (1877-1956) zusammen, einem jungen Chemiker aus Oxford. Sie entdeckten, daß radioaktive Elemente sich allmählich in andere Elemente umwandeln. Dies war ein weiterer Beweis dafür, daß das Gesetz der Energieerhaltung hier nicht zutrifft, und daß chemische Elemente nicht unveränderlich sind. Beispielsweise entstand aus dem Thorium, das sie untersuchten, unter anderem Helium. Die Arbeit der beiden Wissenschaftler erschien 1902 im *Philosophical Magazine* und war der wichtigste Beitrag zum Verständnis der Radioaktivität, seit das Ehepaar Curie vier Jahre zuvor das Radium entdeckt hatte.

Im Jahre 1903, als manche Wissenschaftler sich noch mit dem »Plum pudding«-Modell von J. J. Thomson herumschlugen, postulierten andere, daß Atome aus unterschiedlich vielen gleichartigen Bestandteilen aufgebaut seien, die sie »Dynamide« nannten. Im folgenden Jahr vermutete der japanische Physiker Hantaro Nagaoka, daß die Elektronen eine positive Kugel umkreisen - ähnlich wie die Ringe den Saturn - und dabei einander abstoßen. Während diese und ähnliche Theorien über den Atom-

bau überprüft wurden, entdeckte man 1906, daß Röntgenstrahlen elektromagnetische Strahlung mit extrem kleiner Wellenlänge sind. Röntgens Entdeckung der nach ihm benannten Strahlen trug letztlich auch zur Klärung des Atombaus bei, denn später stellte sich heraus, daß es eine direkte Beziehung zwischen der Struktur der Atome und den Röntgenstrahlen gibt. Aber seinerzeit, zu Beginn unseres Jahrhunderts, ging es um die subatomaren Teilchen bzw. Elementarteilchen, also um Elektronen und Alphateilchen, und nicht um elektromagnetische Strahlung wie Röntgenstrahlen, Licht oder Radiowellen.

Rutherford kehrte 1907 nach England zurück und wurde Professor an der Universität Manchester. Er setzte seine Debatten mit Becquerel über die Eigenschaften der Alphateilchen fort, die von radioaktiven Materialien emittiert werden. Becquerel berichtete ihm, seine Experimente deuteten darauf hin, daß Alphateilchen von den Molekülen der Luft abgelenkt werden. Rutherford versuchte nun, den Grund dafür zu finden. Zu seinen Assistenten gehörte damals der deutsche Physiker Hans Geiger (1882-1945), der später den Geigerzähler erfand, den ersten brauchbaren Detektor für Alphateilchen. Mit Hilfe seiner Mitarbeiter ermittelte Rutherford, daß nur eines von rund 8000 Alphateilchen zurückprallt, wenn diese auf eine dünne Goldfolie gerichtet werden.

Ende November 1911 kam Ernest Rutherford zu dem Ergebnis, daß das Durchlassen der allermeisten und das Zurückprallen weniger Alphateilchen an der Goldfolie nur erklärbar ist, wenn fast die gesamte Masse der Goldatome in einem kleinen, positiv geladenen Kern im Zentrum konzentriert ist. Er stellte seine Theorie am 7. März 1912 auf einer Tagung der Literary and Philosophical Society in Manchester vor. Die Ablenkung der Alphateilchen, so postulierte Rutherford, müsse durch etwas sehr Kleines und sehr Hartes in den Atomen des betreffenden Materials (z. B. des Goldes) hervorgerufen werden, gegen das die Alphateilchen stoßen. Er lehnte J.J. Thomsons »Plumpudding«-Modell des Atoms ab, weil Elektronen im Unterschied zu Alphateilchen nicht zurückgeworfen wurden, und beschrieb das Atom statt dessen als »eine zentrale elektrische Ladung, die in einem Punkt konzentriert ist« (den wir heute Atomkern nennen) und »eine sphärisch gleichförmig verteilte Ladung mit entgegengesetztem

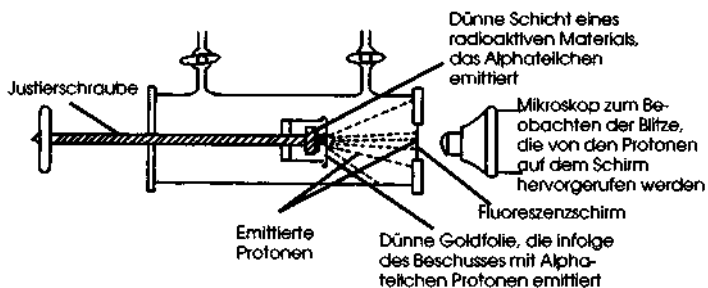


Abb. 5.1: Rutherfords Apparatur zum Untersuchen der Effekte beim Beschuss verschiedener Elemente mit Alphateilchen

Vorzeichen« (die Elektronen). Es spielt keine Rolle, welche Ladung man als positiv bzw. als negativ ansieht, sondern wichtig sind die unterschiedlichen Vorzeichen. Die »sphärisch gleichförmig verteilte« Ladung der Elektronen wird traditionell als negativ angesehen.

Rutherfords Modell war der Ausgangspunkt für das moderne Verständnis des Atombaus. Er erreichte als erster die Ziellinie, vor Curie und Becquerel. Wir wissen heute, daß die von Becquerel entdeckten Alphateilchen die Kerne gewöhnlicher Heliumatome sind und von radioaktiv zerfallenden Atomen mit Geschwindigkeiten von über 15000 Kilometern pro Sekunde emittiert werden. Rutherford erntete für sein Atommodell viel Anerkennung und wurde 1914 zum Ritter geschlagen; aber er erhielt nie einen Nobelpreis.

Obwohl Rutherfords Arbeiten die Grundlage für die heutigen Atomtheorien schufen, blieben entscheidende Fragen noch offen. Nach seinem Modell umkreisen die negativen Elektronen den positiv geladenen Atomkern. Nun fragten sich viele Physiker, darunter Rutherford selbst: Wenn dies wirklich so ist, warum stürzen die Elektronen dann nicht in den positiv geladenen Atomkern hinein? Rutherfords Theorie war zwar bahnbrechend, aber »sein« Atom konnte eigentlich weder elektrostatisch noch elektromagnetisch stabil sein. Nun begann die intensive Suche nach dem Mechanismus, der die Balance der Ladungen im Atom aufrechterhält.

## **Bohr erkennt, daß bestimmte Energieportionen die Elektronen auf ihren Bahnen halten**

### *Lichtquanten als Zoll*

Der Däne Niels Bohr (1885-1962) erhielt 1911 ein Stipendium, um für ein Jahr mit J. J. Thomson am Cavendish Laboratory zusammenzuarbeiten. Er hatte sich mit Thomsons »Plumpudding«-Modell des Atoms befaßt und meinte, wie auch Rutherford, daß es unmöglich zutreffen könne. Schon bald nach seiner Ankunft hatte Bohr Gelegenheit, mit Thomson über den Atomkern zu diskutieren. Er konnte aber nicht gut genug Englisch, um seine Bedenken detailliert auszudrücken, und platzte einfach heraus: »Das ist falsch!« Wegen ihrer unterschiedlichen Anschauungen über das Atom war Bohrs Aufenthalt am Cavendish Laboratory nicht sehr erfreulich. Daher ging er im März 1912 zu Rutherford nach Manchester. Im selben Monat hatte Rutherford übrigens seine inzwischen berühmt gewordene Arbeit über den Atombau publiziert.

Bohrs Zusammenarbeit mit Rutherford erwies sich als fruchtbar, denn beide sahen die Beziehungen zwischen Elektronen und Atomkern sehr ähnlich. Sie waren sich auch darin einig, daß Rutherfords Atommodell nicht akzeptiert werden könne, solange noch unklar war, warum das Atom nicht die gemäß dem Modell zu erwartende Instabilität aufweist. Im Frühsommer 1912, also wenige Monate nach dem Beginn seiner Zusammenarbeit mit Rutherford, vermutete Bohr, daß eine von Max Planck und Albert Einstein aufgestellte Theorie über das Licht auch auf das Atom anwendbar sein könnte. Nach dieser Theorie besteht das Licht aus einzelnen (»diskreten«) Energieportionen, die *Quanten* genannt wurden. Bohr überlegte nun, daß die sogenannte Quantelung eine fundamentale Eigenschaft jeglicher Energie sein könnte. Träfe dies zu, so wäre damit die Stabilität des Atoms erklärbar. Könnten bestimmte Energieportionen mit den einzelnen Bahnen der Elektronen um den Atomkern verknüpft sein? Bohr machte sich nun daran, diese Frage zu beantworten.

Er kehrte im Sommer 1912 von Manchester nach Kopenhagen, zurück und heiratete seine Verlobte Margrethe Norlund. Sie sagten die geplante Hochzeitsreise ab, damit Bohr sich der Ausarbei-

tung seiner Theorie widmen konnte. Sieben Monate später, im Februar 1913, war sich Bohr immer noch nicht klar darüber, wie er diese Theorie begrifflich und mathematisch formulieren sollte. Da wies ihn ein Bekannter auf eine Formel hin, die der Schweizer Dozent und Lehrer Johann Balmer (1825-1898) aufgestellt hatte. Sie gibt die Frequenzen des von Atomen emittierten Lichts an. Bohr erkannte sofort, daß eine Kombination der Planck-Einstein-Quanten mit dieser Formel das Verhalten der Elektronen beschreiben könnte, die den Atomkern umkreisen. Seine Anwendung der Balmer-Formel auf die Quanten ergab folgendes:

- Die Elektronen müssen in bestimmten Anordnungen vorliegen, wie Monde einen Planeten in gewissen Abständen umrunden.
- Ein Elektron, das von einer Umlaufbahn auf eine andere springt, setzt entweder ein Energiequant frei oder nimmt eines auf.

Während sich ein Elektron in einem seiner stabilen Zustände befindet, emittiert ein Atom keine Strahlung; dies tut es nur, wenn es in einen energieärmeren Zustand übergeht. Die abgegebene Energie liegt dann in Form elektromagnetischer Strahlung vor, zuweilen als sichtbares Licht. Wie Robert Crease und Charles Mann in ihrem Buch *The Second Creation* ausführten, sind »Lichtquanten der Zoll, der von Elektronen erhoben oder an sie ausgezahlt wird, wenn sie zwischen den erlaubten Bahnen im Atom wechseln. Die der Balmer-Formel gehorchenden Spektrallinien entsprechen einem Satz von inneratomaren Hopsern und Sprüngen, einem wilden Tanz des einzelnen Elektrons im Wasserstoffatom«. Das Atom emittiert oder absorbiert die Strahlung also nicht kontinuierlich, sondern bei den »Quantensprüngen« nur in gewissen Portionen. Der heute häufig verwendete Ausdruck Quantensprung geht unmittelbar auf Niels Bohrs Theorie zurück.

Am 6. März 1913 - rund ein Jahr, nachdem Rutherford das Atom als eine zentrale elektrische Ladung mit einer gleichförmigen sphärischen Verteilung einer entgegengesetzten elektrischen Ladung beschrieben hatte - reichte Rutherfords Assistent und nunmehr Kollege Niels Bohr bei der Zeitschrift *Philosophical Magazine* seine eigene Theorie ein. Die Artikel erschienen in den

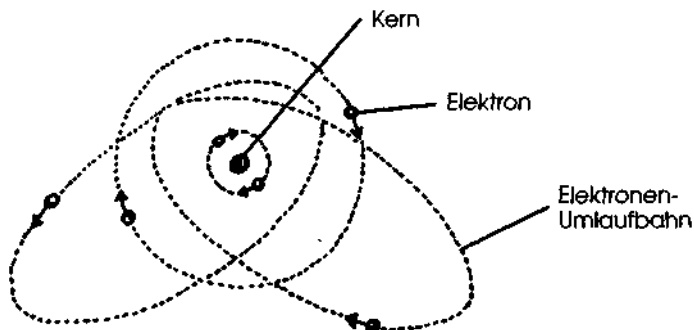


Abb. 5.2: Das Atommodell nach Rutherford und Bohr, hier am Beispiel des Kohlenstoffatoms (mit sechs Elektronen) dargestellt

Monaten Juli, September und November 1913. Hierin stellte Bohr die Lösung des Hauptproblems vor, das in der Rutherford'schen Theorie noch offen geblieben war. Dieses neue Konzept wird zuweilen Rutherford-Bohr-Modell des Atoms genannt, meist aber kurz Bohrsches Atommodell.

Bohrs Arbeit wurde noch im selben Jahr von dem englischen Physiker Henry Moseley (1887-1915) experimentell bestätigt. Es zeigte sich, daß energiereiche, d. h. hochfrequente Lichtstrahlung emittiert wird, wenn Elektronen von einem Zustand hoher Energie im Atom auf einen Zustand niedriger Energie übergehen. Hierbei handelt es sich um die 1895 von Röntgen entdeckte Strahlung. Damit war der weiter oben erwähnte Zusammenhang zwischen Röntgenstrahlen und Elektronen geklärt. Moseley stellte außerdem das heute nach ihm benannte Gesetz auf, das die Frequenzen bestimmter Röntgenstrahlen mit der Ordnungszahl der Elemente bzw. mit der Ladung der Atomkerne verknüpft. Dieser Zusammenhang wird heute bei der qualitativen Analyse, beispielsweise von Mineralien, genutzt.

Wie in Kapitel 4 erwähnt, fanden die Chemiker Avogadro und Cannizzaro im 19. Jahrhundert heraus, daß sich Atome zu »festen Verbänden«, den Molekülen, vereinigen können. Aber erst mit dem Rutherford-Bohr-Modell des Atoms wurde die Natur der chemischen Bindung erklärbar. Atome können sich zu Molekülen vereinigen, wenn sie »ungepaarte« Elektronen in den

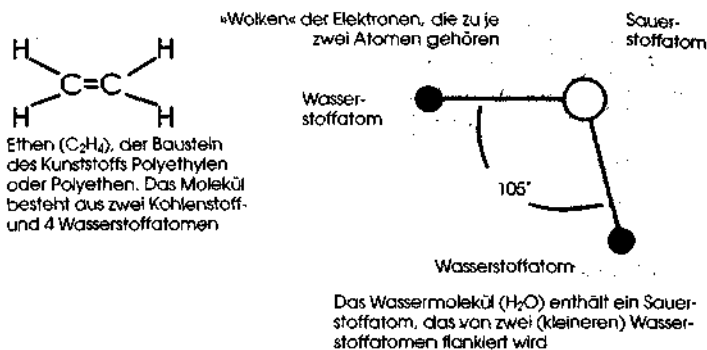


Abb. 5.3: Zwei wichtige Moleküle: Ethen und Wasser

äußeren Schalen oder Umlaufbahnen enthalten. Die Elektronen haben die Tendenz, sich über die beteiligten Atome so zu verteilen, daß die Gesamtenergie der betreffenden Atomanordnung kleiner ist als die Summe der Energien der einzelnen Atome. Daher werden beim Entstehen von Molekülen die bindenden Elektronen zwischen den Atomen geteilt, d. h. sie gehören nun zu jeweils zwei Atomen. Die Anzahl der ungepaarten Elektronen in der äußeren Schale nennt man Valenz oder Wertigkeit des Elements, und die Bindung, bei der je zwei Elektronen zu zwei Atomen gehören, heißt kovalente Bindung oder Atombindung.

Bemühen wir noch einmal unseren Größenvergleich in der Einleitung zu diesem zweiten Teil des Buches. Danach wäre der Atomkern rund einen Millimeter groß, wenn die Elektronenschale des Atoms einen Durchmesser von ungefähr hundert Metern hätte. Die Größe eines Atoms wird durch die »Wolke« bestimmt, in der sich seine Elektronen mit enormer Geschwindigkeit bewegen. Stellt man sich die Erde auf einen Durchmesser von 150 Millionen Kilometer vergrößert vor (das ist die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne), dann wäre der Atomkern etwa so groß wie die Erde. Das bedeutet: Das Volumen des Kerns ist über eine Billion mal kleiner als das des Atoms, und praktisch dessen gesamtes Volumen ist leer, daher auch das der Moleküle.

Die grundlegenden Eigenschaften des Atoms erscheinen aus der Perspektive des täglichen Lebens so fremdartig, daß sie be-

grifflich schwer zu fassen sind. Diese fundamentale Form der Materie erscheint uns flüchtig, kurzlebig und fast surreal. Aber die Manifestation der elektrischen Ladungen ist greifbare Realität.

Im Jahre 1921 richtete die Universität Kopenhagen für Niels Bohr ein Institut für Theoretische Physik ein, dessen Direktor er für den Rest seines Lebens war. Das Institut wurde bald zur Hauptstadt der Atomphysik und zog Wissenschaftler aus aller Welt an. 1922 erhielt Bohr für seine Arbeiten zur Atomtheorie den Physik-Nobelpreis.

Nach der Publikation von Bohrs Quantentheorie des Atoms befaßten sich Hunderte von theoretischen und experimentellen Physikern am Cavendish Laboratory und später an Bohrs Institut mit dem Aufbau und den Eigenschaften des Atoms, fast wie Archäologen, die sorgfältig Schicht um Schicht von einem empfindlichen Fundstück abtragen. Man stellte Theorien auf und gab sie bekannt, damit sie weltweit experimentell überprüft und kritisch bewertet werden konnten. Unter den führenden Physikern entbrannten heftige Auseinandersetzungen, sowohl in den Instituten als auch per Korrespondenz und in wissenschaftlichen Zeitschriften: *Ist das Elektron eine Welle oder ein Teilchen? Wodurch wird der Wechsel der Umlaufbahnen von Elektronen hervorgerufen? Welche Kräfte halten den Atomkern zusammen? Gibt es noch andere Teilchen im Kern?* - In den 20er Jahren wurde eine neue physikalische Interpretation des Atoms entwickelt, die sogenannte Quantenmechanik, die die physikalischen Prinzipien mit den mathematischen Beschreibungen Bohrs und anderer verknüpft.

In den folgenden Jahren befaßte man sich intensiv mit der Suche nach einem großen ungeladenen (»neutralen«) Teilchen, das man im Atomkern vermutete. Rutherford hatte schon 1920 die Existenz von »Neutronen« vorhergesagt und führte in Cambridge etliche Experimente durch, um sie zu finden. Er erzielte aber keine schlüssigen Ergebnisse, und seine Idee geriet aus dem Blickfeld. Doch 1932 konnte sein früherer Schüler James Chadwick (1891-1974), der inzwischen an der Universität Cambridge wirkte und Rutherfords Vermutung kannte, die Existenz des Neutrons im Atomkern bestätigen. Das gelang ihm erst ein Jahr,



nachdem ihm Irène Joliot-Curie und Frédéric Joliot (Tochter und Schwiegersohn von Marie Curie) einen entscheidenden Hinweis gegeben hatten: Sie berichteten über die Entdeckung einer neuartigen energiereichen, aber ungeladenen Strahlung, die beim Beschuß von Beryllium mit Alphateilchen emittiert wurde. Das Ehepaar Joliot-Curie mißdeutete die Strahlung aber als Gammastrahlung, und erst Chadwick erkannte sie als die schwer faßbaren Neutronen. Er erhielt dafür 1935 den Physik-Nobelpreis. Chadwicks Entdeckung des Neutrons vervollständigte nicht nur die Vorstellung vom Aufbau des Atoms aus drei verschiedenen Elementarteilchen, sondern bereitete zudem den Weg zur Freisetzung der enormen Energiemengen, die im Atomkern schlummern.

Am 4. Juli 1934 starb Marie Curie im Alter von nur 67 Jahren - ein Opfer ihres fast vierzigjährigen Umgangs mit radioaktiven Substanzen. Inzwischen war ihr wissenschaftliches Vermächtnis offensichtlich geworden, weil ihre Entdeckungen seit 1930 immer schneller aufeinandergefolgt und die Kenntnisse über das Atom umfassender geworden waren. Die Entdeckung des Neutrons und mehrere andere Forschungen der 30er Jahre machten die Atomphysik in einem dramatischen und unumkehrbaren Prozeß von einer reinen Laborwissenschaft zu einem Fachgebiet mit praktischen Anwendungen. Die Welt trat nun schnell in das »Atomzeitalter« bzw. in die Ära der Kernenergie ein.

Bohrs Institut blieb in den 30er Jahren ein Brennpunkt der Theoretischen Physik und spielte eine zentrale Rolle beim Erforschen der Atomspaltung, wie wir in Kapitel 6 noch sehen werden. 1940 wurde Dänemark von den deutschen Truppen besetzt. Bohr war aufgrund seiner jüdischen Abstammung zunehmend gefährdet und floh 1943 nach England. Bald darauf ging er in die USA und wirkte zwei Jahre lang als Mitglied der britischen Forschergruppe am Manhattan-Projekt in Los Alamos (New Mexico) mit. Hier wurden die ersten amerikanischen Kernwaffen entwickelt.

Seit Bohr im Jahre 1913 das Atom weitgehend korrekt beschrieben hatte, arbeiteten Hunderte von Physikern an der Klärung weiterer Aspekte des Atoms und verfaßten unzählige

wissenschaftliche Werke, die weit außerhalb der Fragen liegen, die wir in unserem Zusammenhang betrachten können. Die Forscher haben nicht nur neue chemische Elemente »erschaffen«, sondern auch die drei schon genannten subatomaren Teilchen (Elektronen, Protonen und Neutronen) in noch fundamentalere Teilchen zerlegt. Beim Erzeugen neuer Elemente sind sie derzeit (Anfang 1997) beim Element Nummer 112 angelangt (das noch nicht benannt ist). Seine Atome bestehen aus 112 Protonen und 165 Neutronen. Mit seiner Ordnungszahl 112 steht es zwanzig Plätze hinter dem Uran, dem schwersten natürlich vorkommenden Element. Das Element 112 entstand beim Beschuß von Blei mit Zinkionen. Aber wie die anderen künstlich erzeugten schweren Elemente ist auch dieses höchst instabil und zerfällt innerhalb von Millisekunden. Mit Ausnahme einiger weniger Elemente, die in der Natur in Spuren auftreten, wurden alle Elemente mit Ordnungszahlen über 92 (Uran) als synthetische Produkte in den Teilchenbeschleunigern der Kernforschungslaboratorien oder als Spaltprodukte von Kernexplosionen entdeckt. Sie sind stark radioaktiv und wurden nur in winzigen Mengen erhalten. Meist entstanden sogar nur wenige Atome auf einmal.

Als Bestandteile der Elementarteilchen Elektron, Proton und Neutron (die eine Zeitlang als wirklich kleinste Teilchen galten) identifizierten die Physiker Hunderte noch kleinerer Teilchen. Alle diese sind aber Kombinationen von nur zwei Arten von fundamentalsten Bausteinen der Materie: sechs Quarks und sechs Leptonen. Zu den Leptonen gehören beispielsweise Elektron, Myon und Tauon sowie die damit assoziierten Neutrinos. Das Proton besteht aus drei Arten von Quarks. Die Quarks werden allgemein als unteilbar angesehen. Die meisten der erwähnten über hundert Teilchen zerfallen innerhalb winzigster Sekundenbruchteile in andere Teilchen. Die Vorstellung, daß die Materie letztlich aus sechs Quarks und sechs Leptonen aufgebaut ist, nennt man Standardmodell. Am leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Tevatron am Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia im US-Bundesstaat Illinois, fanden Teilchenphysiker im Januar 1996 jedoch deutliche Anzeichen dafür, daß Quarks noch weiter teilbar sind, also ihrerseits eine Art innerer Struktur haben.

Hatte Anaxagoras doch recht? Ist die Materie unbegrenzt teilbar? Obwohl diese Frage noch nicht sicher zu beantworten ist, weiß man heute, daß die bisher entdeckten subatomaren Teilchen gewisse Merkmale haben: elektrische Ladung, Masse, bestimmte Energiequanten, Drehimpuls und Spin (Richtung der Eigenrotation).

Ernest Rutherford hatte vorausgesagt, daß »die Kräfte, die den Atomkern zusammenhalten, in dieser und der folgenden Generation nicht gefunden werden, (...) auch noch nicht in vielen Jahrhunderten, denn der Aufbau des Atoms ist natürlich das große Problem, das aller Physik und Chemie zugrundeliegt«. Wir wollen hier die Geschichte von der Schaffung neuer Atome oder von der Erforschung von Quarks, Leptonen oder Drehimpulsen nicht vertiefen, sondern uns ansehen, wie die Physiker dazu kamen, die Kräfte zu verstehen, die »den Atomkern zusammenhalten«. Bei ihrer Erforschung des Atoms selbst stießen sie auf etwas, das so unglaublich ist und so weitreichende Auswirkungen auf uns alle hat, daß es bei keiner Diskussion des Atombaus fehlen darf: die furchteinflößende Energie, die sich im Atomkern verbirgt: Bombe oder Reaktor, Schrecken oder Nutzen, Zerstörung oder Hoffnung.

Daher schauen wir uns im nächsten Kapitel an, wie die Wissenschaftler die unglaublich hohen Energien entdeckten und zu zähmen versuchten, die in dieser trügerischen, unmöglichen, unsichtbaren und scheinbar strukturlosen elektrisch geladenen »Perle« im Zentrum des leeren Atoms schlummern.

## KAPITEL 6

### Der Schicksalsschlag

*»Ich bin fest davon überzeugt, daß schon in den nächsten Jahrhunderten die Wissenschaft den Menschen beherrschen wird. Die Maschinen, die er erfunden haben wird, werden sich seiner Macht zur Steuerung entziehen. Eines Tages wird die Existenz der Menschheit in der Macht der Wissenschaft liegen, und die menschliche Art wird Selbstmord begehen, indem sie die Welt in die Luft sprengt.«*

Henry Adams (1862)

*»Das Atom steht als ein Monument für die Klugheit des Menschen. Eines Tages kann es zum Gedenkstein seiner Torheit werden.«*

J. G. Feinberg

*The Story of Atomic Theory and Atomic Energy* (1960)

*»Die Welt hat sich sehr verändert; denn der Mensch hält in seinen sterblichen Händen die Macht, jegliche menschliche Not zu überwinden, aber auch jegliches menschliche Leben zu vernichten.«*

John F. Kennedy

in seiner Antrittsrede als Präsident der USA (1961)

Die freie Welt freute sich, als Ende 1989 die Berliner Mauer fiel, und am 12. September 1990 seufzten wir alle erleichtert auf, als der Kalte Krieg mit dem Viermächtevertrag (USA, Frankreich, Großbritannien und die damalige Sowjetunion) zur deutschen Einheit beendet wurde. Weitere Entspannung brachte im Juli 1991 der START-Vertrag (START steht für *Strategie Arms Reduction Talks*, Verhandlungen zur Reduzierung der strategischen Waffen). Nun konnten Zehntausende von Kernsprengköpfen

verschrottet werden. Die politischen Entwicklungen zu Beginn der 90er Jahre verminderten die unmittelbare Gefahr eines nuklearen Holocausts. Aber als rein politische Veränderungen sind diese Vorgänge von zweifelhafter Bedeutung und Dauerhaftigkeit. Verträge auf Papier können die Unsicherheiten und Ängste, die von den Kernwaffen und deren Potential zur Zerstörung aller Zivilisation ausgehen, niemals völlig von uns nehmen. Waffenstillstandsabkommen zwischen Nationen, die einander widerstreitende politische Systeme haben und in dieser Welt auch sonst konkurrieren, sind keine stabilen Einrichtungen. Sie entsprechen bestenfalls einem provisorischen und sehr labilen Status quo.

Die Drohung einer nuklearen Katastrophe schwebt immer noch über uns wie eine dunkle Wolke. Seit der Atompilz einen Teil der Geheimnisse enthüllte, sind die Schicksale der Kernwaffen und der Menschheit unauflöslich miteinander verknüpft. Das Gespenst des Atompilzes wird uns begleiten, solange es in der Welt politische Unsicherheiten gibt. Die Geschichte zeigt, daß Kulturen entstehen und vergehen und daß Supermächte aufkommen und nach Jahrhunderten oder auch Jahrtausenden wieder verschwinden. Wer wird in hundert Jahren mit der Anwendung der Kernwaffen drohen? Theodore Zeldin schrieb in seinem Werk *Eine intime Geschichte der Menschheit*:

*»Wenn man einen Film drehen wollte, der alles, was (...) je geschehen sein soll, in ein paar Stunden pressen würde (...), dann würde die Erde wie der Mond aussehen, grau und menschenleer, bemerkenswert nur wegen ein paar Kratern auf ihr. Die Krater sind Kulturen - bisher vierunddreißig wichtige -, und jede davon ist explodiert und ausgestorben, nachdem sie kurz Teile der Erde erleuchtet hat, doch nie die ganze Erde; einige dauern ein paar Jahrhunderte, andere einige Jahrtausende. (...) Alle Kulturen erlebten bisher ihren Niedergang und starben, wie großartig sie in ihrer Glanzzeit auch gewesen sein mochten und wie schwer es ist zu glauben, daß sie verschwinden (...) können.«\**

\*Theodore Zeldin, *Eine intime Geschichte der Menschheit*, Stuttgart 1997 S.67

Wir wollten das Geheimnis ergründen, das der Atompilz symbolisiert. Und bei dem Versuch, Struktur und Eigenschaften des Atoms zu verstehen, kamen wir auf die wechselvolle politische und militärische Weltgeschichte.

## **Wissenschaftler finden den Zusammenhang zwischen der Energie der Sonne und dem Atomkern** *Fehlende Masse und der Schlüssel allen Lebens*

Im 19. Jahrhundert beriefen sich führende Wissenschaftler auf die »Kontraktionshypothese«, die der schottische Physiker William Thomson (1824-1907), besser bekannt als Lord Kelvin of Largs, aufgestellt hatte. Danach bezieht die Sonne ihre Energie daraus, daß ihr gewaltiger Körper langsam, aber stetig schrumpft. Dabei hätte die Sonne aber nur Energie für eine Strahlungsdauer von insgesamt gut 20 Millionen Jahren. Als Biologen, Geologen und Paläontologen jedoch feststellten, daß es Leben auf der Erde schon vor weit über 20 Millionen Jahren gegeben hatte, wurde Kelvins Theorie aufgegeben.

Henri Becquerels Entdeckung von 1896, daß radioaktive Materialien spontan Energie emittieren, gab einen ersten Hinweis auf die immense Energieabstrahlung der Sonne. Aber erst rund zehn Jahre später konnte mit Einsteins berühmt gewordener Beziehung  $E = mc^2$  der Zusammenhang zwischen Materie und Energie geklärt werden, und damit auch die wahre Quelle von Wärme und Licht, die von der Sonne zu uns gelangen. Nach Einsteins Gleichung ist die Energie das Produkt aus der Masse  $m$  und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Einstein postulierte mit dieser Relation, daß Materie (»Masse«) und Energie ineinander umgewandelt werden können. Das widersprach dem bis dahin für unverletztlich gehaltenen Gesetz von der Erhaltung der Energie, aufgestellt 1847 von dem deutschen Physiker Hermann von Helmholtz. Es besagt, daß weder Materie noch Energie vernichtet oder erzeugt werden können. Einsteins Theorie zeigte nun die Möglichkeit auf, daß die Materie der Sonne auf irgendeine Weise in Energie, also in Wärme und Licht umgewandelt wird.

Die Masse eines Gegenstands ist - im Einklang mit den Newtonschen Gesetzen - die Menge an Materie, aus der er besteht. Wir können auch sagen, die Masse entspricht im wesentlichen der Anzahl aller Elementarteilchen in den Atomen des Gegenstands, wie wir in Kapitel 5 gesehen haben. Anders als das von der Schwerkraft abhängige Gewicht eines Körpers ist seine Masse nach den Newtonschen Gesetzen unveränderlich, hängt also nicht von der Gravitationsanziehung durch die Erde oder einem anderen Himmelskörper ab. Daher ist, wie schon erwähnt, die Masse in der Physik eine wichtigere Größe als das Gewicht. Die Masse eines Gegenstands ist gemäß dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz proportional zu der Kraft, die nötig ist, um ihm eine bestimmte Beschleunigung zu verleihen.

Wie aus Einsteins oben angeführter Gleichung hervorgeht, ist bei der Umwandlung die Energiemenge, die beispielsweise einem Gramm Materie entspricht, unvorstellbar groß (denn die Lichtgeschwindigkeit, die ja in der Gleichung quadriert wird, hat den enorm hohen Wert von 300000 Kilometern pro Sekunde). Stellen wir uns vor, wir verbrennen zwei Gramm Wasserstoff, gewinnen also die bei dieser gewöhnlichen Reaktion frei werdende chemische Energie. Weiter angenommen, wir könnten diese vollständig in elektrische Energie umwandeln, so könnten wir eine 100-Watt-Glühbirne gut 40 Minuten lang betreiben. Wenn wir aber die Masse (d. h. alle Elementarteilchen) derselben Wasserstoffmenge vollständig in elektrische Energie umwandeln könnten, dann würde dieselbe Glühbirne gemäß Einsteins Gleichung 56000 Jahre lang brennen! Die Kernspaltung eines Kilogramms Uran liefert mehr Energie als das Verbrennen von 3000 Tonnen Kohle. Die Verbrennung ist lediglich eine chemische Reaktion, bei der Energie freigesetzt wird, die aufgrund der molekularen Struktur gespeichert ist. Mit anderen Worten: Beim Verbrennen werden chemische Bindungen zwischen Atomen, also Bindungselektronen, umgruppiert, während der Atomkern und dessen Energieinhalt völlig unbeeinflusst bleiben.

Man weiß inzwischen, daß die Sonne ihre Energie erzeugt, indem Protonen (Wasserstoffkerne) miteinander verschmolzen werden; man spricht hierbei von einer Kernfusion. Im großen und ganzen gesehen, ergeben vier Wasserstoffkerne einen Heli-

umkern. Dieser Vorgang spielt sich unaufhörlich in jedem Stern des Universums ab. Der Heliumkern, der - wie gesagt - aus vier Wasserstoffkernen entsteht, ist etwas leichter als diese vier Kerne zusammen, und eben diese »verlorene« Masse wurde bei der Fusion in Energie umgewandelt, die wir als Licht und Wärme empfangen. Die Fusion der Wasserstoffkerne führt dazu, daß im Inneren der Sonne eine unvorstellbar hohe Temperatur von über 10 Millionen Grad Celsius herrscht. Die hier ablaufende Umwandlung von Masse in Energie ist für uns extrem bedeutsam, denn auf ihr beruht letztlich alles Leben auf unserer Erde.

Im Grunde hatte Newton in seinem berühmten Buch *Optik* Einsteins Beziehung in gewisser Weise schon angedeutet, als er schrieb: »Sind nicht schwere Körper und Licht ineinander umwandelbar, und können nicht Körper einen Großteil ihrer Aktivität von Lichtteilchen erhalten, die ihre Zusammensetzung beeinflussen?« Aber die Vorstellung, daß diese Energie irgendwie erfaßt und genutzt werden könnte, wie es Einsteins Postulat von 1905 vorsah, blieb noch 27 Jahre lang eine faszinierende Spekulation, die nicht überprüft werden konnte. Man kannte keine Methode, eine dermaßen hohe Temperatur zu erzeugen. Doch schon bald nachdem er die Beziehung  $E = mc^2$  aufgestellt hatte, bemerkte Einstein: »Es gibt nicht den geringsten Hinweis darauf, daß diese Energie jemals zugänglich wird.«

### **Die Energie des Atomkerns wird zugänglich** *Die Deutung der Kern-»Flüssigkeit«*

Der russisch-amerikanische Kernphysiker George Gamow (1904-1968) entwickelte 1928 die erste Quantentheorie der Radioaktivität. Dies brachte ihm ein Forschungsstipendium an Niels Bohrs Kopenhagener Institut für Theoretische Physik ein, an dem er von 1928 bis 1930 wirkte. In dieser Zeit formulierte er das sogenannte Tröpfchenmodell des Atomkerns. Nach diesem kann man die verschiedenen Atomkerne als winzigste Tröpfchen einer universellen »Kernflüssigkeit« ansehen.

Gamow gründete seine Theorie auf der Annahme, daß die



Starke Kernkraft hält  
den Kern zusammen



Zwischen den positiv  
geladenen Protonen  
herrscht eine Ab-  
stoßungskraft

Abb. 6.1: Das Kern-»Tröpfchen« mit den wichtigsten Kräften

zwischen den Bestandteilen eines Atomkerns wirkenden Kräfte jenen ähneln, die zwischen den Molekülen einer gewöhnlichen Flüssigkeit herrschen. Er wußte natürlich, daß die Kugel die geometrische Figur ist, die bei gleichem Volumen die kleinste Oberfläche aufweist. Wenn auf ein Flüssigkeitströpfchen keine äußere Kraft (etwa die Schwerkraft, die es auf eine flache Fläche herunterzieht) einwirkt, dann hält die Oberflächenspannung die Teile der Flüssigkeit zusammen, so daß das Tröpfchen eine Kugelform annimmt. Entsprechend vermutete Gamow, daß es einer »zusätzlichen« Energie bedürfe, um die Kraft zu überwinden, die den Atomkern zusammenhält; er nannte sie »starke Kernkraft«. Zudem wies er darauf hin, daß eine Energie vorliegt, die diesem Effekt der »Oberflächenspannung« entgegenwirkt, nämlich die gegenseitige Abstoßung der positiv geladen Protonen im Atomkern. Ein Atomkern ist ein eng zusammenhängendes Gebilde aus Teilchen, obwohl die Protonen die natürliche Tendenz haben, sich voneinander zu entfernen, ähnlich wie zwei magnetische Nordpole. Das deutet darauf hin, daß im Atomkern ein natürliches Gleichgewicht vorliegt. Anders ausgedrückt: Weil der Atomkern nicht spontan in kleinere Stücke zerfällt und sich auch nicht mit anderen Atomkernen vereinigt, folgerte Gamow, daß die starke Kernkraft, die das Kern-»Tröpfchen« zusammenhält, die internen Abstoßungskräfte im Atomkern übersteigen muß.

Die elektrostatische Abstoßungskraft zwischen den Protonen und die starke Kernkraft, die den Atomkern zusammenhält, haben jeweils einen bestimmten Wert, den man berechnen kann. Anhand dieser Werte zeigte Gamow theoretisch, daß die Spal-

tung eines Kern-»Tröpfchens« in zwei Hälften zu einem Anstieg der gesamten Oberflächenenergie führen muß, während die elektrostatische Abstoßungskraft zwischen den Protonen vermindert wird. Nun verstanden die Kernphysiker besser, was beim Verschmelzen von Atomkernen (d. h. bei der Kernfusion) in der Sonne geschieht. Sie überlegten nun ernsthaft, ob die bei den Kernprozessen (Kernspaltung oder Kernfusion) frei werdende Energie irgendwie zugänglich gemacht und damit eventuell praktisch nutzbar werden könnte.

Wie in den Kapiteln 4 und 5 erläutert, kommen auf der Erde 92 Elemente natürlich vor, deren Atomgewicht im Prinzip mit zunehmender Ordnungszahl ansteigt. Die Atomkerne von Wasserstoff, Helium und einigen anderen leichten Elementen entstanden relativ bald nach dem Urknall (siehe Teil 4 dieses Buches). Zu jener Zeit war das Universum extrem heiß und dicht. Die anderen Atomkerne und Atome bildeten sich später infolge von Fusionsreaktionen und bei der Explosion von Sternen gegen Ende ihrer normalen Lebensdauer. Im derzeit »kühlen« Universum befinden sich alle diese Elemente in einem sehr stabilen Zustand. In Kapitel 5 haben wir gesehen, daß Elektronen teilweise in die äußeren Umlaufbahnen von Nachbaratomen übergehen können, wobei Moleküle gebildet werden. Im Vergleich mit den chemischen Bindungskräften ist die starke Kernkraft, die den Atomkern zusammenhält, viel stärker, und sie ist auch schwieriger zu erklären. Die starke Kernkraft ist eine der vier fundamentalen Kräfte in der Natur; die anderen drei sind die Gravitationskraft, die elektromagnetische Kraft und die schwache Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen außer dem Photon (dem »Lichtteilchen«). Die Gravitationskraft und die elektromagnetische Kraft wirken im Universum auch über größte Entfernungen. Dagegen ist die starke Kernkraft nur im Laboratorium nachzuweisen, denn sie wirkt lediglich auf die extrem geringen Entfernungen innerhalb der Atomkerne und hält Protonen und Neutronen zusammen.

Trotz der extrem geringen Reichweite der starken Kernkraft benötigt man eine enorme Energiemenge, will man einen Atomkern destabilisieren und eine Verschmelzung oder auch eine Spaltung einleiten. Die hierbei nötige »Aktivierungsenergie« ist

sehr viel höher als die Energie, die zum Einleiten chemischer Reaktionen, beispielsweise beim Zünden von Sprengstoffen, nötig ist. Damit eine Kernfusion stattfindet, müssen die Atomkerne so heftig aufeinanderprallen, daß die gegenseitigen Abstoßungskräfte der positiven Elementarteilchen überwunden werden. Auch zum Start einer Kernspaltung ist ein heftiger Beschuß des Atomkerns mit bestimmten Elementarteilchen nötig - abgesehen von der natürlichen Radioaktivität, bei der die Kerne spontan zerfallen. Die radioaktiven Elemente tragen übrigens wesentlich zur inneren Wärme der Erde bei. Die Zerfallsgeschwindigkeiten der betreffenden Atome gehorchen so exakt bestimmten statistischen Gesetzen, daß sie als »natürliche Uhren« für große Zeiträume dienen können. Dieser Umstand wird in der Geologie und in der Archäologie bei der Altersbestimmung von Gesteinen und anderen Materialien genutzt.

Zu Beginn der 30er Jahre wußte man - im wesentlichen auf der Basis von Gamows Modell des Kerntröpfchens -, daß es unmöglich ist, die Fusionsreaktionen der Sonne auf der Erde nachzubilden, weil dazu eine unvorstellbar hohe Temperatur erreicht werden müßte. Aber bald erkannte man, daß die bei der Spaltung von Atomkernen frei werdende Energiemenge nutzbar sein müßte, die der Einsteinschen Gleichung entspricht. Das Ausnutzen der Energiemenge, die bei der Spaltung entsteht, ist jedoch viel schwieriger, als lediglich vom Atomkern einen Teil abzuspalten. Henri Becquerel und Ernest Rutherford hatten schon zu Beginn unseres Jahrhunderts bestimmte Atome mit Alphateilchen aus einer radioaktiven Quelle beschossen und dadurch Protonen aus Atomkernen herausgeschlagen - natürlich, ohne daß ihre Labors in die Luft flogen. Und 1919 war es Rutherford gelungen, Stickstoffatome in Wasserstoff- und Sauerstoffatome zu spalten, indem er sie mit Alphateilchen bombardierte. Zu Beginn der 30er Jahre überlegten die Physiker, ob sie Atomkerne mit so hohen Kräften aufeinander schießen könnten, daß eine Spaltung eintritt, die aus den Kern-»Tröpfchen« so viel Energie freisetzt, daß diese zugänglich und nutzbar werden könnte.

## **Der Atomkern wird gespalten: Das Atomzeitalter beginnt *Flucht aus Italien***

Mit ihrem immer besseren Verständnis der Kräfte, die den Atomkern zusammenhalten, wurde den Wissenschaftlern klar, daß sie eine Vorrichtung brauchten, mit der sie Protonen mit hoher Geschwindigkeit auf Atomkerne richten konnten. Sie wußten, daß Protonen nur sehr schwer die natürliche Barriere der elektrostatischen Abstoßung zu durchdringen vermögen, die die ebenfalls positiv geladenen Protonen im Atomkern ihnen entgegensetzen. Ein erfolgreicher heftiger Stoß gelang erstmals 1932. Zwei Physiker, der Engländer John D. Cockcroft (1897-1967) und der Ire Ernest Walton (1903-1995), die seinerzeit mit Ernest Rutherford am Cavendish Laboratory in Cambridge zusammenarbeiteten, bauten den ersten »Atomzertrümmerer« bzw. Teilchenbeschleuniger. Er wird ihnen zu Ehren heute Cockcroft-Walton-Generator genannt. Sie führten die erste künstlich hervorgerufene Spaltung von Atomkernen durch. Dazu beschossen sie Lithium mit Protonen. Bei der Spaltung entstanden aus einem Lithiumkern zwei Heliumkerne.

Der Energiegewinn war gering, aber das Experiment lieferte den ersten Beweis für Einsteins Postulat, daß Energie frei wird, wenn Masse verlorengeht, und daß diese Energie im Prinzip genutzt werden kann. Cockcroft und Walton erhielten dafür 1951 den Physik-Nobelpreis. Aber der Cockcroft-Walton-Generator und ähnliche Apparaturen, die danach konstruiert wurden, waren in ihrer Wirksamkeit dadurch begrenzt, daß die Kernspaltung auf eine eher zufällige und nicht vorhersagbare Weise eingeleitet wurde. Wenn bei der Kernspaltung nicht wiederholt Energie freigesetzt wird, benötigt man mehr Energie zum Beschleunigen der Teilchen, die die Spaltung einleiten sollen, als man durch die Spaltung selbst gewinnt.

Wie in Kapitel 5 erwähnt, war 1932 auch das Jahr, in dem James Chadwick das Neutron als Bestandteil des Atomkerns entdeckte. Das Neutron ist ein Elementarteilchen, dessen Masse etwa der des Protons gleicht. Aber es hat im Gegensatz zu diesem keine elektrische Ladung. Deshalb muß es bei der Annäherung an ei-

nen Atomkern keine elektrostatische Barriere überwinden. Die Physiker erkannten sehr bald, daß das Neutron das ideale »atomare Geschöß« zum Einleiten der Kernspaltung ist. Einen anderen Wendepunkt auf dem Weg zum Ausnutzen der Kernenergie brachte das Jahr 1935 mit sich, als der italienische Physiker Enrico Fermi (1901-1954) drei Tatsachen feststellte:

1. Neutronen können aus radioaktiven Substanzen erhalten werden;
2. wasserstoffreiche Verbindungen, beispielsweise Wasser, bremsen die Neutronen ab, die von den radioaktiven Elementen emittiert werden;
3. wenn Neutronen langsamer sind, ist die Wahrscheinlichkeit höher, daß sie von einem Atomkern eingefangen werden.

Fermi überlegte nun: Wenn das Neutron mit seiner großen Masse auf den Atomkern trifft und sich mit ihm verbindet, dann wird die Abstoßungskraft zwischen den Protonen größer als die starke Kernkraft, die das Kern-»Tröpfchen« zusammenhält. Dadurch wird der Atomkern gespalten. Das hereinkommende Neutron kann so zerstörerisch wirken, daß ein Atomkern mit vielen Protonen und hoher potentieller Energie (beispielsweise der Kern eines Uranatoms) in zwei ungefähr gleichgroße Kerne gespalten wird. Auch hierbei wird die Energiemenge frei, die der Differenz der Kernmassen entspricht, denn die beiden kleineren Kerne und die entweichenden Elementarteilchen sind zusammen leichter als der Urankern und das auftreffende Neutron.

Fermi erhielt 1938 den Physik-Nobelpreis für seine Arbeiten zum Beschuß von Atomkernen mit langsamen Neutronen. Mussolinis faschistisches Regime erlaubte Fermi, nach Schweden zu reisen, um den Nobelpreis entgegenzunehmen. Diese Gelegenheit nutzte Fermi, um sich mit seiner Familie aus Italien abzusetzen. Sie ließen sich in den Vereinigten Staaten nieder, und Fermi wurde Professor an der Columbia University.

## **Die Kernphysiker müssen sich neu orientieren**

*Ihr sehr ergebener... Albert Einstein*

Zu Beginn des Jahres 1939 waren die Spaltung eines großen Atomkerns in zwei kleinere sowie das Freisetzen und Nutzen der dabei entstehenden enormen Energiemenge noch reine Theorie. Für den Fall, daß dies je möglich würde, stellten sich die Kernphysiker vor, daß die Kernenergie für friedliche industrielle Zwecke zum Wohle der Menschheit genutzt würde. Sie waren sich darüber im klaren, daß sie eine längere und ununterbrochene Folge von Neutroneneinschlägen auf große Atomkerne realisieren mußten. Dabei würden die bei der Spaltung aus den Kernen entweichenden Neutronen ihrerseits auf benachbarte große Kerne treffen und diese spalten. Ohne eine solche »Kettenreaktion« würde mehr Energie zum Beschleunigen der Neutronen benötigt, als bei der Spaltung frei wird. Dies hatten Cockcroft und Walton experimentell gezeigt. In jenem Jahr 1939 begann in Europa der Zweite Weltkrieg, und es ist keineswegs ein Zufall, daß die Entwicklung der ersten Atombombe die friedlichen Perspektiven der Kernenergie sofort in den Hintergrund drängte.

Die österreichisch-schwedische Physikerin Lise Meitner (1878-1968) berechnete, wie die Kernspaltung und die Kettenreaktion bei einem schweren Element zu realisieren sind. Sie schuf damit im Grunde die Voraussetzungen für die Entwicklung der Atombombe. Meitner führte zusammen mit zwei Kollegen in Deutschland Experimente durch, die jenen bei Fermis Neutronenbeschuß ähnelten. Dabei waren Uranatome in mehrere Teile gespalten worden, und es hatte in geringem Ausmaß eine Kettenreaktion stattgefunden. 1938 verließ Meitner, wegen ihrer jüdischen Herkunft gefährdet, heimlich Deutschland und reiste nach Stockholm. Hier arbeitete sie mit ihrem Neffen Otto Frisch (1904-1979) zusammen, der Professor an Bohrs Institut für Theoretische Physik an der Universität Kopenhagen war. Die beiden übersandten der renommierten englischen Wissenschaftszeitschrift *Nature* eine Abhandlung mit dem Titel »Zerfall des Urans durch Neutronen: Neue Arten von Kernreaktionen«. Der Artikel mit der Beschreibung von Meitners Experiment erschien am 11. Februar 1939. Hier wurde für die Teilung des Urankerns

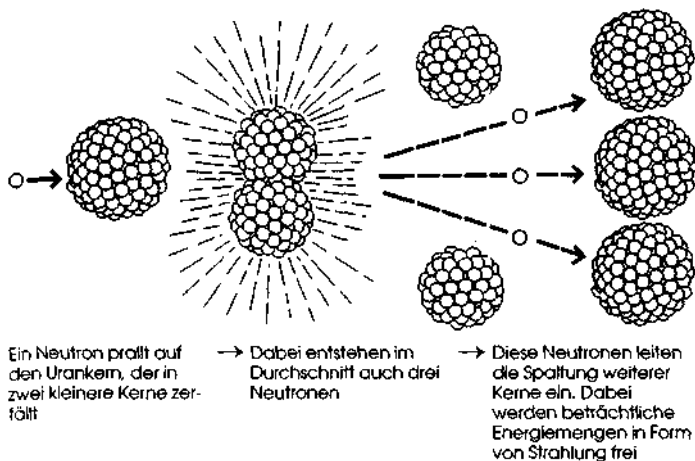


Abb. 6.2: Kernspaltung und Kettenreaktion

in zwei leichtere Kerne erstmals der Begriff »Spaltung« verwendet:

*»Bei der Spaltung eines Urankerns (der 54 Neutronen mehr als Protonen enthält) bildeten sich zwei Kerne (darunter Bariumkerne mit 26 Neutronen mehr als Protonen); dies führte zu einer Entfernung des Neutronenüberschusses und weiterhin zu einer Kettenreaktion, indem diese Neutronen auf die Kerne anderer Uranatome trafen. Damit setzte sich die Spaltung dieser Atome fort.«*

Fermi und Bohr erkannten die Bedeutung von Meitners Arbeit und begannen in den USA sofort mit entsprechenden theoretischen und experimentellen Untersuchungen. Ihre Ergebnisse deuteten ebenfalls auf die Durchführbarkeit einer nuklearen Kettenreaktion hin. Noch im gleichen Jahr wiesen Fermi und zwei ungarische Physiker von der Columbia University, nämlich Leo Szilard (1898-1964) und Eugene Wigner (1902-1995), Albert Einstein auf die Arbeit über die Kernspaltung hin. Die US-Regierung vermied es noch, direkt in den Krieg gegen Deutschland hineingezogen zu werden, und setzte die Unterstützung der Al-

lierten fort. Einstein war davon überzeugt, daß Nazi-Deutschland bald im Besitz von Atomwaffen sein und diese zum Unterwerfen vieler Länder einsetzen könnte. Daher unterzeichnete er einen Brief an Präsident Roosevelt, den Fermi, Szilard und Wigner aufgesetzt hatten. Obwohl Einsteins frühere physikalische Arbeiten mit der Entdeckung oder der potentiellen Anwendung der Kernspaltung nichts zu tun hatten, wurde er um die Unterzeichnung des Briefes gebeten, da er als Physiker ein überragendes Ansehen und hohe Glaubwürdigkeit besaß. Anders als Einstein hatten die übrigen in die USA emigrierten Wissenschaftler (darunter Fermi, Szilard, Wigner, Gamow und Teller) keine direkte Möglichkeit zur Kommunikation mit dem Weißen Haus. Der Brief wurde am 2. August 1939 verfaßt und acht Tage später unterzeichnet. Man übergab ihn Alexander Sachs, einem Vertrauten des Präsidenten, der ihn diesem aber erst am 11. Oktober übergab. Im folgenden ist in deutscher Übersetzung der Wortlaut des Briefes wiedergegeben, der zu den bedeutendsten Schreiben der Weltgeschichte gezählt werden kann.

Einsteins Brief an Präsident Roosevelt:

*Sehr verehrter Herr Präsident!*

*Eine neuere Arbeit von E. Fermi und L. Szilard, die mir als Manuskript zuzuging, läßt mich erwarten, daß das Element Uran in nächster Zukunft zu einer neuen und bedeutenden Energiequelle werden kann. Bestimmte Aspekte der neuen Situation scheinen Aufmerksamkeit zu erfordern und, wenn nötig, auch schnelles Handeln seitens der Regierung. Ich glaube daher, daß es meine Pflicht ist, Sie auf folgende Tatsachen und Empfehlungen hinzuweisen:*

*In den letzten vier Monaten wurde es aufgrund der Arbeiten von Joliot in Frankreich sowie von Fermi und Szilard in Amerika wahrscheinlich, daß in einer großen Uranmasse eine nukleare Kettenreaktion gestartet werden kann, durch die enorme Energiemengen freigesetzt werden und andere, dem Radium ähnliche Elemente, entstehen. Inzwischen erscheint es als sicher, daß dies in naher Zukunft realisiert werden kann.*

*Dieses neue Phänomen würde auch die Konstruktion von Bomben ermöglichen, und es ist denkbar - wenn auch viel weni-*



ger gewiß —, daß damit extrem leistungsfähige Bomben einer neuen Art zu bauen sind. Eine einzige derartige Bombe, per Schiff herantransportiert und im Hafen gezündet, würde nicht nur den gesamten Hafen, sondern auch einen Teil der Umgebung völlig zerstören. Solche Bomben könnten sich aber als zu schwer erweisen, um mit dem Flugzeug transportiert zu werden.

Die Vereinigten Staaten verfügen nur über wenige Uranerze, die zudem einen sehr geringen Urangehalt haben. In Kanada und der früheren Tschechoslowakei finden sich Erze mit höherem Urangehalt, und die wichtigsten Lagerstätten liegen in Belgisch-Kongo.

Angesichts dieser Situation erscheint es Ihnen vielleicht als ratsam, daß zwischen der Regierung und der Physikergruppe, die die Kettenreaktionen erforscht, ständiger Kontakt besteht. Diesen zu realisieren, könnten Sie eine Person beauftragen, die Ihr Vertrauen genießt und gegebenenfalls in inoffizieller Eigenschaft handeln könnte. Zu ihren Aufgaben könnte folgendes gehören:

a) Sie hätte an Regierungsstellen heranzutreten, diese über die aktuellen Entwicklungen zu informieren und ihnen Empfehlungen zur Vorgehensweise zu geben. Dabei wäre insbesondere darauf zu achten, die Versorgung der Vereinigten Staaten mit Uranerzen sicherzustellen.

b) Die betreffende Person hätte die experimentellen Arbeiten zu fördern, die derzeit auf die beschränkten Etats der Universitätsinstitute angewiesen sind. Dazu wären, wenn nötig, Mittel bereitzustellen, und zwar durch Ausnutzen von Kontakten zu Privatpersonen, die bereit sind, hierfür Beiträge zu leisten. Außerdem wäre die Zusammenarbeit mit industriellen Laboratorien anzustreben, die über die nötige Ausrüstung verfügen.

Ich habe erfahren, daß Deutschland den Verkauf von Uranerzen aus tschechoslowakischen Minen gestoppt hat, die es übernommen hatte. Daß es so früh auf diese Weise handelte, kann vermutlich damit erklärt werden, daß der Sohn des deutschen Staatssekretärs von Weizsäcker an das Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin berufen wurde, an dem einige der in Amerika durchgeführten Arbeiten über Uran wiederholt werden.

Ihr sehr ergebener  
Albert Einstein

Als Reaktion auf dieses Schreiben setzte Roosevelt eine Kommission ein, die klären sollte, ob die Kernenergie militärisch einzusetzen ist. Das Gremium bestätigte dem Präsidenten, daß diese Energieform in Atombomben angewandt werden könne. Daraufhin gewährten Heer und Marine der US-Streitkräfte im Februar 1940 die ersten Mittel für die Atomforschung. Die bewilligten 6000 US-Dollar waren selbst damals ein sehr bescheidener Betrag, belegten aber die erste Beteiligung des US-Militärs an der Erforschung der Atomenergie. Nach dem Unterzeichnen des Briefes hatte Einstein nichts mehr mit den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Kernenergie und die Atombombe zu tun.

### **Das Manhattan-Projekt beginnt**

*210 000 Todesopfer durch »Little Boy« und »Fat Man«*

Im August 1942 beauftragte Präsident Roosevelt den US-Brigadegeneral Leslie R. Groves damit, die Arbeiten zur militärischen Nutzung der Kernenergie zu koordinieren. Großbritannien und Kanada hatten ihre Unterstützung zugesagt. Das Vorhaben lief unter der Bezeichnung Manhattan-Projekt, weil ein Großteil der Forschung von Enrico Fermi und anderen an der Columbia University in Manhattan durchgeführt worden war und weil der Manhattan-Distrikt des US-Militärs das Projekt anfangs organisierte. Im Oktober 1942 wurde Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) Direktor des neu gegründeten Atomforschungsinstituts. Oppenheimer, Sohn eines deutsch-jüdischen Immigranten, hatte 1925 sein Studium in Harvard abgeschlossen und dann unter Ernest Rutherford am Cavendish Laboratory im englischen Cambridge geforscht.

Zu jener Zeit erzielte man bahnbrechende Erkenntnisse über den Aufbau der Atome. Oppenheimer promovierte 1927 und lehrte dann Physik in Berkeley, Kalifornien. 1939, im selben Jahr, als die deutsche Wehrmacht in Polen einmarschierte und Einstein den Brief an Präsident Roosevelt unterzeichnete, begann Oppenheimer seine Zusammenarbeit mit dem kleinen Kreis von Kernphysikern, denen die Möglichkeit klar war, eine Atombombe zu

konstruieren. Bedeutsam waren dabei seine speziellen Kenntnisse über die Gewinnung des Isotops Uran-235 aus dem natürlichen Uran, das vor allem aus dem Isotop Uran-238 besteht. Unter strenger Geheimhaltung koordinierte Oppenheimer die Arbeiten der besten Kernphysiker in verschiedenen Instituten in den Vereinigten Staaten. Bei Los Alamos in der Wüste von New Mexico wurde ein Institut eingerichtet, an dem ebenfalls im Rahmen des Manhattan-Projekts geforscht wurde. Hier untersuchte man, welche Bedeutung die Kettenreaktionen bei der Kernspaltung schwerer Elemente, beispielsweise des Urans, haben. Zu den Physikern, die am Manhattan-Projekt mitwirkten, gehörten neben Fermi unter anderem folgende Wissenschaftler:

- Hans Albrecht Bethe (geb. 1906), amerikanischer Physiker deutscher Herkunft. Er hatte 1931 mit Fermi in Italien zusammengearbeitet und war 1934 in die USA emigriert. Er leitete in Los Alamos die Abteilung für Theoretische Physik. 1939 hatte er die spezifische Energiemenge berechnet, die in der Sonne und in anderen Sternen durch die Kernfusion erzeugt wird.
- Edward Teller (geb. 1908), amerikanischer Kernphysiker ungarischer Herkunft. Er hatte an Niels Bohrs Kopenhagener Institut studiert und zusammen mit Gamow den radioaktiven Zerfall erforscht. Er arbeitete in Fermis Team an der Universität Chicago und war einer der ersten, die Oppenheimers Ruf nach Los Alamos folgten.
- Willard F. Libby (1908-1980), amerikanischer Chemiker. Er wirkte an der Entwicklung des Verfahrens zum Trennen des Uran-235 vom Uran-238 mit.
- William G. Penney (1909-1991) englischer Kernphysiker. Er leitete die britische Arbeitsgruppe des Manhattan-Projekts.
- Leo Szilard (1898-1964), amerikanischer Physiker ungarischer Herkunft. Er war maßgeblich daran beteiligt, Einstein zum Unterzeichnen des Briefes an Präsident Roosevelt zu bewegen. Er entwickelte das erste Verfahren zum Abtrennen des Uran-235 vom Uran-238 und arbeitete 1942 eng mit Fermi zusammen, als sie an der Universität Chicago die Kettenreaktionen erforschten. Szilard wirkte bis Kriegsende am Manhattan-Projekt mit.

- Harold C. Urey (1893-1981), amerikanischer Chemiker. Er hatte 1931 das Deuterium, d. h. den schweren Wasserstoff, entdeckt und trieb die Erforschung der Kernspaltung voran. Später leitete er an der Columbia University eine Forschungsgruppe, die bedeutende Beiträge zur Trennung der Uran-Isotope leistete.

Fermi und seine Kollegen hatten also die Aufgabe, eine kontrollierte, sich selbst erhaltende nukleare Kettenreaktion zu realisieren. Die Wissenschaftler arbeiteten in einer aufgegebenen Squashhalle nahe der Universität Chicago. Sie hatten berechnet, daß ungefähr 54 Tonnen Uran, verteilt in über 400 Tonnen Graphit, die optimale Masse und das optimale Volumen hätten, um eine derartige Kettenreaktion auszulösen. Am 2. Dezember 1942 fügten sie zu dem vier Meter hohen »Haufen« aus Uran- und Graphitblöcken vorsichtig weiteres Material hinzu und nahmen dann einen weiteren Test vor: Sie zogen die Cadmiumstäbe nacheinander langsam heraus, und die Anzeige des Geräts, das die freigesetzten Neutronen erfaßte, begann heftig auszuschlagen. Das deutete darauf hin, daß eine Kettenreaktion begonnen hatte, also die Spaltung von Millionen von Urankernen. Die Physiker schoben die Steuerstäbe wieder hinein, um die Neutronenaktivität zu vermindern. Einer von Fermis Assistenten rannte zum Telefon, um Oppenheimer das Resultat mitzuteilen: »Der italienische Seefahrer ist gerade in der Neuen Welt gelandet.« Dieses inzwischen berühmt gewordene Experiment war der Höhepunkt der intensiven, fast fünfzig Jahre währenden Bemühungen, das Atom zu verstehen. Fermi und seine Gruppe waren die ersten, die die praktische Anwendbarkeit von Einsteins Gleichung bewiesen - entweder für eine friedliche Nutzung der Kernenergie oder für die Herstellung von Waffen, die im Extremfall die ganze Menschheit mit einem Schlag auslöschen könnten.

Nun war die Kettenreaktion keine Vermutung mehr, sondern eine Realität, und man errichtete geheime Anlagen. Eine entstand auf einem 180 Quadratkilometer großen Gelände bei Oak Ridge in Tennessee und die andere in einem abgelegenen, 2500 Quadratkilometer großen Gebiet nördlich von Pasco im US-Staat Washington. Diese sogenannten Hanford Engineer Works wur-

den am Ufer des Columbia River gebaut, denn hier war genügend Kühlwasser verfügbar, um die enorme Wärmemengen abzuführen, die von den Kernspaltungsanlagen abgegeben wurden. In der Anlage Oak Ridge, die ein Gebäude mit einer Grundfläche von 18 Hektar umfaßte, wurde das für die Spaltung nötige Uran-235 von seinen natürlichen Begleitern, vor allem dem Uran-238, abgetrennt. In der ebenso riesigen Hanford-Anlage erzeugte man künstlich Plutonium-239, denn mit Uran-235 oder Plutonium-239 sollte die explosive Kettenreaktion in der Atombombe am besten einzuleiten sein. In Oak Ridge lebten bis zu 75000 Menschen und bei der Hanford-Anlage rund 10000.

Die von den Wissenschaftlern und Ingenieuren unter anderem in Oak Ridge und Hanford hergestellten Produkte sollten in einer geheimen Anlage 56 Kilometer nordwestlich von Santa Fe in New Mexico weiterverwendet werden. Oppenheimer hatte dieses Gebiet wegen seiner Abgelegenheit gewählt. Hier, in der ebenen Wüste Los Alamos, entstand ab November 1942 der gleichnamige Ort. Einen Monat zuvor war Oppenheimer zum Leiter des Manhattan-Projekts bestellt worden. In Los Alamos koordinierte er die Bemühungen der bedeutenden Physiker, die er angeworben hatte, darunter Fermi und die oben aufgeführten Wissenschaftler. Die Wissenschaftler in Los Alamos hatten einen schrecklichen Auftrag: den konkreten Bau der Bombe, deren Sprengkraft von dem spaltbaren Material herrührte, das in Oak Ridge und Hanford produziert wurde.

Die wesentliche Frage, die sich sofort stellte, betraf die Menge an Uran-235 oder Plutonium, die in die Bombe einzusetzen war. Mit anderen Worten: »Wie groß ist die kritische Masse des spaltbaren Materials?« Die Zeitspanne zwischen dem Entweichen eines Neutrons aus einem Urankern, der sich gerade spaltet, und der Spaltung des nächsten Urankerns beträgt ein Hundertmillionstel einer Sekunde. Setzte man zuwenig Uran ein, dann entweichen die entstandenen Neutronen aus der Masse, ohne daß die gewünschte Kettenreaktion einsetzte. Läge aber zuviel Uran in kompakter Form vor, dann explodierte es augenblicklich. Dadurch würde Los Alamos zerstört, und alle 5000 damals dort arbeitenden Menschen würden getötet. Könnte das Los-Alamos-Team diese und andere gravierende Probleme bei der Konstruk-

tion der Atombombe lösen, dann hätte diese eine Explosionswirkung, die jede Vorstellung übersteigt: Pro Kilogramm Uran oder Plutonium hätte sie die Sprengkraft von 15000 Tonnen Dynamit. Durch den Einsatz einer solchen Waffe könnte der Zweite Weltkrieg vielleicht schnell beendet werden.

Nach rund zwei Jahren war in Oak Ridge und Hanford so viel spaltbares Material produziert worden, daß in Los Alamos der Zusammenbau der ersten Atombombe versucht werden konnte. Sie war knapp zwei Meter lang, und ihr Durchmesser betrug gut einen halben Meter. Insgesamt wog sie vier Tonnen und enthielt eine den Berechnungen zufolge überkritische Masse an Plutonium-239. Gut fünfzehn Jahre nach Einsteins Brief an Roosevelt und nachdem zwei Milliarden Dollar sowie Millionen von Arbeitsstunden aufgewendet waren, konnte am frühen Morgen des 16. Juli 1945 der Countdown für den ersten Test beginnen. Im abgelegenen Luftwaffenstützpunkt Alamogordo in New Mexico wurde die Bombe an der Spitze eines 33 Meter hohen Stahlturms angebracht, der von zahlreichen Meßgeräten umgeben war. Oppenheimer und seine Gruppe saßen zehn Kilometer entfernt im Kontrollraum, während etliche andere Wissenschaftler und Beobachter 16 Kilometer entfernt in Bunkern und hinter Schutzschilden oder anderen Befestigungen kauerten. Nachdem die letzten Sekunden bis zum Zünden heruntergezählt waren, schoß ein riesiger Feuerball zum Himmel, und die Beobachter wurden durch Licht in allen Spektralfarben geblendet, das hundertmal so intensiv war wie das Sonnenlicht an einem klaren Nachmittag. Die Sprengkraft dieser ersten Atombombe entsprach der von rund 20000 Tonnen Dynamit. Rund 30 Sekunden nach der gewaltigen Explosion wurden einige Beobachter, die hinter einem Schutzschild standen, von der heftigen Stoßwelle zu Boden geschleudert, obwohl sie 16 Kilometer vom Ort der Explosion entfernt waren. General Farrell, der in Los Alamos das militärische Kommando hatte, schrieb später in seinem Bericht an das Verteidigungsministerium, daß die Explosion »unerhört, großartig, ausgezeichnet, erstaunlich und schrecklich« gewesen sei. Der Stahlurm verdampfte völlig, und der Wüstensand wurde noch in über 700 Metern Entfernung zu Glas geschmolzen.

Mit dem Atompilz, der sich gut zwölf Kilometer hoch in die Atmosphäre erhob, sahen die Menschen bei Alamogordo an jenem schicksalhaften Tag ein Gebilde, das die Geschichte für Jahrzehnte und vielleicht für Jahrhunderte entscheidend beeinflussen sollte. Man schrieb damit das letzte Kapitel einer Epoche, das die Vergangenheit mit der Zukunft verknüpfte. Hier kulminierten die faszinierenden, fast 2500 Jahre währenden Bemühungen, Einblick in die fundamentalen Teilchen der Materie zu erlangen, also in die Teilchen, die nach Leukipp die Bausteine der Materie sind. Dieses Kapitel der Geschichte endete mit einer völlig unerwarteten und fürchterlichen Wendung. Über Jahrzehnte hinweg hatten sich viele hervorragende Wissenschaftler - zurückgehend auf Robert Boyle und andere Chemiker im 17. und 18. Jahrhundert - bemüht, die im Atom schlummernde Energie zu erkennen. Außerdem wurde Einsteins Gleichung von einer Prophezeiung zu einer realen Möglichkeit, denn diese Energie konnte nun freigesetzt werden, und die Geheimnisse des Atoms wurden entschlüsselt. Wir können uns ihnen nicht mehr entziehen - weder heute noch künftig, weder im Frieden noch im Krieg.

Am 6. August 1945, drei Wochen nach dem Test von Alamogordo, überquerte ein B-29-Bomber der US-Luftwaffe den Pazifik und warf um 8.15 Uhr über Hiroshima eine Uran-235-Bombe ab, die die Tarnbezeichnung »Little Boy« trug. Sie detonierte in knapp 600 Metern Höhe und zerstörte zwei Drittel der Stadt; dabei kamen 140000 der 350000 Einwohner unmittelbar um. Die US-Luftwaffe warf am 9. August um 11.02 Uhr eine zweite Atombombe über Japan ab, diesmal über Nagasaki. Eigentlich sollte sie zwei Tage später Kokura treffen, doch wurde der Start wegen ungünstiger Wetterprognosen vorverlegt. Zudem konnte beim Anflug das Ziel durch die Wolkendecke nicht erkannt werden, so daß der Bomber schließlich nach Nagasaki beordert wurde. Die von ihm abgeworfene Plutoniumbombe (»Fat Man«) war vom gleichen Typ wie die bei Alamogordo getestete. Sie tötete unmittelbar 70000 Menschen, etwa ein Viertel der Bevölkerung, und zerstörte die Hälfte der Stadt.

## TEIL 3

### Das Relativitätsprinzip

*Was könnte sicherer und absoluter sein als das Vergehen der Zeit? Schon im Alter von 16 Jahren stellte sich Albert Einstein diese Frage, zu der er zehn Jahre später die Spezielle Relativitätstheorie entwickeln sollte. Diese besagt, daß das Vergehen der Zeit eben nicht gewiß oder absolut ist. Der Begriff einer universellen Zeit muß durch eine Vielfalt »verschiedener« Zeiten ersetzt werden. Außerdem sind Zeit und Raum nicht unabhängig voneinander, sondern es muß eine vierte Dimension eingeführt werden, nämlich die Raum-Zeit.*

*Einsteins Theorie ersetzte nicht die Newtonsche Physik. Die Spezielle Relativitätstheorie wird nur angewandt, wenn es um Objekte geht, die sich relativ zu anderen Körpern fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Newton konnte solche Gegebenheiten in seine Betrachtungen natürlich nicht einbeziehen, denn er konnte nichts über elektromagnetische Wellen oder die Lichtgeschwindigkeit wissen. Zehn Jahre nach dem Erarbeiten der Speziellen Relativitätstheorie vollendete Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie. Sie ermöglichte eine neue Sichtweise über die Quelle und die Effekte der Gravitation im Universum und beeinflusste viele andere Wissenschaftsgebiete.*

*Einstein zählt zu den bedeutendsten Persönlichkeiten aller Zeiten. Er befaßte sich auch mit den gesellschaftlichen Problemen seiner Zeit, äußerte sich hierzu bei vielen Gelegenheiten und engagierte sich dafür, unsere Welt lebenswerter zu machen. Wir werden uns hier zunächst mit der Person Einsteins befassen und danach die Theorie betrachten, die sozusagen die Grundfesten der Zeit erschütterte.*



## KAPITEL 7

### Philosoph und Wissenschaftler

*»Wie merkwürdig ist die Situation von uns Erdenkindern! Für einen kurzen Besuch ist jeder da. Er weiß nicht wofür. (...) Meine Ideale, die mir voranleuchteten und mich mit frohem Lebensmut immer wieder erfüllten, waren Güte, Schönheit und Wahrheit.« \**

Albert Einstein

Albert Einstein war ein außergewöhnlicher Physiker und auch Philosoph. Er wurde bekannt durch seine Theorien über Raum, Zeit und Gravitation, befaßte sich aber gleichermaßen mit philosophischen Fragen - über die Freiheit, den Wert und Sinn des menschlichen Lebens, die Unterscheidung von Gut und Böse oder mit Fragen der Bildung, Religion oder Politik. Zwischen 1915 und seinem Todesjahr 1955 schrieb oder sprach Einstein über zweihundertmal öffentlich über gesellschaftspolitisch relevante Themen, obwohl ihn sein weltweiter Ruhm eher befangen machte:

*»Jeder soll als Person respektiert und keiner vergöttert sein. Eine Ironie des Schicksals, daß die ändern Menschen mir selbst zuviel Bewunderung und Verehrung entgegengebracht haben, (...) ohne mein Verdienst. Es mag wohl von dem (...) Wunsch herrühren, die paar Gedanken zu verstehen, die ich mit meinen schwachen Kräften in unablässigem Ringen gefunden habe.« \*\**

Einstein korrespondierte mit dem berühmten österreichischen Psychiater Sigmund Freud über die menschlichen Instinkte,

\* Albert Einstein, *Die Welt, wie ich sie sehe*, Berlin 1934, S. 7-8

\*\* ebd., S. 8

fürhte mit dem hinduistischen Poeten und Mystiker Rabindranath Tagore einen ausführlichen philosophischen Dialog über das Wesen der Wahrheit und debattierte mit vielen anderen Denkern seiner Zeit. Er war überzeugter Pazifist, zudem ein begabter Schriftsteller und Musiker.

Die folgenden Auszüge aus Einsteins öffentlichen Äußerungen und Artikeln vermitteln einen Eindruck von dem Reichtum an Ideen, Idealen und Anschauungen über das Leben, die diese bescheidene, brillante und höchst idealistische Persönlichkeit vertrat.

### Über das Militär

*»Innerhalb von zwei Wochen können die Menschen irgendeines Landes, wie eine Schafherde, von den Zeitungen in einen solchen Zustand aufgeregten Zornes versetzt werden, daß die Männer sich Uniformen anziehen, um zu töten und getötet zu werden, nur um der schmutzigen Ziele einiger weniger Interessengruppen willen. Die Wehrpflicht erscheint mir als schändlichstes Symptom jenes Mangels an persönlicher Würde, an dem die zivilisierte Menschheit heute leidet.« (Aus: Mein Weltbild,*

### Über Palästina

*»Juden und Araber stehen sich als Feinde gegenüber. (...) Dieser Zustand ist beider unwürdig. (...) Es sollte ein Staatsrat eingerichtet werden, in den Juden und Araber jeweils vier Vertreter entsenden. (...) Diese acht Abgeordneten sollten sich einmal wöchentlich treffen. Sie sollten nicht die Teilinteressen ihres Bekenntnisses oder ihrer Nation vertreten, sondern gewissenhaft (...) das Wohl der ganzen Bevölkerung des Landes im Auge haben.« (München, 1930)*

### Über Rechte und Antikommunisten

*»Die reaktionären Politiker haben es erreicht, die Öffentlichkeit gegenüber allen intellektuellen Bemühungen mißtrauisch zu machen, indem sie ihr eine Gefahr von außen vorgaukelten. Nachdem das gelungen ist, gehen sie jetzt dazu über, die Freiheit der Lehre zu unterdrücken und all jene ihrer Stellungen zu berauben, die sich nicht fügsam zeigen.« (New York)*

## Über Menschenrechte

*»Die Existenz und die Gültigkeit der Menschenrechte stehen nicht in den Sternen. Die Ideale für das Verhalten der Menschen gegenüber anderen und eine wünschenswerte Struktur des Gemeinwesens wurden im Laufe der Geschichte von aufgeklärten Persönlichkeiten erdacht und gelehrt. Jene Ideale und Überzeugungen (...) wurden mit Füßen getreten. (...) Ein Großteil der Geschichte war daher erfüllt vom Kampf für die Menschenrechte, einem ewigen Streit, bei dem niemals ein endgültiger Sieg zu erringen ist. Aber in diesem Kampf zu ermüden, würde den Untergang der Gesellschaft bedeuten.« (Chicago, 1954)*

Die internationale Bedeutung seiner öffentlichen Stellungnahmen trug entscheidend zu Einsteins weltweitem Ansehen bei.

## **Einstein sucht nach der Ordnung in einer chaotischen Welt**

### *Der Ritt auf einem Lichtstrahl*

Albert Einstein war weit mehr als ein Wissenschaftler, der über Raum und Zeit nachsann. Und doch war es sein scharfer wissenschaftlicher Verstand, der ihn berühmt machte. Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Ungefähr ein Jahr später ging das Geschäft seines Vaters bankrott, und die Familie zog nach München. Hier errichtete der Vater zusammen mit seinem Bruder Jakob eine kleine Fabrik für elektrische Geräte und Maschinen. Albert besuchte in München sehr strenge Schulen. Hier entstand wohl seine lebenslange Abneigung gegen reglementierte Ausbildung und sinnlose Disziplin, wie sie in seiner häufigen öffentlichen Kritik an militärischer Autorität und an totalitären Staaten deutlich wurde.

Die Berichte über seine schlechten Leistungen als Schüler treffen für seine frühen Jahre durchaus zu. Der Unterricht langweilte ihn, und er war schüchtern, gehemmt und verschlossen. Einige Historiker vermuteten sogar, er habe an einer Art Legasthenie gelitten; dafür gibt es aber keine Beweise. Seine Lehrer berichteten, er sei »geistig träge und ungesellig gewesen und habe sich

stets seinen albernen Träumen hingegenben«. Auf die Frage des Schulrektors, welchen Beruf Albert einmal ergreifen könnte, erwiderte der Vater: »Das ist nebensächlich. (...) Er wird nie bei irgend etwas Erfolg haben.«

Es gab schon in Alberts früher Jugend Einflüsse, die den Weg für die Relativitätstheorie bereiteten: Ein Taschenkompaß, den er als Kind geschenkt bekam, ließ ihn vermuten, daß der Raum nicht leer ist, wie er gelernt hatte; seine Beschäftigung mit der Geige machte ihm die mathematische Struktur der Musik bewußt; sein Onkel Jakob interessierte ihn für die Mathematik; sein Onkel Cäsar Koch erkannte und förderte sein Interesse für die Naturwissenschaften. Aber es war Max Talmey, ein junger Medizinstudent an der Münchener Universität und Alberts Tutor und Mentor, der seine schlummernden Talente wirklich weckte und ihm Physik- und Mathematikbücher für Fortgeschrittene gab. Talmey berichtete: »Seine mathematische Begabung war so groß, daß ich bald nicht mehr folgen konnte. Später unterhielten wir uns oft über Philosophie. Ich empfahl ihm, Kant zu lesen.« Später las Einstein auch philosophische Werke von David Hume, Ernst Mach und anderen.

Bereits im Alter von zwölf Jahren besaß er eine gesunde Skepsis gegenüber dem Stoff, der ihm im stark reglementierten deutschen Schulsystem aufgezwungen wurde. Er begann, sich auf die physikalische Welt zu konzentrieren. Einstein wurde mit 15 von der Schule verwiesen, weil er sich den strengen Regeln nicht unterwerfen wollte. Sein Lehrer sagte zu ihm: »Deine Gegenwart in der Klasse ist destruktiv und stört die anderen Schüler«. Er folgte daraufhin seiner Familie, die zuvor nach Mailand gezogen war, weil auch die Münchener Firma seines Vaters keinen Bestand gehabt hatte. Im nächsten Jahr fuhr Albert, nun 16 Jahre alt, mit dem Fahrrad durch Italien. Hier kam ihm erstmals die scheinbar harmlose Frage in den Sinn, die zu einer der größten wissenschaftlichen Entdeckungen in der Geschichte führen und unsere Vorstellung vom Universum grundlegend ändern sollte: *Wie würde mir die Welt wohl erscheinen, wenn ich auf einem Lichtstrahl säße und mich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegte?*

Einstein wollte seine Ausbildung in Physik und Mathematik fortsetzen und bewarb sich im Frühjahr 1895 bei der renommierten

ten Polytechnischen Hochschule in Zürich. Allerdings war er erst 16, und das Mindestalter für die Aufnahmeprüfung lag bei 18 Jahren. Aber im selben Jahr schrieb er einen Aufsatz über den Elektromagnetismus, in dem sich erste Andeutungen der Relativitätstheorie finden, und sandte ihn seinem Onkel Cäsar. Über Freunde der Familie gelangte die Abhandlung in die Hände des Rektors der Hochschule. So wurde Einstein schließlich zugelassen. Er wollte Dozent für mathematische Physik werden. Daher gehörten zu seinen Fächern Differential- und Integralrechnung, beschreibende und analytische Geometrie, Zahlentheorie und die Theorie der bestimmten Integrale. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts kamen neue Theorien über den Elektromagnetismus auf, und man erkannte, daß bestimmte Phänomene im Rahmen der Newtonschen Physik nicht erklärbar sind. Diese Befunde begannen die allgemein akzeptierten Anschauungen über das Universum in den Grundfesten zu erschüttern.

Einstein wurde während der vier Jahre, die er an der Hochschule verbrachte, in seinem Denken gleichermaßen beeinflusst von Röntgens Entdeckung der später nach ihm benannten Strahlung, von Thomsons Nachweis des Elektrons und von Ernest Rutherfords damals neuem Atommodell. Doch die Newtonsche Physik war immer noch maßgebend, denn sie hatte schon lange gegolten und war sehr tief im Denken verwurzelt. Daher war das konservative Establishment der Wissenschaft keineswegs bereit, ein neues Konzept anzuerkennen, das Schwächen im Gefüge der Erkenntnisse zutage treten ließ.

Der Boden für einen der größten intellektuellen Fortschritte in der Wissenschaft wurde durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren bereitet: Einsteins vierjährige physikalische und mathematische Ausbildung an der Polytechnischen Hochschule, seine Befähigung zu neuen Ansätzen ohne die Fesseln der akzeptierten wissenschaftlichen Dogmen, der Einfluß von Max Talmey und seinen Onkeln sowie die damaligen Entdeckungen auf dem Gebiet des Elektromagnetismus. In der Zwischenzeit hatte Einstein aber auch an der Akademie seine Widerspenstigkeit und Unabhängigkeit gezeigt. »Sie haben einen Fehler«, bemerkte einer der Professoren, »Sie lassen sich nichts sagen«. So wurde er nach dem Abschluß seines Studiums übergangen, als die Stelle

eines Lehrbeauftragten für Physik an der Akademie besetzt wurde. Dadurch zerschlugen sich seine Hoffnungen, Dozent für mathematische Physik zu werden.

## **Einstein erklärt das Universum neu** *Die Äquivalenz von Masse und Energie*

Einstein kehrte für einige Monate zu seiner Familie nach Mailand zurück, ging aber bald wieder nach Zürich und wurde Schweizer Staatsbürger, um seine Aussichten auf eine Dauerstellung zu verbessern. Ab dem 16. Juni 1902 arbeitete Einstein als technischer Experte beim Schweizerischen Patentamt in Bern. Sein Jahresgehalt betrug 3500 Franken. Er wohnte in einem kleinen Appartement ein paar hundert Meter vom Amt entfernt. Max Talmey, sein Mentor aus Jugendtagen, besuchte ihn in Bern und schrieb später: »Seine Umgebung wirkte sehr ärmlich. Er lebte in einem kleinen, schlecht möblierten Zimmer. (...) Seine Not wurde noch durch Hindernisse verschlimmert, die ihm Leute in den Weg stellten, die auf ihn eifersüchtig waren.« Tag für Tag saß Einstein neben seinen Kollegen in einem langen, schmalen Büro, las endlose Patentanmeldungen für Schreibmaschinen, Kameras, technische Instrumente und zahllose andere Vorrichtungen, für die zuversichtliche Erfinder gesetzlichen Schutz wünschten. Einstein bewältigte die wenig anspruchsvolle Routinearbeit schnell und hatte daher in der Freizeit den Kopf frei, seine kreativen Ideen über die Physik zu entwickeln.

Um nebenbei etwas Geld zu verdienen, bot er in Zeitungsinserten Privatunterricht in Physik an. Dadurch lernte er einige sehr fähige Physikstudenten kennen, die etwas jünger waren als er. Einstein freundete sich mit ihnen an, und sie führten in den folgenden Jahren zahlreiche lange, angeregte Debatten. Sie unternahmen oft Ausflüge in die Schweizer Berge und frönten ihrer gemeinsamen Leidenschaft für Physik auch im Cafe Bollwerk, das nicht weit vom Patentamt entfernt war. Zu dieser Zeit arbeitete Einstein seine Ansätze weiter aus und suchte nach Wegen, seine Theorien möglichst überzeugend zu formulieren. Einige der Physikstudenten äußerten später, daß schon mit Anfang

zwanzig nicht nur sein Genie offenkundig war, sondern auch seine Dominanz und seine beeindruckende Charakterstärke.

Einstein heiratete 1903 Mileva Marie, eine Freundin aus der Züricher Zeit. Zwei Jahre später, als noch immer unbekannter 26jähriger Angestellter des Schweizerischen Patentamts, schrieb er einen Artikel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Darin beantwortete er die Frage, die er sich zehn Jahre zuvor gestellt hatte. Seine Berechnungen ergaben folgendes: Wenn sich das Licht im freien Raum immer mit derselben Geschwindigkeit ausbreitet - ungeachtet der Bewegung der Lichtquelle -, dann muß das Vergehen der Zeit relativ und nicht absolut sein. Angenommen, eine Person bewege sich mit dem Licht (also mit Lichtgeschwindigkeit) und schalte eine Taschenlampe ein. Dann wird deren Lichtstrahl die Person und die Taschenlampe mit Lichtgeschwindigkeit relativ zur Person und relativ zu einem ruhenden Beobachter verlassen. Konzeption und Beweis dieses Gedankengangs bilden die Spezielle Relativitätstheorie, die wir im nächsten Kapitel näher betrachten werden. Diese Theorie führte zu einem grundlegenden Wandel in unseren Auffassungen über das Universum. In einem weiteren Aufsatz begründete Einstein die Äquivalenz von Masse und Energie, für die er später die berühmte Gleichung  $E = mc^2$  aufstellte (siehe Kapitel 6). Das war eine der wichtigsten Folgerungen, die Einstein aus der Speziellen Relativitätstheorie zog.

Im Jahre 1905 publizierte er insgesamt fünf Artikel über ganz verschiedene Themen. Drei dieser Aufsätze gehören zu den bedeutendsten in der Geschichte der Physik. Die auf der Quantentheorie beruhende Deutung des photoelektrischen Effekts brachte ihm 16 Jahre später den Nobelpreis ein. Der dritte Artikel aus dem Jahre 1905 behandelte die eben erwähnte Spezielle Relativitätstheorie, in der die Raum-Zeit als vierte Dimension des Universums eingeführt wird - 9000 Wörter, die eine der bemerkenswertesten wissenschaftlichen Abhandlungen aller Zeiten ausmachen.

Die anderen Physiker brauchten allerdings etwas Zeit, um Einsteins Publikationen angemessen würdigen zu können. Im Jahr 1908 begann Einstein seine akademische Laufbahn: Er wurde nach seiner Habilitation außerplanmäßiger Professor für Theore-

tische Physik an der Universität Bern, behielt aber seine Tätigkeit am Patentamt noch bei. Im ersten Semester hatte er vier Hörer und im folgenden nur noch einen. Als die Relativitätstheorie allmählich bekannt wurde und immer mehr Physiker ihre Bedeutung erkannten, legte sich Einsteins Isolation, und er wurde ein anerkanntes Mitglied der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft. Er verbrachte immer mehr Zeit außerhalb von Bern und knüpfte Beziehungen zu Hendrik Lorentz in Holland, Ernst Mach in Österreich, Ernest Rutherford in England, Marie Curie und Paul Langevin in Frankreich, Max Planck in Berlin und Arnold Sommerfeld in München. Ab 1909 erhielt er zahlreiche Einladungen zu Vorträgen bei verschiedenen Tagungen und galt bald als führend unter den Wissenschaftlern, die sich im frühen 20. Jahrhundert um die Klärung physikalischer Grundfragen bemühten.

Im Juli 1909 gab Einstein seine Anstellung am Patentamt auf und zog wieder nach Zürich. Hier trat er seine erste wissenschaftliche Vollzeitstelle an: Er übernahm den an der Universität neu geschaffenen außerordentlichen Lehrstuhl für Theoretische Physik. Einsteins Vorlesungen in Zürich - unter anderem über Thermodynamik, kinetische Theorie der Wärme und Elektromagnetismus - waren sehr beliebt wegen seines Humors, seiner Geduld und seiner unkonventionellen und doch gut verständlichen Darstellungsweise.

In den nächsten Jahren hielt Einstein häufig Vorträge in verschiedenen europäischen Ländern. Er befaßte sich vor allem mit der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie (die wir ebenfalls im nächsten Kapitel besprechen werden). Im März 1911 ging er an die Deutsche Universität in Prag. Seine Wirkungsstätte lag jetzt nur wenige Kilometer von dem Ort entfernt, an dem der junge Johannes Kepler erstmals für Tycho Brahe gearbeitet hatte. Einstein bemerkte in Prag eine zunehmende Feindseligkeit zwischen Tschechen und Deutschen. Ohne daß er oder andere sich dessen bewußt waren, waren diese Animositäten Vorboten einer brisanten politischen Situation in Prag, die zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs beitragen sollte.

Die Einsteins hatten zwei Kinder: Hans-Albert, geboren 1903, und Eduard, geboren 1910. Im März 1912 reiste Einstein nach Pa-



ris, um vor der französischen Physikalischen Gesellschaft zu sprechen. Hier vertiefte er seine Freundschaft zu Marie Curie (die bis zu deren Tod 1934 bestehen sollte). Im Juli desselben Jahres machten beide Familien zusammen Urlaub in den Alpen. Curies älteste Tochter Irene, die später das Werk ihrer Mutter fortführte, begründete hier ebenfalls ihre lebenslange Freundschaft mit Einstein.

Im April 1914 zog die Familie nach Berlin. Hier konnte Einstein mit großzügiger Unterstützung durch die Preußische Akademie der Wissenschaften, Deutschlands bedeutendste Wissenschaftsvereinigung, arbeiten. Einstein drückte seine Dankbarkeit in einem Brief aus:

*»Sehr verehrte Herren, (...) ich habe Ihnen herzlichst dafür zu danken, daß Sie mir die größte Wohltat erweisen, die jemand einem Mann wie mir verleihen kann. Indem Sie mich zum Mitglied Ihrer Akademie erwählten, befreiten Sie mich von den Beschwernissen und Sorgen des Berufslebens und ermöglichen es mir, mich ganz meinen wissenschaftlichen Studien zu widmen.«*

Diese Worte und die gegenseitige Bewunderung zwischen Einstein und der Akademie sollten aber bald der Vergangenheit angehören, denn der Ausbruch des Ersten Weltkriegs stand unmittelbar bevor. Das veränderte Antlitz Europas und Deutschlands Schlüsselrolle im Krieg beeinflussten Einsteins Leben einschneidend; er wurde von einem stillen Wissenschaftler zu einem Kämpfer für den Pazifismus.

Wegen des Kriegsausbruchs im Sommer 1914 konnte Mileva mit den beiden Söhnen nicht von ihrem Urlaubsort in der Schweiz nach Berlin zurückkehren. Diese unfreiwillige Trennung mag schließlich zur Scheidung beigetragen haben. Im Jahre 1915 begann Einstein, sich gegen den deutschen Militarismus und gegen den Nationalismus im allgemeinen zu äußern. Sein Leben wurde nun vom Weltkrieg überschattet. Dennoch gelang es ihm in diesen Monaten, die Allgemeine Relativitätstheorie zu vollenden. Er publizierte sie erstmals 1916 unter dem Titel *Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*. Nach ihr ist die Gravitation - im Gegensatz zu Newtons Auffassung - keine Kraft,

sondern stellt »ein gekrümmtes Feld im Raum-Zeit-Kontinuum« dar. Einsteins Gefühle beim Abschluß dieses Werkes wurden in einem Brief an den mit ihm befreundeten deutschen Physiker Arnold Sommerfeld (1868-1951) offenbar. Einstein schrieb ihm im November 1915: »Ich hatte im letzten Monat eine der aufregendsten, anstrengendsten Zeiten meines Lebens, allerdings auch die erfolgreichste.« Für die Physiker war die Kombination beider Relativitätstheorien eine wissenschaftliche Revolution, wie sich seit Newtons *Principia* keine mehr ereignet hatte.

## **Einsteins Schritte auf die Weltbühne** *Hitlers größter öffentlicher Gegner*

Einstein heiratete 1919 Elsa Löwenthal, eine entfernte Verwandte seines inzwischen verstorbenen Vaters, und lebte mit ihr und ihren zwei Töchtern in Berlin. Im selben Jahr gab die Royal Society in London bekannt, daß auf Photographien der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 die Ablenkung des Sternenlichts zu erkennen war und daß die daraus berechneten Werte die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins bestätigten. Obwohl Einstein in wissenschaftlichen Kreisen bereits weltbekannt war, begründete dieses Ergebnis seinen eigentlichen internationalen Ruhm. Sein öffentliches Leben änderte sich nun drastisch. Er wurde zum Symbol der Wissenschaft und zum führenden Denker des 20. Jahrhunderts. Während der nächsten 35 Jahre nahm er, wie bereits erwähnt, freimütig zu vielen gesellschaftlichen Fragen Stellung, und sein Hauptanliegen wurde der internationale Pazifismus. In den 20er Jahren, einer Zeit unrealistischer Ideale, war Einstein überzeugter Idealist und gehörte einigen Organisationen an, die seine Weltanschauungen förderten, darunter der *League of Nations International Committee Intellectual Cooperation*; zu ihren Mitgliedern zählte neben anderen Physikern auch Marie Curie.

Bis 1929 hatte Einstein Beziehungen mit Physikern in aller Welt geknüpft, auch in den Vereinigten Staaten. Angesichts des wiedererstarkten deutschen Militarismus, der mit einem Antisemitismus in noch nie dagewesener Ausprägung einherging, erwog Einstein, nicht nur Deutschland zu verlassen, sondern sich

ganz von Europa abzuwenden. Mitte 1932 war er sich darüber im klaren, daß die Nazis bald an die Macht kommen würden, und plante mit seiner Frau bereits die Emigration in die Vereinigten Staaten. Er war dort gerade auf einer Vortragsreise, als Hitler am 30. Januar 1933 Reichskanzler wurde. Einstein verzichtete auf seine deutsche Staatsangehörigkeit, verdammt das Land seiner Geburt und forderte ganz Europa eindringlich auf, die Waffen gegen die Nazis zu erheben und sie daran zu hindern, einen Krieg zu entfesseln. Seine Prognosen in diesen frühen Jahren von Hitlers Herrschaft wurden jedoch ignoriert. Als Revanche für Einsteins öffentliche Erklärungen plünderten Nazihorden sein Sommerhaus bei Berlin. Einsteins Beziehung zur Preußischen Akademie der Wissenschaften, die ihn 1914 herzlich aufgenommen hatte, endete abrupt, als Einstein öffentlich austrat und die Akademie ihre »Deklaration vom 1. April 1933« herausgab; in dieser gelobte sie Treue zu Deutschland und stellte fest, daß sie »keinen Grund habe, Einsteins Austritt zu bedauern«.

Im Oktober 1933 begann Einstein seine Tätigkeit in der mathematischen Abteilung des neu gegründeten *Institute for Advanced Study* an der Universität Princeton in New Jersey. Hier blieb er die letzten 22 Jahre seines Lebens. Er beschäftigte sich nun intensiv mit der Frage, ob es möglich sei, die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie mit anderen Theorien zu einer »vereinigten Feldtheorie« zu verknüpfen. Dieses wissenschaftliche Problem ließ ihn nicht mehr los, aber seine Bemühungen sollten keine Früchte mehr tragen.

Seine wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Aktivitäten waren nach den 20er Jahren nicht annähernd so einflußreich oder bedeutend, wie sie es zuvor gewesen waren. Zudem erlitt sein Sohn Eduard einen Nervenzusammenbruch und warf seinem Vater vor, ihn nach dessen Scheidung von Mileva 1914 im Stich gelassen zu haben und an seiner schwierigen Situation schuld zu sein. Nach diesem Schicksalsschlag und vor allem nach dem Tode seiner Frau Elsa im Jahre 1936 wurde Einstein immer bedrückter; er war von sich selbst enttäuscht - unter anderem auch deswegen, weil er es nicht vermochte, die Gefahr eines Krieges zu vermindern, der nach seiner Überzeugung für so viele unschuldige Menschen verhängnisvoll sein würde. Einsteins stilles Wirken in

Princeton wurde nur 1939 kurz unterbrochen, als er den Brief an Roosevelt unterzeichnete, der schließlich zum Manhattan-Projekt, d. h. zum Bau der ersten Atombombe führte (vgl. Kapitel 6). In den 40er Jahren wurden auch seine Reisen seltener, und er führte ein sehr regelmäßiges Leben, das sich um seine theoretische Forschung drehte. Einstein lieferte keinen bedeutenden Beitrag zur Physik mehr.

Wegen seiner bahnbrechenden Theorie zu einem neuen Verständnis des Universums wird Albert Einstein immer als einer der größten Wissenschaftler gelten. Um ihm aber als Menschen völlig gerecht zu werden, muß man ebenso sein unermüdliches soziales und politisches Engagement würdigen: Frieden, bessere Lebensbedingungen, Wahrhaftigkeit und die schwierige Aufgabe, politische Institutionen zu schaffen, die die Freiheit in der Gesellschaft bewahren. Einstein verurteilte die unfähigen Regierungen mit ihrer repressiven Politik, die das Schicksal von Millionen Menschen in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts bestimmten. Er wurde zum Gewissen der Welt. Aber seine Kreuzzüge scheiterten. Seine einzige Bemühung, die zu einer klaren Initiative einer Regierung führte, war ausgerechnet der schicksalsschwere Brief an Roosevelt. Hier hatte Einstein zum Vorantreiben der Kernwaffenentwicklung ermutigt. Damit bleibt sein Name auch mit dem Bau der ersten Atombomben verknüpft, die im August 1945 über 200000 Menschen töteten und die Städte Hiroshima und Nagasaki völlig verwüsteten. Einstein drückte sein Bedauern darüber auf viele verschiedene Arten und bei zahlreichen Gelegenheiten aus. Beispielsweise sagte er zu dem berühmten Biochemiker Linus Pauling: »Ich beging einen großen Fehler in meinem Leben - als ich den Brief an Präsident Roosevelt unterzeichnete, in dem der Bau von Atombomben empfohlen wurde«. Weiterhin schrieb er: »Die Physiker, die sich am Verwirklichen der furchtbarsten und gefährlichsten Waffe aller Zeiten beteiligten, werden gequält von einem Gefühl der Verantwortung, um nicht zu sagen der Schuld.« Er sah sich selbst und jene anderen Physiker als Mitwirkende bei der Erfindung der schlimmsten Tötungsmaschine aller Zeiten. Doch angesichts der Umstände, unter denen er sich zum Unterzeichnen des Briefes entschloß, war es eine Entscheidung, deren Logik er manchmal verteidigte:

*»Wir halfen dabei, die neue Waffe zu schaffen, damit die Feinde der Menschheit nicht vor uns über sie verfügten. Das hätte angesichts der Geisteshaltung der Nazis bedeutet, daß unvorstellbare Zerstörung und Versklavung über die Welt gekommen wären. Wir gaben diese Waffe in die Hände des amerikanischen und des britischen Volkes als Treuhänder der ganzen Menschheit, als Kämpfer für Frieden und Freiheit. Aber bis heute können wir keinerlei Garantie für einen Frieden erkennen. Wir sehen keine Garantie für die versprochenen Freiheiten. (...) Der Krieg ist gewonnen, aber es herrscht noch kein Frieden.«*

Einstein hatte das Manhattan-Projekt für gerechtfertigt gehalten, da er befürchtete, daß die Deutschen die Bombe zuerst entwickelten. Als die Vereinigten Staaten später erkannten, daß Deutschland noch lange nicht soweit war, und als der Krieg in Europa im Mai 1945 endete, sprach sich Einstein gegen die Anwendung der Waffe aus. »Ich habe den Einsatz der Atombombe gegen Japan immer verurteilt«, sagte er. Einsteins Engagement für den Pazifismus wurde nach dem Abwurf der Bomben auf Hiroshima und Nagasaki noch entschiedener und gründete auf der Überzeugung, daß eine Weltregierung eingerichtet werden mußte, deren Verfassung von den Vereinigten Staaten, Großbritannien und Rußland gemeinsam entworfen werden sollte. »Ich trete für eine Weltregierung ein«, schrieb Einstein, »weil ich davon überzeugt bin, daß es keinen anderen Weg gibt, die entsetzlichste Gefahr zu bannen, in der sich die Menschheit jemals befand«.

Einstein ließ bei dieser Haltung aber die starken sozialen, kulturellen und politischen Kräfte außer acht, die einzelne Gruppen zu nationalen und regionalen Gesamtheiten vereinigen. Diese Kräfte gehen auf Wurzeln zurück, die Jahrhunderte oder gar Jahrtausende alt sind, und führen immer wieder zu Konflikten in den verschiedensten Regionen, beispielsweise in Bosnien, Tschetschenien, Nahost, Somalia, Ruanda, Haiti oder Nordirland. Einstein muß gewußt haben, daß diese Kräfte nicht durch die vage und unbestätigte Prophezeiung einzudämmen sind, für die meisten Menschen wäre das Beste erreicht, sobald die Nationen ihre Souveränität allgemein aufgäben.

Obwohl Einsteins soziale und politische Ansichten die Regie-

rangen niemals merklich beeinflussen, war er während des größten Teils seines Lebens eine hochangesehene Persönlichkeit des öffentlichen Lebens. Doch nach dem Zweiten Weltkrieg, als sich das Verhältnis zwischen den USA und der Sowjetunion zusehends verschlechterte, sah sich Einstein wegen seiner Auffassungen über den Pazifismus und seiner Forderung nach einer Welt-Regierung zunehmendem Argwohn ausgesetzt. Er fiel ein letztes Mal in Ungnade, nachdem er 1950 im Fernsehen geäußert hatte:

*»Und nun wird die Öffentlichkeit darüber informiert, daß die Produktion der Wasserstoffbombe das neue Ziel ist. (...) Eine beschleunigte Entwicklung in diese Richtung wurde vom Präsidenten feierlich proklamiert. Sollten sich diese Bemühungen als erfolgreich erweisen, dann wird die radioaktive Verseuchung der Atmosphäre und damit die Vernichtung allen Lebens auf der Erde in den Bereich des technisch Möglichen geraten.«*

Während Einsteins Kräfte in den nächsten Jahren stetig schwan- den, blieb er bei seinen Aufrufen zum Pazifismus, war aber zuneh- mend isoliert und wurde zu einem einsamen, exzentrischen Wis- senschaftler, der keinen Bezug mehr zur gesellschaftlichen und politischen Realität hatte. Diese Einschätzung bestätigte er selbst:

*»Mein leidenschaftliches Eintreten für soziale Gerechtigkeit und gesellschaftliche Verantwortlichkeit stand immer in einem merk- würdigen Gegensatz zu dem fehlenden Wunsch nach direktem Umgang mit meinen Mitmenschen. (...) Ich gehörte niemals von ganzem Herzen zu einem bestimmten Land oder Staat, zu mei- nem Freundeskreis oder auch nur zu meiner Familie. Diese Bin- dungen waren immer begleitet von einer gewissen Zurückhal- tung, und das Bedürfnis, mich in mich selbst zurückzuziehen, wurde mit der Zeit immer ausgeprägter. Eine solche Isolation ist zuweilen schmerzlich, aber ich bedauere es nicht, vom Verständ- nis und der Sympathie anderer abgeschnitten zu sein. Freilich verliere ich dabei etwas, doch werde ich dadurch entschädigt, daß ich unabhängig von den verbreiteten Meinungen und Vorurtei- len anderer bin. (...) Es ist seltsam, so allgemein bekannt und doch so einsam zu sein.«*

Albert Einstein gab sich nicht der Illusion hin, seine Worte könnten die Nationen beeinflussen. Aber er fühlte sich zu seinen mündlichen und schriftlichen Äußerungen moralisch gezwungen. Er wollte »einfach mit meinen begrenzten Möglichkeiten der Wahrheit und der Gerechtigkeit dienen, auf die Gefahr hin, niemandem zu gefallen«. Einstein trat für die Humanität ein und befaßte sich intensiv mit der Wissenschaft als einem Teil unserer Kultur. Er war ein Deutscher, der Deutschland haßte, ein Zionist, der Frieden mit den Arabern schließen wollte, ein Pazifist, der bei der Entwicklung der Atomwaffen seine Hand im Spiel gehabt hatte, und ein introvertierter Einzelgänger, der in der ganzen Welt gehört wurde. - Dieser Mann zeigte besser als jeder andere, wie sehr die Wissenschaft auf eine freie Gesellschaft angewiesen ist und wie flüchtig diese Freiheit sein kann.

## KAPITEL 8

### Die vierte Dimension

*Manchmal seh' ich  
So deutlich vor mir,  
Allein und mich Erinnernd  
An das Abendrot nach einem Schultag,  
Die Welt mit den Augen eines Kindes.*

*Dann kann ich sie sehen,  
Die Welt, die erst wird,  
So gegenwärtig und greifbar,  
Wie sonnabends morgens beim Aufwachen:  
Ich seh' sie mit den Augen eines Kindes.*

*Und wenn ich einst alt bin,  
im Winter und in der Dämmerung,  
Denk' ich zurück an den Frühling  
Und an die Weisheit, die ich erlangte,  
Als ich die Welt manchmal sah,  
Sie sah mit den Augen eines Kindes.*

JOHN KUZMA, *The World Through  
the Eyes of a Child* (1996)

Wir alle wissen, daß Einstein ein wissenschaftliches Genie war und etwas Außerordentliches schuf. Aber nur wenige wissen, was dies genau war. In diesem Kapitel soll versucht werden, die Relativitätstheorie zu erläutern. Um sie vollständig zu verstehen, benötigt man fundierte Kenntnisse in Physik. Aber ebenso wie die sechs anderen großen wissenschaftlichen Entdeckungen, die in diesem Buch vorgestellt werden, kann man die Relativitäts-



theorie auf begrifflicher Ebene ohne Formeln verstehen. Dennoch erfordert dies ein etwas abstrakteres Denken als bei den anderen Entdeckungen. Wir spüren die Relativität nicht, wie wir beispielsweise die Gravitation erfahren, und wir können sie ebensowenig sehen wie Galaxien oder menschliche Zellen. Einstein selbst meinte, daß der Vorteil der meisten Theorien deren Klarheit sei, während beim Beweisen und Verstehen der Relativitätstheorie die »logische Perfektion« beeindruckend sei. Das Prinzip der Relativität ist dasjenige, das dem sogenannten gesunden Menschenverstand am meisten zuwiderläuft. Um es zu verstehen, muß man die Welt daher so betrachten, als besäße man keine alltäglichen Erfahrungen. Anders gesagt: Man sollte sie wie mit den Augen eines Kindes sehen.

## **Die Newtonsche Physik versagt**

### *Fragen zur Umlaufbahn des Planeten Merkur*

Zunächst wollen wir uns Einsteins Spezieller Relativitätstheorie zuwenden, und am Ende dieses Kapitels werden wir einen kurzen Blick auf die Allgemeine Relativitätstheorie werfen. Am bedeutungsvollsten ist bei der Speziellen Relativitätstheorie die Aussage, daß der Ablauf der Zeit nicht absolut ist. Newton schrieb in seinem Werk *Principia*: »Die absolute, wahre und mathematische Zeit fließt gleichmäßig, aus sich selbst heraus und aufgrund ihres eigenen Wesens, ohne Beziehung zu irgendwelchen äußeren Dingen.« Bemerkenswert ist nun, daß inzwischen zahlreiche Experimente zum Überprüfen der Speziellen Relativitätstheorie bewiesen, daß diese Aussage Newtons nicht zutrifft. Die Zeit vergeht für eine »ruhende« Person nicht ebenso schnell wie für eine Person, die sich relativ zu ihr mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Trotzdem ist für jede der beiden Personen ihre Zeit die reale, aktuelle und normale Zeit.

Mit dem Entdecken des Relativitätsprinzips wurde offensichtlich, daß Raum und Zeit keine separaten Aspekte, sondern als Raum-Zeit miteinander verknüpft sind. Newtons Physik war nicht falsch; sie mußte nur ergänzt werden, damit die Beziehung zwischen Bewegung und Raum-Zeit erklärbar wurde. Die Spezial-

le Relativitätstheorie widerlegte die Newtonsche Physik nicht, sondern zeigte, daß deren Prinzipien unter extremen Bedingungen nicht gelten. Wenn Newton von einer Entfernung sprach, dann meinte er den räumlichen Abstand, der zu einem gegebenen Zeitpunkt vorlag. Niemand, auch Newton selbst nicht, kam auf den Gedanken, es könnte irgendeine Unklarheit über die »Zeit« geben. Die von Newton entdeckten Gesetzmäßigkeiten, die er 1687 in den *Principia* darlegte, enthielten alles, was die Physiker in den folgenden zwei Jahrhunderten für ein erfolgreiches Arbeiten benötigten. Galilei und Newton verstanden den Begriff »Relativität« so, wie er seinerzeit üblich war. Einige der von ihnen entwickelten Vorstellungen bestanden in Verfeinerungen der seit der griechischen Antike bekannten Konzepte, während andere eher eine Korrektur der alten Auffassungen darstellten. Galileis und Newtons Gesetze hinsichtlich der Relativität wurden allgemein akzeptiert, bevor Einsteins Theorie auf den Plan trat. Die folgenden beiden Beispiele sollen das »Galileische Relativitätsprinzip« (auch »Newtonsches Relativitätsprinzip« genannt) verdeutlichen, das unserer Alltagserfahrung entspricht:

1. Wenn eine Person den Gang in einem Eisenbahnwagen entlanggeht, und zwar in gleicher Richtung wie der Zug fährt, dann ist ihre Geschwindigkeit relativ zur Erde gleich der Summe der Geschwindigkeiten des Zuges und seines Gehens. Wenn der Zug mit 100 Kilometern pro Stunde fährt und die Person mit 6 Kilometern pro Stunde vorwärts geht, dann bewegt sie sich relativ zur Erde mit 106 Kilometern pro Stunde.
2. Wenn eine in einem fahrenden Zug stehende Person einen Gegenstand vom Dach auf den Boden des Waggons fallen läßt, dann wird der Gegenstand relativ zum Zug und zur Person senkrecht herabfallen. Aber relativ zur Erde bzw. zu einem am Bahnsteig stehenden (»ruhenden«) Beobachter hat der Gegenstand eine gekrümmte Falllinie, denn seine vertikale Geschwindigkeit überlagert sich mit der horizontalen Bewegung des Zuges, während die Fallgeschwindigkeit mit der Zeit zunimmt; siehe Abbildung 8.1.

Diese beiden Beispiele machen klar, daß man zum Beschreiben von Bewegungen sogenannte Bezugssysteme benötigt. Dies wa-

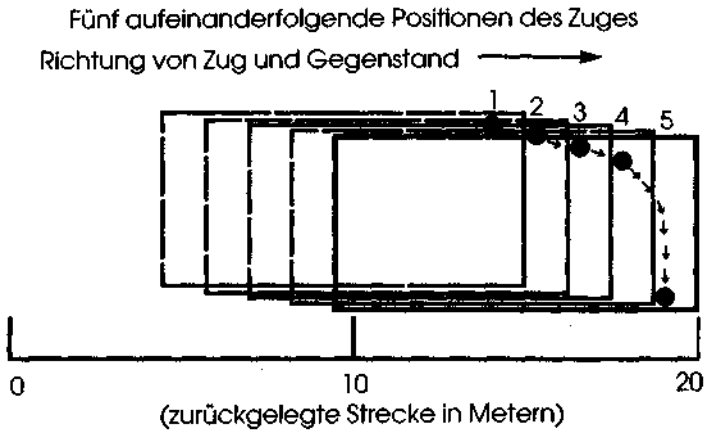


Abb. 8.1. Das Galileische Relativitätsprinzip. Hier wird ein Gegenstand in einem fahrenden Zug fallen gelassen.

ren hier zum einen der Zug und zum anderen die Erde. Als Bezugssystem kommen - je nach der Art der Bewegungen - beispielsweise auch ein Planet, ein Satellit oder ein anderer Himmelskörper in Frage.

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts wurden nach und nach einige Tatsachen entdeckt, die den anerkannten Gesetzen der Physik (darunter dem Galileischen Relativitätsprinzip) widersprachen oder von ihnen nicht berücksichtigt wurden. Fünf wichtige Beispiele dafür sind:

- a) Die Lichtgeschwindigkeit unterliegt nicht denselben Gesetzen wie die Geschwindigkeiten von Gegenständen.
- b) Die spezifische Wärmekapazität molekularer Gase weicht von den Werten ab, die gemäß der Newtonschen Theorie zu erwarten waren.
- c) Die Radioaktivität beweist, daß die Materie unvorhersagbaren Instabilitäten unterliegt.
- d) Die Umlaufbahn des Planeten Merkur ist mit den Newtonschen Bewegungsgesetzen unvereinbar.
- e) Die von Atomen emittierte elektromagnetische Strahlung, darunter auch sichtbares Licht, ist in der klassischen Physik nicht erklärbar.

Erstmals seit Newtons Zeiten mußten die Physiker die Gültigkeit des klassischen Regelwerks in Frage stellen, auf das sie so fest vertraut hatten. Die experimentellen Vorrichtungen und die Meßgeräte wurden immer genauer und raffinierter, so daß man die sehr geringfügigen Abweichungen gegenüber den erwarteten Ergebnissen überhaupt erkennen konnte. Eine der Diskrepanzen betraf die Lichtgeschwindigkeit und konnte erst 1905 mit Hilfe von Einsteins Spezieller Relativitätstheorie geklärt werden. Wie schon bemerkt, besagt diese Theorie, daß das Vergehen der Zeit nicht absolut ist. Sie beruht im Grunde auf der Kombination des Galileischen Relativitätsprinzips mit dem von Einstein entdeckten Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit. Danach hat das Licht im Vakuum stets dieselbe Geschwindigkeit (rund 300000 Kilometer pro Sekunde), unabhängig von der Bewegung des Beobachters oder der Lichtquelle.

Einsteins Entdeckung dieses Sachverhalts geht unmittelbar auf die Frage zurück, die er sich als Jugendlicher gestellt hatte. In seinen späteren autobiographischen Aufzeichnungen erklärte er, warum er so sicher war, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant ist:

*»Nach zehn Jahren der Überlegung resultierte dieses Prinzip aus einem Paradoxon, über das ich schon im Alter von 16 Jahren nachgedacht hatte: Wenn ich einem Lichtstrahl mit der Geschwindigkeit [des Lichts] folge, dann sollte ich solch einen Strahl als ein räumlich schwingendes elektromagnetisches Feld wahrnehmen, das sich in Ruhe befindet. Aber so etwas schien es nicht zu geben. (...) Von Anfang an war mir intuitiv klar, daß (...) alles gemäß denselben Gesetzen geschehen müßte, die für einen relativ zur Erde ruhenden Beobachter gelten. Denn wie könnte sonst der erste Beobachter (...) feststellen, daß er sich im Zustand einer schnellen, gleichförmigen Bewegung befindet?«*

Der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) hatte 1861 und 1865 zwei berühmt gewordene Aufsätze publiziert. Darin beschrieb er die Existenz unsichtbarer elektromagnetischer Strahlung bzw. elektromagnetischer Wellen, zu denen (wie sich später herausstellte) auch Röntgenstrahlen, Radiowellen und

Lichtwellen gehören. Maxwell hatte gezeigt, daß Lichtwellen der sichtbare Teil dieses Spektrums sind und daß sich alle elektromagnetischen Wellen mit 300000 Kilometern pro Sekunde ausbreiten. Einstein postulierte nun, daß die Geschwindigkeit dieser Wellen (auch des Lichts) konstant sein muß, also keine relative Größe sein kann. Die Geschwindigkeit des Beobachters sollte demnach die Geschwindigkeit derartiger Wellen relativ zu ihm nicht beeinflussen. Dann waren entweder Maxwells Gleichungen falsch, oder die Newtonsche Mechanik war nicht anwendbar. Um diesen Widerspruch zu lösen, entwickelte Einstein die Spezielle Relativitätstheorie. Nach ihr sind die Maxwellschen Gleichungen korrekt, und die Newtonsche Physik vermag den Zusammenhang von Raum und Zeit nicht zu erklären, wenn ein Gegenstand oder ein Beobachter sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

### **Das Michelson-Morley-Experiment stützt die Relativitätstheorie** *Schwingungen im Äther*

Daß die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, war schon zwei Jahrzehnte vor Einsteins Relativitätstheorie bewiesen worden. Zwischen 1881 und 1887 führte der deutsch-amerikanische Physiker Albert A. Michelson (1852-1931) eine Reihe von Experimenten mit Licht durch, die weiter unten beschrieben werden. Der Höhepunkt seiner Arbeiten war ein Versuch, den er 1887 zusammen mit dem amerikanischen Chemiker Edward W. Morley (1838-1923) vornahm. Dieser berühmt gewordene Versuch wird heute allgemein das Michelson-Morley-Experiment genannt. Allerdings wurden die Ergebnisse zunächst nicht korrekt interpretiert. Erst in Verbindung mit Einsteins Spezieller Relativitätstheorie erhielt man aus dem Michelson-Morley-Experiment die Werte, die das Postulat von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - entscheidend für das Verständnis der Relativitätstheorie - untermauerten.

Auch nachdem Maxwell im vorigen Jahrhundert das Wesen der elektromagnetischen Strahlung geklärt hatte, glaubten die

meisten Physiker noch, daß der Raum von einer unsichtbaren, gewichtslosen Substanz erfüllt sei, die in Wellenform schwingen und damit die Ausbreitung des Lichts ermöglichen sollte, ähnlich wie sich der Schall durch Luftschwingungen ausbreitet. Die vermutete Substanz nannte man »lichttragenden Äther« oder einfach »Äther«. Obwohl Maxwell zeigte, daß das Licht selbst ein elektromagnetisches Phänomen ist - also eine Welle und kein Teilchen -, hielt man an der Überzeugung fest, daß eine Art Äther die Lichtwellen stütze oder mit sich trage.

Die frühen Experimente von Michelson und das Michelson-Morley-Experiment von 1887 sollten eigentlich die Existenz des Äthers beweisen. Dazu wurde die Differenz der Geschwindigkeiten gemessen, die das Licht entgegen der Richtung der Erdbewegung um die Sonne und in der dazu senkrechten Richtung hat. Wäre die Lichtgeschwindigkeit nicht konstant, so erwartete man nach dem Galileischen Relativitätsprinzip, daß sich bei geeigneter Anordnung eine meßbare Differenz ergibt, denn ein Lichtstrahl müßte auf der Erde entgegen der Richtung der Erdbewegung langsamer sein als quer dazu. Die Geschwindigkeitsdifferenz wäre gleich der Geschwindigkeit der Erdbewegung von über 107000 Kilometern pro Stunde und damit gleich der Geschwindigkeit der Erde relativ zum Äther. (Das Prinzip ist das gleiche wie bei einem Schiff, das stromaufwärts fährt und dessen Geschwindigkeit relativ zum Ufer um die Fließgeschwindigkeit des Wassers geringer ist als seine Geschwindigkeit relativ zum Wasser.) Im Jahre 1887 wiederholten Michelson und Morley in Cleveland also die früheren Experimente von Michelson und erhielten dasselbe Ergebnis: Sie konnten keine Bewegung der Erde relativ zum Äther feststellen.

Wenn man die Äthertheorie einmal außer acht läßt, wie es Michelson, Morley und andere Wissenschaftler hätten tun sollen, dann bewiesen die Experimente, daß die Lichtgeschwindigkeit stets und in allen Richtungen dieselbe ist. Das bedeutet, das Licht ändert seine Geschwindigkeit nicht, ob es sich nun »stromaufwärts« oder »stromabwärts« durch den scheinbaren Äther ausbreitet. Also war nach heutigen Begriffen die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zweifellos bestätigt.

Im Jahre 1907 erhielt Michelson als erster Amerikaner einen

Nobelpreis für wissenschaftliche Leistungen, und zwar für seine spektroskopischen und metrologischen Untersuchungen (die Metrologie ist die Lehre vom Messen und den Maßsystemen). Michelsons Arbeit gilt heute als sehr bedeutender Beitrag zur Physik, aber er selbst hielt sie für einen totalen Fehlschlag; denn er hatte ja sein Ziel nicht erreicht, die Geschwindigkeit der Erde relativ zum Äther zu messen.

**Wenn die Lichtgeschwindigkeit absolut ist,  
kann die Zeit es nicht sein  
*Bewegte Bezugssysteme***

Wir nehmen das Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit nun als gegeben an und kehren zurück zur Speziellen Relativitätstheorie. Ihre zentrale Aussage lautet: *Das Vergehen der Zeit ist nicht absolut*. Diese Theorie betrifft nur die Beziehung zwischen zwei Körpern, von denen sich der eine mit hoher Geschwindigkeit dem anderen nähert oder sich von ihm entfernt. Wir können auch sagen, der eine Körper bewegt sich relativ zum anderen - daher hat die Theorie auch ihren Namen. Natürlich gäbe es in einem Universum mit nur einem Körper keine Relativität, weil dort nichts wäre, relativ zu dem er sich bewegen könnte. Aber in unserem Universum kann ein Gegenstand oder ein Beobachter relativ zu einem anderen Gegenstand oder Beobachter ruhen, der sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Dann führt die Bewegung des zweiten Gegenstands oder Beobachters relativ zum ersten dazu, daß für jeden der beiden Beobachter die Zeit beim jeweils anderen Beobachter verschieden schnell vergeht. Wenn zwei Beobachter A und B relativ zueinander ruhen und sich ein Beobachter C relativ zu ihnen mit hoher Geschwindigkeit bewegt, dann stellen A und B fest, daß bei C die Zeit langsamer vergeht.

Einstein entwarf die Spezielle Relativitätstheorie zunächst nur begrifflich. Dann entwickelte er den mathematischen Beweis, der sie stützte. In unserem Jahrhundert lieferten zahlreiche Experimente empirische Indizien für diese Theorie. Wir werden uns hier keine der Formeln oder Experimente ansehen, sondern uns

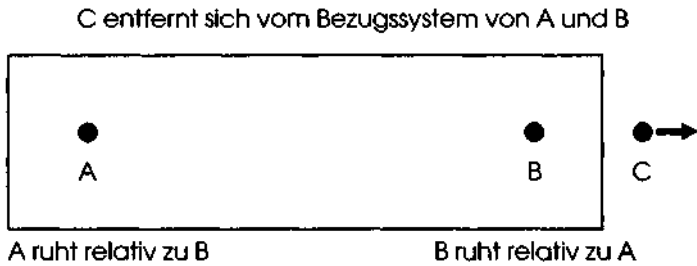


Abb. 8.2: Das Bezugssystem von A und B relativ zu C

die Gegebenheiten anhand von Abbildung 8.2 klarmachen. Hier seien A, B und C je ein Beobachter oder auch ein Gegenstand. Die Beobachter A und B befinden sich in einem Bezugssystem, also in einem physikalischen Gebiet oder Raum, und bewegen sich relativ zueinander nicht. Der Beobachter C befindet sich in einem anderen Bezugssystem.

Nun soll sich der Abstand zwischen dem Paar A-B und C rasch vergrößern. Das bedeutet, C entfernt sich schnell vom Bezugssystem von A und B. Es gibt nun drei Möglichkeiten, die Relation zwischen A, B und C zu beschreiben:

- (1) C bewegt sich weg von A-B.
- (2) A und B bewegen sich weg von C.
- (3) Das Paar A-B und C bewegen sich voneinander weg.

Wir wählen die Variante (1), bei der A und B »ruhen« und C sich von ihnen weg bewegt, wie es in Abbildung 8.2 dargestellt ist. Obwohl natürlich (2) und (3) gleichermaßen zutreffende Beschreibungen sind, haben wir mit (1) ein nützliches Modell, bei dem das Bezugssystem und unser Standpunkt übereinstimmen.

Jetzt soll ein Lichtstrahl im Bezugssystem A-B von A nach B gelangen. Zum Zurücklegen dieser Entfernung benötigt er eine gewisse Zeitspanne.

Was geschieht aber, wenn sich C schnell vom Bezugssystem A-B weg bewegt, wie es in Abbildung 8.2 angedeutet ist? Wir kennen die Lichtgeschwindigkeit von A nach B, also innerhalb des betreffenden Bezugssystems. Wir erwarten nun aufgrund unserer Alltagserfahrung, daß die Geschwindigkeit dieses Lichtstrahls



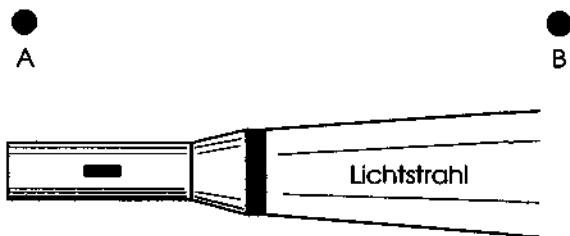


Abb. 8.3: Ein Lichtstrahl im Bezugssystem A-B

im Bezugssystem C, also von C aus gesehen, geringer ist, weil sich C von A-B entfernt; siehe Abbildung 8.4. Diese Erwartung beruht auf dem Galileischen Relativitätsprinzip. Danach wäre die Geschwindigkeit, mit der sich die Bezugssysteme voneinander entfernen, von der Lichtgeschwindigkeit zu subtrahieren. Dies ergäbe die »Netto«-Geschwindigkeit des Lichtstrahls, wie sie von C gemessen würde.

Aber wir kennen ja jetzt das Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit, und das muß irgendwie mit der relativen Bewegung der beiden Bezugssysteme vereinbar sein. Dabei hilft uns die Spezielle Relativitätstheorie, nach der das Vergehen der Zeit von den Beobachtern in verschiedenen Bezugssystemen »individuell« wahrgenommen wird. Weil die Geschwindigkeit des Lichts konstant ist, kann das Zeitelement *nicht* konstant sein. Es muß vielmehr von der Relation des Beobachters zur bewegten Lichtquelle abhängen. Wir befinden uns auf der Erde alle im selben Bezugssystem und bewegen uns auf ihr ziemlich langsam, verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit. Daher ist der Ablauf der Zeit gleichmäßig und ändert sich nicht. Befänden wir uns dagegen im Bezugssystem A-B und bewegte sich C mit Lichtgeschwindigkeit auf uns zu, dann bewegte sich ein Lichtstrahl von C nach A-B nicht mit dem Doppelten der normalen Lichtgeschwindigkeit auf uns (auf A-B) zu. Mit anderen Worten: Wir dürfen die Bewegungsgeschwindigkeit und die Lichtgeschwindigkeit nicht addieren oder subtrahieren, weil die Lichtgeschwindigkeit konstant ist.

Die Zusammenhänge werden noch deutlicher, wenn man sich folgende drei Fragen überlegt:



Abb. 8.4: Ein Lichtstrahl gelangt vom Bezugssystem A-B nach C

1. Wie schnell muß sich jemand bewegen, damit seine Geschwindigkeit sich darauf auswirkt, wie schnell die Zeit gegenüber einem »ruhenden« Beobachter vergeht? Angenommen, es befinde sich je eine Uhr im Bezugssystem A-B und im Bezugssystem C. Wie schnell muß sich C relativ zu A-B bewegen, damit die beiden Uhren, vom jeweils anderen Bezugssystem aus gesehen, unterschiedlich schnell gehen?
2. Wie kann man diese neue Wahrnehmung der Zeit visualisieren und verstehen?
3. Welche physikalischen Auswirkungen hat es auf die Materie, wenn sie sich mit einer so hohen Geschwindigkeit bewegt?

Wenn man die Antworten auf diese drei Fragen einmal verstanden hat, kennt man die begriffliche Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie.

### **Erste Frage:**

#### **Welche Beziehung besteht zwischen Geschwindigkeit und Zeitablauf?**

##### *Der relativistische Faktor*

Einsteins Theorie liefert für die Geschwindigkeit der Person, die den Gang im Eisenbahnwagen entlang geht, ein anderes Ergebnis als das Galileische Relativitätsprinzip. Diese Differenz ist jedoch so winzig, daß sie unmeßbar ist. Wenn sich die Beobachter oder Objekte aber relativ zueinander mit mindestens der halben Lichtgeschwindigkeit bewegen, dann ergibt nur Einsteins Theorie einen korrekten Wert, das heißt, die erwähnte Differenz wäre merklich. Das ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

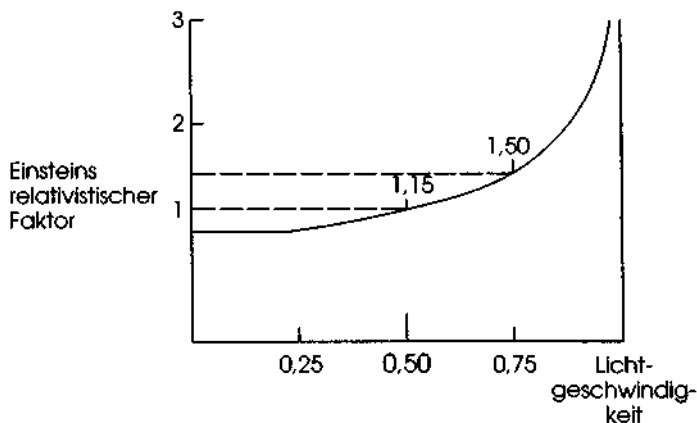


Abb. 8.5: Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zeitdehnung

Die im Alltag auftretenden Effekte werden mit Hilfe des Galileischen Relativitätsprinzips und der Newtonschen Physik angemessen beschrieben, weil die Geschwindigkeiten viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind. Aber aus der Kurve von Abbildung 8.5 geht hervor, daß bei einem Körper, der sich beispielsweise mit halber Lichtgeschwindigkeit bewegt, die Auswirkung auf den Zeitablauf deutlich wird. Das bedeutet, bei höheren Geschwindigkeiten werden die Zeitintervalle (die Zeitspannen zwischen Ereignissen) stärker beeinflusst. Mit anderen Worten: Die Zeit vergeht in einem der Bezugssysteme langsamer. Diesen Effekt nennt man Zeitdilatation oder Zeitdehnung. Wir können der Abbildung 8.5 beispielsweise folgendes entnehmen: Wenn sich ein Beobachter (zum Beispiel C in Abbildung 8.2) mit der halben Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem A-B entfernt, dann sind von A-B aus gesehen in seinem Bezugssystem die Zeitintervalle zwischen zwei Ereignissen um 15 Prozent kürzer als im ruhenden Bezugssystem A-B. Eine Stunde in dem sich mit halber Lichtgeschwindigkeit entfernenden Bezugssystem C entspricht damit für eine Person im ruhenden Bezugssystem 115 Prozent dieser Zeitspanne, also einer Stunde und neun Minuten. Der »relativistische Faktor« in Abbildung 8.5, für den Einstein eine Formel aufstellte, gibt das Verhältnis zwischen den beiden Zeitspan-

nen an. Das Leben eines mit hoher Geschwindigkeit reisenden Raumfahrers wird relativ zu einem auf der Erde Verbliebenen länger sein. Aber der mit halber Lichtgeschwindigkeit Reisende und seine Mitfahrer werden keinen Unterschied spüren, weil dies ihre wirkliche Zeit ist. Es gibt keine selbst wahrzunehmende Veränderung des Zeitablaufs. Jeder hat in seinem Bezugssystem seine wirkliche Zeit, und die Unterschiede sind nur aus relativ dazu bewegten Bezugssystemen zu erkennen. Bewegte Uhren gehen langsamer.

Die Vorstellung, daß sich das Vergehen der Zeit je nach der Geschwindigkeit ändern kann, widerspricht jeglicher Erfahrung aus dem Alltag. Die Zeit erscheint uns so sicher, so konstant und so »unrelativ«, daß alles Herumrechnen an ihr schwer zu akzeptieren ist. In der Newtonschen Physik waren die Masse und die Länge physikalischer Objekte sowie die Zeit die einzigen fundamentalen Größen, die man zum Beschreiben mechanischer Bewegungen benötigte. Einstein fügte nun seinen »relativistischen Faktor« hinzu. Ferner bewies er, daß bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit die Zeit im bewegten Bezugssystem wirklich (nicht nur theoretisch) langsamer vergeht, verglichen mit dem Vergehen der Zeit im ruhenden Bezugssystem.

Der relativistische Faktor dient also zur Anpassung oder Korrektur der Zeiten in beiden Bezugssystemen. Ohne eine solche Anpassung stünden wir den unvereinbaren Ergebnissen gegenüber, die dem Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit nicht entsprechen. Eigentlich müßte man Einsteins Prinzip besser »Absolutismus« oder »Spezielle Theorie der Nicht-Relativität« nennen, denn er suchte ein vereinigendes Prinzip und wollte die relative Natur der fundamentalen Newtonschen Gesetze beseitigen. Die Bezeichnung »Spezielle Relativitätstheorie« wurde übrigens nicht von Einstein, sondern von anderen geprägt.

Ein weiteres Beispiel soll die Verknüpfung zwischen Geschwindigkeit und Zeit illustrieren und gleichzeitig verdeutlichen, daß das Vergehen der Zeit nicht absolut ist. Wir nehmen an, daß sich die Beobachter A und B im selben Bezugssystem A-B befinden und einen großen, jedoch konstanten Abstand voneinander haben. Nun richtet A seine Taschenlampe auf B und schaltet

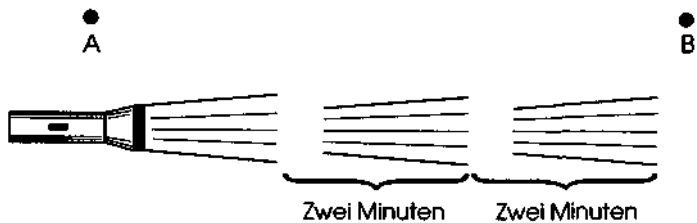


Abb. 8.6: Zwei-Minuten-Intervalle zwischen den einzelnen Lichtstrahlen

sie alle zwei Minuten für einen Augenblick ein. Es gelangt also jeweils ein weißer Lichtstrahl zu B, den dieser alle zwei Minuten auch sieht.

Weil sich die Positionen von A und B im Bezugssystem A-B nicht ändern, erscheint nach jeweils zwei Minuten ein neuer Strahl bei B. Wir wissen nicht, wie lange der erste Strahl für den Weg von A zu B benötigt. Das können einige Sekunden oder auch zehn Jahre sein. Darauf kommt es auch gar nicht an, weil für uns nur das Zwei-Minuten-Intervall zwischen den Anfängen aufeinanderfolgender Strahlen wichtig ist.

Weiterhin nehmen wir an, daß ein Beobachter C sich von A in Richtung auf B entfernt, und zwar mit einer konstanten Geschwindigkeit. Dabei beobachtet er die von A ausgesandten Strahlen (siehe Abbildung 8.7). Natürlich erreicht jeder Strahl erst C und dann B, weil C sich näher an A befindet. Aber selbst bei einer sehr geringen Geschwindigkeit von C relativ zu A sieht C die Strahlen von A in Zeitabständen von über zwei Minuten, denn er entfernt sich ja von A.

Angenommen, C hätte sofort angehalten, als der erste Strahl ihn erreichte. Dann hätte der den zweiten Strahl exakt zwei Minuten später gesehen, d. h. das Zeit-Intervall hätte zwei Minuten betragen, genau wie beim Senden durch A und beim Empfangen durch B. Aber C bewegt sich ja von A weg. Daher muß jeder weitere Strahl von A eine etwas längere Strecke bis zu C zurücklegen als der vorangegangene Strahl. Mit anderen Worten: Der zweite Strahl kommt erst über zwei Minuten nach dem ersten bei C an. Dies hat alles noch nichts mit Einsteins Relativitätsprinzip zu tun. Das interessante Phänomen ist nicht das, was zwischen A

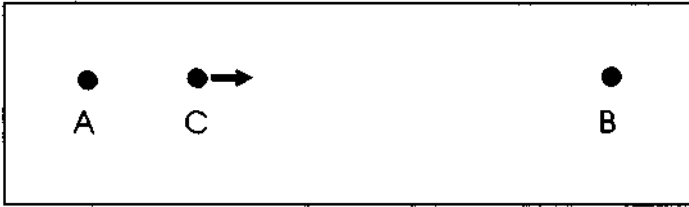


Abb. 8.7: Der Beobachter C bewegt sich von A nach B und beobachtet währenddessen die von A ausgesandten Lichtstrahlen (vgl. Abb. 8.6).

und C geschieht, sondern die Auswirkung der Speziellen Relativität auf C und B. Dies soll nun gezeigt werden.

Wir nehmen zusätzlich folgendes an: Die Geschwindigkeit von C beträgt 75 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, und er führt eine eigene Lichtquelle mit sich. Mit dieser richtet er einen gelben Lichtstrahl in Richtung auf B, und zwar schaltet er ihn exakt in dem Augenblick ein, in dem der weiße Lichtstrahl von A ihn erreicht; siehe Abbildung 8.8. Obwohl sich C bewegt, hat der von ihm ausgesandte Lichtstrahl Lichtgeschwindigkeit und bewegt sich mit dieser zu B hin. Frage: Wird der gelbe Lichtstrahl von C früher bei B ankommen als der weiße Lichtstrahl von A? - Nein, das wäre nach dem zuvor Gesagten unmöglich.

Beide Lichtstrahlen werden B gleichzeitig erreichen, denn sie gehen im selben Augenblick von C aus (wie wir ja voraussetzen) und haben beide Lichtgeschwindigkeit. Das gilt, obwohl beide Strahlen von verschiedenen Quellen ausgehen, die sich auch nicht im selben Bezugssystem befinden. Der weiße Lichtstrahl geht von A im Bezugssystem A-B aus und der gelbe von C in dessen bewegtem Bezugssystem.

Wenden wir jetzt Einsteins relativistischen Faktor gemäß Abbildung 8.5 an. Bei 75 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beträgt er 1,5. Daher wird dasselbe Zwei-Minuten-Intervall für A und B nun für C um 50 Prozent größer sein. Das bedeutet, für C liegt ein Drei-Minuten-Intervall vor. Die weißen Strahlen (von A) kommen alle zwei Minuten bei B im Bezugssystem A-B an, während die gelben Strahlen (von C) alle drei Minuten bei B eintreffen. Wie können dann die beiden Lichtstrahlen gleichzeitig B erreichen? Die einzig mögliche Antwort ist die, daß die »Zeit« für

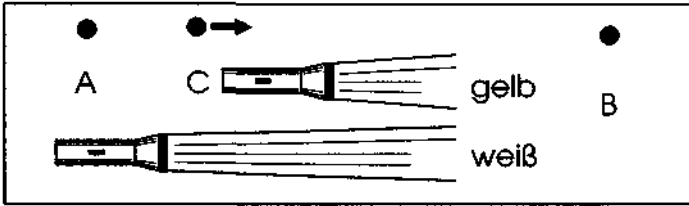


Abb. 8.8: Hier bewegt sich C von A weg, hin zu B und richtet einen gelben Lichtstrahl auf diesen.

A und B nicht dieselbe »Zeit« ist wie für C. Weil die weißen und die gelben Lichtstrahlen verschiedene Zeitintervalle benötigen, um dieselbe Entfernung zurückzulegen und von den zwei separaten Beobachtern wahrgenommen zu werden, kann die Zeitkomponente nicht konstant sein.

Solange A und B zueinander in derselben unveränderlichen Beziehung stehen (sich relativ zueinander nicht bewegen), stimmen ihre Zeitintervalle überein. Aber ihre Wahrnehmung der vergangenen Zeit wird niemals dieselbe sein wie für einen Beobachter, der sich (mit hoher Geschwindigkeit) auf sie zu oder von ihnen weg bewegt. Dies ist die einzig mögliche Erklärung für die Tatsache, daß B den weißen Lichtstrahl von A im selben Augenblick wahrnimmt wie den gelben Lichtstrahl von C, obwohl dieser gelbe Strahl gegenüber dem weißen den »Vorteil« der *zusätzlichen* Geschwindigkeit von C in Richtung auf B hat. Aus der Perspektive von B als Empfänger beider Strahlen treffen beide exakt gleichzeitig ein: In dem Augenblick, in dem der weiße Strahl bei C ankommt und diesen wieder »verläßt«, gesellt sich der gelbe Strahl als Begleiter hinzu. Also müssen beide Strahlen alle zwei Minuten B erreichen. Aber aus der Perspektive von C verlassen sie ihn alle drei Minuten. Mit anderen Worten: Im Bezugssystem von C sind die *Zeit-Intervalle* um 50 Prozent länger. Die Geschwindigkeit, mit der die Zeit vergeht, ist für C geringer als für A und B. Diesen Effekt nennt man, wie schon erwähnt, *Zeitdehnung*.

Kehren wir einen Moment zum Galileischen Relativitätsprinzip zurück und stellen uns Bälle statt der Lichtstrahlen vor: A wirft einen weißen Ball auf B zu, und in dem Augenblick, in dem

dieser Ball über C hinwegfliegt, wirft C (der sich ja auf B zubewegt) einen gelben Ball auf B zu. Nun wollen wir berechnen, mit welcher Geschwindigkeit C den gelben Ball werfen muß, damit dieser gemeinsam mit dem weißen Ball die (restliche) Entfernung bis B zurücklegt. Dabei müssen wir natürlich die Geschwindigkeit von C berücksichtigen. Beispielsweise bewegt sich C mit 20 Kilometern pro Stunde, und der weiße Ball fliegt mit 50 Kilometern pro Stunde. Dann muß C seinem gelben Ball eine Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde verleihen, damit er zusammen mit dem weißen Ball auf B zufliegt. Aber gemäß der Speziellen Relativitätstheorie ist die Geschwindigkeit der Bälle keine Variable in unserer Berechnung, sondern unveränderlich (denn die Lichtgeschwindigkeit ist konstant); daher besteht keine Möglichkeit, die Geschwindigkeit der Lichtquelle zu berücksichtigen.

### **Zweite Frage:**

#### **Wie ist dieser Zeitbegriff zu veranschaulichen?**

*Kauf von »Zeiteinheiten« mit zwei verschiedenen Währungen*

Um die Zeitdehnung begrifflich zu erklären, können wir den Unterschied beider Bezugssysteme mit dem Wechselkurs zweier Währungen vergleichen. Wie jeder Auslandsreisende weiß, gilt an jedem Tag ein bestimmter Umrechnungskurs der heimischen Währung in die Währung eines bestimmten anderen Landes. Nehmen wir an, alle US-Amerikaner (beispielsweise unsere Beobachter A und B) befänden sich im »ruhenden« Bezugssystem auf der Erde. Der Beobachter C sei ein Raumfahrer kanadischer Nationalität, der sich - wie alle Kanadier - relativ zu Amerika mit halber Lichtgeschwindigkeit bewege. Schließlich sollen alle käuflichen Waren, zu denen auch die sehr wertvolle »Ware« Zeit gehören soll, in beiden Ländern denselben Preis haben. Das bedeutet, eine Stunde Zeit kostet in den Vereinigten Staaten ebenso viele US-Dollar, wie sie in Kanada kanadische Dollar kostet. In dieser hypothetischen Situation bewirkt der aktuelle Umrechnungskurs zwischen beiden Währungen folgendes:



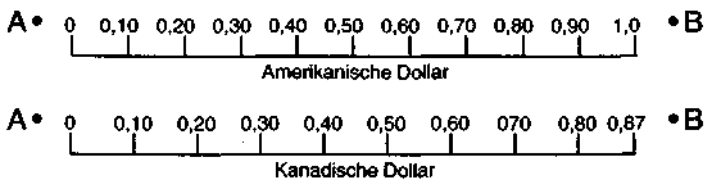


Abb. 8.9: Der Wechselkurs in Analogie zur Zeitdehnung

- Ein US-Dollar entspricht 0,87 kanadischen Dollar. Daher muß ein Raumfahrer (Kanadier) nur 0,87 kanadische Dollar ausgeben, um 1,00 US-Dollar oder US-amerikanische Waren in diesem Wert zu kaufen.
- Umgekehrt müssen A oder B (US-Amerikaner) 1,15 US-Dollar ausgeben, um 1,00 kanadische Dollar oder kanadische Waren in diesem Wert zu kaufen. Demnach muß ein Amerikaner mehr US-Dollar ausgeben, als ein Kanadier kanadische Dollar, um gleichwertige Waren zu kaufen.

Dieser Vergleich ist in Abbildung 8.9 dargestellt.

Wenn wir jetzt in unseren Überlegungen das Geld durch die Zeit ersetzen, dann erkennen wir, daß der Raumfahrer C und seine mitreisenden Kanadier mehr »Zeit« kaufen können als die auf der ruhenden Erde befindlichen US-Amerikaner A oder B. Anders gesagt: Die Raumfahrer haben die wertvollere Währung bzw. die größere Kaufkraft. Setzt man den um 15 Prozent höheren Geldwert in eine um 15 Prozent größere Menge an Zeit um, dann kann man statt einer Stunde (60 Minuten) nun 69 Minuten kaufen. Das bedeutet, der Kanadier C benötigt weniger Zeit (weniger seiner Dollar), um die Entfernung von A zu B zurückzulegen, weil seine Zeit wertvoller ist als die der Amerikaner. Wenn ein Amerikaner beispielsweise 100 Jahre benötigte, um von A zu B (in deren Bezugssystem) zu gelangen, dann brauchte der Kanadier dafür nur 87 Jahre seiner Zeit, weil sie für ihn im Vergleich zu der Zeit der ruhenden Amerikaner langsamer vergeht. Also braucht C weniger Zeit (im Bezugssystem A-B gemessen), um dieselbe Entfernung zu überwinden.

Somit spart der kanadische Raumfahrer C an Zeit; man kann auch sagen, er spart an Dollars durch Ausnutzen des Wechselkurs-

ses zwischen Kanada und den Vereinigten Staaten. Durch dieses »Sparen« an Zeit wird das Leben von Raumfahrern relativ zum Leben der Erdbewohner A und B verlängert.

**Dritte Frage:**  
**Was geschieht mit Materie bei extrem hoher  
Geschwindigkeit?**  
*Beobachten von Elektronen auf ihren Umlaufbahnen*

Die Antwort auf diese dritte Frage lautet: Es geschieht nichts. Trotzdem wird der Begriff der Relativität klarer, wenn wir die physikalischen Merkmale von Materie betrachten, die sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Wir wollen die Theorie auf dreierlei Weise mit physikalischen Aspekten der Materie verknüpfen:

- A. mit der Beziehung zwischen allen Bewegungen (auch denen der Elementarteilchen bzw. subatomaren Teilchen) und der Zeitdehnung;
- B. mit der von einem Beobachter in einem anderen Bezugssystem wahrzunehmenden »Längenkontraktion« (entlang der Bewegungsrichtung) von Materie, die sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt;
- C. mit Einsteins Gleichung  $E = mc^2$ , gemäß der die Masse eines Körpers äquivalent zur Energie ist.

**A. Die Bewegung subatomarer Teilchen**

Wir stellen uns einen Gegenstand oder ein Materieteilchen im kanadischen Raumschiff vor, beispielsweise ein Wasserstoffatom mit seinem Elektron, das den Atomkern mit einer bestimmten Geschwindigkeit umrundet. Außerdem stellen wir uns ein gleiches Wasserstoffatom im Bezugssystem des Amerikaners vor, der sich auf der Erde befindet. Jede der beiden Personen soll über eine Vorrichtung verfügen, mit der sie gleichzeitig bei beiden Atomen die Anzahl der Umläufe des Elektrons in einer bestimmten Zeitspanne bestimmen kann. Dann wird sich bei beiden Atomen eine andere Anzahl der Umläufe ergeben. Die Beobachter in dem auf der Erde ruhenden Bezugssystem A-B kommen zu dem Ergeb-

nis, daß das Elektron des Atoms im Raumschiff langsamer umläuft als das Elektron im Atom auf der Erde.

Das Geschwindigkeitsverhältnis ist dasselbe, wie wir es vorhin mit Hilfe des relativistischen Faktors beim Beantworten der ersten Frage berechnet hatten (dieser Faktor gibt die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Zeitdehnung an). Das Ergebnis entspricht ebenso dem Konzept der Zeitdehnung, das wir bei der zweiten Frage besprachen, als wir die beiden Währungen verglichen. Beide Beobachter erkennen diese relativ geringe Differenz, weil ihre Meßgeräte sehr exakt sind. Natürlich konnte Einstein dieses hypothetische Beispiel nicht anführen, weil der Aufbau der Atome im Jahre 1905 noch nicht geklärt war. Die eben vorgestellte Folgerung ist dennoch unausweichlich.

### *B. Die Längenkontraktion*

Der zweite physikalische Effekt bei Bewegungen mit extrem hoher Geschwindigkeit ist die »Längenkontraktion« der Körper in Bewegungsrichtung. Wie wir im Teil 2 dieses Buches gesehen haben, besteht die Materie aus Atomen, deren Struktur unter anderem auf der Wirkung elektrischer Kräfte beruht. Nach den modernen Theorien über den Atombau muß man sich die Elektronen eher als Wellen um den Atomkern vorstellen und nicht als diskrete (separate) Teilchen. In jedem Atom haben die Elektronenwellen oder -wolken einen bestimmten mittleren Radius, auf dem die jeweiligen Atomabstände in den Molekülen oder Festkörpern beruhen. Wenn sich der Abstand der Atome ändert, dann ändern sich auch Größe und Form des betreffenden Körpers.

Daher wird die Gesamtlänge beispielsweise eines Meterstabs durch die mittleren Abstände seiner Atome oder Moleküle bestimmt. Mißt ein ruhender Beobachter die Länge eines Meterstabs, der sich fast mit Lichtgeschwindigkeit an ihm vorbei bewegt, dann stellt er eine geringere Länge fest. Das bedeutet, der Abstand der Atome wird ihm in Richtung der Bewegung verkürzt erscheinen. Auch die Gestalt und die Länge von Meßeinrichtungen hängen demnach von ihrem Bewegungszustand ab. Entsprechendes gilt für die Entfernung, die im obigen Beispiel (Abbildung 8.8) mit den farbigen Lichtstrahlen zwischen den Punkten A und B gemessen wird: Der erhaltene Wert hängt da-

von ab, ob einer der Beobachter A und B die Entfernung bestimmt, oder ob der Beobachter C dies tut, der sich ja mit hoher Geschwindigkeit relativ zu den beiden anderen bewegt.

Beobachter, die sich relativ zueinander bewegen, weisen den Längen- und Zeitintervallen zwischen je zwei Ereignissen also andere Werte zu. Das bedeutet, es können keine absoluten Werte angegeben werden. Die Werte der Masse sowie der Längen- und Zeitintervalle ändern sich stets, wenn sie nicht im selben Bezugssystem ermittelt werden, sondern von einem bewegten Bezugssystem aus. Einsteins relativistischer Faktor hängt von der Geschwindigkeit des betreffenden Körpers ab, während Masse, Länge und Zeit ihrerseits vom relativistischen Faktor abhängen. In der Newtonschen Physik gibt es natürlich keine derartige »Korrektur«, weil Masse, Länge und Zeit in ihr nicht von der Geschwindigkeit abhängen. Aber in Wirklichkeit werden sowohl die gesamte Geometrie des Raumes als auch die Geschwindigkeit, mit der die Zeit vergeht, durch die Geschwindigkeit bestimmt, mit der sich die Materie durch den Raum bewegt. Um es noch einmal zu sagen: Die Geschwindigkeit, mit der die Zeit vergeht, ist kein absolutes Phänomen, sondern ist die Geschwindigkeit der physikalischen Veränderungen im Universum, betrachtet von zwei Bezugssystemen aus, die sich mit konstanter Geschwindigkeit aufeinander zu oder voneinander weg bewegen. Solche Veränderungen umfassen die Bewegung von Uhrzeigern, das Fließen in einem Bach oder irgendwelche anderen physikalischen Bewegungen, aus denen man die »Zeit« ableitet. Das beweist außerdem, daß die Relativität eine physikalische Realität betrifft und keine mentale Wahrnehmung.

### *C. Masse wird zu Energie*

Im Zusammenhang mit seiner Speziellen Relativitätstheorie stellte Einstein die wohl berühmteste physikalische Gleichung auf:  $E = mc^2$ . Sie spiegelt die Erkenntnis wider, daß die einem Körper eigene Masse im Grunde eine latente (verborgene) Energie darstellt. Außerdem kombiniert sie die Prinzipien der Masseerhaltung und der Energieerhaltung; das hatten wir in Kapitel 6 im Zusammenhang mit der Kernenergie und der Entwicklung der Atombombe besprochen. Bis dahin war nicht bekannt, daß

Masse und Energie lediglich zwei Seiten ein und derselben Gleichung sind. Jegliche Masse trägt Energie mit sich, und jegliche Energie trägt zur Masse bei. Die Energie in Form von Licht oder anderer elektromagnetischer Strahlung, also in Form von Photonen (»Lichtteilchen«), ist keine Materie, weil sie nicht aus Atomen aufgebaut ist. Aber sogar Photonen verhalten sich zuweilen so, als hätten sie eine Masse. Schon die Energiemenge, die mit einer winzigen Massemenge verknüpft ist, ist enorm. Das wird durch die Energie deutlich, die bei der Spaltung von Atomkernen freigesetzt wird.

Die *Masse* eines Atoms (oder allgemein Materie) nimmt gemäß dem relativistischen Faktor zu, wenn seine Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Körper, die sich mit extrem hoher Geschwindigkeit bewegen, haben eine hohe Bewegungsenergie (kinetische Energie), die diesen Massezuwachs hervorruft. Energie kann, wie schon erwähnt, in Materie umgewandelt werden. Dagegen ist in der Newtonschen Physik die Masse eines Körpers stets dieselbe. Aber nach der Relativitätstheorie hängt die Masse von der Geschwindigkeit ab. Multipliziert man die Masse des ruhenden Körpers, seine sogenannte Ruhemasse, mit dem jeweiligen relativistischen Faktor, dann erhält man die Masse bei der betreffenden hohen Geschwindigkeit. Man kann auch sagen: Der relativistische Faktor »korrigiert« sozusagen die Beziehung zwischen zwei Körpern, die sich relativ zueinander rasch bewegen. Dieser physikalische Unterschied zwischen ruhender Materie und sehr schnell bewegter Materie gehorcht der Gleichung  $E = mc^2$  in Kombination mit dem relativistischen Faktor. Zudem ist dieser Unterschied ein zwangsläufiger Teil des Wesens der Materie. In unserer Analogie mit dem US- und dem kanadischen Dollar (siehe die oben angeführte zweite Frage) wird die »Masse« des US-Dollars entwertet im Vergleich zur zunehmenden bewegten »Masse« des kanadischen Dollars.

## **Die Allgemeine Relativitätstheorie erklärt die Gravitation**

### *Gravitationswellen beugen das Licht*

Über die Allgemeine Relativitätstheorie ist das Mißverständnis weit verbreitet, sie sei so schwierig, daß nur wenige Menschen sie verstehen können. Das mag wohl der Fall gewesen sein, als Einstein sie im Jahre 1916 vollendete, aber heute trifft es nicht mehr zu. Die Physikprofessoren auf der ganzen Welt lehren sie, und es gibt Tausende wissenschaftlicher Artikel sowie zahlreiche populäre Bücher zu verschiedenen Aspekten dieser Theorie. Allerdings ist die Allgemeine Relativitätstheorie begrifflich schwieriger als die Spezielle, und ihr Verständnis erfordert eine gewisse Vertrautheit mit einigen Prinzipien der theoretischen Physik. Daher werden wir hier nur die wichtigsten Gesichtspunkte kurz zusammenfassen.

In den zehn Jahren nach der Publikation seiner Speziellen Relativitätstheorie im Jahre 1905 arbeitete Einstein an der Erweiterung zur Allgemeinen Relativitätstheorie. Er bemerkte dazu:

*»Die Relativitätstheorie ähnelt einem Gebäude mit zwei getrennten Stockwerken, nämlich der speziellen und der allgemeinen Theorie. Die spezielle Theorie, auf der die allgemeine beruht, gilt für alle physikalischen Phänomene mit Ausnahme der Gravitation. Die allgemeine Theorie betrifft die Gravitation und deren Beziehungen zu den anderen Kräften in der Natur.«*

Die Allgemeine Relativitätstheorie erklärt die Gravitation umfassender, als es die Newtonsche Physik tat. Newton hatte gefunden, daß die Massen von Körpern die Gravitation hervorrufen, und er hatte die Formel zum Berechnen der Gravitationskraft aufgestellt. Einstein erklärte nun aber, warum die Materie eine Schwerkraft bewirkt. Um die Allgemeine Relativitätstheorie zu verstehen, müssen wir noch einmal auf die Bezugssysteme zurückkommen. Einstein fragte sich, welche Bedeutung in der Natur die Bezugssysteme und ihre jeweiligen Bewegungszustände haben. Er kam zu dem Schluß, daß die Bewegungsgesetze völlig unabhängig davon sein müssen, welches Bezugssystem ge-

wählt wird, um die Natur zu beschreiben. Und das ist der zentrale Punkt der Allgemeinen Relativitätstheorie: Die physikalischen Gesetze müssen vollkommen unabhängig von der Wahl des Bezugssystems sein.

Einsteins Suche nach Einheitlichkeit und Einfachheit in den Prinzipien führte ihn zunächst zur Speziellen Relativitätstheorie, und seine späteren Überlegungen sollten in einer vereinheitlichten Feldtheorie münden. Wie hier bereits dargestellt wurde, ist die Spezielle Relativitätstheorie auf Bezugssysteme beschränkt, die sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig aufeinander zu oder voneinander weg bewegen, also nicht beschleunigt oder abgebremst werden. Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert dagegen eine Formel für das Verhalten von Objekten, die sich in irgendeiner Richtung durch den Raum bewegen, sei es mit oder ohne Beschleunigung. Damit liegt ein einheitliches und vereinfachendes Prinzip vor, das sich durch zwei Merkmale auszeichnet: Erstens modifiziert es das Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit, so daß dieses auch die Wechselwirkung mit starken Gravitationsfeldern umfaßt. Zweitens berücksichtigt es die Tatsache, daß alle Körper (ungeachtet ihrer Masse und Zusammensetzung) in einem Gravitationsfeld dieselbe Beschleunigung erfahren.

Zu den wichtigsten Folgerungen, die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie abzuleiten sind, gehören folgende:

1. Jegliche elektromagnetische Strahlung, darunter das Licht, wird durch Gravitationskräfte abgelenkt.
2. Die Umlaufbahn des Planeten Merkur weicht von der Bahn ab, die gemäß den Newtonschen Bewegungsgesetzen berechnet wurde.
3. Eine Uhr auf der Oberfläche eines schweren Körpers geht langsamer als eine identische Uhr im freien Raum.
4. Es existieren Gravitations-Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten; sie gehen von großen beschleunigten Massen aus.

Die ersten drei dieser Aussagen wurden bereits bewiesen, während man nach Belegen für die vierte in verschiedenen Instituten auf der ganzen Welt noch intensiv sucht. Die Allgemeine Relativitätstheorie stellt also eine Erweiterung des physikali-

sehen Gedankengebäudes dar. Sie erklärt die Gravitation bei beschleunigten Bezugssystemen und führt zu der Schlußfolgerung, daß der Raum »gekrümmt« ist. Ferner besagt sie, daß nicht nur Raum und Zeit miteinander verknüpft sind, sondern daß die vollständige Erklärung des Universums die Kombination von Raum, Zeit und Materie erfordert.

## **Das Relativitätsprinzip beeinflusst unser Alltagsleben** *Eine Navigationshilfe*

So merkwürdig und geheimnisvoll das Relativitätsprinzip uns auch erscheinen mag - es hat doch einige praktische Auswirkungen auf unseren Alltag. Beispielsweise öffnete Einsteins Gleichung  $E = mc^2$ , die aus der Speziellen Relativitätstheorie hervorging, den Weg für die Atomforschung. Außerdem spielt sie in der Nuklearmedizin eine Rolle, denn hier dienen radioaktive Substanzen zur Diagnose und Behandlung mancher Krankheiten. So wird das Element Technetium bei der Strahlenuntersuchung von Krebspatienten eingesetzt, um festzustellen, ob sich in den Knochen Metastasen gebildet haben. Technetium kommt in der Erdkruste in Spuren vor (entstanden beim spontanen radioaktiven Zerfall des Urans). Es wurde erst 1937 entdeckt, und zwar als Produkt einer energiereichen Bestrahlung des Elements Molybdän in einem Teilchenbeschleuniger. Die Spezielle Relativitätstheorie, insbesondere die von ihr gedeutete Beziehung zwischen Masse und Energie, ist wesentlich für die Konstruktion von Teilchenbeschleunigern und damit für die Erzeugung einiger Isotope für die Nuklearmedizin.

Ein Beispiel für die Verknüpfung der modernen Technik mit der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das derzeit stetig erweiterte »Global Positioning System« (GPS). Dieses extrem genaue satellitengestützte System zur Navigation und Ortung wurde ursprünglich für das US-Militär entwickelt. Unter anderem diente es im Golfkrieg 1991 zum Orten von Landminen und vermißten Soldaten. Inzwischen wird das GPS für viele nichtmilitärische Zwecke eingesetzt, beispielsweise zum Erkennen tektonischer Bewegungen in der Erdkruste und zum exakten Lokalisieren von



Fahrzeugen an Land oder von Flugzeugen und Schiffen. Außerdem können Energieversorgungsunternehmen mit Hilfe des GPS Schäden an langen Überlandleitungen aufspüren. Schließlich erleichtert das GPS die Blindlandung von Flugzeugen, das Verfolgen der Wanderungen von Tierherden und das Auffinden von Landmarken, die im Lauf der Zeit unter die Erde gerieten. Damit das GPS präzise arbeitet, muß es (gemäß der Speziellen Relativitätstheorie) nach den Satellitenuhren sowie (gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie) nach den Satellitenpositionen exakt ausgerichtet sein. Derzeit gibt es von über fünfzig Herstellerfirmen weltweit rund 350 verschiedene Gerätetypen, die mit spezieller Software die GPS-Signale auswerten. Damit ist die Relativitätstheorie die Grundlage, eines ganzen Industriezweiges geworden. In den nächsten Jahren werden wir alle - unmittelbar oder indirekt - mit dem GPS zu tun haben.

Einstein hatte 1916 seine Arbeiten zur Speziellen und zur Allgemeinen Relativitätstheorie abgeschlossen. Drei Jahre später schrieb er:

*»Niemand soll annehmen, (...) daß das gewaltige Werk Newtons durch diese oder irgendeine andere Theorie ersetzt werden könnte. Seine tieferschürfenden und klaren Ideen werden für alle Zeiten ihre einzigartige Bedeutung als Grundlage unserer gesamten Begriffsstruktur in der Naturphilosophie behalten.«*

Einstein beschrieb die Spezielle Relativitätstheorie bescheiden als »einfach eine systematische Weiterentwicklung der Elektrodynamik von Maxwell und Lorentz«, die deren »mächtigem Gedankengebäude den Schlußstein hinzufügte«. Er erkannte ebenso die Tragweite der Entdeckungen von Marie Curie und Ernest Rutherford an, durch die er auf die Energie aufmerksam wurde, die in der Materie »schlummerte«. Dadurch wiederum kam er zur Gleichung  $E = mc^2$ . Er meinte: »Wir sehen den Zerfall von Atomen, durch den die Natur uns die Energie zeigt, beispielsweise beim Radium.«

Im Alter von 16 Jahren hatte er 1895 seine unschuldige Frage gestellt: »Wie würde mir die Welt erscheinen, wenn ich auf einem Lichtstrahl säße?« Und 1916 konnte er die Entwicklung der

Allgemeinen Relativitätstheorie abschließen. In diesen 21 Jahren vereinigte Einstein verschiedene Konzepte und Erkenntnisse seiner Vorgänger, geradeso als bildete er aus den dissonanten Tönen vieler Musikinstrumente einen harmonischen Klang, ja geradezu eine ganze Symphonie. Deren mächtiges Crescendo gab der ganzen Welt eine Revolution der Physik bekannt. Wie Newton stand auch Einstein auf den Schultern von wissenschaftlichen Größen, und wie bei Newton überstrahlte seine Größe die seiner Vorgänger.

Obwohl Einsteins Ruhm vor allem auf der Relativitätstheorie beruht, schrieb er in seinen frühen Jahren zahlreiche Abhandlungen über verschiedene Probleme. In den elf Jahren zwischen seinen zwei wichtigsten Publikationen über das Relativitätsprinzip verfaßte er sechzig Artikel, darunter über Photochemie, Quantenstatistik der Gase, Thermodynamik, Optik, Molekülphysik und Elektromagnetismus, ferner zur Geschichte und zur Philosophie der Wissenschaft. Zwischen 1915 und 1930 hatten seine Arbeiten über die Quantentheorie großen Einfluß. Wir kennen insgesamt 350 wissenschaftliche Abhandlungen von Einstein.

Er starb am 18. April 1955 im Krankenhaus von Princeton. In seinem Leben konnte er zwei der größten Beiträge zur Physik des 20. Jahrhunderts leisten, und sein Schicksal war eng verknüpft mit dem Aufstieg und Fall Deutschlands, mit der Gründung des Staates Israel, auch mit dem Bau der Atombombe. Zu den zwei Neigungen, die sein Leben beherrschten, sagte er einmal: »Politik ist für den Augenblick. Eine Gleichung ist für die Ewigkeit.«

## TEIL 4

### Der Urknall und die Entstehung des Universums

*Galileis Beobachtungen zu Beginn des 17. Jahrhunderts vermitteln nur eine Ahnung von der Weite des Himmels. Tiefere Erkenntnisse wurden erst in unserem Jahrhundert möglich, als riesige Teleskope die Ausdehnung und die Struktur der Milchstraße enthüllten und noch andere, weit entfernte Galaxien sichtbar machten.*

*Unser Sonnensystem befindet sich in einem Spiralarm der Milchstraße (der Galaxis) und bewegt sich relativ zu deren Zentrum mit einer Geschwindigkeit von rund 220 Kilometern pro Sekunde. Die Milchstraße mit ihren dreihundert Milliarden Sternen dreht sich einmal in 230 Millionen Jahren um ihre Mitte. Trotz ihrer enormen Größe ist sie nur eine von einigen Milliarden Galaxien (Sternsystemen), die alle aus einer gigantischen Explosion hervorgingen, dem sogenannten Urknall. Dessen »Spuren« erkennen wir noch heute in den Spektren der weit entfernten Galaxien und in der kosmischen Strahlung, die das ganze Universum erfüllt. Wenn man die Geschwindigkeit mißt, mit der sich die Galaxien voneinander und von uns entfernen, kann man berechnen, daß das Universum vor rund fünfzehn Milliarden Jahren entstanden sein muß. Das war auch die Geburtsstunde der Raum-Zeit.*

*Aus bestimmten Merkmalen der Elementarteilchen, aus denen die Atome aufgebaut sind, und aus der Struktur des Universums konnte man ableiten, welche Bedingungen unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben müssen. Ebenso weiß man heute einiges über die Ereignisse in der Frühzeit des Weltalls, in der auch die Elemente entstanden, aus denen die Erde und alle Lebewesen auf ihr bestehen. So können wir zurückschauen und nicht nur die*

*Schöpfung erahnen, sondern auch das Aufkommen von Leben auf unserem Planeten.*

*Es bleiben noch zwei Fragen von entscheidender Bedeutung: Woher kam das »Material«, das beim Urknall explodierte? Welches Schicksal ist dem Universum letztlich beschieden? In diesem vierten Teil des Buches betrachten wir die Erforschung des Urknalls und dessen Konsequenzen. Dabei werden wir mögliche Antworten auf diese beiden fundamentalen Fragen kennenlernen.*

## KAPITEL 9

### Das Kosmische Ei

*»Ich sah die Gestalt und die Teile der Milchstraße. Mit Hilfe des Teleskops konnte ich sie so gut erkennen und so genau untersuchen, daß alle Dispute irritierter Philosophen aus den verschiedensten Epochen gegenstandslos wurden. (...) Die Milchstraße ist in Wahrheit nichts anderes als eine Anhäufung unzählig vieler einzelner Sterngruppen. (...) Und was noch bemerkenswerter ist: Die Himmelskörper, die von den Astronomen bisher »Nebel« genannt wurden, erwiesen sich als Gruppen sehr kleiner Sterne. (...) Im Orion-Nebel konnte ich 21 Sterne zählen. Und der Krippen-Nebel (...) ist ein Haufen aus über 40 kleinen Sternen.«*

Galileo Galilei, *Der Sternbote* (1610)

*»Den Urknall umgibt ein so tiefes Geheimnis, daß die Physiker nicht einmal Worte finden, um die richtigen Fragen zu stellen. (...) Das Universum bestand aus (...) vielleicht nur einem Teilchen, das mit sich selbst in einem winzigen, schrecklichen Raum wechselwirkte. Bei der Explosion (...) wurden mit großer Gewalt Materieteilchen gegeneinander geschleudert, die sich zuvor in einem winzig kleinen Raum befanden, kleiner als ein Atomkern.«*

Robert Crease und Charles Mann, *The Second Creation* (1986)

Schauen wir zum Himmel. In der Nacht sind mit bloßem Auge ungefähr 5000 Sterne zu erkennen. Bis vor vier Jahrhunderten hielt man diese unveränderlichen und unbeweglichen Sterne, die Fixsterne, für den gesamten Inhalt des Weltalls, dem man eine endliche Ausdehnung zuschrieb. Abgesehen vom gelegentlichen Auftreten eines neuen Sterns, einer Nova, beispielsweise der 1572

von Tycho Brahe beobachteten, erschienen den Astronomen die Sterne um unser Sonnensystem herum im wesentlichen genauso, wie Aristoteles sie gut 2000 Jahre zuvor beschrieben hatte. Wie wir in Kapitel 2 gesehen haben, konnte Galilei zu Beginn des 17. Jahrhunderts das Teleskop entscheidend verbessern. Bald danach untersuchte er die Sternbilder genauer, zu denen Orion, Perseus, Cassiopeia, Schwan, Adler, Schütze, Zentaur und Carina gehören. Das helle Band am Himmel, das einer Wolke ähnelt, war von den Griechen der Antike mit einem milchigen Fluß verglichen worden. Daher rührt die Bezeichnung Milchstraße. Galilei erkannte im Teleskop, daß die Milchstraße keineswegs aus »Wolken« besteht, sondern aus unzählig vielen Sternen. In der Renaissance begann eine astronomische Revolution, die sich nicht auf die kopernikanische Theorie über das Sonnensystem beschränkte, sondern den ganzen Sternenhimmel zum Gegenstand hatte. Einige Jahrhunderte später erkannte man im Weltall Strukturen, Zusammenhänge und Vorgänge, von denen man in früheren Zeiten nicht einmal etwas ahnen konnte. Man begann zu verstehen, wie Sonne, Planeten und Sterne entstanden und wie sich die Substanzen bildeten, aus denen auf der Erde das Leben hervorging.

### **Astronomen erforschen die Milchstraße und klären unseren Standort in ihr** *In den Spiralarmen*

Der deutsch-englische Astronom Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822) war weitgehend Autodidakt. Er fand 1781 den Planeten Uranus. Das war seit prähistorischen Zeiten die erste Entdeckung eines Planeten. Vier Jahre später - er hatte inzwischen die Positionen mehrerer tausend Sterne katalogisiert - vermutete Herschel als erster, daß unser Sonnensystem Teil eines größeren Systems aus zumindest einigen Millionen Sternen ist und daß dieses Sternensystem eine »dünne Scheibe fast unendlicher Ausdehnung« darstellt. Innerhalb der nächsten zwanzig Jahre erfaßte Herschel bei seinen systematischen Beobachtungen mit dem damals leistungsfähigsten, von ihm selbst konstruierten Teleskop 2500 Sternhaufen in der Milchstraße.

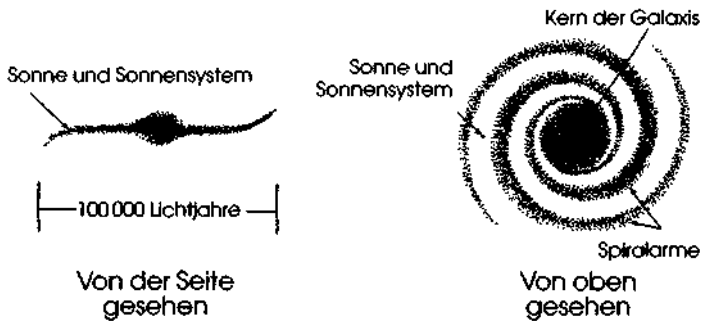


Abb. 9.1: Die Milchstraße (Galaxis)

Im 19. Jahrhundert baute man schon Teleskope mit weitaus höheren Vergrößerungen, so daß die Astronomen nun Millionen von Sternen sahen, die ihren Blicken zuvor verborgen waren. Nun konnten auch die Entfernungen der »näheren« Sterne von der Erde genauer bestimmt werden. Dabei wurde 1845 der achte Planet, Neptun, entdeckt. In den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts führten die Arbeiten von Harlow Shapley (1885-1972) und Robert J. Trumpler (1886-1956) zu noch fundierteren Erkenntnissen über die Milchstraße. Sie konnten zeigen, daß sich unser Sonnensystem in einem Spiralarm dieses gigantischen rotierenden Sternensystems befindet. Die Milchstraße hat einen Durchmesser von rund 100000 Lichtjahren, und das Sonnensystem ist von ihrem Zentrum ungefähr 27000 Lichtjahre entfernt, liegt also etwa auf halbem Radius; siehe Abbildung 9.1. (Ein Lichtjahr ist die Entfernung von 9,46 Billionen Kilometern, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von 300 000 Kilometern pro Sekunde in einem Jahr zurücklegt.)

Mit fortschreitender Erfassung der Himmelskörper erkannten die Astronomen immer besser die unermessliche Weite, in der wir leben. Zudem wurde klar, daß Wilhelm Herschels Abschätzung von mehreren Millionen Sternen in der Milchstraße noch viel zu vorsichtig war. Wie man heute weiß, enthält sie rund 300 Milliarden Sterne. Und einem von diesen sind wir - astronomisch gesehen - sehr nahe: Die durchschnittliche Entfernung zwischen Erde und Sonne beträgt »nur« 150 Millionen Kilome-

ter. Die Sonne, ein Stern mittlerer Größe, enthält 99 Prozent der Masse des gesamten Sonnensystems. Dieses besteht aus dem Zentralstern, also der Sonne, sowie aus den Planeten und anderem Material, das die Sonne umrundet (Kometen, Asteroiden, Staub, Gas und kleinere Bruchstücke). Der unserem Sonnensystem nächste Stern ist Proxima Centauri im selben Spiralarm der Milchstraße; er ist 4,3 Lichtjahre (40 Billionen Kilometer) von uns entfernt. Die Milchstraße enthält auch gewaltige Wasserstoff- und Staubwolken, die für die Astronomen sehr interessant sind. Dieses Material erstreckt sich noch weit über die sichtbaren Sterne hinaus.

Der Teil des Spiralarms der rotierenden Milchstraße, in dem sich unser Sonnensystem befindet, bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 220 Kilometern pro Sekunde (rund 800000 Kilometern pro Stunde) relativ zum Zentrum der Milchstraße. Diese dreht sich einmal in gut 230 Millionen Jahren um ihre Mitte. Das Sonnensystem hat seit seinem Entstehen bisher rund zwanzig solche Umläufe mitgemacht. Könnte man diese Umrundungen aus unvorstellbar großer Entfernung und im Zeitraffer betrachten, dann wären in dieser gravitatischen Bewegung verschiedene Entwicklungsphasen erkennbar. Ähnlich wie die äußeren Planeten die Sonne langsamer umrunden als die inneren Planeten (Erde, Venus, Mars und Merkur), sind auch die Bewegungen der äußeren Bereiche der Milchstraße um so langsamer, je größer der Abstand vom Zentrum der Milchstraße ist.

## **Astronomen entdecken weitere hundert Milliarden Galaxien**

*Der Sternenbote wird korrigiert*

Ist der gewaltige rotierende Haufen von 300 Milliarden Sternen, die die Milchstraße bilden, das ganze Universum? Umfaßt diese Ansammlung »brennender« Wasserstoff- und Heliumkugeln zusammen mit der Erde, einigen Planeten und anderer lebloser Materie alles, was existiert? Ist dahinter nur leerer Raum?

Im Jahre 964 schrieb der arabische Astronom Al Sufi sein *Buch über die Fixsterne*. Er bemerkte als erster einen kleinen



Himmelskörper, der wie ein ausgefranster Stern aussah. 1612 entdeckte der deutsche Astronom Simon Marius (1573-1624) mit Hilfe des damals gerade erfundenen Teleskops erneut dieses weit entfernte Gebilde. Er sagte, es wirke wie das »Licht einer Kerze, die man durch eine matte Scheibe betrachtet«. Man nannte es Andromeda-Nebel und hielt es für eine leuchtende Wolke aus Gasen und Staub in der Milchstraße. Obwohl die Teleskope immer besser wurden, konnte man noch 1885 im Andromeda-Nebel keine einzelnen Sterne erkennen. In jenem Jahr war dort aber für einige Tage eine Nova sichtbar. Das wies darauf hin, daß dieses Gebilde nicht nur aus Staub und Gasen besteht. Man glaubte nun, es sei ein Sternhaufen am Außenrand der Milchstraße.

Der amerikanische Astronom Edwin Powell Hubble (1889-1953) war der Begründer der extragalaktischen Astronomie. Nach ihm wurde 1989 das Hubble-Weltraumteleskop benannt. Hubble gab auch der Erforschung des Andromeda-Nebels entscheidende Impulse. Nach dem Abschluß seines Studiums der Mathematik und der Astronomie an der Universität Chicago begann er 1910 in Oxford als Rhodes-Stipendiat ein Jurastudium und ließ sich 1913 als Anwalt in Kentucky nieder. Die Arbeit langweilte ihn aber bald, und er änderte seine Ausrichtung erneut. 1917 promovierte er an der Universität Chicago im Fach Astronomie. Später wirkte er am Mount-Wilson-Observatorium in Kalifornien. Mit dessen 2,5-m-Teleskop konnte man schließlich einzelne Sterne im Andromeda-Nebel erkennen. Dieser hat seinen Namen übrigens vom Sternbild Andromeda, in dem er sich befindet.

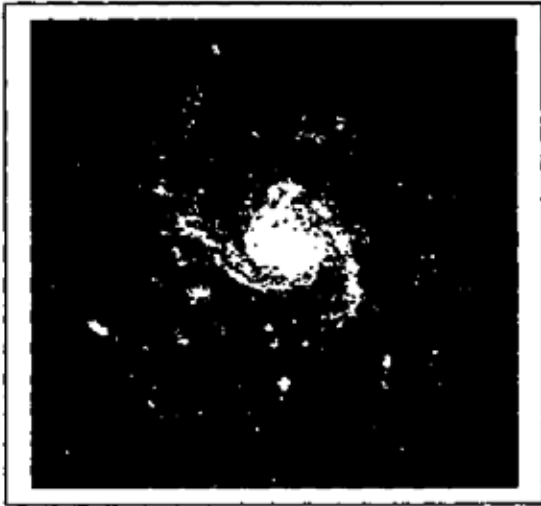
Hubble konnte zeigen, daß der Andromeda-Nebel nicht nur aus Staub und Gasen und einigen Novae besteht, sondern aus Milliarden von Sternen. Noch erstaunlicher war, daß diese Formation sich gar nicht in der Milchstraße befindet, sondern weit außerhalb von ihr. 1923 stellte Hubble fest, daß der Andromeda-Nebel eine eigene Galaxie mit einem Durchmesser von über 200000 Lichtjahren darstellt, rund zwei Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Sie ist die erste Galaxie, die außerhalb der Milchstraße erkannt wurde. Die Andromeda-Galaxie ist zwar die Galaxie, die der Milchstraße am *nächsten ist*, aber auch das entfernte-



Abb. 9.2: Der Andromeda-Nebel bzw. die Andromeda-Galaxie mit den beiden Begleitgalaxien NGC 205 (links unten) und NGC 221 (bzw. M 32, rechts oben). NGC bedeutet *New General Catalogue*; das ist ein ab 1888 geführtes Verzeichnis von Nebeln und Sternhaufen. Die Aufnahme entstand am 1,2-m-Teleskop des Mount-Palomar-Observatoriums, nordöstlich von San Diego in Kalifornien.

ste Objekt, das wir am Himmel mit bloßem Auge sehen können; siehe Abbildung 9.2.

Hubble ermittelte weiterhin, daß Tausende anderer Nebel ebenfalls Galaxien sind. Galilei hatte ja schon 300 Jahre zuvor vermutet, daß der Milchstraßen-Nebel aus vielen Sternen besteht. Nun mußte wieder einmal die Karte des Universums überarbeitet und unsere Stellung in ihm neu bewertet werden. Seit 1925 wissen die Astronomen, daß es im beobachtbaren Universum über 100 Milliarden einzelne Galaxien gibt, jede mit durchschnittlich 100 Milliarden Sternen. Nach derzeitiger Kenntnis ist die mit 15 Milliarden Lichtjahren am weitesten von uns entfernte Galaxie diejenige mit



Galaxie Messier 101

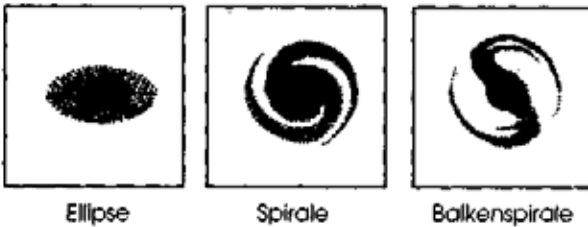


Abb. 9.3: *Oben*: Die Spiral-Galaxie Messier 101 (bzw. NGC 5457) im Sternbild Großer Bär. *Unten*: Die Klassifikation der Galaxienformen nach Hubble.

der Bezeichnung 4C41.17. Die größte bisher bekannte Galaxie heißt Abel 2029; sie ist über 60mal so groß wie die Milchstraße, besteht aus über 100 Billionen Sternen und hat einen Durchmesser von 6 Millionen Lichtjahren. Die meisten solcher Sterngruppen sehen aus wie Lichtstrudel mit Spiralarmen. Ungefähr 90 Prozent aller Galaxien im Universum können einer der drei Grundformen (Ellipse, Spirale, Balkenspirale) zugeordnet werden, die in Abbildung 9.3 unten dargestellt sind.

Es gibt einzelne Galaxien, außerdem Galaxienpaare und große Galaxien mit kleineren Satelliten- oder Begleitgalaxien. Die meisten Galaxien sind Teile sogenannter Galaxienhaufen mit durchschnittlich je 100 Galaxien. Im Sternbild Haar der Berenike (*Coma Berenices*) gibt es einen Galaxienhaufen mit über 10000 einzelnen Galaxien. Die Milchstraße ist Teil eines Haufens aus 20 Galaxien. Die Galaxienhaufen sind über den Raum in Gruppen so verteilt, daß ein im wesentlichen gleichförmiges Muster entsteht, bei dem die Gruppen rund 10 Millionen Lichtjahre voneinander entfernt sind.

### **Hubble errechnet die Geschwindigkeit der Galaxien bei der Expansion des Universums** *Sirius und die Rotverschiebung*

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts entwickelten Astronomen und Physiker eine Methode, um die Bewegung von Sternen und anderen Himmelskörpern relativ zur Erde zu bestimmen. Dabei wird das Licht, das von den betreffenden Objekten auf die Erde gelangt, spektral zerlegt. Der englische Astronom William Huggins (1824-1910) und der französische Physiker Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) erkannten, daß bestimmte Spektrallinien einiger heller Sterne gegenüber ihrer normalen Position im Spektrum ein wenig zum Roten hin verschoben sind. Dies führten sie richtigerweise auf den Doppler-Effekt zurück, den man bei Schallwellen schon kannte. Dieser Effekt, benannt nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler, beruht darauf, daß die Wellen »komprimiert« werden, wenn sich die Schallquelle (z. B. eine Autohupe oder ein Martinshorn) dem Beobachter nähert. Dann nimmt dieser einen höheren Ton bzw. eine kleinere Wellenlänge wahr als bei stehender Quelle. Wenn diese sich entfernt, werden die Wellen »gedehnt«, so daß der Ton tiefer wird, d. h. die wahrgenommene Wellenlänge zunimmt. Diese Gesetzmäßigkeit gilt für Lichtwellen ebenso wie für Schallwellen. Daher kann aus der Verschiebung gegenüber der »Normalwellenlänge« die Geschwindigkeit der Quelle errechnet werden. Eine Verschiebung zum Roten (zu größeren Wellenlängen) hin ent-

steht dadurch, daß sich der betreffende Stern von der Erde entfernt. Im Jahre 1869 ermittelte Huggins, daß Sirius (der hellste Stern am Nordhimmel) sich mit rund 32 Kilometern pro Sekunde von der Erde wegbewegt.

Edwin Hubble machte aufgrund der Rotverschiebung in den Lichtspektren der Sterne seine zweite bemerkenswerte Entdeckung. Sie sollte sich als die bedeutendste astronomische Erkenntnis unseres Jahrhunderts erweisen. 1927 wertete Hubble die Lichtspektren aus, die unter anderem mit dem sehr leistungsfähigen neuen Teleskop am Mount-Wilson-Observatorium aufgenommen wurden. Dabei errechnete er, daß die Rotverschiebung bei den entweichenden Galaxien proportional zu ihrem Abstand von uns zunimmt. Daraus folgerte er, daß sich das Universum ausdehnt, wobei die entferntesten Sterne am schnellsten sind. Die Fluchtgeschwindigkeit eines Galaxienhaufens entspricht der Entfernung von uns, dividiert durch eine Zeitspanne von rund 15 Milliarden Jahren. Die Galaxienhaufen (aber nicht unbedingt einzelne Galaxien in einem Haufen) entfernen sich von allen anderen Galaxienhaufen, und zwar um so schneller, je weiter sie voneinander entfernt sind. Der Reziprokwert der Zeitspanne von 15 Milliarden Jahren heißt heute *Hubble-Konstante*. Neuere Messungen ergaben, daß die Fluchtgeschwindigkeit für jede weitere Million Lichtjahre Entfernung von der Erde um 10 bis 20 Kilometer pro Sekunde höher ist. Beispielsweise entfernt sich der Galaxienhaufen Ursa Major II (im Sternbild *Ursa Major*, Großer Bär) mit 42000 Kilometern pro Sekunde von uns; das entspricht 14 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Im äußersten Bereich des sichtbaren Universums werden 84 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreicht.

Die von Hubble entdeckte Expansion vollzieht sich zwischen den Galaxienhaufen, nicht innerhalb von diesen. Jede Galaxie und jeder Galaxienhaufen wird durch die Gravitation zusammengehalten und expandiert nicht. So sind die Andromeda-Galaxie und die Milchstraße Teile eines Galaxienhaufens, in dem die Galaxien durch Gravitation einander anziehen und sich sogar aufeinander zubewegen. In mehreren hundert Millionen Jahren könnten sie daher ineinanderstürzen. Das gesamte Universum aber dehnt sich aus. Wie wir im folgenden

Abschnitt sehen werden, besteht ein unauflöslicher Zusammenhang zwischen dieser Expansion und der Entstehung des Universums.

## **Rechnen wir die Expansion des Universums zurück, kommen wir zum Urknall**

### *Der Zeit-Nullpunkt und hundert Billionen Grad Celsius*

Noch im vorigen Jahrhundert verknüpften die Theorien über den Beginn der Zeit die Schöpfung des Menschen und aller Lebewesen stets mit der Entstehung des Universums. Der irische Bischof James Usher (1580-1656) verfaßte eine Chronologie des Alten Testaments. Darin führte er, beginnend mit Adam und Eva, alle Generationen von Männern und Frauen auf, die in der Bibel erwähnt werden. Auf dieser Grundlage datierte er die Schöpfung auf das Jahr 4004 v. Chr. Er gab den Zeitpunkt sogar exakt an: Sonntag, den 23. Oktober, 14.30 Uhr! Jemand soll den Bischof gefragt haben: »Bitte, Eminenz, was tat Gott, bevor er das Universum schuf?« Usher erwiderte unwillig: »Er schuf die Hölle für Leute, die derartige Fragen stellen.«

Nachdem die Astrophysiker im 20. Jahrhundert erkannten, daß sich die Galaxienhaufen voneinander entfernen, können wir sozusagen zeitlich zurückschauen auf die Erschaffung des ganzen Universums, also auf ein Ereignis, das sich Bischof Usher niemals vorgestellt haben konnte. Nehmen wir an, im Universum kehrten sich alle Vorgänge um. Dann müßten sich die Galaxienhaufen wieder einander nähern und träfen sich alle gleichzeitig in einem Punkt, und zwar exakt zum Zeit-Nullpunkt, der den Beginn des Universums repräsentiert. Es ist noch nicht ganz geklärt, wie lange dieser Zeitpunkt zurückliegt, aber die meisten Fachleute sind sich darin einig, daß es rund 15 Milliarden Jahre sein müssen.

»Es war einmal eine Zeit, da gab es keine Zeit«, schrieb John Barrow in seinem Buch *Der Ursprung des Universums*. Was geschah zum Zeit-Nullpunkt und danach, so daß wir heute da sind, wo wir uns gerade befinden? Der belgische Astronom Georges Henri Lemaitre (1894-1966) hatte natürlich von Hubbles Entdeckung erfahren, daß sich das Universum ausdehnt. 1927 stellte

er eine Theorie auf, die inzwischen von den Astronomen und Physikern allgemein akzeptiert wird. Danach war zur Zeit null alle Materie in einem winzigen Massestückchen vereinigt, die er »Superatom« oder »Kosmisches Ei« nannte. Es existierte nichts anderes: keine Galaxien, Sterne, Planeten oder gar Lebewesen. Es gab nicht einmal Elemente, weil das Kosmische Ei selbst noch nicht einmal aus Kernen oder Atomen bestand, sondern nur aus Energie. Ohne Materie gab es auch keine Zeit.

Das Kosmische Ei unterlag seiner eigenen Gravitationsanziehung und zog sich immer stärker zusammen, so daß die Temperatur höher und höher stieg, während es immer stärker komprimiert wurde, sein Volumen also kleiner und kleiner wurde. In diesem Augenblick war das Universum so etwas wie ein Energie-»Kern«. An einem gewissen Punkt, bei unvorstellbar hoher Temperatur und kleinstmöglichem Volumen, geschah eine gewaltige Explosion, und dieser einzelne Energie-»Kern« entwickelte sich zu allem, was nun existiert. Lemaitre meinte, daß das Auseinanderweichen der Galaxien der sichtbare Beweis für diese Explosion sei. Seine Theorie erklärte auch im Rahmen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie das Zurückweichen der Galaxien.

Diese Explosion ist das früheste Ereignis, über das wir irgendwelche Kenntnis haben. Die entsprechende Theorie wurde von dem russisch-amerikanischen Physiker George Gamow weiterentwickelt und modifiziert (Gamow hatte auch das Tröpfchenmodell des Atomkerns aufgestellt; siehe Kapitel 6). 1948 publizierte er einen Artikel *Über den Ursprung der chemischen Elemente*. Darin postulierte er, daß die Elemente aus Atomkernen gebildet wurden, die durch sukzessiven Einfang von Neutronen entstanden. In dieser Abhandlung prägte Gamow den Begriff »Urknall«. Die sogenannte Urknalltheorie wurde 1950 populär, als der englische Astrophysiker Fred Hoyle in einer BBC-Hörfunksendereihe über *Die Natur des Universums* referierte. Die entsprechenden Vorstellungen werden heute allgemein akzeptiert.

Man kennt inzwischen viele Indizien für den Urknall. Steven Weinberg (geb. 1933), Physikprofessor an der Harvard University, erhielt 1979 den Physik-Nobelpreis für seine Arbeiten auf diesem Gebiet. Er beschrieb die Ergebnisse in seinem Buch *Die ersten drei Minuten*:

»Zu Anfang gab es eine Explosion. (...) Nach etwa einer Hundertstelsekunde (...) betrug die Temperatur des Universums etwa hunderttausend Millionen ( $10^{11}$ ) Grad Celsius. Selbst im Zentrum der heißesten Sterne herrscht nicht eine derartige Hitze; sie war in der Tat so groß, daß keiner der Bausteine, aus denen die gewöhnliche Materie sich zusammensetzt - Moleküle, Atome oder auch nur die Kerne von Atomen -, hätte bestehen können. Die Materie, die bei dieser Explosion auseinanderflog, bestand statt dessen aus verschiedenen Typen der sogenannten Elementarteilchen. (...)

Während die Explosion andauerte, sank die Temperatur und erreichte (...) am Ende der ersten drei Minuten schließlich eine Milliarde Grad Celsius. Damit war eine Abkühlung eingetreten, bei der die Protonen und Neutronen beginnen konnten, komplexe Kerne zu bilden, und zwar zunächst den Kern von schwerem Wasserstoff (...), der aus einem Proton und einem Neutron besteht. Dabei war die Dichte immer noch so groß (...), daß es diesen leichten Kernen möglich war, sich rasch zu dem stabilsten leichten Kern, dem des Heliums, zusammenzuschließen, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht.

Am Ende der ersten drei Minuten war das Universum überwiegend aus Licht, Neutrinos und Antineutrinos zusammengesetzt. (...) Diese Materie stob immer weiter auseinander und wurde dabei ständig kühler und weniger dicht. Viel später - nach einigen hunderttausend Jahren - war sie soweit abgekühlt, daß die Elektronen sich mit den Kernen zu Atomen von Wasserstoff und Helium zusammenschließen konnten.«\*

Der Urknall fand vor etwa 15 Milliarden Jahren statt, und die Galaxien - darunter die Milchstraße mit unserem Sonnensystem - erreichten ihre gegenwärtige Konfiguration im Universum erst einige Milliarden Jahre später. Die Wasserstoff- und Heliumwolken rotierten immer schneller und flachten sich in der Rotations Ebene ab. Die meisten bildeten wie die Milchstraße scheibenähnliche Strukturen mit Spiralarmen, also große, radähnliche

Steven Weinberg, *Die ersten drei Minuten. Der Ursprung des Universums*, München 1992, S. 14 und 16 f



Gebilde, die von Materie und Strahlung erfüllt waren. (Die Grundformen der Galaxien wurden in Abbildung 9.3 gezeigt.)

In den äußeren Bereichen der Milchstraße begann vor über fünf Milliarden Jahren eine Wasserstoff- und Heliumwolke zu kondensieren. Schließlich fiel sie aufgrund ihrer eigenen Gravitationsanziehung in sich zusammen. Die Materie, aus der sie bestand, rührte vermutlich von der Explosion einer Supernova her und war wohl nicht beim Urknall gebildet worden. Auf jeden Fall formte diese Materie zuerst eine flache, rotierende Scheibe, wie die Milchstraße heute auch. Aber nachdem immer mehr Materie zusammengekommen war, wurde das Zentrum der Scheibe dicker, und die stärkere Gravitationswirkung des größer gewordenen Gebildes zog immer mehr Staub und Bruchstücke an, so daß ein Körper entstand, der die kompakteste aller möglichen geometrischen Figuren annahm, nämlich die Kugelform.

Wegen der hohen Gesamtmasse und der deshalb starken Gravitation herrschte im Inneren ein unglaublich hoher Druck. Dieser führte zur Erwärmung auf bis zu 20 Millionen Grad Celsius. Dadurch konnten die Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen, und zwar in einer kontinuierlichen Reihe sehr vieler Kernreaktionen: Unsere Sonne war geboren. Derselbe Prozeß vollzog und vollzieht sich beim Entstehen auch der anderen Sterne im Universum, die zu Hunderten von Billionen zählen. Wie in den vorigen Teilen dieses Buches besprochen, sehen wir das Ergebnis dieser Transformation von Masse in Licht und Wärme, und mehr noch - unser Leben beruht auf dieser Energie.

Die Fachleute sind sich nicht ganz einig darüber, ob das Universum unbegrenzt weiter expandiert. Alle Galaxienhaufen, die sich voneinander entfernen, scheinen langsamer zu werden. Dennoch kann die Explosion der Materie so viel Energie mitgeben haben, daß sie der Gravitationsanziehung der übrigen Materie entfliehen kann. Dann wird das Universum ewig weiter expandieren. Wenn aber die Materie keine ausreichend hohe Energie aufweist, wird das gesamte Universum irgendwann in sich zusammenfallen und vielleicht einen weiteren Urknall hervorrufen, so daß alles wieder von vorn beginnt. Falls das eintritt, werden noch einige Dutzend Milliarden Jahre vergehen, bis das Universum kollabiert.

## **Die schwereren Elemente machen ein Prozent des Universums aus, dazu gehört auch die Erde**

### *Pluto und die Oortsche Wolke*

Wie Steven Weinberg ihn erklärte, verstehen wir jetzt den Prozeß, der nach dem Urknall zur Entstehung der Elemente führte. Das Kosmische Ei wurde überwiegend zu Wasserstoffatomen, bestehend aus nur einem Proton und einem Neutron, gefolgt vom nächst-einfachen Atom, dem Heliumatom mit zwei Protonen und zwei Neutronen im Kern. Heute machen diese zwei Elemente rund 99 Prozent des gesamten Universums aus (74 Prozent Wasserstoff und 25 Prozent Helium).

Im Laufe von Hunderten von Jahrillionen nach dem Urknall entstanden die schwereren Elemente, die das restliche Prozent der Materie im Universum bilden. Sie waren die Produkte von Fusionsreaktionen in jungen Sternen und auch von unvorstellbar heftigen Sternexplosionen. Man kann sagen, daß sich vom Urknall bis heute die Elementzusammensetzung des Universums nur wenig änderte. Zwar führten Billionen und Aberbillionen von Wechselwirkungen der Wasserstoff- und der Heliumkerne sowie anderer Elementarteilchen zur Bildung schwererer Elemente. Aber die 90 anderen natürlich vorkommenden chemischen Elemente repräsentieren weniger als ein Prozent der Masse des ganzen Universums.

Und wie ist das bei der lebenden Materie auf der Erde? Es ist bemerkenswert, daß 99 Prozent der Materie aller Lebewesen aus nur vier verschiedenen Elementen bestehen: Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Wahrscheinlich war jedes Atom in unserem Körper einmal Teil eines Sterns gewesen. Damit beispielsweise ein Kohlenstoffkern entsteht, müssen im Prinzip drei Heliumkerne innerhalb eines Millionstels einer Sekunde miteinander zusammenstoßen. Mit einigen relativ unbedeutenden Ausnahmen gingen die Kohlenstoffkerne in den Molekülen aller Zellen der Lebewesen auf der Erde aus solchen Dreierstößen hervor. Diese Prozesse waren also Teil der spektakulären Umwandlungen von Elementarteilchen, die letztlich zu Lebewesen führten.

Wie bereits erwähnt, zieht sich Materie aufgrund der Gravita-

tion wenn möglich zu einer Kugel zusammen, weil diese bei gegebenem Volumen die geometrische Form mit der kleinsten Oberfläche ist. Ungefähr zur selben Zeit, als die Bildung der Sonne begann, schwebten auch Staub und Gase aus schwereren Elementen durch die Milchstraße und begannen sich zu größeren Körpern zu vereinigen, die von der Sonnenmasse durch deren enorme Schwerkraft angezogen wurden. Als sich die Sonne verdichtete, taten dies auch die anderen Massenansammlungen, so daß schließlich feste Körper entstanden. Sie stießen im Laufe mehrerer Millionen Jahre häufig miteinander zusammen und kombinierten teilweise zu größeren kugelförmigen Gebilden. Aus solchen Zusammenballungen von Materie und den Zusammenstößen gingen in unserem Sonnensystem der Planet Erde, die anderen Planeten und deren Monde hervor.

Die Erde war anfangs extrem heiß und hatte keine Atmosphäre. Das geschmolzene Material setzte Wasserstoffsulfid und andere Gase frei, und es entstand die frühe Atmosphäre. Rund 11 Milliarden Jahre nach dem Urknall bildeten sich in der sogenannten Uruppe die ersten organischen Moleküle. Die Wissenschaftler erweitern ständig unsere Kenntnisse über die Bedingungen in der Frühzeit der Erde. Dazu erforschen sie intensiv auch die anderen Planeten. 1995, nach einem Jahrzehnt der Planung und einer langen Reise an ihren Bestimmungsort, trat die 400 Kilogramm schwere und 1,35 Milliarden US-Dollar teure Raumsonde Galilei in die Jupiter-Atmosphäre ein. Sie funkte danach 57 Minuten lang eine Fülle von Daten zur Erde, bevor sie auf den Planeten aufschlug und in der ungeheuren Hitze verglühte. Die Sonde ermittelte die Anteile von Sauerstoff, Wasserstoff und anderen Gasen; ferner maß sie mit ihrem Ultraviolettspektrometer die Temperatur.

Die Ergebnisse geben uns Aufschluß über die Frühzeit der Erde vor einigen Milliarden Jahren, denn der Planet Jupiter ist so schwer und seine Gravitationskraft daher so hoch, daß seine Atmosphäre etwa im gleichen Zustand ist, wie er vor viereinhalb Milliarden Jahren im Sonnensystem herrschte. Die gleichen Gase waren auch am Entstehen der Erde beteiligt, aber die Zusammensetzung änderte sich allmählich, denn einige Gase entwichen weitgehend in den Weltraum, und es schlugen Meteoriten und Kometen ein. Außerdem liefen chemische Reaktionen ab, und es entwickelte sich

vulkanische Aktivität. Obwohl sich auf dem Jupiter inzwischen die für ihn spezifischen chemischen und physikalischen Veränderungen vollzogen, läßt er die früheren Bedingungen noch gut erkennen. Daher können wir aus der Beschaffenheit seiner Oberfläche auf die Entwicklung der Erde schließen.

Enorme Mengen von Staub und Trümmerstücken in unserem Sonnensystem vereinigten sich niemals zu Planeten oder Monden, sondern bildeten nach und nach die Planetoiden, Kometen und Staubteilchen, die sich häufig auch außerhalb der äußeren Planetenbahnen befinden. Die Planetoiden, auch Asteroiden genannt, bestehen aus Gestein und Metallen und kommen in den verschiedensten Größen vor. Viele wiegen nur einige Dutzend Gramm, andere Millionen Tonnen, und die meisten von ihnen (rund 7000) umrunden die Sonne im sogenannten Planetoiden- oder Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter. Der größte bekannte Planetoid ist Ceres mit einem Durchmesser von 930 Kilometern. Bruchstücke von Planetoiden entstanden bei Zusammenstößen zwischen ihnen, und in jedem Jahr treffen zahlreiche solche Trümmer als Meteoriten die Erde.

Die Kometen dagegen bestehen vor allem aus Gestein und Eis, ferner aus Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan, Ammoniak und anderen kleinen stickstoffhaltigen Molekülen. In unserem Sonnensystem gibt es wahrscheinlich einige Billionen Kometen. Ihr Material bildet bei Annäherung an die Sonne einen sichtbaren Schweif aus, der übrigens von der Sonne abgewandt ist. Auf diese Erscheinung geht die Bezeichnung »Komet« zurück, nach dem griechischen Wort *kometes*, langhaarig. Die meisten Kometen umlaufen die Sonne in einer Ebene, die etwa derjenigen der größeren Planeten entspricht. Oft kreuzen sie die zehn Planetenbahnen, so auch der bekannte Halleysche Komet. Manche Kometen haben sehr enge Umlaufbahnen (zwischen Erde und Sonne), während andere extrem weite elliptische Bahnen aufweisen, die zum größten Teil weit außerhalb des Planeten Pluto liegen. Die meisten Astronomen vertreten die Theorie, daß die Kometen aus einer ausgedehnten Wolke hervorgehen, der sogenannten Oort-schen Wolke. Sie ist nach dem holländischen Astronomen Jan Hendrik Oort (1900-1992) benannt, der als erster postulierte, daß sich weit außerhalb des Sonnensystems - über 20 000mal so

weit von der Sonne entfernt wie die Erde - eine Materiewolke befindet. Durch Gravitationswirkung anderer Himmelskörper können die Körper dieser Wolke als Kometen in das eigentliche Sonnensystem hinein oder auch von ihm weg katapultiert werden.

## **Die Astronomen entdecken andere Sonnensysteme in der Milchstraße**

### *Leben auf dem Mars?*

Seit den frühen 80er Jahren suchen die Astronomen mit verbesserten Geräten und Methoden nach anderen Sonnensystemen. Im Jahre 1992 entdeckte man, daß ein 1300 Lichtjahre von uns entfernter Stern in der Milchstraße von zwei Planeten umrundet wird. Im Oktober 1995 fand man einen Planeten, der etwa halb so groß wie Jupiter ist und den Stern »51 Pegasi« umrundet, sich also im Sternbild Pegasus befindet. Und im Januar 1996 entdeckten zwei kalifornische Astronomen zwei Planeten, die noch größer als Jupiter sind: einen beim Stern »70 Virginis« im Sternbild Jungfrau (Virgo) und einen beim Stern »47 Ursae Majoris« im Sternbild Großer Bär (*Ursa Major*), über 35 Lichtjahre von uns entfernt. Wegen der Entfernung von mehreren Billionen Kilometern sind diese Planeten mit keinem Teleskop zu erkennen. Man kann sie aber mit hochempfindlichen Instrumenten an Bord von Satelliten oder auf der Erde indirekt nachweisen, nämlich durch die Bahnänderung des betreffenden Sterns aufgrund der Gravitationswirkung des Planeten. Einige derartige Instrumente messen die Intensitätsverteilung der Infrarotstrahlung der dünnen, abgeflachten Gaswolke um diese Sterne. Aus einer ringförmigen Lücke in diesem Gebilde kann man ebenfalls auf das Vorhandensein eines Planeten schließen.

Die Temperaturen auf den beiden erwähnten Planeten in den Sternbildern Jungfrau und Großer Bär liegen zwischen minus 40 und plus 90 Grad Celsius. In diesem Temperaturbereich können chemische Prozesse ablaufen, die das Entstehen und Fortdauern von Leben ermöglichen. Man konnte in einem 25000 Lichtjahre von der Erde entfernten Sternhaufen sogar Essigsäuremoleküle nachweisen, und zwar anhand ihrer spektroskopischen »Finger-

abdrücke« in der Licht- und Radiowellenstrahlung aus dem betreffenden Gebiet. Die Essigsäure oder Ethansäure ist eine organische Verbindung, die beim Entstehen von Leben auf der Erde eine Rolle spielte. Mit demselben spektroskopischen Verfahren konnte man in gewaltigen Staub- und Gaswolken an vielen Stellen des Weltalls alle vier Elemente nachweisen, die auf der Erde für die Entstehung des Lebens notwendig waren: Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff.

Die Spekulationen über Leben im Universum erhielten überraschenden Auftrieb, als die NASA im August 1996 bekanntgab, daß in einem Meteoriten vom Mars organische Moleküle gefunden wurden. Der Gesteinsbrocken war vor rund 15 Millionen Jahren vom Mars weggeschleudert worden, als ein riesiger Planetoid ihn traf. Der Meteorit ging vor etwa 13000 Jahren auf die Erde nieder. Er enthält polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe. Einige Biologen sehen darin einen eindeutigen Beweis für das Vorhandensein von Wasser auf dem Mars in dessen Frühzeit (vor rund drei Milliarden Jahren) sowie für die Existenz von Organismen, die die Kohlenwasserstoffe produzierten. Etwa zur selben Zeit entstand auf der Erde das erste Leben.

Es gibt Billionen von Sternen im Universum, und man hat - wie gesagt - auch schon Planeten bei anderen Sternen entdeckt. Da dürfen wir angesichts der Möglichkeit von Leben auf dem Mars vermuten, daß unser Sonnensystem und die Existenz von Leben auf der Erde nicht einzigartig sind.

Es erscheint immer unwahrscheinlicher, daß die Sonne der einzige Stern ist, der von einem Planeten, auf dem Leben existiert, umrundet wird. Wenn Leben oder früheres Leben auf dem Mars oder anderswo nachzuweisen ist, wird die Einstellung der Menschheit über die eigene Stellung im Universum wieder einmal ins Wanken geraten. In Anbetracht der immer leistungsfähigeren Geräte und Verfahren sehen die Astronomen eine neue Ära heraufziehen, vielleicht vergleichbar mit den Umwälzungen zu Zeiten von Kolumbus. Innerhalb von vier Monaten nach der Entdeckung der organischen Moleküle auf dem Marsmeteoriten wurden von den Vereinigten Staaten und Rußland insgesamt drei Raumsonden gestartet. Sie sollen die Atmosphäre des Mars untersuchen, seine Oberfläche kartographieren und Gebiete ausfindig

machen, auf denen Leben existiert haben könnte. Mitte 1997 landete die US-Sonde Pathfinder auf dem Mars. Sie untersuchte den Boden und funkte die Ergebnisse sowie zahlreiche Bilder zur Erde.

Vielleicht gibt es sogar Millionen von Himmelskörpern, auf denen sich Lebewesen aufhalten. In vielen Planetensystemen, die vermutlich existieren, die wir aber nicht sehen können, könnte sich sogar intelligentes Leben entwickelt haben. Wir sehen uns nicht nur ungeheuer vielen Sternen und wohl auch Sonnensystemen gegenüber, sondern müssen auch bedenken, daß sich das Universum nun schon rund 15 Milliarden Jahre lang entwickelt. Lebende Systeme, vielleicht sogar Millionen verschiedenartige, könnten sich auf anderen Planeten herausgebildet haben und dann im Universum zerstreut worden sein. Manche Entwicklungsstadien mögen sich überschneiden haben, und manche mögen erst Millionen von Jahren nach dem Untergang anderer entstanden sein.

Schließlich gab es auch auf der Erde Epochen, in denen sie völlig lebensfeindlich war. Die Umwelt veränderte sich, und bald konnte auf unserem Planeten Leben entstehen. Die Zeitspanne, seit es Menschen gibt, ist im Grunde nur eine einzige Sekunde im Verhältnis zur Ewigkeit. Im Teil 6 dieses Buches, wenn wir die Zelle besprechen, werden wir sehen, daß sich Leben bei geeigneten Bedingungen überall im Universum bilden könnte. So könnte es auch auf anderen Planeten Zeiten mit Leben geben oder gegeben haben. Dieses könnte dem Leben auf der Erde ähneln oder auch aus ganz anderen Einheiten und Formen bestehen, die den Bedingungen auf dem betreffenden Planeten entsprechen. Im Laufe von Milliarden Jahren kann es sich gewandelt haben; es kann aber auch untergegangen sein, wenn die Bedingungen auf dem Planeten lebensfeindlich wurden. Es könnte Leben auf Milliarden von Planeten geben, aber wahrscheinlich hat kein lebendiges, denkendes Wesen direkte Kenntnis von den anderen Lebensformen.

Die oben zitierte Frage an den Bischof Usher legt die Annahme zugrunde, daß es keine Wirkung ohne Ursache gibt. Zwar war Aristoteles überzeugt, daß das Universum immer existierte. Jedoch kennen wir kein physikalisches Phänomen, das beweisen könnte, daß Energie oder Materie spontan entstehen kann. Einsteins Beziehung  $E = mc^2$  besagt, daß Masse und Energie ineinander

der unwandelbar sind. Aber weder Energie noch Materie können sich aus *nichts* bilden. Wir wissen inzwischen, daß sich das Universum ausdehnt und daß sich alle Galaxienhaufen voneinander entfernen. Außerdem ist inzwischen klar, daß diese Ausdehnung in einem bestimmten Ausmaß langsamer wird. Aus all dem folgt, daß sich das Universum nicht immer im gegenwärtigen Zustand befunden haben kann. Das bedeutet, das Universum kann nicht unendlich alt sein, weil es dann bereits untergegangen wäre. Also muß es vor einer bestimmten Zeitspanne entstanden sein. Daher müssen wir fragen: Woher kam das Kosmische Ei? Was war die »erste Ursache« ? Wie bildete sich Lemaitres Superatom - dieses ursprüngliche Ei mit unvorstellbar hoher Dichte und Temperatur -, und warum explodierte es?

Diese Fragen sind von ungeheurer Tragweite. Vielleicht wird es eines Tages eine wissenschaftliche Theorie geben, die uns die Antworten gibt. Einige Wissenschaftler vermuteten, daß das kosmische Ei schon vor dem Urknall für ewige Zeiten bestanden hatte. Andere nahmen an, daß die Ursache für die Bildung des kosmischen Eies oder dieses selbst ein höchstes Wesen oder eine übernatürliche Kraft gewesen sei. Einige Kosmologen stellten Theorien auf, die nicht auf dem allgemeinen Verständnis von Ursache und Wirkung beruhen; denn es gelten nicht dieselben physikalischen Gesetze, wenn weder Zeit noch Raum noch Materie vorhanden sind. Legen wir aber die gewohnte Bedeutung von Ursache und Wirkung zugrunde, dann können wir ohne weiteres folgern, daß solch eine übernatürliche Kraft den »Stoff« erschaffen haben muß, aus dem das kosmische Ei hervorging. In der Astrophysik gibt es genügend Raum für ein höchstes Wesen bei der Schöpfung. Aber gibt es noch eine andere, zwingende oder unausweichliche Folgerung aus dieser Tatsache oder Annahme? Selbst wenn jedermann akzeptierte, daß eine übernatürliche Kraft die Ursache für das kosmische Ei war - gibt es weitere empirische Folgerungen, die aus dieser »Tatsache« hergeleitet werden?

Die verschiedenen Schöpfungsmythen der alten Zeiten versuchten, unsere Existenz zu erklären, das Unbekannte zu ergründen und der Gesellschaft eine psychologische Sicherheit und Stabilität zu verleihen. Obwohl der Urknall und der Zeitpunkt, zu dem er sich vollzog, inzwischen zweifelsfrei bewiesen wurde,



glauben Millionen von Menschen weiterhin fest an die biblischen Aussagen über die spontane Schöpfung des Universums durch Gott vor rund 5800 Jahren. Aber die Beweise, die die Urknalltheorie stützen, sind überwältigend. Angesichts dieser Indizien sind die Hoffnung und der Glaube an die vor Jahrhunderten beschworenen ewigen »Wahrheiten« über die Schöpfung für den Fortbestand und das Wohlergehen der Menschheit viel gefährlicher und weit weniger rational als während der Renaissance. Damals ließ man ja zu, daß die Anschauungen von Aristoteles und Ptolemäus über das Universum mit solcher Macht weiterwirken konnten.

Unmittelbar nach dem ersten Augenblick des Entstehens begann sich das Universum in einer voraussagbaren Weise zu entwickeln. Aber auch wenn man annimmt, daß ein übernatürliches Wesen oder eine übernatürliche Kraft für die Entstehung des Universums im Moment des Urknalls verantwortlich war, ist kein göttliches Eingreifen nötig für die vielen Fragen, die wir zu stellen begannen und auch in jüngster Zeit noch nicht beantworten konnten. In seinem Buch *Eine kurze Geschichte der Zeit* sagt Stephen Hawking dazu:

*»Die ganze Geschichte der Wissenschaft ist von der allmählichen Erkenntnis geprägt, daß die Ereignisse nicht auf beliebige Weise ablaufen, sondern daß ihnen eine bestimmte Ordnung zugrundeliegt, die göttlichen Ursprungs sein mag oder auch nicht. (...) Diese Gesetze können ursprünglich von Gott erlassen worden sein. Aber es scheint so, daß er seitdem das Universum sich gemäß diesen Gesetzen hat entwickeln lassen und nun nicht mehr eingreift.«\**

Es bleiben noch ungelöste Rätsel. Aber sie sind Bestandteile eines inzwischen geklärten Gefüges. Von unserem kleinen Planeten aus - in den Außenbereichen einer nicht ungewöhnlichen Galaxie - haben Frauen und Männer den weiten Raum erforscht, der diesen Planeten umgibt. Sie konnten dabei ein wunderbares Bild der Schöpfung enthüllen.

\*Stephen Hawking, *Eine kurze Geschichte der Zeit. Die Suche nach der Urkraft des Universums*, Hamburg 1988, S. 156

## KAPITEL 10

### Das Echo der Schöpfung

*»Die Erde ist ein Ort, aber keineswegs der einzige, ja nicht einmal ein typischer, denn kein Planet oder Stern und keine Galaxie kann typisch sein, da der Kosmos überwiegend leer ist. Der einzig typische Ort in dieser riesigen, kalten, allumfassenden Leere ist die ewige Nacht des intergalaktischen Raums - ein Ort, so fremdartig und trostlos verlassen, daß Planeten, Sterne und Galaxien daneben ob ihrer Seltenheit ergreifend schön anmuten.«\**

Die ersten Kapitel der Urknalltheorie wurden von Astronomen geschrieben, die in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts mit ihren großen Teleskopen den Himmel erforschten. Ein unerwartetes und verblüffendes Kapitel wurde danach in einem neuen Gebiet der Astronomie eröffnet, der Radioastronomie. Man fand nun verschiedene Spuren, die innerhalb von 15 Milliarden Jahren sozusagen über das Universum verteilt wurden. Wir können den Beweis für den Urknall am Entfernen der Galaxien voneinander nicht nur sehen, sondern auch die Reste der »Wärme« messen, die von dieser Explosion zurückblieben.

Wie wir im vorigen Kapitel sahen, war das frühe Universum unglaublich heiß. Die extrem hohe Temperatur spielte eine große Rolle, nicht nur wegen ihrer Auswirkung auf die atomaren Teilchen, sondern auch, weil das ganze Universum von elektromagnetischer Strahlung erfüllt war, die dann zusammen mit der Materie abkühlte. Wenn wir verstehen wollen, warum die Entdeckung dieser Strahlung Hubbles Beobachtungen und Lemai-

\* Carl Sagan, *Unser Kosmos*, München 1982, S. 17 (1980)

tres Urknalltheorie bestätigte, müssen wir uns mit der elektromagnetischen Strahlung befassen.

## **Maxwell sagt die Existenz unsichtbarer Wellen voraus** *Volt, Ampere und Coulomb*

Wie schon die Bezeichnung vermuten läßt, ist der Elektromagnetismus ein Phänomen, das auf einer Kombination von Elektrizität und Magnetismus beruht. Ähnlich wie Newton, der die wissenschaftliche Methodik auf die Mechanik angewandt hatte, führten etliche Forscher im 18. Jahrhundert zahlreiche Experimente mit Elektrizität und Magnetismus durch, um die Zusammenhänge und Phänomene zu ergründen. Hier sind vor allem folgende Persönlichkeiten zu nennen: die französischen Physiker Charles Coulomb (1736-1806) und Andre Marie Ampere (1775-1836), der italienische Physiker Alessandro Volta (1745-1827), der deutsche Mathematiker und Physiker Carl Friedrich Gauß (1777-1855) sowie der englische Physiker und Chemiker Michael Faraday (1791-1867). Ihre Arbeiten führten zu einem Verständnis des Wesens und der Merkmale von Elektrizität und Magnetismus. Dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) gelang es im Jahre 1861, die Zusammenhänge in vier Gesetzen zu formulieren. Diese beschreiben mit Hilfe von entsprechenden Gleichungen vollständig die Beziehung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern. Sie spielen damit beim Elektromagnetismus dieselbe Rolle wie bei der Mechanik Newtons Gesetze über Bewegungen und die Gravitation. Wir können die Maxwellschen Gesetze folgendermaßen zusammenfassen:

1. Eine elektrische Ladung ruft ein elektrisches Feld hervor.
2. Zwischen den Polen eines Magneten herrscht ein magnetisches Feld.
3. Elektrische Felder entstehen durch sich verändernde magnetische Felder.
4. Magnetische Felder entstehen sowohl durch sich verändernde elektrische Felder als auch durch elektrische Ströme.

Die ersten beiden dieser Prinzipien beziehen sich auf statische elektrische und magnetische Felder, also solche, bei denen weder Ströme noch veränderliche Felder vorliegen. Maxwells wichtigster Beitrag lag im vierten der hier aufgeführten Gesetze. Er erkannte, daß magnetische Felder nicht nur von elektrischen Strömen hervorgerufen werden, sondern auch von sich ändernden elektrischen Feldern. Aus Maxwells vier Gleichungen geht letztlich hervor, daß nach dem dritten und dem vierten obigen Prinzip sich ausbreitende elektrische und magnetische Felder nicht unabhängig voneinander bestehen können, weil jedes das jeweils andere erzeugt. Daraus schloß Maxwell auf die Existenz unsichtbarer Energiewellen, die wir heute elektromagnetische Wellen oder Strahlung nennen. Das heißt, er postulierte die Existenz oszillierender elektromagnetischer Felder, die sich durch den Raum ausbreiten, ähnlich wie Wellen auf einem Teich von ihrer Quelle ausgehen.

Zur Beschreibung elektromagnetischer Wellen dienen drei Merkmale: Wellenlänge, Geschwindigkeit und Frequenz. Wie wir in Abbildung 10.1 erkennen, besteht jede Welle aus einer Abfolge von »Bergen« und »Tälern«. Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Wellenberg vorwärtsbewegt. Die Frequenz (meist in der Einheit Hertz angegeben) gibt an, wie viele Wellenberge einen gegebenen Punkt im Raum pro Sekunde passieren.

Unter Licht verstehen wir den kleinen Teil der elektromagnetischen Strahlung, den der Mensch mit seinem Auge wahrnehmen kann. Die von Maxwell berechnete Geschwindigkeit aller elektromagnetischen Wellen (einschließlich des Lichts) betrug rund 297000 Kilometer pro Sekunde. Ferner erkannte er, daß diese Wellen extrem unterschiedliche Frequenzen und Wellenlängen haben können. Wellenlänge und Frequenz einer elektromagnetischen Welle hängen miteinander zusammen; ihr Produkt ist gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Dies bedeutet, daß die Frequenz um so höher ist, je kleiner die Wellenlänge ist, und umgekehrt.

Die elektromagnetische Strahlung umfaßt ein weites Spektrum, von dem nur ein kleiner Ausschnitt (mit Wellenlängen

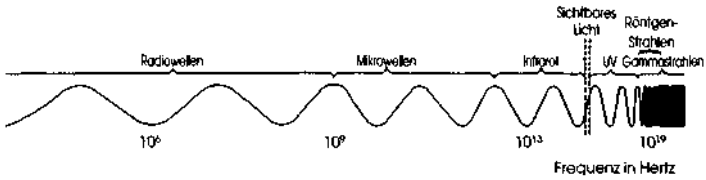


Abb. 10.1: Das elektromagnetische Spektrum

zwischen 400 und 800 Millionstel Millimetern) als Licht sichtbar ist. Das in Abbildung 10.1 skizzierte elektromagnetische Spektrum reicht von den Radiowellen (mit Wellenlängen von wenigen Zentimetern bis zu Tausenden von Kilometern) über die Mikrowellen (einige Millimeter bis Dezimeter) bis hin zu den Röntgen- und Gammastrahlen, die die energiereichste elektromagnetische Strahlung (mit den kleinsten meßbaren Wellenlängen) darstellen. Sie entstehen in der Natur unter anderem in den Sternen und beim radioaktiven Zerfall bestimmter Elemente.

Wie wir in Kapitel 8 gesehen haben, ging Einstein später beim Erarbeiten seiner Speziellen Relativitätstheorie von Maxwells Arbeiten aus. Er nannte Maxwells Theorien den »tiefschürfdsten und fruchtbarsten Beitrag zur Physik seit Newtons Zeiten«. Bei der Auswertung bestimmter Spektrallinien entdeckte der Astronom Edwin Hubble eine Rotverschiebung, aus der er darauf schließen konnte, daß sich die Galaxien voneinander entfernen (vgl. Kapitel 9).

Nachdem Maxwell die Existenz der elektromagnetischen Strahlung vorhergesagt hatte, dauerte es noch 25 Jahre, bis seine Theorie allgemein akzeptiert wurde - vor allem, weil man keine solchen Wellen nachweisen oder im Labor erzeugen konnte. Dies gelang erst dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) im Jahre 1887, also acht Jahre nach Maxwells Tod. Hertz war der erste Mensch, der mit seinen Apparaturen Radiowellen senden und empfangen konnte. In seinen raffinierten Experimenten verwendete er im Grunde die ersten primitiven Ausführungen von Sendern, Antennen und Detektoren für elektromagnetische Strahlung im Radiofrequenzbereich. Seine Versuche schufen die Grundlage für das Radio und natürlich auch für viele andere heu-

te alltägliche Geräte und Verfahren, bei denen elektromagnetische Wellen eine Rolle spielen, darunter Fernsehgeräte, Nachrichtensatelliten und Funktelefone. Der Name der oben erwähnten Frequenzeinheit wurde zu Ehren von Heinrich Hertz gewählt.

## **Penzias und Wilson entdecken zufällig die kosmische Hintergrundstrahlung** *Eine fehlende Antenne*

Die von Faraday und Maxwell begonnene Geschichte greifen wir nun fünfzig Jahre nach den Experimenten von Hertz wieder auf. Während sich die Rundfunktechnik entwickelte, erkannten die Physiker und Ingenieure, daß die Sonnenstrahlung zu Störungen beim Rundfunk führen kann. Gegen Ende der 20er Jahre wollte die amerikanische Firma Bell Telephone Laboratories ein System für die Radio- und Telefonkommunikation über den Atlantik hinweg errichten, in Ergänzung zu ihrem Unterseekabel. Dazu mußte man aber die erwähnten Interferenzen verhindern. Also richtete das Unternehmen ein Forschungsprogramm ein, bei dem das Zustandekommen der Störungen durch die Sonnenstrahlung untersucht werden sollte. Mit Hilfe eines raffinierten Systems von Antennen, Empfängern und Aufzeichnungsvorrichtungen stellte man schließlich fest, daß die Emissionen im Radiowellenbereich nicht nur von der Sonne kamen, sondern auch von anderen Himmelskörpern. Diese Entdeckung gab man am 27. April 1933 bekannt.

Das war sozusagen der Geburtstag einer neuen Wissenschaft, nämlich der Radioastronomie. Sie ermöglichte gewaltige Fortschritte in der astronomischen Forschung, denn Millionen von Himmelskörpern emittieren Radiowellen, und diese können seitdem mit Radioteleskopen auch dann erfaßt werden, wenn man die Objekte in den optischen Teleskopen nicht erkennen kann. Die Astronomie ist im Grunde die älteste Wissenschaft; sie wurde schon vor Jahrtausenden in China, Ägypten und Griechenland betrieben. Nun war sie erstmals in ihrer langen Geschichte nicht mehr nur auf die optische Beobachtung angewiesen. Wir werden

gleich sehen, daß das Aufkommen der Radioastronomie zu einer Entdeckung führte, die noch bedeutender war als das Aufspüren zuvor unsichtbarer Sterne und Galaxien.

In den 30er und 40er Jahren wurde den Astrophysikern allmählich klar, welche Bedingungen nach dem Urknall geherrscht haben mußten. Sie erkannten, daß die enorm hohe Temperatur im frühen Universum zu einem thermischen elektromagnetischen Strahlungsfeld führte, das einen hohen Anteil an Röntgen- und Gammastrahlung (mit kleinen Wellenlängen) umfaßte. Während das Universum abkühlte, entsprach die mittlere Temperatur immer größeren Wellenlängen im Spektrum. Die Physiker Ralph Alpher (geb. 1921) und Robert Herman (1914-1997), die mit dem russisch-amerikanischen Physiker George Gamow (1904-1968) zusammenarbeiteten, postulierten im Jahre 1948 folgendes: Wenn das Universum mit einem Zustand extrem hoher Dichte und Temperatur seinen Anfang nahm, dann muß als Folge des Urknalls noch heute eine Strahlung vorhanden sein, die einer mittleren Temperatur von drei Kelvin über dem absoluten Nullpunkt entspricht und im ganzen Universum mit geringer Intensität verteilt ist. Die Wissenschaftler sagten diese Strahlung im selben Artikel voraus, den wir in Kapitel 9 im Abschnitt über die Entstehung der chemischen Elemente erwähnten. Damals hatte man aber noch keine Geräte, mit denen man diese Reststrahlung hätte nachweisen können; so blieb ihre Voraussage fast zwei Jahrzehnte lang unbeachtet.

Im Jahre 1965 waren der deutsch-amerikanische Astrophysiker Arno Penzias (geb. 1933) und der amerikanische Radioastronom Robert Wilson (geb. 1936) bei den Bell Telephone Laboratories in Holmdel im Bundesstaat New Jersey damit beschäftigt, eine empfindliche Radioantenne zu kalibrieren. Über diese sollten die Verbindungen mit dem ersten Telstar-Nachrichtensatelliten geführt werden. Die beiden Forscher versuchten, die Quelle des unerwünschten Mikrowellen-»Rauschens« zu finden und zu eliminieren, das offensichtlich aus allen Richtungen des Raums mit gleichmäßiger Intensität auf die Erde gelangte. Die Existenz dieser Mikrowellensignale (also elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen zwischen denen von Radiowellen und Infrarotlicht) ähnelte sehr dem Problem, das die Bell Laboratories in

den 20er Jahren hatten und das - wie schon bemerkt - letztlich zur Entwicklung der Radioastronomie führte. Obwohl die neue Bell-Antenne so konstruiert war, daß sie stets der Satellitenbahn am Himmel folgte, nahm sie doch ständig diese allgegenwärtige Strahlung aus dem Weltraum auf, ungeachtet der Erdrotation. Die Gleichförmigkeit der Strahlung ließ Penzias und Wilson vermuten, daß sie nicht von einem bestimmten Himmelskörper oder einer bestimmten Galaxie ausgehen könne.

Zur selben Zeit untersuchte der theoretische Physiker P. J. E. Peebles (geb. 1935) an der benachbarten Princeton University mit seinem Team die Strahlung, von der Gamow, Alpher und Herman im Jahre 1948 gesprochen hatten. Die Gruppe um Peebles hatte in Princeton diese Strahlung völlig unabhängig von der Gamow-Gruppe erneut berechnet. Weil ihnen jedoch keinerlei Vorrichtungen zum Nachweis dieser kosmischen Hintergrundstrahlung bekannt waren, entwarfen sie dafür selbst eine Antenne.

Penzias und Wilson bei Bell konnten die Quelle der gleichbleibenden Strahlung, die sie mit der Telstar-Antenne empfangen, immer noch nicht erklären. Als Penzias einmal in einer anderen Angelegenheit mit dem renommierten Astronomen Bernard Burke (geb. 1928) am MIT in Boston telefonierte, erwähnte er zufällig das Problem der unerklärlichen Mikrowellensignale. Burke kannte die Arbeiten der Peebles-Gruppe in Princeton und meinte, daß Penzias und Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung gefunden haben mußten, die auch Peebles in Princeton vorausgesagt hatte. Daher machte Burke die zwei Teams miteinander bekannt. Nun arbeiteten die Bell- und die Princeton-Gruppe zusammen. Sie publizierten 1965 im *Astrophysical Journal* gleichzeitig ihre Entdeckungen. Penzias und Wilson erhielten 1978 den Nobelpreis für Physik.

Damit begann eine neue Ära in der Erforschung des Urknalls; ihr Höhepunkt waren die Daten, die vom COBE-Satelliten der NASA (der Name COBE steht für *Cosmic Background Explorer*) im Jahre 1992 aufgenommen wurden. Die Vorrichtungen an Bord von COBE lieferten nicht nur die bisher genauesten Meßwerte der Temperatur der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, sondern erfaßten auch die winzigen Variationen (entspre-



chend 1 zu 100000) dieser Strahlung. Nun konnten die Kosmologen auf die Verteilung der Materie zurückrechnen, die eine Million Jahre nach dem Urknall vorlag. Daraus wiederum konnten sie auf die Ereignisse schließen, die zur Entstehung der Galaxien infolge von Gravitationskräften führten. Das wurde in Kapitel 9 näher ausgeführt.

Im Inferno des Urknalls wurden nicht nur Wasserstoff- und später Heliumkerne gebildet. Durch die unvorstellbare Hitze jener Explosion entstand ein unsichtbares, gleichförmiges und allgegenwärtiges Feld der Mikrowellenstrahlung - eine fundamentale Form der Energie, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Kosmos ausbreitet. Georges Lemaitre, der dies 1927 als erster postuliert hatte, durfte noch erleben, daß diese Strahlung mit Hilfe der Radioastronomie entdeckt wurde. Er bezeichnete sie als »das vergangene Leuchten des Ursprungs der Welten«. Theorien und Beweise, die auf separaten Gebieten von Maxwell, Hertz, Einstein, Planck, Hubble, Gamow, Peebles, Penzias, Wilson und vielen anderen gedanklich und experimentell erarbeitet sowie miteinander kombiniert wurden, führten zur unausweichlichen Folgerung: Vor 15 Milliarden Jahren ereignete sich eine titanische kosmische Explosion, die den Raum mit elektromagnetischer Strahlung erfüllte, die sich in jedem Winkel des Universums ausbreitete. Diese Strahlung durchlief das Spektrum und hinterließ ihre schwachen Reste, die man heute mit den Radioteleskopen nachweisen kann. Auf unserem fernen, winzigen Stäubchen in diesem »weiten, kalten, allumfassenden Vakuum« sind wir ehrfürchtig und demütig, denn wir durften das »vergangene Leuchten des Ursprungs der Welten« erblicken.

## KAPITEL 11

### Der große Kollaps

*»Zur selben Stunde gab es ein großes Erdbeben, und ein Zehntel der Stadt wurde zerstört, und (...) siebentausend Menschen wurden erschlagen. (...) Und zur Zeit ihres Todes sollen sie gerichtet werden. (...) Und wenn tausend Jahre vergangen sind, soll Satan aus seinem Gefängnis befreit werden, und er soll ausgehen, die Völker zu täuschen, die in den vier Erdteilen wohnen. (...) Tod und Hölle geben die Toten frei, die in ihnen waren; und sie werden gerichtet, jedermann nach seinen Taten.«*

Die Offenbarung des Johannes

Wann wird das Universum aufhören zu bestehen? Wie wird das ablaufen? Wird irgend etwas danach kommen? Der Glaube an die Apokalypse, gefolgt vom Überleben und Frieden nur für die Tugendhaften, ist ein Mythos, der auf das 15. Jahrhundert v. Chr. zurückgeht und bis heute erhalten blieb. Jedes Jahr sagen verschiedene Gruppen den letzten Kampf von Armageddon voraus und nehmen dabei dieselbe Gewißheit für sich in Anspruch, mit der Bischof James Usher in seinen Schriften zum Alten Testament den Zeitpunkt der Schöpfung festgelegt hatte. Und ebenso werden jedes Jahr große Unglücke und Naturkatastrophen als Vorboten des Untergangs interpretiert. Im 10. Jahrhundert begannen die Verlautbarungen des englischen Königs mit den Worten »weil nun das Ende der Welt nahe ist«. Viele glaubten nämlich, daß Christus vor dem Jüngsten Gericht ein Jahrtausend lang herrschen würde, wie es in der Offenbarung des Johannes geschrieben steht. In diesem sind die apokalyptischen Prophezeiungen zusammengefaßt. Das Wort Apokalypse ist vom griechischen

Wort für »Offenbarung« abgeleitet. In den letzten Jahren traten verschiedene Gruppen mit Vorhersagen der Apokalypse auf den Plan, beispielsweise die Davidianer 1993 in Texas oder andere Gruppen, die sich in sicheren Bunkern verschanzten, um das Feuer und die Erdbeben zu überleben, die nach ihrer Überzeugung die gottlosen Menschen vernichten werden.

Im Oktober 1994 begingen fünfzig Mitglieder des Sonnen-templer-Ordens in Kanada und in der Schweiz kollektiven Selbstmord. Etliche Sekten sind vom bevorstehenden Weltuntergang überzeugt, der nur wenige Auserwählte verschonen soll. Man versucht immer noch, sein Schicksal zu wenden, und fühlt stets Anzeichen einer Verzweiflung, die die Menschheit zu allen Zeiten gequält hat.

Die ältesten Aufzeichnungen über den Glauben an die Apokalypse finden wir im *Avesta*, einer heiligen Schrift aus Persien. Sie berichtet über die Vision des Propheten Zarathustra, in der Angra Mainyu, der Geist der Zerstörung, gegen den Gott Ahura Masda aufgetreten war. Zarathustra lebte irgendwann zwischen 1200 und 1500 v. Chr. und prophezeite ein großes Gericht über alle Menschen; dieses sollten nur die Gerechten überleben.

Apokalyptische Vorhersagen finden sich auch im Christentum und im Judentum. Im Markus-Evangelium widersteht Jesus dem Zorn Satans und stellt die Einheit zwischen Gott und Mensch wieder her. In der *Offenbarung des Johannes* erscheint Jesus wie Zarathustra als ein Held, der Satan im Kampf von Armageddon besiegt. Im Alten Testament finden wir Reflexionen über apokalyptische Überzeugungen früher jüdischer Sekten, beispielsweise bei der Zerstörung Jerusalems und des Tempels durch die Babylonier oder bei jenen, die Satan zu verdrängen und die Sünder in ewige Qualen zu stürzen suchten, während die Rechtschaffenen mit immerwährenden Freuden belohnt werden sollten.

Alle apokalyptischen Mythen haben ein gemeinsames Motiv. Wir wollen etwas über das Ende des Universums wissen, und wir glauben, daß unsere Handlungen Konsequenzen haben. In den meisten Mythen wird das Gute belohnt und das Böse bestraft. Es wird also klar zwischen Richtig und Falsch unterschieden. Die Moral muß sich auf unsere menschlichen Handlungen und Beziehungen praktisch auswirken, denn sonst bestünde weniger

Anreiz, an solchen moralischen Prinzipien festzuhalten. Die Mythen verstärken diese Hoffnung und diese Furcht - die Hoffnung auf ewige Belohnung und die Furcht vor der Apokalypse, dem verheerenden Ende der Welt -, und sie versuchen, dem Leben einen Sinn zu geben und den Lebenswillen zu stärken.

Die alten Mythen gingen aus Furcht und Hoffnung hervor, doch sie verkörpern auch ein Element von Wahrheit und Realität in unserem dynamischen Universum: Was einmal entstand, muß irgendwann wieder vergehen. Die Menschen fürchten sich weiterhin und werden von der Vorstellung beunruhigt, Menschheit und Welt könnten untergehen. Wir haben uns hier mit dem Urknall und mit der Entstehung des Universums befaßt. Nun wollen wir untersuchen, welche wahrscheinlichen Vorgänge zu einem Ende des Lebens auf dieser Erde, zum Untergang unseres Sonnensystems und schließlich des ganzen Universums führen können. Diese Theorien beruhen auf wissenschaftlichen Beobachtungen und Beweisen sowie auf Überzeugungen anerkannter Kosmologen und anderer Wissenschaftler. Jedoch kann man nicht genau wissen, welches Schicksal der Welt beschieden ist. Entgegen allen apokalyptischen Lehren wird es ohne Rücksicht auf moralische Einschätzungen über sie kommen und niemanden verschonen.

## **Kometen, Planetoiden und Klimaveränderungen bedrohen das Leben auf der Erde** *Das Schicksal der Dinosaurier*

Das Leben auf der Erde, aber nicht die Erde selbst, könnte einem riesigen Kometen oder Planetoiden zum Opfer fallen. Wie in Kapitel 9 erwähnt, gibt es Billionen von Kometen, die in unserem Sonnensystem dem Einfluß der Gravitationsfelder von Sonne und Planeten unterliegen. Außerdem befinden sich Tausende von Planetoiden im Planetoiden- oder Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter. Zuweilen fängt der Planet Jupiter mit seiner gewaltigen Masse einen Kometen ein; so prallte der Komet Shoemaker-Levy 9 im Jahre 1994 auf der Südhalbkugel des Jupiter auf. Dabei verdampften enorme Mengen Mate-

rie, und riesige Gaswolken stiegen auf. Das war der mächtigste Zusammenstoß, der im Sonnensystem von Menschen jemals beobachtet werden konnte. Gelegentlich schleudert Jupiter auch Planetoiden zur Erde hin oder an der Erde vorbei auf die Sonne. Man schätzt, daß es über 10000 Kometen und Planetoiden gibt, deren Bahnen die Erdumlaufbahn schneiden und die mit über 500 Metern Durchmesser groß genug sind, unvorstellbare Katastrophen auszulösen, wenn sie auf die Erde prallen. Denkt man in geologischen Zeiträumen, dann sind solche Kollisionen recht häufig: Durchschnittlich alle paar Millionen Jahre trifft ein großer Komet oder Planetoid die Erde. Es gibt heute die Vermutung, daß ein solcher Einschlag vor rund 65 Millionen Jahren letztlich zum Aussterben der Dinosaurier geführt haben könnte. Zu anderen möglichen Bedrohungen des Lebens auf unserem empfindlichen kleinen Planeten gehören drastische Veränderungen des Wärmeflusses von der Sonne, hervorgerufen durch riesige interplanetarische Gaswolken, die im Sonnensystem schweben. Wenn sie zwischen Sonne und Erde gelangen, könnte sich die Erde abkühlen, und es könnten bestimmte Lebensformen aussterben.

**Die Sonne wird als Roter Riese und als  
Weißer Zwerg enden**  
*Die Menschen werden vorher umkommen*

Aus den Gesamtzusammenhängen konnten die Wissenschaftler ermitteln, daß das Sonnensystem - einschließlich der Erde - wohl in vier oder fünf Milliarden Jahren untergehen wird, denn dann neigt sich die Lebensdauer unserer Sonne ihrem Ende zu. Die Sonne ist über fünf Milliarden Jahre alt und kann noch fünf Milliarden Jahre lang »brennen«, das heißt in ihrem Inneren Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen. Diese Kernfusion, die in allen Sternen abläuft, setzt ungeheure Energiemengen frei, von denen ein kleiner Teil als Licht und Wärme die Erde erreicht und alles Leben auf ihr erst ermöglicht. Wenn die Sonne den gesamten Wasserstoff in ihrem Inneren zu Helium umge-

setzt haben wird, dann wird die Gravitationsenergie frei werden, so daß die Sonne expandiert. Die Temperatur an ihrer Oberfläche wird von den derzeitigen knapp 6000 Grad Celsius auf rund 3700 Grad Celsius sinken. Dadurch wird sie eine rötliche Färbung annehmen. Sie wird sich weiter zu einem Roten Riesen entwickeln, einem gewaltigen Feuerball, der 20mal so hell ist wie die heutige Sonne und einen 3mal größeren Durchmesser hat. Dieses Stadium kündigt bei einem Stern mit der Größe unserer Sonne das Ende der Lebensdauer an.

Die Astronomen haben bereits zahlreiche Rote Riesen im Weltall gefunden, darunter Aldebaran, Beteigeuze und Arktur. Während die Sonne zu einem Roten Riesen wird, wird sie viel mehr Wärme abgeben, obwohl sie gegenüber dem heutigen Zustand kühler sein und wesentlich weniger Masse enthalten wird. Dadurch werden die Menschen und alle anderen Lebewesen auf der Erde aussterben, weil durch die große Hitze das Wasser verdampft und die Atmosphäre zersetzt wird. Während der Feuerball sich ausdehnt, wird er die vier inneren Planeten (Merkur, Venus, Erde und Mars) verschlingen. Dann, nach weiteren Milliarden Jahren der sprunghaften und gewaltigen Aktivität, wird unsere Sonne schließlich zu einer kleinen Kugel zusammenschrumpfen, die etwa die Größe eines kleinen Planeten hat. Dann ist sie ein »Weißer Zwerg«, wie die Astronomen sagen, in dem der Gasdruck nicht mehr ausreicht, der Gravitationskraft standzuhalten, die die Kontraktion bewirkt. Zum Schluß wird die Sonne sich weiter abkühlen und in der Dunkelheit des Weltraums verblassen.

**Enthält das Universum genug Materie,  
um die Expansion zu stoppen und wieder in sich  
zusammenzufallen?  
*Zerfallende Protonen***

Jeder der Billionen Sterne im ganzen Universum ist irgendwann zum Untergang verurteilt, nicht nur, weil sein nukleares Brennmaterial eines Tages erschöpft sein wird, sondern auch, weil er den Kampf gegen die Gravitation letztlich nur verlieren kann. Dies bringt uns zu den einleitenden Fragen zurück: Wird das

ganze Universum irgendwann enden ? Wenn ja, auf welche Weise? Wir hatten einige Szenarien betrachtet, nach denen sich das Schicksal des Lebens auf der Erde sowie dasjenige der Sonne, des Sonnensystems und der Sterne vollziehen können. Aber welches Schicksal wird dem ganzen Universum widerfahren? Die Antwort auf diese Frage hängt vor allem von der gesamten Materiemenge und damit von der Gravitationskraft ab. Diese Kraft ist in den Atomen und in den uns vertrauten Größenordnungen viel schwächer als die elektrischen und magnetischen Kräfte, auch im Vergleich zu den Kernkräften, aber sie dominiert im astronomischen Maßstab. Ihre Reichweite beträgt Milliarden von Lichtjahren; daher hält sie Galaxien und Galaxienhaufen im ganzen Kosmos zusammen.

Wenn die beim Urknall aller Materie verliehene Geschwindigkeit der Expansion hoch genug ist, so wird die gesamte Materie der gegenseitigen Gravitationskraft entfliehen können. Das bedeutet, die zum Zeitpunkt des Urknalls begonnene Expansion wird sich auf ewig fortsetzen. Wenn die Materie aber nicht schnell genug expandiert, wird die Ausdehnung irgendwann aufhören, und das Universum wird sich wieder zum Ursprungspunkt hin kontrahieren und schließlich in einem gewaltigen Kollaps enden.

Um das Prinzip dieses Vorgangs zu verstehen, stellen wir uns einen Ball vor, den wir in die Luft werfen. Weil er der Schwerkraft dadurch nicht entkommen kann, wird er wieder auf den Boden herunterfallen. Aber Raketen erreichen so hohe Geschwindigkeiten (über 40000 Kilometer pro Stunde), daß sie der Gravitationswirkung der Erde entfliehen können. Die Geschwindigkeit, die ein Körper haben müßte, um der Gravitationskraft zu entkommen, die von der Masse der gesamten restlichen Materie im Universum herrührt, liegt dicht unterhalb der Lichtgeschwindigkeit. Wie in Kapitel 9 erwähnt, scheint es so, als entfernten sich die meisten weit außen befindlichen Galaxien von der übrigen Materie mit dieser unvorstellbar hohen Geschwindigkeit. Damit wären sie schnell genug, um niemals mehr zurückzukehren.

Im Jahre 1992 fanden Astrophysiker am Lawrence Berkeley Laboratory der Universität von Kalifornien Hinweise darauf, daß 90 Prozent der Materie im Universum als sogenannte dunkle Materie vorliegt. Sie erstreckt sich in Form gewaltiger Gaswolken

über zwei Drittel des Universums, 10 Milliarden Lichtjahre weit. Diese Materie wurde mit Hilfe eines im Jahre 1989 gestarteten NASA-Satelliten erforscht, der die Hintergrundstrahlung mißt; siehe hierzu Kapitel 10. Andere »fehlende« Masse besteht aus ausgebrannten Sternen. Sie und die eben erwähnten Gaswolken sind auch mit den leistungsfähigsten Teleskopen nicht sichtbar, aber ihre gesamte Materie kann ein so starkes Gravitationsfeld hervorrufen, daß »der Ball wieder auf die Erde zurückfällt«, das Universum also irgendwann in sich zusammenfällt.

Bei einem anderen Projekt, mit dem das Schicksal des Universums geklärt werden soll, wird eine Formation von 27 Radioteleskopen in Socorro im US-Bundesstaat New Mexico verwendet. Sie wird Very Large Array (VLA) genannt, zu deutsch »sehr große Anordnung«. Mit dem VLA kann man auch extrem weit entfernte Objekte im Weltraum nachweisen, sozusagen an den Rand des Universums blicken. Wenn wir auf diese schwach leuchtenden Objekte blicken, schauen wir im Grunde in die Vergangenheit, denn wir sehen sie so, wie sie vor Milliarden von Lichtjahren beschaffen waren, denn das Licht brauchte so lange, um die Erde zu erreichen. Daher mißt man mit dem VLA und anderen Instrumenten das Volumen der Materie und die Geschwindigkeit, mit der sie auseinanderstrebt. Noch wichtiger ist, daß wir die Geschwindigkeit der entfernteren, äußeren Objekte (also ihre Geschwindigkeit vor Milliarden von Jahren) mit der gegenwärtigen Geschwindigkeit der anderen Objekte vergleichen können. Die Zusammenhänge sind noch nicht vollständig geklärt, aber sie werden die Antwort auf die Frage ermöglichen, ob das Universum letztlich kollabieren wird (vielleicht als Ursprung eines neuen Urknalls) oder ob die Expansion in alle Ewigkeit weitergeht.

Wenn das Universum kollabieren wird, werden rund eine Milliarde Jahre vor dem großen Kollaps viele Galaxienhaufen beginnen, sich zu vereinigen. Dieser Vorgang wird Hunderte von Jahr-millionen dauern, und während dieser Zeit werden die Gravitationskräfte auf alle Sterne enorm ansteigen. Während der letzten Million Jahre wird all diese Materie noch enger zusammenkommen, und die Temperatur des sich komprimierenden Universums wird über die der Sterne hinaus ansteigen, so daß



diese explodieren werden. Dadurch werden auch viel mehr Objekte mit extrem starker Gravitationswirkung entstehen, die man als »Schwarze Löcher« bezeichnet. Sie werden mit enormer Geschwindigkeit jegliche Materie »aufsaugen«, bis schließlich alles in einen einzigen Punkt von Raum und Zeit mit unendlich hoher Temperatur und unendlich hoher Dichte kollabiert. Vielleicht wird danach ein weiterer Urknall stattfinden und das Universum damit »erneut geschaffen«.

Einige theoretische Physiker, die von Einsteins Arbeiten über eine vereinigte Feldtheorie ausgingen, entwarfen ein weiteres Szenario über das Schicksal des Universums. Wie Einstein sind sie überzeugt, daß es eine - allerdings noch nicht entdeckte - Theorie geben muß, die mit einem einheitlichen Satz von Prinzipien und Gleichungen die Existenz und die Merkmale aller Materie und Energie beschreibt. Man spricht heute von Großen Vereinheitlichten Theorien, abgekürzt GUT (vom englischen Ausdruck *Great Unified Theories*). Ein Aspekt bei den meisten Ansätzen hierfür besagt, daß alle Protonen im Universum innerhalb einiger Billionen Billionen Billionen Jahre zerfallen werden. Wenn alle Protonen innerhalb dieser enormen Zeitspanne von sich aus zerfallen müssen, wie diese Theorie es voraussagt, dann wird auch jedes Atom auseinanderfallen. Physiker an der Universität von Kalifornien in Irvine, an der Universität von Michigan, am Brookhaven National Laboratory in Upton im Bundesstaat New York sowie an anderen Instituten auf der ganzen Welt versuchen, diese Theorie zu beweisen oder zu widerlegen - in der Hoffnung, die Elementarteilchen besser zu verstehen und sie durch die fundamentalsten Theorien der Physik mit den physikalischen Phänomenen zu verknüpfen.

Das Jahr 2000 steht vor der Tür; das Millennium Watch Institute, das die apokalyptischen Prophezeiungen verfolgt, berichtet, daß allein in den USA in den letzten Jahren über tausend Organisationen und Einzelpersonen Bücher und Artikel über globale Umwälzungen publizierten, die zur Apokalypse führen sollen. Einige warnen vor Überschwemmungen und Erdbeben, andere sagen Kriege oder Hungersnöte voraus. Obwohl ihr die lange und reiche Geschichte und Tradition der alten Mythen abgeht, liegt die Wahrheit über unser Schicksal und das des ganzen

Universums in den Planetoiden und den Kometen, im Kernfusionsprozeß der Sonne, in der kumulativen Gravitation des Universums sowie im Ablauf des Protonenzerfalls.

Blicken wir nun zurück auf die bisher besprochenen Entdeckungen von Newton, Rutherford, Bohr, Einstein, Hubble und anderen, dann erkennen wir, daß jeder weitere Schritt bei der Suche nach wissenschaftlicher Erkenntnis eine neue Perspektive nicht nur über das physikalische Universum ermöglichte, sondern auch über den Menschen. Während wir vom vorkopernikanischen Zentrum eines endlichen und unveränderlichen Universums mit 5000 Sternen übergangen zu den nach Hubble erforschten Rändern einer Galaxie mit 300 Milliarden Sternen, inmitten von Milliarden anderer Galaxien, haben wir ständig die Grenzen unserer jeweiligen Erkenntnis überprüft. Im Vergleich zum Universum, wie wir es heute kennen, ist unsere ganze Welt kleiner als ein Sandkorn unter allen anderen Sandkörnern an allen Stränden der Welt.

Das Universum begann als ein leerer Raum mit Elementarteilchen, und wir wissen nicht, wie es enden wird. Zwischen diesem Beginn und diesem Ende trat die Menschheit auf die Bühne, mit mannigfaltiger und faszinierender Geschichte und Kultur. Wenn wir fortfahren, unser Denken und unsere Urteilskraft auf das Verständnis der physikalischen Welt zu richten, werden wir uns als einzigartig empfinden, zumindest bis in anderen Teilen des Universums Leben gefunden wird. Wir sind uns des Zusammenhangs, in dem wir stehen, inzwischen in höherem Maße bewußt. Wir leben für eine kurze Zeitspanne in der Nachbarschaft von öden, unbelebten Planeten, die ebenfalls ein Resultat des Urknalls sind. Wir existieren in einem entlegenen Winkel dieser Galaxis, in der der nächste Stern 37 Billionen Kilometer von uns entfernt ist. Die Menschheit fand während ihrer ganzen Geschichte zwar Trost in einer reichen Tradition von Mythen, aber es liegt ein größerer Trost in dem, was wir heute wissen, denn dieses Wissen liegt näher bei der Wahrheit.

Wir haben nun die bedeutenden Entdeckungen in Physik und Astronomie betrachtet und werden uns anschließend mit der lebendigen Materie befassen, also mit den wunderbaren Gebilden

und Wesen, die das Leben ausmachen. Wir werden die großen Geheimnisse des Lebens ergründen, ebenso die Beziehungen zwischen der physikalischen Welt und den Lebewesen, die auf der Erde entstanden. Wir werden die Verknüpfungen zwischen den chemischen Elementen und der lebendigen Materie erkennen. In den letzten drei Teilen dieses Buches werden wir die verschiedenen Lebensformen in ihrem jeweiligen Zusammenhang betrachten: mit den Atomen, aus denen sie bestehen, sowie mit den physikalischen Kräften und der Umgebung, die das Leben entstehen ließen und sein Schicksal bestimmen. Wir werden im einzelnen die Bedingungen, Schritte und Entwicklungen untersuchen, durch die sich im Laufe von Jahrmilliarden die in der Ursuppe vorhandenen Elemente zu frühen Lebensformen kombinierten, die sich zu unzähligen verschiedenen Arten auseinanderentwickelten. Von diesen wechselte ein Teil auf das Festland, und eine ganz besondere Spezies entwickelte sich so weit, daß sie selbst in den Nebel der Zeit zurückschauen und die eigene Geschichte erkennen kann.

## TEIL 5

# Evolution und das Prinzip der natürlichen Auslese

*Unter den sieben größten wissenschaftlichen Entdeckungen sind drei vor allem deshalb bemerkenswert, weil sie unsere Auffassungen vom Leben und vom Universum grundlegend veränderten: erstens die Entdeckung der Gravitation und die Enthüllung der physikalischen Gesetze des Universums, zweitens die Urknalltheorie und drittens Darwins Evolutionstheorie. Mit ihr wollen wir uns im folgenden beschäftigen. Die Evolution ist heute keine bloße Theorie mehr, sondern ein Prinzip, das nicht mehr in Frage gestellt oder debattiert wird. Dennoch versuchen die Kreationisten auch im 20. Jahrhundert noch, mit ihrer destruktiven und irrationalen, geradezu mittelalterlichen Denkweise die Emotion über die Vernunft zu stellen und die Evolution als anfechtbar hinzustellen. Die Wahrheit ist aber: Alle Lebensformen haben einen gemeinsamen Urahn, und durch Prozesse, die auf natürliche Weise die für das Überleben wichtigen Merkmale »auswählen« oder »selektieren«, paßt sich jede Art - auch der Mensch - allmählich an seine veränderliche Umgebung an.*

*In den 140 Jahren seit dem Erscheinen von Darwins Werk »Die Entstehung der Arten« konnten die Forscher auf eindrucksvolle Weise die Prinzipien der Evolution klären. Dazu trugen in unserem Jahrhundert etliche Fossilienfunde von Vorgängern des Homo sapiens bei. Außerdem entschlüsselte man weitgehend die Evolutionsmechanismen in den Zellen und in der DNA; das werden wir in den Teilen 6 und 7 besprechen. Das Gesamtbild vervollständigt sich durch zahlreiche unerwartete Entdeckungen auf anderen Gebieten. So werden wir uns in Kapitel 15 mit der Bedeutung der Plattentektonik für die Veränderungen der Umgebungsbedingun-*

gen befassen, durch die wiederum die natürliche Selektion beeinflusst wird.

Darwins Entdeckung ist ähnlich bedeutsam wie die Newtons. Beide konnten sich beim Aufstellen ihrer Postulate praktisch nicht auf irgendwelche Vorgänger stützen. Ihre Arbeiten waren weitgehend individuell, äußerst innovativ und auch umfassend. Darwin wird zuweilen als »Newton der Biologie« bezeichnet, denn Newton bereitete den Weg für unser heutiges Verständnis des Universums, und Darwin verdanken wir unser Verständnis vom Leben auf unserem Planeten.

## KAPITEL 12

### Der Fels der Schöpfung

*»Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. (...) Und Gott schuf (...) die Lebewesen im Wasser und die Vögel (...) und alle Arten von Vieh, wilden Tieren und Kriechtieren. (...) Und Gott, der Herr, schuf den Menschen aus dem Staub der Erde und blies ihm den Lebenshauch in die Nase; und der Mensch erhielt eine lebendige Seele.«*

*Die Schöpfungsgeschichte*

*»Die Überzeugung, daß die Arten unwandelbare Produkte seien, war fast zwingend, solange man glaubte, daß die Geschichte der Welt noch nicht lange andauerte. (...) Der Hauptgrund unseres (...) Widerwillens, anzuerkennen, daß eine Art deutlich verschiedene Arten hervorbrachte, liegt darin, daß wir bedeutende Veränderungen stets nur zögernd wahrnehmen, wenn wir deren Schritte nicht erkennen können.«*

*Charles Darwin, Die Entstehung der Arten (1859)*

Wir wenden uns nun vom Teleskop und dem weiten Himmel ab und betrachten die Entstehung und die Merkmale des Lebens auf der Erde. Galileis und Newtons Entdeckungen waren anfangs umstritten und wurden sogar für gefährlich gehalten. Doch wer es wagte, die anerkannten Grundsätze über das Leben in Frage zu stellen, besonders die über den Menschen, war noch gefährdeter, und seine Meinungen wurden noch heftiger bekämpft. Das war zu erwarten, denn der Ursprung des Lebens interessiert und berührt uns Menschen viel mehr als die Stellung der Erde im Universum oder das Wesen der Gravitation. Im 19. Jahrhundert gab

es einige Wissenschaftler, die sich von ihren zahlreichen Gegnern nicht beeindrucken ließen. Sie leiteten in Geologie und Biologie eine Revolution ein, die zu neuen Auffassungen über das Alter der Erde sowie über Beschaffenheit und Entstehung der Lebewesen führte. Dieses neue Verständnis war so tiefgreifend, daß es die Menschheit ihrer »kindlichen Unschuld« für immer beraubte.

## **Die spontane Entstehung des Lebens ist widerlegt, aber man muß nicht an der Schöpfung zweifeln**

*Nach Gottes Ebenbild*

Bis zur Renaissance hielt man die Fortpflanzung für das Ergebnis eines übernatürlichen Ereignisses, das von der Wissenschaft niemals beschrieben oder gar erklärt werden könne, ebenso wie die Entstehung des Lebens in der Schöpfungsgeschichte. Die Fortpflanzung oder Reproduktion der einfacheren, niederen Lebensformen sollte demnach spontan aus unbelebter Materie erfolgen. Ähnliche Theorien vertrat man für das plötzliche Auftreten von Maden im Fleisch oder von Würmern an Bäumen, von Käfern auf Mist oder Mäusen im Abfall. Man war also allgemein von »spontaner Entstehung« überzeugt.

Eine andere in den Akademien des 17. Jahrhunderts verbreitete Vorstellung war die Präformationstheorie, d. h. die Theorie der Vorausbildung. Nach ihr enthält das Spermium oder das Ei (je nach der vertretenen Version dieser Lehre) mikroskopisch kleine, zur Zeit von Adam und Eva vorgeformte Gebilde, die ihrer Befruchtung entgegensehen. Diese löst einen wundersamen Reifungsprozeß aus, und alle späteren Generationen gehen letztlich aus diesen einmal entstandenen Gebilden hervor. Der italienische Arzt und Biologe Marcello Malpighi (1628-1694) machte diese Theorie populär. Sie behinderte den wissenschaftlichen Fortschritt erheblich. Aber sehr bedeutsam für die Biologie wurden Malpighis jahrzehntelange Arbeiten als Begründer der mikroskopischen Anatomie sowie auf den Gebieten Embryologie und Pathologie.

Der englische Physiologe William Harvey (1578-1657) bewies als erster, daß bei der Fortpflanzung eine spontane Erzeugung unmöglich ist, weil jedes Tier aus einem befruchteten Ei entsteht. Der

italienische Biologe Francesco Redi (1626-1698) zeigte mit seinen Experimenten, daß Maden in faulendem Fleisch nicht spontan auftreten, sondern aus winzigen Eiern hervorgehen, die von Fliegen auf dem Fleisch abgelegt wurden. Der berühmte holländische Linsenmacher Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) wirkte entscheidend an der Weiterentwicklung des Mikroskops mit. Seine umfassenden Forschungen über Bakterien und andere einfache Mikroorganismen trugen ebenfalls dazu bei, die Vorstellung von einer spontanen Erzeugung zu widerlegen. Allerdings unterstützte er auch die Präformationstheorie. Im späten 18. Jahrhundert belegte der italienische Priester und Physiologe Lazzaro Spallanzani (1729-1799) durch eigene Versuche, daß der Kontakt zwischen Ei und Spermium für die Fortpflanzung entscheidend ist.

Im 18. Jahrhundert setzten sich allmählich biologische Erklärungen für die Fortpflanzung durch. Aber eine wissenschaftliche Biologie, die die Merkmale und Beziehungen der Lebewesen erklärt, steckte noch in den Kinderschuhen. Bis etwa 1830 war man allgemein davon überzeugt, daß wir auf einem Planeten leben, der von unveränderlichen Arten bevölkert ist, so wie Gott sie erschaffen hatte, und daß Gott die Erde als Heimstatt für den Menschen vorgesehen hatte. Man glaubte also, daß alle Pflanzen und Tiere in ihren gegenwärtigen Formen auf ewig weiterbeständen. Diese Sichtweise erscheint verständlich, denn die Theorie eines sich verändernden Universums mit einem Anfang und einem Ende kam ja erst im 20. Jahrhundert auf. Die Grundlage dafür war die Erkenntnis, daß sich die Galaxien voneinander entfernen. Daraus folgte die Urknalltheorie, wie wir im Teil 4 gesehen hatten. Die aristotelische Theorie der kristallinen Sphären war um 1830 längst widerlegt, und als Ergebnis jahrhundertelanger Forschungen akzeptierten die Menschen inzwischen die Vorstellung von »Antipoden«, das heißt von Völkern auf Inseln oder Kontinenten, die gegenüber, auf der anderen Seite der Erdkugel liegen. Die Erde »durfte« nun um ihre Achse rotieren und die Sonne umrunden; außerdem wurde die Newtonsche Physik natürlich gleichermaßen für Neuseeland wie für Europa akzeptiert. Man nahm deshalb aber noch lange nicht hin, daß sich die Erde oder das Leben auf ihr mit der Zeit veränderten.

Abgesehen von der inzwischen nicht mehr umstrittenen Stel-



lung der Erde im Sonnensystem nahm man die Bibel immer noch wörtlich und glaubte daher, das Universum sei innerhalb von sechs Tagen erschaffen worden. Wie in Kapitel 9 erwähnt, hatte der irische Erzbischof James Usher das Jahr der Schöpfung auf 4004 v. Chr. datiert. Sogar den genauen Zeitpunkt gab er an: Sonntag, 23. Oktober, um 14.30 Uhr. Ein solcher Glaube machte die menschliche Existenz klar und begreifbar. Die Menschen zogen Trost aus dem Gefühl, daß ihnen Gott ihre Vergangenheit nicht grausam vorenthielt, daß sie also nichts versäumt hatten, denn es hatte vor dem Menschen ja keine Geschichte und nicht einmal ein Universum gegeben.

Der Begriff »prähistorisch« kam in Europa erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts auf. Wenn man in einer groben Näherung fünfzig Jahre als mittlere Lebenszeit des Menschen annimmt, dann entsprachen die seit dem angenommenen Schöpfungszeitpunkt bis zum Jahre 1800 vergangenen rund 5800 Jahre nur 116 aufeinanderfolgenden Lebensspannen. Demnach war die Menschheit 116 Lebensspannen zuvor in einer unbekanntem Dunkelheit entstanden, hatte sozusagen wie aus einer Gebärmutter das Licht der Welt erblickt. Man glaubte, die Menschen seien Kinder Gottes, unschuldig und behütet. Man hatte keinen Grund, diesen Glauben in Frage zu stellen. Die vertraute Vorstellung von der Geburt der Menschheit lehnte sich an den Begriff der Schöpfung an. Gott erschuf Adam und brachte damit die Menschheit in die Welt, wie es Michelangelo auf seinen Fresken in der Sixtinischen Kapelle in Rom darstellte. Kunst und Literatur verankerten diese Vorstellung in der westlichen Kultur. Es war noch eine weitere Revolution nötig, um dieses Bild aus unseren Köpfen zu verbannen.

**Vergleichen und Einordnen der Lebewesen führt zur Frage, ob Lebensformen auf Dauer feststehen**  
*Der sechste Tag der Schöpfung*

Aristoteles hatte gelehrt, daß alles in der Natur nach Perfektion strebt und sie weitgehend erreicht (wie der Mensch) oder verfehlt (wie alle niederen Tiere), daß sich die Lebewesen aber nicht im biologischen Sinne entwickeln. Die sorgfältig ausgearbeitete

»Skala des Seins« in seiner Philosophie war sozusagen eine Stufenleiter des Lebens. An ihrem unteren Ende standen die Mineralien und ganz oben der Mensch. Dabei gab es im Laufe der Zeit keinerlei Variation, sondern die Arten waren für immer unveränderlich und ließen den Grad der Perfektion erkennen. Dieser hatte nichts mit ihrer Anatomie oder ihrem jeweiligen Entwicklungsstadium zu tun. Zusammen mit der Schöpfungsgeschichte, der Überlieferung von der Sintflut sowie der Beschreibung der Menschen in der Bibel und der Macht der Religion führte dieses Konzept dazu, daß man keine Evolution akzeptierte. Daher überdauerte die aristotelische Auffassung der unveränderlichen Arten seine Auffassung von der unbeweglichen Erde um mehr als zwei Jahrhunderte.

Im Jahre 1691 hatte der englische Naturkundler und Botaniker John Ray (1627-1705) eine Abhandlung mit dem Titel *Die Weisheit Gottes, manifestiert in den Werken der Schöpfung* herausgegeben. Darin beschrieb er ein System der Lebewesen, das er aus deren strukturellen und anatomischen Merkmalen ableitete. Dieses Werk führte wie auch andere das aristotelische Konzept fort und verfeinerte es, indem es die damals bekannten Lebewesen identifizierte und einordnete. Zudem entwickelte Ray ein System für die Benennung, das das Konzept der Unwandelbarkeit der Arten weiter fixierte. Gleichzeitig legte es jedoch den Grundstein für die vergleichende Anatomie, die später ein wichtiger Ausgangspunkt der Evolutionstheorie wurde, denn deren Voraussetzung war ein klares Bild der anatomischen Ähnlichkeiten und Unterschiede der Arten.

Der bedeutendste der Forscher, die in der Biologie das Klassifizieren, Beschreiben und Vergleichen vorantrieben, war der Schwede Carl von Linné (1707-1778). Der berühmte Anthropologe und Philosoph Loren Eiseley beschrieb in jüngerer Zeit Linnés Zuneigung zur unglaublichen Vielfalt des Lebens als einen »poetischen Hunger des Geistes nach Erkenntnis über jedes Blatt, jede Blume und jeden Vogel. (...) Er [Linne] war in der Namensgebung der Genius par excellence.« In seinem 1735 erschienenen Werk *Systema Naturae* (Das System der Natur) beschrieb Linné eine klare und effiziente Methode, alle Tiere und Pflanzen zu benennen. Dabei erhält jede Art einen zweiteiligen Namen.

Der erste Teil gibt die Gruppe (oder Gattung) der miteinander verwandten Lebewesen an, beispielsweise alle Hundeähnlichen, und der zweite Teil gibt die spezifischere Gruppe an, die sogenannte Art. So heißt der Wolf wissenschaftlich *Canis lupus* (von den lateinischen Wörtern *canis* = Hund und *lupus* = Wolf). Außer den Kategorien Gattung und Art, wie sie aus dem Namen im Linnischen System hervorgehen, wurden inzwischen fünf weitere Kategorien identifiziert, jede wiederum mit mehreren Untergliederungen. So gibt es sieben bedeutende hierarchische Stufen, in die alle Lebewesen eingeordnet werden können. Diese Stufen sind, beginnend mit der allgemeinsten:

*Reich:* Tiere, Pflanzen, Pilze, Protozoen und Bakterien.

*Stamm:* Im Tierreich gibt es beispielsweise zwanzig Stämme. Einer davon sind die Chordaten, also alle Tiere, die einen vom Kopf bis zum Schwanz verlaufenden Nervenstrang haben; hierzu gehören - neben vielen anderen - Fische, Schlangen, Fledermäuse und auch der Mensch.

*Klasse:* Eine Klasse der Chordaten sind die Säugetiere, deren Weibchen Milchdrüsen haben, mit denen sie die Jungen säugen. Hierzu gehören unter anderem die Hunde, die Wale, aber auch der Mensch.

*Ordnung:* Eine Ordnung der Säugetiere sind beispielsweise die Primaten. Diese weisen also sämtliche eben für die Säugetiere und die Chordaten erwähnten Merkmale auf. Sie sind jedoch weiter gekennzeichnet durch Gliedmaßen mit jeweils fünf Fingern bzw. Zehen, an denen sich Nägel anstatt Krallen befinden; schließlich haben ihre Hände einen Daumen und können greifen. Außerdem haben die Primaten von allen Säugetieren im Verhältnis das größte Gehirn. Zu den Primaten gehören unter anderem Schimpansen, Orang-Utans und der Mensch. Anders ausgedrückt: Der Mensch gehört zum selben Reich, zum selben Stamm, zur selben Klasse sowie zur selben Ordnung wie die Affen.

*Familie:* Eine Familie der Primaten sind beispielsweise die Hominiden, die - wie gesagt - zu den Säugetieren und zu den Chordaten gehören. Die Hominiden sind charakterisiert durch ihre Fähigkeit, auf zwei Beinen zu gehen. Man kennt zumindest drei ausgestorbene Arten der Hominiden - *Homo erectus*, *Homo ha-*

*bilis* und *Australopithecus* (auf den wir in Kapitel 14 noch zurückkommen werden) - und eine noch lebende: *Homo sapiens*.

**Gattung:** Zur Familie der Hominiden gehört unter anderem die Gattung *Homo* (vom lateinischen Wort *homo* - Mensch, nicht zu verwechseln mit dem griechischen Wort *homo* = gleich). Die Gattung *Homo* ist charakterisiert durch ein größeres Gehirn und eine Kopfform, die der des heutigen Menschen ähnelt. Der *Homo sapiens* ist die einzige noch lebende Art der Gattung *Homo*.

**Art:** Zur Gattung *Homo* und zur Familie Hominiden gehört als einzige Art der *Homo sapiens* (lateinisch *sapiens* = weise, vernunftbegabt). Ein anderes Beispiel: Der Höckerschwan (*Cygnus olor*) ist eine von mehreren Arten der Gattung *Cygnus* (Schwan), die wiederum zur Familie der Gänsevögel gehört. Modern ausgedrückt: Zu einer Art gehören alle Mitglieder einer Gattung, die sich paaren und dabei fruchtbare Nachkommen hervorbringen können.

Das Linnese System war in den beiden vorigen Jahrhunderten zeitgemäß und äußerst nützlich, denn bei zahlreichen Seereisen und anderen Expeditionen wurden auf allen Kontinenten und in den Meeren Tausende neuer Pflanzen- und Tierarten entdeckt. Linnés Ruhm beruht auf der Systematik, in die er die Lebewesen einteilte. Vor allem um diese Kategorisierung zu fördern, beschäftigte man bei fast allen Übersee-Expeditionen Naturkundler. Und auf einer solchen Forschungsreise erhielt Charles Darwin erste Anregungen zu seiner Evolutionstheorie.

In den frühen Ausgaben seines *Systema Naturae* hielt Carl von Linné die Vorstellung aufrecht, daß die Arten unveränderlich seien, daß also die heutigen Arten genau so beschaffen seien, wie sie es am sechsten Tag der Schöpfung waren. Sein System der Klassifizierung machte es klarer als jemals zuvor, daß jedes Lebewesen eine bestimmte Form hat. Im Laufe seiner langjährigen Forschungen fiel es ihm jedoch immer schwerer, an seiner ursprünglichen These von der Unwandelbarkeit der Arten festzuhalten. Angesichts der Möglichkeit, Haustiere zu kreuzen, und der Vererbung geringfügiger Veränderungen, die man heute Mutationen nennt, war Linné schließlich nicht mehr sicher, »ob alle diese Arten Kinder ihrer Zeit sind oder ob der Schöpfer zu Beginn

der Welt den Lauf der Entwicklung auf eine bestimmte Anzahl von Arten beschränkt hatte«. Weil diese Frage seinerzeit unbeantwortet blieb, strich Linne für die späteren Ausgaben des *Systema Naturae* die Behauptung, daß alle Arten festgelegt seien und keine weiteren entstehen könnten. So diente sein System nicht nur als Basis für die vergleichende Anatomie der Lebewesen, sondern konnte auch deren Veränderungen reflektieren.

## **Die moderne Geologie widerspricht dem Kreationismus**

### *Mammuts und Säbelzahn tiger*

Bereits um 500 v. Chr. fand der griechische Philosoph Xenophanes von Kolophon (ca. 570-475 v. Chr.) Seemuscheln sogar in den Gesteinsschichten hoher Berge in Griechenland. Er meinte, die Muscheln seien durch katastrophale Überschwemmungen dorthin gelangt. Mitte des 17. Jahrhunderts verfaßte der französische Naturkundler Isaac de La Peyrère (um 1596-1676) ein Buch über einige seltsam geformte Steine, die man in Frankreich auf dem Lande gefunden hatte. Er war überzeugt, diese Steine seien von primitiven Menschen bearbeitet worden, die noch vor Adams Zeiten gelebt hätten. De La Peyrère wurde bedroht, und sein Werk wurde 1655 öffentlich verbrannt.

Ab 1749 brachte der französische Naturkundler Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) ein 44bändiges Werk über die Naturgeschichte heraus. In seinen umfassenden Studien entwickelte Buffon revolutionäre Vorstellungen zur Geologie und zur Biologie. Er war einer der ersten, die sich diesen Gebieten auf streng wissenschaftliche Weise zuwandten. Buffon kam zu dem Schluß, daß manche tierische Lebensform ausgestorben war, und nahm an, daß bestimmte Tierarten im Laufe der Zeit Veränderungen erfahren hätten. Weiterhin glaubte er, daß manche Säugetiere gemeinsame Vorfahren haben könnten, die sich physisch von den heutigen Säugetieren unterschieden. Wissenschaftler und Theologen kritisierten Buffons Ideen über die Evolution heftig. Außerdem bekämpfte man seinen Ansatz zur Erdgeschichte mit verschiedenen Stadien sowie seinen Vorschlag einer Zeitskala mit

rund 35000 Jahren, anhand deren er die geologische Schichtenbildung und die Geschichte des Lebens auf der Erde erklären wollte. Ähnlich wie die katholische Kirche im Jahre 1633 Galilei zum Widerruf gezwungen hatte, nötigte das theologische Komitee an der Universität Paris Buffon, bestimmte Passagen schriftlich zurückzuziehen, um der Zensur zu entgehen: »Ich nehme alles zurück, was in meinem Buch über die Entstehung der Erde enthalten ist«, führte Buffon aus, »und alles, was der Schöpfungsgeschichte widersprechen könnte«.

Im Jahre 1771 fand Johann Friedrich Esper (1732-1781) in einer Höhle in Deutschland menschliche Gebeine, zusammen mit dem Skelett einer ausgestorbenen Bärenart. Der englische Archäologe John Frere (1740-1807) fand 1790 nahe dem englischen Ort Hoxne einige steinzeitliche Feuerstein-Artefakte zwischen den Knochen von Tieren, die auf der Erde nicht mehr vorkamen. An einigen Orten in Europa wurden menschliche Schädelknochen gefunden, wiederum neben ähnlichen Überresten und auch zusammen mit zahlreichen anderen Arten von Fossilien. All diese Funde entsprachen nicht der biblischen Schöpfungsgeschichte, denn sie ergaben das Bild einer Erde, auf der Mammuts, Nashörner mit struppigem Fell, Säbelzähntiger und viele andere Arten lebten, die inzwischen alle ausgestorben waren.

Aber davon abgesehen, daß fossile Indizien für die biologischen Aspekte eines derart revolutionären Ansatzes wie der Evolutionstheorie notwendig waren, mußte man zuerst einmal beweisen, daß ausreichend Zeit verstrichen war, in der eine Evolution hätte stattfinden können. Buffon hatte schon darüber spekuliert, aber der entscheidende Beweis schlummerte buchstäblich noch in der Erde und wartete sozusagen darauf, durch sorgfältige Beobachtung und Analyse ans Tageslicht gebracht zu werden - durch jene Forscher, die ein ganz neues Wissenschaftsgebiet schufen. Nach mehrjährigen Bemühungen reichte der schottische Naturforscher und Geologe James Hutton (1726-1797) bei der Royal Society in Edinburgh seine erste fundierte Untersuchung über das Alter der Erde ein. Die 1785 erschienene Arbeit trug den Titel *Theorie der Erde*. Hutton zeichnete ein überzeugendes Bild: Böden entstehen durch die Verwitterung von Gesteinen; Gezeiten und Wellenschlag erodier-

ren die Küste; Sedimentschichten häufen sich an; die allgemeinen Zyklen von Ablagerung, Auffalten von Gebirgen sowie Erosion sind überall zu erkennen.

Mit seiner Abhandlung schuf Hutton eine neue Wissenschaft geradezu aus dem Nichts und wurde damit sozusagen zum Vater der modernen Geologie. Er stellte das fundamentale Prinzip der Geologie auf, das heute Uniformitarianismus oder Aktualismus genannt wird. Es besagt, daß Gesteine und andere anorganische Materialien der Erde durch eine kontinuierliche und grundsätzlich gleichförmige Reihe natürlicher Phänomene geformt und modifiziert werden, darunter Regen, Wind, Gezeiten und allmählicher Verschiebungen in der Erdkruste. Hutton sah Katastrophen wie Überschwemmungen und Erdbeben als Ausnahmen innerhalb der fundamentalen geologischen Prozesse des Aktualismus an. »Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit«, meinte er. Nach seiner Überzeugung waren alle Bedingungen, die für beobachtete (vergangene) geologische Phänomene verantwortlich waren, die gleichen Bedingungen wie die heute herrschenden. Das bedeutet, frühere Phänomene können vollständig durch gegenwärtige Prozesse und den Zeitfaktor erklärt werden.

Zehn Jahre nach seiner ersten Präsentation vor der Royal Society gab Hutton sein zweibändiges Werk *Theorie der Erde* mit einer umfassenderen Analyse heraus. Er behauptete unumwunden, daß die Erde mindestens einige hunderttausend Jahre alt sein müsse. »James Hutton grübelte an einem schottischen Flößchen, das etwas Sediment zur See hinabträgt«, schrieb Loren Eiseley, »und er spürte das Gewicht des ganzen Kontinents unruhig unter seinen Füßen schwanken und sah Städte und Reiche so körperlos entschweben wie eine Wolke am Sommerhimmel. (...) Er entdeckte ein ungreifbares Ding, gegen das der menschliche Geist sich lange gewappnet hatte, (...) die Zeit.« Hutton öffnete dieses weite Fenster der Zeit und gab damit anderen die Möglichkeit, die immer häufigeren Fossilienfunde in einen angemessenen Zusammenhang zu stellen.

Trotz der Überzeugungskraft von Huttons Vorträgen und Schriften bekämpften viele Wissenschaftler seine Theorie des Uniformitarianismus. Sie wollten keine Vorstellung akzeptieren, die der seinerzeit gängigen Sichtweise, dem sogenannten Kata-

strophismus, widersprach. Danach war die Erde vor 5800 Jahren von Gott als Heimstatt für die Menschen erschaffen worden, und die geologischen Formationen entstanden durch plötzliche Katastrophen, ähnlich der in der Bibel beschriebenen Sintflut. Hutton wurde von vielen als Ketzer angesehen. Doch allmählich zeichnete sich immer deutlicher ab, daß der Katastrophismus kein tragfähiges Prinzip war, sondern aufgegeben oder modifiziert werden mußte. Dabei waren einerseits Huttons Theorien einzubeziehen und andererseits die Lehren der christlichen Theologie zu bewahren.

Der französische Zoologe und Staatsmann Georges Cuvier (1769-1832) begann 1796 damit, eine Geschichte der Erde zu erarbeiten. Während seiner Zeit als Professor für Naturkunde am College de France entdeckte Cuvier nahe bei Paris Mammutknochen, außerdem die Überreste von riesigen Salamandern, fliegenden Reptilien und anderen ausgestorbenen Arten. An den Fossilien erkannte er eine Beziehung zwischen den Schichten und den Veränderungen bei inzwischen ausgestorbenen Arten: Je tiefer die Schichten lagen, desto weniger ähnelten die Fossilien den heute lebenden Tieren. Mit Hilfe von Mineralogen versuchte Cuvier herauszufinden, wie die Knochen dieser faszinierenden ausgestorbenen Kreaturen in die tiefen Erdschichten geraten waren. Er entwickelte dabei auch das noch recht junge Fachgebiet der vergleichenden Anatomie weiter, das ja auch auf Linnés Arbeiten gründete. Zu Cuviers brillanten Schriften gehören die *Vorlesungen über vergleichende Anatomie* (1800), in denen er sein Prinzip der »Beziehung der Teile« aufstellte, und die *Untersuchungen an den Knochen fossiler Wirbeltiere* (1812).

Fast schien es so, als hätte Cuvier keine andere Wahl gehabt, als Huttons Theorien zu bestätigen, denn die Erde enthüllte Schicht um Schicht ihre frühe Geschichte: Sie erzählte von Seemuscheln, Gebeinen, verschiedenen Gesteinsarten, von Seen und Meeren wie auch vom Zurückweichen des Wassers, das von einem weiteren marinen Zeitalter gefolgt wurde. Aber als tief religiöser Mensch sah Cuvier seine Aufgabe darin, die Indizien für diese Phasen der geologischen Ereignisse in Einklang damit zu bringen, daß die Erde nach den anerkannten Glaubenssätzen weniger als 6000 Jahre alt sein mußte. Das zwang ihn in die



schwierige Position eines führenden Vertreters des Katastrophismus.

Cuvier kam zu dem Ergebnis, daß der populäre Ansatz des Katastrophismus richtig sei und James Hutton unrecht habe. Ein Reihe großer Überschwemmungen, so meinte Cuvier, habe zu den Ablagerungen und zum Aussterben von Arten geführt. Seit 1812 propagierte er seine Version des Katastrophismus und verfaßte dazu einige Schriften, darunter 1815 seine *Theorie der Erde* und 1825 die *Abhandlungen über die Umwälzungen auf der Erde*. Andere Wissenschaftler unterstützten Huttons Thesen, wie z. B. William Smith (1769-1839) in seiner Schrift *Das formationskundliche System organisierter Fossilien*, die 1817 herausgegeben wurde. Cuvier blieb dabei, daß die von plötzlichen Landbewegungen und Überschwemmungen verschonten Arten die Erde wieder bevölkerten. Er war überzeugt, daß neue Arten nicht wirklich neu waren, sondern aus noch unerforschten Teilen der Erde stammten. Cuviers unseliges Erbe war eine Modellvorstellung, der noch die Kreationisten des 20. Jahrhunderts anhängen.

Ohne jemals einen realistischen Begriff von der geologischen Zeitskala zu bieten, blieb der Katastrophismus doch eine populäre Sichtweise. Er bewahrte die letzten aristotelischen Bemühungen um Erkenntnisse in der Biologie und hielt die Auffassungen vom göttlichen Ursprung und der Unwandelbarkeit der Arten aufrecht.

### **Die geologische Zeitskala wird anerkannt, nicht aber die Evolutionstheorie** *Nach dem Ebenbild eines Affen*

Entscheidende Beiträge zur Evolutionstheorie leisteten im 18. Jahrhundert Erasmus Darwin (1731-1802), der Großvater Charles Darwins, und Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829). Der Engländer Erasmus Darwin war ein bekannter Arzt und galt auch als innovativer und radikaler Denker. Seine Version der Evolutionstheorie besagte, daß Arten sich selbst modifizieren, indem sie sich an ihre Umgebung anpassen, und zwar in einer Art »bewußter Bemühung«. Erasmus Darwins Theorie nannte man später die »Lehre von den erworbenen Eigenschaften«.

Der französische Biologe und Botaniker Jean-Baptiste Lamarck, ein Zeitgenosse von Erasmus Darwin, war der bekanntere der beiden. Er vertrat eine ähnliche Evolutionslehre wie dieser und trug wesentlich zur korrekten Einordnung von Pflanzen und Tieren in Klassen, Ordnungen, Gattungen usw. bei. In einem 1809 erschienenen Zoologie-Lehrbuch vertrat er zwei Prinzipien, von denen er glaubte, sie erklärten die Vielfalt und die Entwicklung von Lebensformen: Erstens werden die Organe durch Anwendung leistungsfähiger, verkümmern aber, wenn sie nicht genutzt werden. Zweitens bleiben solche Veränderungen in den Tieren erhalten und werden auf ihre Nachkommen übertragen. Beispielsweise meinte Lamarck, daß Giraffen einen so langen Hals haben, weil sie sich so oft nach den Blättern an den Bäumen strecken. Diese Ansicht war eine Art »umgekehrter Darwinismus«. Danach könnte eine Kreatur eher selbst ihr Schicksal steuern, als daß die Umgebung die Kreatur beeinflusste. Es handelte sich hier aber um eine reine Vermutung, ohne wissenschaftlichen Ansatz und ohne jede Beweisführung.

Lamarcks Version der »Lehre von den erworbenen Eigenschaften« war eine Kombination seiner eigenen Sichtweise von Gottes Plan mit der aristotelischen Skala des Seins. Lamarck lehrte, daß das Leben höheren Stufen zustrebt, um der perfekten Schöpfung näher zu kommen. Auch er erkannte, daß Veränderungen in der physikalischen Umgebung zu Veränderungen der Bedürfnisse der Lebewesen führen. Diese Umgebungsfaktoren machte er verantwortlich für die Fähigkeit aller Tiere, nach Gottes unerforschlichem Ratschluß Perfektion zu erreichen. Wie andere Evolutionisten des 18. Jahrhunderts sah er Grenzen für diese Variationen. Beispielsweise könnten demnach eine graue und eine weiße Taube vor vielen Generationen einen gemeinsamen Vorfahren gehabt haben, während dies seiner Meinung nach bei Hund, Wolf und Bär nicht der Fall sein konnte. Lamarcks Auffassungen galten als interessant, aber umstritten und wurden von einigen Biologen im frühen 19. Jahrhundert unterstützt. Doch seine strikte Weigerung, seine Theorien mit Fakten zu untermauern, machte ihn schließlich zum Außenseiter. Er starb später vereinsamt und in Armut.

Bis um das Jahr 1820 hatte noch niemand Huttons neue Er-

kenntnisse ernsthaft angewandt. Geologie und Biologie waren noch völlig unabhängig voneinander: Carl von Linné hatte ein siebenstufiges System zum Klassifizieren der Lebewesen geschaffen; man hatte die ersten Zellen im Mikroskop erblickt und nach den Entwicklungsstadien der Lebewesen gesucht; Hutton hatte den Uniformitarianismus stark gestützt, aber Cuviers Katastrophismus verstellte den Blick für die Notwendigkeit einer geologischen Zeitskala. Buffon, Erasmus Darwin und Lamarck glaubten, die Tiere seien nicht so unveränderlich, wie man angenommen hatte. Aber Ablauf und Triebkraft der Evolution blieben unklar, so daß man auf Vermutungen und Spekulationen angewiesen war. Andeutungen über die Evolution und das hohe Alter der Erde waren noch kaum zu vernehmen, denn sie wurden von denen übertönt, die die Unveränderlichkeit der Arten und den Katastrophismus proklamierten.

Im Kielwasser von Cuviers Popularität in Europa zu Beginn des 19. Jahrhunderts untersuchte der englische Geologe Charles Lyell (1797-1875) einige Gesteinsformationen und Fossilien genauer, als dies zuvor irgend jemand getan hatte. In seinem 1830 erschienenen Buch *Prinzipien der Geologie* griff er Huttons Ansichten auf und bewies noch überzeugender, daß der Katastrophismus hier - im Gegensatz zu Cuviers Auffassungen - keinen Sinn ergab: Auch wenn sich von Zeit zu Zeit Katastrophen ereigneten, so hätten doch die natürlichen Kräfte von Wind, Wasser und Erdbewegungen stets langsam und gleichmäßig gewirkt.

Lyell stützte seine Sichtweise mit einer noch nie dagewesenen Anzahl von Beispielen, die er bei seinen ausgedehnten Reisen in der ganzen Welt gesammelt hatte. Angesichts dieser überwältigenden Indizien begann man allmählich zu akzeptieren, daß sich ein langsamer, gleichmäßiger geologischer Prozeß vollzogen hatte und noch vollzog. Erstmals sah es so aus, als könnte die Erde sogar Jahrmillionen alt sein. Und tatsächlich schien sich die Erde verändert zu haben. Vielleicht waren Gesteinsformationen, Küsten und Gebirge erodiert worden und hatten ganz neue Konfigurationen hervorgebracht. In der Geologie wandte sich das Blatt zugunsten von Hutton, Lyell und den jungen Naturforschern, die nicht in der Vergangenheit steckengeblieben waren.

Auch wenn die Erde älter als angenommen war und Verände-

rungen erfahren hatte, wie sie Lyell beschrieb, blieb es - aus wissenschaftlicher, philosophischer und religiöser Sicht - indiskutabel, daß das Leben selbst sich irgendwie entwickelt hatte. Der belgische Paläontologe Philippe-Charles Schmerling (1791-1836) fand im Jahre 1830 in Belgien steinerne Artefakte und zwei menschliche Schädel neben den Knochen ausgestorbener Rhinocerosse und Mammuts. Prompt erklärte man die räumliche Nähe der verschiedenen Funde mit Zufall oder gar Betrug. Und 1838 fand der französische Archäologe und Schriftsteller Jacques Boucher de Perthes (1788-1868) bei Abbéville in Nordfrankreich zahlreiche Feuersteinbeile und andere steinerne Gegenstände, die sehr alt und von Hand bearbeitet zu sein schienen. Er knüpfte an seine Funde die Theorie, daß die Beile von primitiven Menschen gefertigt worden waren, die vor der Sintflut gelebt haben mußten, die in der Schöpfungsgeschichte geschildert ist. Trotz dieser und anderer sich häufender Indizien wurden die Theorien und Schriften von Boucher de Perthes ignoriert, wie man auch im 17. Jahrhundert ähnliche Entdeckungen von Isaac de La Peyrère zurückgewiesen hatte. Allerdings gab es noch keine Methode, das Alter der Proben festzustellen. Heute ist die Datierung anhand der Radioaktivität der Kohlenstoff-Isotope gängig, und auch die moderne chemische Analytik gibt einige Aufschlüsse über Herkunft oder Geschichte der Funde.

Immerhin akzeptierte man allmählich Lyells geologische Lehren, und auch die Frage nach dem Alter der Erde und der Lebewesen auf ihr wurde zum gängigen Thema. Trotzdem sah man darin keine Evolution, sondern glaubte nur, daß die unwandelbaren, von Gott erschaffenen Lebensformen dann eben seit mehr als 5800 Jahren bestünden. Es schien mittlerweile möglich, eine veränderliche Erde und eine erweiterte biologische Zeitskala zu akzeptieren; aber die Vorstellung veränderlicher Lebensformen blieb unerhört und damit ein paar wunderlichen Philosophen überlassen. Nach wie vor galt die von John Ray formulierte Sichtweise: »Was auch immer über das Alter der Erde und der Lebewesen auf ihr gesagt wird, die Art des Menschen ist jung.«

Obwohl nach der Veröffentlichung der Werke von Buffon, Lamarck und Erasmus Darwin weitere Beweise für die frühere Existenz primitiver Menschen und auch Artefakte gefunden wurden

- jedoch niemals Fossilien existierender Arten -, blieb die Frage bestehen: Entwickeln sich Lebewesen? Wenn sich die anorganische Welt mit der Zeit veränderte, wie Hutton und Lyell gezeigt hatten, war es dann möglich, daß sich die organische Welt ebenfalls mit der Zeit entwickelte? Warum starben Tiere aus? Woher kamen die menschlichen Gebeine in den Höhlen? War der Mensch einst so primitiv, wie es die Artefakte und die Gebeine vermuten ließen? War der Mensch jemals in geringerem Maße Mensch? - Fragen von enormer Tragweite.

Solange die Arten in ihrer gegenwärtigen Form als unveränderlich galten und die Veränderungen der Erde auf plötzliche und katastrophale Einwirkungen (wie die Sintflut) zurückgeführt wurden, herrschte Frieden zwischen Theologen und Wissenschaftlern. Das war die Situation in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts - ein stillschweigender Waffenstillstand, denn Geologen und Biologen waren so weit wie irgend möglich gegangen, um ihre Beobachtungen noch mit der Heiligen Schrift in Einklang zu bringen. Aber Huttons und Lyells abweichende Auffassungen über die Erde, verknüpft mit Ansätzen zu einer Evolutionstheorie, markierten den Anfang vom Ende dieses unbequemen Kompromisses.

Entgegen Gottes Wort hatten Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton die Menschheit aus dem Zentrum des Universums verbannt. Nun war ein anderer Ketzer drauf und dran, durch das von Hutton und Lyell geöffnete Fenster zu blicken und eine unglaubliche Aussicht zu beschreiben. Dabei sollte er die Menschheit noch heftiger herausfordern, indem er bewies, daß Michelangelos Fresken in der Sixtinischen Kapelle in Rom vollständig umgezeichnet werden müßten, denn die Menschen sollten nun nicht mehr Geschöpfe nach Gottes Ebenbild sein: Die Fingerspitze, die Adam seine Existenz verlieh, sollte nicht mehr die Gottes sein, sondern die eines Affen.

## KAPITEL 13

### Der unauslöschliche Stempel unseres Ursprungs

*»Der große Synthetiker, der das Aussehen einer Generation verändert, der plötzlich eine kaleidoskopische Änderung unserer Weltsicht hervorruft, kann als der beneidetste, gefürchtetste und gehäßteste Zeitgenosse gelten.«*

Loren Eiseley, *Darwin's Century* (1958)

Die abenteuerlichste und umstrittenste Entdeckung im 19. Jahrhundert und vielleicht in der Menschheitsgeschichte überhaupt war die von Charles Robert Darwin (1809-1882) aufgestellte Theorie der Evolution durch natürliche Auslese. Sie rief zu Darwins Zeit und auch später starke Emotionen hervor - sowohl bei denen, die sein Genie anerkannten, als auch bei denen, die ihn am liebsten auf dem Scheiterhaufen verbrannt hätten.

#### **Darwin sticht mit der »Beagle« in See** *Finken und Strauße geben einen Hinweis*

Als Charles Darwin acht Jahre alt war, starb seine Mutter, und seine älteste Schwester Caroline zog ihn auf. Er besuchte exklusive Privatschulen, war aber kein besonders guter Schüler. Nach Meinung seines Vaters, eines wohlhabenden Arztes, kümmerte er sich »um nichts als um Schießen, Hunde und Rattenfängerei«. Ähnlich wie Einsteins Vater sagte Darwin senior zu seinem Sohn: »Du wirst dir selbst und deiner Familie Schande bringen.« Nachdem Charles sein Studium an der medizinischen Fakultät der Universität Edinburgh abgebrochen hatte, studierte er Theologie

am Christ's College an der Universität Cambridge. Dieses Studium schloß er 1831 ab, um anschließend in die Dienste der Anglikanischen Kirche zu treten. Aber auf seine Ordination mußte er warten, denn meist dauerte es ein bis zwei Jahre, bis eine Anstellung möglich war. Darwins Vater war bereit, ihn in der Zwischenzeit zu unterstützen.

Charles war als Student in den Naturwissenschaften recht gut gewesen. Deshalb erwog er, eine »geologische« Reise in andere Erdteile oder eine ausgedehnte Seefahrt auf einem Handelsschiff zu unternehmen, um seinen Horizont zu erweitern, bevor er eine lebenslange Stellung als Geistlicher antrat. Er hatte seinen Botanikprofessor John Stevens Henslow (1796-1861) bewundert. Dieser hatte die Botanik und die Biologie überhaupt an der Universität populär gemacht. Darwin hatte sich mit ihm angefreundet, aber niemals daran gedacht, sich der Biologie zu verschreiben. Ende August 1831 aber erhielt Darwin von einem Regierungsbeamten namens George Peacock einen Brief, der nicht nur Darwins Ansichten über die Bedeutung der Biologie, sondern letztlich sogar den Lauf der Wissenschaftsgeschichte ändern sollte:

*»Captain FitzRoy (...) sticht Ende September in See, um die Südküste (...) der Terra del Fuego zu erforschen. Danach will er die Südseeinseln aufsuchen und anschließend durch den Indischen Archipel nach England zurückkehren. Die Expedition hat ausschließlich wissenschaftliche Zwecke, und auf der Reise wird man Ihnen die nötige Zeit lassen, Ihren Forschungen über die Naturgeschichte nachzugehen. (...) Die Admiralität beabsichtigt nicht, Ihnen eine Vergütung zu zahlen, wird Sie aber offiziell berufen. (...) Wenn eine Vergütung nötig ist, so wird sie, wie ich meine, allerdings gewährt werden.«*

Die Empfehlung für Darwins Berufung zum offiziellen Naturkundler auf dem englischen Forschungsschiff »Beagle« kam von Professor Henslow. Diese Reise um die Welt war eine einzigartige Gelegenheit, Pflanzen und Tiere zu entdecken und zu identifizieren. Zu jener Zeit bestand die Aufgabe der Biologie ja vor allem darin, die Lebewesen zu kategorisieren, sie also in das von Carl von Linné geschaffene System einzuordnen. Die Reise sollte

höchstens zwei Jahre dauern; danach wollte Darwin in den Kirchendienst zurückkehren.

Obwohl Darwin erst als dritter gefragt worden war, wurde er der Naturkundler auf der »Beagle«. Als erstem hatte man Leonard Jenyns (Henslows Schwager) diese Position angeboten und als zweitem Henslow selbst. Jenyns lehnte ab, weil er sich seiner Kirchengemeinde gegenüber verpflichtet fühlte, und Henslow trat wegen des Einspruchs seiner Frau zurück. Auch Darwin wäre beinahe an Land geblieben, denn er geriet mit dem launischen Schiffskapitän Robert FitzRoy (1805-1865) persönlich aneinander und hatte auch andere politische Überzeugungen als dieser. Darwins Vater war anfangs ebenfalls gegen das Vorhaben, stimmte schließlich aber zu, nachdem Charles' Onkel Josiah Wedgwood vermittelt hatte. Wedgwood war in England berühmt für die von ihm entworfenen und produzierten Töpferwaren.

Nach einigen Verzögerungen wegen schlechten Wetters lichtete die »Beagle« mit ihrer kleinen Besatzung am Vormittag des 27. Dezember 1831 die Anker. Charles Darwin mußte sich mit einer engen Kajüte unter dem Achterdeck begnügen, in der er mit seinen 1,80 Meter Körpergröße kaum aufrecht stehen konnte. Neben der Hängematte war kaum noch Platz für seine Habseligkeiten. Das Schiff nahm von Plymouth in Südengland zunächst Kurs auf die Kanarischen Inseln, segelte dann an der Ostküste von Südamerika hinab und an der Westküste hinauf zu den Galapagos-Inseln. Die Reise führte weiter nach Neuseeland, Australien, Tasmanien, Madagaskar und um das Kap der Guten Hoffnung herum zur Himmelfahrts-Insel (Ascension), von da zurück nach Brasilien und wieder nach England.

Darwin wollte während der Reise Proben von Gesteinen, Fossilien, Meerestieren, Pflanzen und auch von Landtieren nahe der Hafenstädte sammeln, die nach und nach angelaufen wurden. Zu seinen Aufgaben als Naturkundler gehörten die Präparation und Konservierung der Funde sowie das Verpacken und der Versand an Professor Henslow zur Begutachtung, Kategorisierung und Analyse. Während Darwin all die angetroffenen Lebensformen - ausgestorbene und noch lebende - wie auch die umgebenden geologischen Formationen sorgfältig untersuchte, begann er die Beziehung zwischen den Veränderungen der geologischen For-





mationen und den Lebensformen zu verstehen, die darin gelebt hatten. Er wurde dabei besonders von Lyells Werk *Prinzipien der Geologie* beeinflusst, das ihm Henslow zum Abschied geschenkt hatte, und sah nun unmittelbar die Zyklen bestätigt, über die Lyell geschrieben hatte: die Erosion durch das Wasser, den Untergang von Wald und Gestein sowie das allmähliche Aufsteigen von Landmassen.

Entgegen der verbreiteten Meinung entwickelte Darwin seine Evolutionstheorie nicht während der 36 Tage, die er auf den Galapagos-Inseln verbrachte. In dieser Zeitspanne (im Herbst 1835) kartographierte die Mannschaft der »Beagle« die Küsten dieser Inselgruppe. Hier fand Darwin aber einen entscheidenden Hinweis, nämlich in den Variationen bestimmter Merkmale bei dort heimischen Tierarten. Darwin untersuchte Finken, die er auf zwei der Inseln gefangen hatte, und erkannte bei ihnen unterschiedlich gestaltete Schnäbel. Weiterhin stellte er fest, daß sich die Schalen der Schildkröten auf den einzelnen Inseln in Form, Farbe und Dicke unterschieden und daß diese Tiere auch verschieden lange Beine und Häuse hatten. Angesichts der Variationen bestimmter Merkmale bei mehreren Tierarten auf den 16 Inseln begann Darwin über die Ursachen der Abweichungen nachzudenken. Hatte sich auf jeder der Inseln jeweils eine eigene Art entwickelt?

Die auf den Galapagos-Inseln ermittelten Fakten führten zu weitergehenden Fragen: Warum ähneln Tiere einander so sehr, die in ganz verschiedenen Gebieten leben? Warum ist der südafrikanische Strauß dem südamerikanischen Nandu so ähnlich? Und warum sind die auf den Galapagos-Inseln gefundenen fossilen Tiere nicht identisch mit den dort lebenden Formen? Auf der Reise stellte sich Darwin immer wieder solche Fragen, und es kamen ihm Zweifel an der Richtigkeit der Schöpfungsgeschichte. Während dieser fünfjährigen »Erweckung« untersuchte Darwin genauestens alle Arten, die er gefunden hatte, und entwickelte auf dieser Grundlage eine neue, revolutionäre Auffassung von den Lebewesen.

Die eigentlich auf zwei Jahre angesetzte Reise dauerte schließlich fünf Jahre, und zwar wegen schlechten Wetters, technischer Probleme und weil manche von der Mannschaft unterwegs gemachte Fehler korrigiert werden mußten. Hinzu kamen natürlich

etliche Widrigkeiten, die im frühen 19. Jahrhundert bei einer Weltumsegelung mit einem so kleinen Schiff nicht ausblieben. Als die »Beagle« am 2. Oktober 1836 im englischen Hafen Falmouth wieder anlegte, war Darwin schon ein gewisser Ruhm vorausgeeilt, denn er hatte enorm viele Proben von unterwegs an Henslow gesandt. Bald nach seiner Rückkehr reichte er bei verschiedenen angesehenen wissenschaftlichen Gremien, darunter der London Geological Society, etliche Arbeiten ein. Deren Themen reichten von fossilen Knochen, die er an südamerikanischen Klippen ausgegraben hatte, bis zu seiner Theorie darüber, wie die Korallenbänke entstanden waren. Fasziniert von der unermesslichen Vielfalt der Arten, von deren Beziehungen zueinander und von den Fragen nach ihrer Geschichte, gab Darwin seine Absicht auf, Geistlicher zu werden, und wandte sich der Naturforschung zu.

## **Die Evolutionstheorie wird geboren** *Ein gemeinsamer Urahn*

Ab Mitte Juli 1837 schrieb Darwin über das Thema, das ihn auf den Galapagos-Inseln erstmals beschäftigt hatte: *die Umwandlung von Arten*. Er vermied gewöhnlich das Wort *Evolution* und zog die Bezeichnung *Umwandlung* vor, denn er wollte betonen, daß die Pflanzen- und Tierarten sich als Reaktion auf ihre Umgebung verändern, aber trotzdem die jeweils gleiche Art bleiben können. Er beschrieb später, wie er dazu gekommen war, sich diesem Thema zu widmen:

*»Als ich mich als Naturforscher an Bord der >Beagle< befand, war ich aufs höchste überrascht durch gewisse Merkwürdigkeiten in der Verbreitung der Tiere und Pflanzen Südamerikas sowie durch die geologischen Beziehungen der gegenwärtigen Bewohner dieses Erdteils zu den früheren (...) Diese Tatsachen (schienen mir) Licht zu werfen auf die Entstehung der Arten (...) Nach meiner Heimkehr (1837) wurde mir immer klarer, daß sich vielleicht durch Sammeln und Vergleichen aller damit zusammenhängenden Tatsachen etwas zur Lösung der Frage tun ließe.« \**

\*Charles Darwin, *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*, Stuttgart 1963, S. 24

Ungefähr zur selben Zeit las Darwin den Essay *über das Prinzip der Population* von dem berühmten englischen Volkswirtschaftler und Demographen Thomas Malthus (1766-1834). Darin hieß es, die menschliche Bevölkerung und deren Bedürfnisse eilten stets der Produktion von Nahrungsmitteln und anderen Gütern voraus. Darwin beschrieb Malthus' Vorstellungen folgendermaßen:

*»Es besteht eine konstante Tendenz allen beseelten Lebens, sich so weit zu vermehren, daß die verfügbare Nahrung nicht ausreicht. (...) Die Natur hat die Samen des Lebens mit großzügigster Hand weit verstreut; aber sie war vergleichsweise sparsam beim Lebensraum und bei der Nahrung, die zum Aufziehen des Nachwuchses nötig ist. (...) Die Population hat diese konstante Tendenz, stärker anzuwachsen, als es die Mittel zum Unterhalt zulassen.«*

Bei der Lektüre der Werke von Malthus hatte Darwin im Oktober 1838 sozusagen eine Erleuchtung:

*»Ich war darauf vorbereitet, den Existenzkampf zu erkennen, der allerorten herrscht. (...) Dabei wurde mir auf einmal klar, daß unter diesen Umständen günstige Variationen eher erhalten bleiben, während ungünstige eher untergehen. Das Ergebnis wäre die Entstehung neuer Arten. Hier hatte ich endlich eine Theorie, mit der ich arbeiten konnte.«*

Darwin griff Malthus' Sichtweise auf und wandte sie auf seine eigenen Ergebnisse hinsichtlich der Pflanzen- und Tierarten an. Er erkannte, daß das reproduktive Potential von Pflanzen und Tieren bei weitem das übersteigt, was zum Aufrechterhalten einer konstanten Population der betreffenden Arten notwendig ist, während jedoch die jeweilige Population ziemlich konstant bleibt. Daraus folgerte Darwin, daß Pflanzen und Tiere, die den intensiven Wettbewerb zwischen allen Lebewesen überleben, besser für das Leben in der jeweiligen Umgebung ausgerüstet sein müssen als die Arten, die nicht überleben. Raubtiere kämpfen um Reviere und Beute, weidende Tiere suchen die fruchtbar-

sten Gebiete, Pflanzen wetteifern um den Raum, in dem sie sich ausbreiten und vermehren können, Männchen vieler Arten kämpfen darum, die Weibchen zu begatten. Die Schnellsten, Stärksten und Geschicktesten siegen, und ihre entscheidenden Merkmale werden ihrer Nachkommenschaft vererbt.

Die natürliche Selektion erlaubt dadurch die Weitergabe von Veränderungen, die das Überleben erleichtern, und eliminiert Veränderungen, für die das nicht gilt. Obwohl der Begriff Genetik seinerzeit noch unbekannt war, vermutete Darwin, daß wesentliche Merkmale der überlebenden Raubtiere, Weidetiere, Pflanzen und siegreichen Männchen irgendwie mit ihrem Samen weitergegeben würden: »Alle diese Ergebnisse (...) folgen aus dem Kampf ums Überleben. Wegen dieses Kampfes tendieren Veränderungen, (...) die für die Individuen einer Art nützlich sind, dazu, (...) diese Individuen zu erhalten; und diese Veränderungen werden im allgemeinen der Nachkommenschaft vererbt.«

Dies war Darwins Behauptung, seine Evolutionstheorie: *Merkmale, die zur Überlegenheit und zum Erfolg jedes Tieres beitragen, bleiben erhalten und gehen auf künftige Generationen über. Dadurch paßt sich jede Art allmählich und fortwährend der Umgebung an, wenn sich diese verändert; das kann das Klima oder die geographischen Bedingungen betreffen, aber auch das Nahrungsangebot oder die Gegenwart bestimmter Raubtiere, ebenso alle anderen Aspekte der Umwelt, in der die betreffende Art lebt.* Darwins Antwort auf die Frage, die er sich während seines Aufenthalts auf den Galapagos-Inseln gestellt hatte, war in ihrer Einfachheit geradezu brilliant: Pflanzen- und Tierarten verändern sich, weil stets die am besten angepaßten Mitglieder einer Art die allmählichen Veränderungen der Umgebungseigenschaften überleben. Sie passen sich also an, das heißt, sie entwickeln sich zusammen mit ihrer Umgebung. Wenn sie das nicht tun, sterben sie. Und wenn ein bestimmter Anteil der betreffenden Art nicht überlebt, stirbt sie schließlich aus. Daher sind die meisten ausgestorbenen Arten einfach die früheren Formen ihrer Nachkommenschaft, die heute gedeiht. Zwar gab es Arten, die relativ plötzlich in großer Zahl ausstarben, beispielsweise die Dinosaurier. Aber die meisten Fossilien repräsentieren Arten, die weder ab-

rupt verschwanden noch ohne Nachfolger oder direkte Nachkommen ausstarben, sondern die sich einfach während Jahrtausenden veränderten und inzwischen »verbesserte Modelle« darstellen.

Jedoch gibt es heute über eine Million Tierarten (darunter 751000 Insektenarten), also eine Million neuere und »bessere Modelle« - und nicht nur eines. Wenn einzelne Mitglieder mit günstigen, natürlich selektierten Merkmalen mit allen Mitgliedern der Art Nachkommen zeugen können, wie konnte dann die natürliche Auslese überhaupt zu einer so hohen Anzahl der Arten führen? Die Antwort liegt in der »Speziation« oder Artbildung (der Fähigkeit der Arten, sich in andere Arten zu unterteilen) und vor allem in einem Aspekt der Speziation, den man »reproduktive Isolation« nennt. Die reproduktive Isolation kann auf verschiedenartigen Wegen eintreten, gewöhnlich ausgelöst durch geographische oder physikalische Entwicklungen, die zu Barrieren zwischen Mitgliedern derselben Art führen: Flüsse ändern ihren Lauf, Gebirge bilden sich, und Kontinente driften auseinander. Auch kommt es oft vor, daß Gruppen von Individuen einer Art aus eigenem Antrieb neue Gebiete aufsuchen, um mehr Nahrung oder bessere Bedingungen für die Fortpflanzung zu finden.

Solche Entwicklungen können einen gewissen Grad an Isolation bewirken, die (zusammen mit den Mutationen und der natürlichen Selektion) die eine Gruppe auf einen Weg führt, aus dem schließlich genetische Ausstattungen resultieren, die nicht mehr kompatibel mit denen der anderen Gruppe sind. Dann können die zwei Gruppen keine gemeinsamen fruchtbaren Nachkommen zeugen. Wo es früher eine Art gab, existieren nun zwei. Und wo es zwei gibt, da sind es vielleicht bald vier. Beispielsweise gab es einen gemeinsamen Urahn von Füchsen, Wölfen, Bären, Kojoten und Hunden. Ähnlich verzweigte sich die Art *Eohippus* (Urpferd) im Laufe von 50 Jahrmillionen in Rhinozerosse, Tapire, Zebras, Esel und Pferde.

Die Prinzipien der natürlichen Selektion gelten für alle Organismen gleichermaßen, von den kleinsten einzelligen Bakterien bis zu den riesigen Walen. Bestimmte Arten von Milben, kleinen spinnenartigen Tieren, nisten zum Beispiel in den Lungen von



Abb. 13.2: Eine Zecke; die Zecken (*Ixodidae*) gehören zu den Milben (*Acarina*) und diese zur Ordnung der Spinnentiere (*Arachnidae*).

Affen, den Nasen von Seehunden oder den Atemröhren (Tracheen) von Honigbienen. Es ist bemerkenswert, daß Milben der Art *Demodex folliculorum* in den Hautporen unseres Gesichts leben. Sie fressen und sie vermehren sich in diesem winzigen, aber offensichtlich für sie idealen Lebensraum.

Es gibt Tausende verschiedener Milbenarten, die sich jeweils einer bestimmten Nische in einem Ökosystem angepaßt haben. Wenn man Milben in der Haut hat, ist dies nicht unbedingt ein Zeichen mangelnder Hygiene, sondern ein Beispiel für die erfolgreiche Anpassung von Organismen an den betreffenden Lebensraum. Die Milben und auch die Zecken entwickelten sich bereits Hunderte von Jahrmillionen, bevor der Mensch auf den Plan trat. Das weiß man, weil man fossile, in Bernstein eingeschlossene Milben fand, die aus dem Paläozoikum (vor 590 bis 250 Millionen Jahren) stammen. Schon bevor es Menschen gab, lebten - wie auch heute noch - Milben der Familie *Demodex* in den Hautporen von Tieren, beispielsweise Hunden und Schafen. Die

Mundwerkzeuge der Milben sind hervorragend an die jeweilige Freßweise angepaßt: Einbohren, Saugen, Reißen oder Kauen, je nach dem Lebensraum der betreffenden Milbenart. Solche Anpassungen zeigen deutlich die Prinzipien der Evolution, die auch für alle anderen Arten gelten.

Sämtliche Lebewesen hatten keine andere »Wahl«, als allmählich die Merkmale herauszubilden, die für das Überleben am günstigsten waren. Einige Entwicklungen hatten dabei negative Auswirkungen auf andere Arten, wie wir in Kapitel 16 bei den infektiösen Bakterien noch sehen werden. Andererseits führte die natürliche Selektion im Reich der Pilze zu einer der größten Entdeckungen in der Medizin. Das Antibiotikum Penicillin wird von einem farbigen Schimmelpilz abgesondert, der normalerweise auf Brot wächst. Diese Schimmelpilzart (*Penicillium*) hat bei der Anpassung an ihren Lebensraum die Fähigkeit entwickelt, eine Substanz abzusondern, die einige Bakterienarten abtötet. Bei der Herstellung von Penicillin gewinnt man also die Abwehrsubstanz der betreffenden Pilzart gegen Bakterien. Auch andere Beispiele der natürlichen Selektion waren und sind für den Menschen nützlich.

Darwin stellte sich vor, daß die Zweige des prächtigen und stark verästelten Lebensbaumes sich selbst sozusagen wieder nach innen ziehen werden, wenn die Uhr der Evolution nach Jahrmillionen wieder rückwärts laufen wird. Er vermutete, daß alle Tiere »einen gemeinsamen Vorfahren« haben, und sprach daher von der natürlichen Selektion oder vom Überleben des Tüchtigsten oder des am besten Angepaßten. »Die natürliche Selektion führt zu Verbesserungen der Lebewesen, je nach den (...) herrschenden Lebensbedingungen.« Darwin vermutete sehr richtig, daß die Evolution nicht zufällig abläuft, sondern dem starken und gezielten Einfluß der natürlichen Selektion unterliegt. Diese hängt ihrerseits von geologischen und klimatischen Kräften sowie von der Konkurrenz zu anderen Arten ab, ferner von allen Einflüssen, die auf die Umgebung einwirken und damit die Lebewesen seit Anbeginn geformt haben.



**Nach 20 Jahren Arbeit publiziert Darwin sein Werk**  
**Die Entstehung der Arten**  
*Ein Affe als Großvater*

Am 29. Januar 1839 heiratete Darwin seine Cousine Emma Wedgwood. Das Ehepaar bekam zehn Kinder, von denen einige ebenfalls berühmt werden sollten; drei wurden aufgrund ihrer Verdienste sogar geadelt. Darwin lebte vom Erlös seiner Bücher und Artikel über biologische Themen, die mit seinen Forschungen während der Reise auf der »Beagle« zusammenhingen. In den Jahren nach der Expedition ging Darwin ähnlich vor wie seinerzeit Newton nach seinem Aufenthalt in Woolsthorpe beim Erarbeiten der Bewegungs- und Gravitationsgesetze: Darwin führte seine Arbeiten im verborgenen fort, ohne seine Ideen zur natürlichen Selektion zu publizieren: »Nach fünfjähriger Beschäftigung damit erlaubte ich es mir, darüber zu spekulieren und einige kurze Anmerkungen auszuarbeiten; diese erweiterte ich im Jahre 1844 zu einer Zusammenstellung der Schlußfolgerungen.« Er teilte seine Theorie einigen engen Freunden mit, darunter dem Geologen Charles Lyell. Sie waren anfangs skeptisch, bald jedoch überzeugt. Bescheiden und vorsichtig, wie er war, wollte Darwin zunächst Lyells Rat befolgen, »sich niemals in eine Kontroverse verwickeln zu lassen«. Also sollten die Manuskripte erst nach seinem Tode von seiner Frau publiziert werden:

*»Ich habe gerade den Entwurf meiner Theorie der Arten vollendet. (...) Daher setze ich folgendes für den Fall meines plötzlichen Todes als meinen feierlichsten und letzten Wunsch fest, den du — wie ich sicher weiß — so betrachten wirst, als hätte ich ihn rechtsgültig unmittelbar geäußert. Du wirst 400 englische Pfund für die Publikation bereitstellen (...) und dich um die Verbreitung kümmern. Ich wünsche, daß mein Entwurf zusammen mit dieser Summe einer kompetenten Person übergeben wird, die die nötigen Korrekturen und Erweiterungen veranlassen soll.(...) Mr. Lyell erscheint mir als der Geeignetest, wenn er dazu bereit ist, insbesondere mit Unterstützung durch Hooker.«*

Darwin hatte den unvermeidlichen Aufruhr befürchtet, den eine solche Theorie hervorrufen würde. Er schob die Veröffentlichung seines revolutionären Konzepts also auf, wie es auch Newton getan hatte. Erst nachdem der englische Biologe Alfred Russel Wallace (1823-1913) in seinen Schriften ähnliche Ansichten geäußert hatte, fühlte sich Darwin zu öffentlichen Erklärungen veranlaßt:

*»Mein Werk ist jetzt beinahe fertig; aber ich werde noch viele Jahre benötigen, um es wirklich zu vollenden. (...) Ich fühle mich dazu veranlaßt, diesen kurzen Abriß zu publizieren, vor allem weil Mr. Wallace (...) über die Entstehung der Arten zu fast denselben allgemeinen Schlußfolgerungen gekommen ist wie ich.«*

Durch das Konkurrenzwerk von Wallace herausgefordert, stellte Darwin sein monumentales Werk nun fertig und publizierte es. Der vollständige Titel lautete (übersetzt): *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl oder die Erhaltung begünstigter Arten im Kampf um das Überleben*. Das Buch erschien am 24. November 1859 - über 22 Jahre nach Darwins ersten Aufzeichnungen dazu - und war sofort vergriffen. In den folgenden Jahren kamen revidierte Auflagen heraus; die sechste und letzte war die von 1872. Darwin vergaß nicht, diejenigen zu würdigen, die vor ihm waren und den Weg für sein Werk bereitet hatten. Aber erst die von Darwin erarbeiteten biologischen Indizien wiesen darauf hin, daß existierende Arten sich aus früheren, davon abweichenden Arten entwickelt hatten. Nicht diejenigen, die Darwin als Wegbereiter anerkannte, sondern er selbst zeigte, wie die natürliche Selektion die Anpassung hervorruft. Er konnte das auch logisch begründen, ohne daß man seinerzeit von Genetik, DNA oder der genauen Funktion von Zellen etwas wissen konnte. Schon kurz nach dem Erscheinen Ende 1859 war Darwins Werk Gegenstand heftiger Kontroversen. In den ersten Jahren hielt sich Darwin dabei etwas zurück, während seine Freunde und Kollegen an vorderster Front gegen mystische und mythische Glaubenssätze kämpften. Hier sind vor allem Joseph Hooker, Thomas H. Huxley, Alfred Russel Wallace und Charles Lyell zu nennen - allesamt anerkannte und berühmte Gelehrte.

Darwins Kritiker und Gegner, die ihn den »gefährlichsten Mann in England« nannten, stellten eine recht inhomogene Gruppe dar. Der englische Geologe Adam Sedgwick (1785-1873), Professor in Cambridge und Präsident der renommierten Geological Society of London, gab nie einen stichhaltigen Grund für seine Gegnerschaft an. Er bemerkte nur, er lehne Darwins Hypothesen und dessen deduktive (anstatt induktiver) Ansätze zum Beweis der Theorien ab. Der englische Anatom und Paläontologe Richard Owen (1804-1892), Mitglied der Royal Society und seinerzeit in England der führende Biologe, war Darwins heftigster und gehässigster Gegner. Owen, ein mißgünstiger und ehrgeiziger Mensch, griff Darwin bei zahlreichen Gelegenheiten an. Dasselbe taten viele andere, die Darwin und seine Theorie aufgrund ihrer eigenen religiösen Überzeugungen in Verruf zu bringen versuchten. Wenn die Evolutionstheorie tatsächlich wahr wäre, müßte ja der Schöpfungsbericht in der Bibel falsch sein. Und wenn gar die natürliche Auslese automatisch wirkte, gäbe es keine göttliche Führung im Leben und Gedeihen von Pflanzen und Tieren.

Solche Aspekte wurden am 30. Juni 1860 in Oxford auf einer Tagung der Britischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften diskutiert. Owens Sprecher war der Bischof Samuel Wilberforce (1805-1873), und auf der Gegenseite wirkte als Darwins Sprecher Thomas H. Huxley (1825-1895). Diese Konfrontation symbolisierte die Kluft zwischen Wissenschaft und Theologie. Auf Wilberforces herablassende Bemerkung über Huxleys Verwandtschaft mit Affen und Gorillas gab dieser seine berühmt gewordene Antwort:

*»Wenn sich mir (...) die Frage stellte, ob ich als Großvater lieber einen erbärmlichen Affen oder einen Mann hätte, dem die Natur reiche Gaben und großen Einfluß verlieh und der seine Talente und seine Autorität nur dazu nutzt, den Spott in eine ernste wissenschaftliche Diskussion einzubringen - ich zöge ohne weiteres den Affen vor.«*

## **Darwin wendet die Evolutionstheorie auf den Menschen an**

### *Schlitzte seitlich am Hals*

Entgegen einer weit verbreiteten Meinung und obwohl Huxley und Wilberforce die menschliche Evolution schon sieben Monate nach dem Erscheinen des Werkes *Die Entstehung der Arten* debattierten, ist darin keine Rede von der Evolution des Menschen, sondern nur von derjenigen der Pflanzen und Tiere. Gegen Ende des Buches findet sich lediglich eine kurze Bemerkung von Darwin über die menschliche Evolution: »Für die Zukunft sehe ich offene Fragen, die noch eingehendere Untersuchungen erfordern. (...) Sie werden den Ursprung des Menschen und seine Geschichte erhellen«. Darwins Ansicht darüber, ob seine Theorie auch für den Menschen gilt, war sozusagen zwischen den Zeilen versteckt, und er überließ es anderen Biologen und der Öffentlichkeit, diese Streitfrage aufzuwerfen: »Während vieler Jahre sammelte ich Informationen über die Entstehung oder die Abstammung des Menschen, ohne eine Veröffentlichung darüber zu beabsichtigen. Ich wollte nichts darüber publizieren, denn ich meinte, daß ich damit nur die Vorurteile gegen meine Ansichten schüren würde.«

Mitte des 19. Jahrhunderts war der Glaube, daß die Art des Menschen unwandelbar und unveränderlich sei, ebenso fest verankert wie drei Jahrhunderte zuvor die allgemein akzeptierte »Tatsache«, daß die Sonne um die Erde kreist. Die Frage nach dem Wesen unseres Seins zu stellen, war ein noch schlimmeres Vergehen, als unsere besondere Stellung im Universum zu bezweifeln. Aber diese Frage ergab sich zwangsläufig aus Darwins Ansätzen in seinem Werk *Die Entstehung der Arten*. Bis dahin galt der Mensch als etwas Besonderes und unterschied sich daher grundsätzlich von den Tieren. Diese Erde und dieses Universum waren von Gott erschaffen worden, und zwar für den Menschen und aus keinem anderen Grunde - aber nur vor Charles Darwins Theorie.

Zwölf Jahre nach dem Erscheinen der *Entstehung der Arten* wurde die Kontroverse erneut angeheizt. Darwin hatte sich gezwungen gesehen, wieder zur Feder zu greifen, diesmal, um sich

direkt zur menschlichen Evolution zu äußern. Sein Werk *Die Abstammung des Menschen* erschien am 24. Februar 1871. Doch er hatte sich zumindest seit dem 27. November 1838 mit diesen Fragen befaßt, dem Tag seiner ersten Notizen zur natürlichen Selektion im Hinblick auf den Menschen. In seinem neuen Buch erklärte er, warum er seine ursprüngliche Absicht aufgegeben hatte, sich nicht in die Kontroverse hineinziehen zu lassen: »Nun sieht die Sache ganz anders aus«, schrieb er. Dabei bezog er sich darauf, daß immer mehr angesehene Naturwissenschaftler seine Grundthesen über die natürliche Selektion akzeptierten. Er fühlte sich dazu aufgerufen, »meine Aufzeichnungen zusammenzustellen, um zu sehen, wie die in meinen früheren Werken aufgestellten allgemeinen Schlußfolgerungen auf den Menschen anwendbar sind«.

Das zweibändige Werk hatte fast tausend Seiten und war noch anspruchsvoller und ehrgeiziger als *Die Entstehung der Arten*. »Der einzige Zweck dieser Arbeit ist die Untersuchung dreier Fragen: erstens, ob der Mensch - wie jede andere Art - von irgendeiner früheren Form abstammt; zweitens, welcher Art seine Entwicklung ist; und drittens, welche Bedeutung die Unterschiede zwischen den sogenannten Rassen der Menschen haben.«

Weil seine Theorie der Evolution durch natürliche Selektion zunehmend akzeptiert wurde, wurde Darwin in den zwölf Jahren, die zwischen seinen zwei bedeutendsten Werken vergingen, immer mutiger. In seinem Werk *Die Abstammung des Menschen* behauptete er nun, daß »der Mensch von irgendeiner weniger hoch organisierten Form abstammt. (...) Das große Prinzip der Evolution steht klar und sicher vor uns, wenn wir diese Gruppen von Fakten betrachten, (...) etwa die Ähnlichkeiten der Mitglieder derselben Gruppe, ihre geographische Verbreitung in Vergangenheit und Gegenwart sowie ihre geologische Aufeinanderfolge«. Hinsichtlich der geographischen Verbreitung sagte Darwin voraus, daß das älteste Fossil, das auf Vorfahren des modernen Menschen hindeuten könnte, eines Tages in Afrika gefunden würde:

*»In jeder großen Region der Erde sind die dort lebenden Säugetiere nahe mit den ausgestorbenen Arten derselben Region verwandt. Es ist daher wahrscheinlich, daß Afrika früher von jetzt ausgestorbenen Affen bewohnt wurde, welche dem Gorilla und*

dem Schimpansen(!) nahe verwandt waren. Und da diesen beiden Species jetzt die nächsten Verwandten des Menschen sind, so ist es noch wahrscheinlicher, daß unsere frühen Urerzeuger auf dem afrikanischen Festlande lebten.«\*

Wegen des Fehlens fossiler Beweise zu Darwins Lebzeiten und weil man den »Dunklen Kontinent« für nicht geeignet hielt, der Ort zu sein, an dem der Mensch auf den Plan trat, wurde diese Voraussage bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts schlicht für törricht gehalten. Doch Darwins grundlegende Theorie wurde bald weithin akzeptiert:

»Der Mensch entwickelt sich aus einem Eichen von ungefähr  $\frac{1}{125}$  Zoll (0,22 mm) im Durchmesser, welches in keiner Hinsicht von den Eichen anderer Thiere abweicht. Der Embryo selbst kann auf einer frühen Stufe kaum von dem anderer Glieder des Wirbelthierreichs unterschieden werden. Auf dieser Periode laufen die Halsarterien in bogenförmigen Ästen (...) und des Schwanzbein springt wie ein wahrer Schwanz vor, indem es sich beträchtlich jenseits der rudimentären Beine verlängert.«\*\*

»Der Mensch ist wohl zu entschuldigen, wenn er einigen Stolz darüber empfindet, daß er (...) zur Spitze der ganzen organischen Stufenleiter gelangt ist (...) Wir haben es aber hier (...) nur mit der Wahrheit (zu tun), soweit unser Verstand es uns gestattet, sie zu entdecken; ich habe das Beweismaterial nach meinem besten Vermögen mitgeteilt. Wir müssen indessen (...) anerkennen, daß der Mensch mit allen seinen edlen Eigenschaften, mit der Sympathie, welche er für die Niedrigsten empfindet, (...) mit seinem gottähnlichen Intellect, welcher in die Bewegungen und die Constitution des Sonnensystems eingedrungen ist, mit allen diesen hohen Kräften doch noch in seinem Körper den unauslöschlichen Stempel eines niederen Ursprungs trägt.«\*\*\*

\* Charles Darwin, *Die Abstammung des Menschen*, Wiesbaden 1996, S.173

\*\* ebd., S. 11 und S. 13

\*\*\* ebd., S. 701

## Fossilfunde bestätigen die Evolution

### *Eine Vorliebe für Käfer*

Darwin schuf die Grundlage, auf der Biologen, Paläontologen und Geologen später aufbauten, um die Evolution allen Lebens zu beschreiben und zu erklären. In der Geologie etablierte man verschiedene »Zeitalter«, also größere geologische Zeiträume, denen man bedeutende Veränderungen in der Entwicklung des Lebens auf der Erde zuordnete. Jedes geologische Zeitalter (jede Ära) unterteilt man in Perioden oder Systeme und diese wiederum in Epochen oder Abteilungen. Wir leben heute in der Epoche Holozän, die vor rund 10000 Jahren begann und zur Periode Quartär gehört, die etwa vor 2,5 Millionen Jahren begann. Das Quartär gehört zur Ära Känozoikum, die die letzten 65 Millionen Jahre umfaßt. Im folgenden sind die vier geologischen Zeitalter sowie die wichtigsten zugehörigen Evolutionsstadien der Lebewesen zusammengefaßt:

*Präkambrium* (vor 4,6 Milliarden bis 590 Millionen Jahren): Das Leben entstand vor rund vier Milliarden Jahren in der Uruppe in Form einer Bakterienzelle. In den folgenden drei Milliarden Jahren breiteten sich die Bakterienzellen auf der Erde aus und blieben in dieser Zeit die einzige Lebensform. Vor rund 600 Millionen Jahren entwickelten sich die ersten mehrzelligen Lebewesen.

*Paläozoikum* (Erdaltertum, vor 590 bis 250 Millionen Jahren): Vor etwas weniger als 590 Millionen Jahren entwickelten sich sehr schnell viele verschiedenartige Wasserlebewesen, darunter vor etwa 425 Millionen Jahren die Schalentiere. Vor rund 395 Millionen Jahren entstanden die ersten Landtiere; vor etwa 350 Millionen Jahren gingen Amphibien aus einigen Fischarten hervor, und seit 280 Millionen Jahren gibt es Reptilien.

*Mesozoikum* (Erdmittelalter, vor 250 bis 65 Millionen Jahren): Vor rund 250 Millionen Jahren ereignete sich das verheerendste Aussterben aller Zeiten, dem viele Arten zum Opfer fielen. Danach entwickelten sich die Dinosaurier; sie beherrschten die Erde, bis sie vor etwa 65 Millionen Jahren ausstarben.

*Känozoikum* (Neozoikum, Erdneuzeit, seit 65 Millionen Jahren): Nach einer weiteren Epoche, in der zahlreiche Arten, darun-

ter die Dinosaurier, ausstarben, wurde das Erdklima kühler. Ausgedehnte Regenwälder machten Weideland und Wäldern Platz. Säugetiere der verschiedensten Arten entstanden. Vor rund vier Millionen Jahren tauchten erstmals Mitglieder der Familie der Primaten in Afrika auf.

Im Kambrium, der frühesten Epoche des Paläozoikums, erfuhr die Evolution vor rund 545 Millionen Jahren sozusagen ihren »Urknall«: Das Leben breitete sich explosionsartig aus, und es traten die Urahnen fast aller heute lebenden Arten auf; viele davon sind inzwischen wieder ausgestorben. In seinem Buch *Wunderbares Leben: Der gewöhnliche Schiefer und die Geschichte der Natur* schrieb der berühmte Biologe Stephen Jay Gould über Tempo und Ausmaß der Evolution während dieser »Explosion« im Kambrium. Bis vor kurzem glaubten Paläontologen und Biologen, daß die Ausbreitung des Lebens im Kambrium 20 bis 70 Millionen Jahre dauerte. Aber im Jahre 1993 ergaben sich neue Indizien: Ein Team aus Forschern der Harvard University, des Massachusetts Institute of Technology und des Geologischen Instituts in der russischen Stadt Jakutsk stellte bei Untersuchungen an kambrischen Gesteinen fest, daß die Zeitspanne der schnellen Diversifikation (steigenden Vielfalt der Arten) viel kürzer war und vielleicht nur fünf Millionen Jahre oder noch weniger betrug.

Diese enorme Vielfalt an pflanzlichen und tierischen Lebensformen gedieh über 200 Millionen Jahre lang und erlitt einen gewaltigen Rückschlag, als vor rund 250 Millionen Jahren etwa 90 Prozent aller Lebensformen im Meer und ein großer Teil der Arten an Land vernichtet wurden. Das war in der gesamten Erdgeschichte das verheerendste Aussterben, aber gleichzeitig der Beginn eines Prozesses, der das Aufkommen der Dinosaurier ermöglichte. An etlichen Fossilienfunden erkannte man, daß gegen Ende der Epoche Perm, also vor 250 Millionen Jahren, rund 97 Prozent aller Baumarten ausstarben. Das führte zur Vermehrung holzzersetzender Pilze, die schließlich große Teile der Erde bedeckten. Einige Paläobotaniker und andere Wissenschaftler meinen, daß zahlreiche Vulkanausbrüche in Sibirien zum Aussterben dieser Bäume geführt hatten. Bestimmte Sedimente deuteten darauf hin, daß während eines Zeitraums von einer Million



Jahren insbesondere ein Vulkan so viel geschmolzenen Basalt ausstieß, daß dieser die ganze Erde meterhoch hätte bedecken können. Die bei den Eruptionen freigesetzten Mengen an Kohlendioxid und Säuren könnten Luft und Wasser vergiftet haben, so daß die Bäume vernichtet wurden.

Im Jahre 1996 stellten vier Biologen und Geochemiker eine andere Theorie auf. Nach dieser wurde die Perm-Katastrophe dadurch ausgelöst, daß gewaltige Mengen an Meerwasser, in dem Kohlendioxid gelöst war, aus der Tiefe aufstiegen. Die Vertreter dieser Theorie glauben, daß dieser hohe Kohlendioxidanteil in der Tiefe des Meeres natürlich war, nun aber an die Oberfläche stieg und dort die Atmosphäre viele Jahre lang belastete. Indizien für eine solche »globale Umwälzung des Tiefenwassers der Meere« findet man heute in der Struktur der Calciumcarbonat-(Kalk-)Sedimente, die am Ende des Perms entstanden. Die überhöhten Kohlendioxidmengen könnten zur Bildung tödlicher Konzentrationen von Carbonsäure (Phenol) im Blut von Tieren geführt haben. Weitere Folgen waren wohl ein Treibhauseffekt auf der ganzen Erde, dem sehr viele Meerestiere zum Opfer fielen, und nicht zuletzt Störungen der empfindlichen Gleichgewichte in den Lebensräumen vieler anderer Arten.

Das massenhafte Aussterben am Ende des Perms ermöglichte die Dominanz der Dinosaurier in den folgenden gut 140 Millionen Jahren. Die Dinosaurier verschwanden gegen Ende der Kreidezeit wieder von der Bildfläche, und zwar, wie einige Wissenschaftler vermuten, infolge einer weiteren Katastrophe, die höchstwahrscheinlich durch einen gewaltigen Asteroiden oder Kometen ausgelöst wurde, der nahe der Halbinsel Yukatan einschlug. Der Aufprall setzte eine Staubwolke frei, die sich in der Atmosphäre ausbreitete und die Sonnenstrahlung abhielt. Dadurch änderte sich das Klima, und die Vegetation, von der die Dinosaurier lebten, wurde stark geschädigt. Wegen der verschlechterten Nahrungsgrundlage konnten die Saurier schließlich nicht überleben. Aber ihr Aussterben öffnete neue ökologische Nischen für andere Lebewesen. Weil die Kräfte der natürlichen Auslese wirkten, erholte sich das Leben wieder und entwickelte eine noch größere Vielfalt.

Wir leben heute in der bisher wohl größten Fülle des Lebens,

die dem Aussterben der Dinosaurier folgte. Betrachten wir nur ein Stückchen Erde, sehen wir schon eine enorme Vielfalt von Arten. Die ältesten und somit ausdauerndsten Bewohner des Planeten Erde sind die Bakterien. Schon ein Blick ins Mikroskop zeigt uns Hunderte verschiedener Arten von Bakterien, die das organische Material im Boden zersetzen. Insgesamt konnten die Biologen über 1,4 Millionen Arten von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen identifizieren und benennen. Viele Experten vermuten aber, daß es noch Millionen Arten von Bakterien und Insekten und sogar zahlreiche Arten von Fischen, Vögeln und Säugetieren gibt, die bisher nicht entdeckt wurden. Die Biologen erweiterten Carl von Linnés ursprüngliches Schema mit zwei Reichen (Pflanzenreich und Tierreich) auf heute fünf Reiche, zu denen auch die der Pilze, der Protozoen (wörtlich: Ur-Tiere), und der Bakterien zählen. Die Kriterien der Abgrenzung sind nicht in allen Fällen eindeutig; wichtige Aspekte der Zuordnung sind unter anderem die Zellstruktur und die Fähigkeit bzw. Unfähigkeit zur Photosynthese.

Aus der folgenden Aufstellung geht hervor, daß die Insekten (einschließlich der außergewöhnlich großen Zahl von Käferarten) mehr Arten umfassen als alle anderen Lebensformen zusammen. Auf die Frage, was die Untersuchung der Lebensformen über Gottes Plan enthüllt habe, witzelte Darwins Freund Thomas H. Huxley: »Der Allmächtige hatte eine große Vorliebe für Käfer.« Bis heute konnte man folgende Lebensformen ausmachen:

- 751000 Insektenarten (davon 290000 Käferarten);
- 281000 Arten (insgesamt) von Amphibien, Reptilien, Fischen, Vögeln und Säugetieren;
- 275000 Pflanzenarten;
- 69000 Pilzarten;
- 31000 Protozoenarten;
- 5000 Bakterienarten.

Am Ende seines Werkes *Die Entstehung der Arten* schrieb Darwin: »Man spürt die Erhabenheit, wenn man das Leben betrachtet. (...) Während dieser Planet gemäß dem unumstößlichen Gesetz der Gravitation seine Bahn zieht und sich um sich selbst dreht, entwickelten sich aus einem so einfachen Anfang der-

maßen herrliche und wunderbare Formen, und sie entwickeln sich weiter.«

Irving Stone schrieb in seinem Buch *The Origin* über das nahe Ende von Darwins Leben:

»Vielleicht war es das lange Ringen mit der Krankheit, vielleicht die Perioden unglaublich harter Arbeit, vielleicht sein schneeweißer, mächtiger Bart (...) aber Charles Darwin sah aus, als wäre er der Patriarch der Welt. Seine Augen lagen tief in den Höhlen; er wirkte wie ein Mensch, der im Begriff ist, Lebewohl zu sagen, jedoch nichts dagegen hat.« Am 19. April 1882 erlag Darwin einem Herzanfall. Auf Bitten von zwanzig Mitgliedern des Parlaments wurde Charles Robert Darwin in der Westminster Abbey beigesetzt. Zu den Sargträgern gehörten Hooker und Huxley.

Darwin legte einen langen Weg zurück - vom schlechten Schüler, dessen Vater sich seiner schämte, zum Sammler biologischer Proben auf der »Beagle«. Er entwickelte sich vom guten Beschreiber zum großen Interpretierer. Er hörte nie zu fragen auf, bis eine sinnvolle Erklärung gefunden war. Er sammelte die zugänglichen, ungeordneten Fakten und brachte sie in einen Zusammenhang, der eine neue Perspektive eröffnete. Er stellte die Evolutionstheorie nicht nur auf, sondern erreichte es noch zu seinen Lebzeiten, daß sie sich in der öffentlichen Meinung von einer unerhörten Ketzerei zu einem allgemein akzeptierten Prinzip wandelte. Ganze wissenschaftliche Disziplinen gründeten unmittelbar auf Darwins Werk. Die Genetik (die wir im Teil 6 dieses Buches besprechen werden) und die Suche nach den Grundmechanismen von Vererbung und Evolution (siehe Teil 7 über das DNA-Molekül) ergaben in Kombination mit Darwins Werk ein vollständigeres Bild der Evolution. Es führte zu einem einschneidenden Wandel unserer Auffassung über das Leben und über die Stellung des Menschen in der Schöpfung.

# KAPITEL 14

## Gestalter der Landschaft

*»Jedes Tier hinterläßt Spuren von dem, was es war. Nur der Mensch hinterläßt Spuren von dem, was er schuf. (...) Der Mensch ist keine bloße Figur in der Landschaft, sondern er ist Gestalter der Landschaft.*

*Wie wurden die Hominiden (...) aufmerksam, geschickt, nachdenklich, leidenschaftlich und fähig, mit Symbolen von Sprache und Mathematik umzugehen, ebenso mit Visionen von Kunst und Geometrie, Dichtung und Wissenschaft? Wie trug der Aufstieg des Menschen ihn von jenen Anfängen als Tier zu dieser Fähigkeit des Hinterfragens der Natur, zu diesem Verlangen nach Erkenntnis?«*

Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (1973)

Charles Darwin formulierte die Theorie der Evolution durch natürliche Selektion. Aber zu seiner Zeit hatte niemand eine Vorstellung davon, wie lange die Entwicklung zum Menschen gedauert hatte oder über welche Stadien dieser Prozeß verlaufen war. Darwin begann das Buch über die Evolution des Menschen, und andere erzählten die Geschichte weiter. Die von den Anthropologen und Paläoanthropologen in unserem Jahrhundert verfaßten Kapitel sind ein weiterer Wendepunkt in der Geschichte der menschlichen Erkenntnis und der Auffassungen über unsere primitiven Vorfahren.

## **Verschiedene Wissenschaftsgebiete klären gemeinsam die Entwicklung des Menschen**

*Am 30. Dezember erscheinen die ersten Säugetiere*

Die Paläoanthropologie befaßt sich mit der Erforschung des frühen Menschen, also auch mit den Fossilien der Hominiden (menschenähnlichen Wesen) und der ausgestorbenen Primaten, aus denen sich der Mensch entwickelte. Gegenstand der Untersuchungen sind außerdem die Relikte kultureller Aktivitäten früher Menschen. Wie wir in Kapitel 13 gesehen haben, starben die Dinosaurier vor rund 65 Millionen Jahren aus, als das Erdklima kühler wurde. Danach breiteten sich die Säugetiere auf der Erde aus. Mit Hilfe neuer technischer Verfahren entdeckten die Paläoanthropologen im 20. Jahrhundert zuvor unbekannte Zusammenhänge, die zwischen menschlichen und nichtmenschlichen Wesen bestehen. Durch Kooperation verschiedener Wissenschaftsgebiete konnten große Teile der Entwicklungslinien der letzten 65 Millionen Jahre geklärt werden.

- *Physik und Geologie:* Mit Hilfe neuer Verfahren, darunter die Datierung anhand der radioaktiven Strahlung und die Zuordnung der Sedimentschichten, kann man inzwischen das Alter von Fossilien recht genau bestimmen.
- *Biochemie und Biologie:* In den Teilen 6 und 7 dieses Buches werden wir sehen, wie Biochemiker und Biologen den elementaren »Code« der Fortpflanzung aufklärten, dessen Prinzipien für die primitivsten Lebensformen ebenso wie für den Menschen gelten.
- *Astrophysik und Geochemie:* Auch diese beiden Wissenschaftszweige trugen Teile zum Puzzle der Evolution bei; beispielsweise untersuchte man die Bildung chemischer Elemente im Weltraum und die Zusammensetzung der frühen Erde.

Anhand einer Fülle von Informationen können wir uns nun ein Bild vom Evolutionsprozeß machen, der schließlich zum Menschen führte. Die Grundlage für solche Erkenntnisse war eine einzigartige Synthese der Ergebnisse verschiedenster wissenschaftlicher Disziplinen, die man bis dahin für unvereinbar gehalten hatte. Wie Darwin behauptete, hatte dieser Evolutionspro-

zeß mit »einem gemeinsamen Vorfahren« begonnen, der noch vor den Reptilien und den Amphibien entstanden war. Dieser Vorgang hatte Milliarden Jahre gedauert. Um die Geschichte der Evolution zu veranschaulichen, stellen wir uns die 15 Milliarden Jahre, die das Universum alt ist, auf ein Erdenjahr komprimiert vor. Demnach ereignete sich der Urknall im ersten Augenblick des 1. Januar, und das heute kurz bevorstehende Jahr 2000 beginnt mit dem ersten Augenblick nach dem 31. Dezember des »Universum-Jahres«. In Tabelle 14.1 sind die wichtigsten Schritte der Evolution in diesem Zeitrahmen aufgeführt.

1. Januar:	Urknall
1. Mai	Entstehung der Milchstraße
9. September	Entstehung des Sonnensystems
14. September	Entstehung der Erde
25. September	Erstes Leben auf der Erde
9. Oktober	Älteste Fossilien (Bakterien und Algen)
12. November	Älteste Fossilien von Pflanzen mit Photosynthese
15. November	Erste Zellen mit einem Zellkern

Tab. 14.1: Das »Universum-Jahr« bis zum November (13,75 Milliarden Jahre)

Weil jeder Monat des »Universum-Jahres« ungefähr 1,25 Milliarden Jahren entspricht, kamen die ersten Lebewesen am 25. September auf, und die aufgezeichnete menschliche Geschichte begann in der letzten Minute vor Mitternacht des 31. Dezember. Andere bedeutsame Ereignisse während der Evolution im Dezember des »Universum-Jahres«, also in den letzten 1,25 Milliarden Jahren, sind in Tabelle 14.2 zusammengestellt.

Vor 65 Millionen Jahren, als die Dinosaurier ausstarben, begann im »Universum-Jahr« gerade der 30. Dezember. Angesichts des Alters der Erde von rund 4,6 Milliarden Jahren und des Universums von etwa 15 Milliarden Jahren kann man daher sagen: Erst »gestern« starben die Dinosaurier aus, und die Vorfahren des Menschen begannen sich zu entwickeln. Die Hominiden leben erst einige Millionen Jahre auf der Erde, also bei weitem nicht so lange wie die 140 Millionen Jahre, die den Dinosauriern vergönnt waren. Und den heutigen Menschen gibt es erst seit rund 40000 Jahren.

Sonntag	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag
	1 Sauerstoff bildet sich in der Atmosphäre	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16 Erste Würmer	17 (Paläozoikum und Kambrium beginnen) Wirbellose Tiere	18 Erstes Meeresplankton, Trilobiten	19 (Ordovizium) Erste Wirbeltiere, erste Fische	20 (Silur) Erste Gefäßpflanzen, erste Pflanzen an Land
21 (Devon beginnt) Erste Insekten, erste Tiere an Land	22 Erste Amphibien und Insekten mit Flügeln	23 (Karbon) Erste Bäume, erste Reptilien	24 (Perm beginnt) Erste Dinosaurier	25 (Paläozoikum beginnt, Mesozoikum endet)	26 (Trias) Erste Säugetiere	27 (Jura) Erste Vögel
28 (Kreide) Erste Blütenpflanzen, Dinosaurier sterben aus	29 (Mesozoikum endet, Känozoikum- und Tertiär beginnen) Erste Primaten, große Säugetiere	30 Erste Vorderlappen im Gehirn der Primaten Weitere große Säugetiere	31 (Pliozän endet, Quartär beginnt) Erste Hominiden und erste Menschen			

Tab. 14.2: Der Dezember des »Universum-Jahres«, die letzten 1,25 Milliarden Jahre der Evolutionsgeschichte

## **Fossilienfunde künden von unseren Vorfahren** *Nagetiere im Urwald Europas*

Vor 65 Millionen Jahren gab es auf der Erde ausgedehnte tropische Wälder, die sich vom Äquator bis in nördliche Breiten erstreckten, etwa bis Nordfrankreich, Mitteldeutschland und Südalaska. Es gab eine große Vielfalt an Pflanzen und Tieren, und die Säugetiere vermehrten und entwickelten sich rapide. Unter ihnen waren die Vorgänger der Primaten. Sie ähnelten noch nicht den Affen und Menschenaffen oder gar dem Menschen.

Aber nach einer Zeitspanne von 65 Millionen Jahren wurden mittels natürlicher Selektion durch viele geringfügige Modifikationen aus einem langschwänzigen nagetierähnlichen Säugetier (unserem Ur-Urahn!) nach und nach auch ganz andersartige Lebewesen. Die engsten heute noch lebenden Verwandten unserer ältesten Säugetier-Vorfahren sind die Prosimien oder Halbaffen, auch eine Art von Primaten. Zu den Halbaffen gehören die Lemuren, die Loris und die Koboldmakis; sie alle leben im Dschungel. Aus Fossilienfunden weiß man, daß sich bestimmte Formen der Halbaffen über lange Zeiträume nur wenig veränderten, während aus anderen frühen Primatenarten verschiedene Arten hervorgingen, wobei gravierende Veränderungen auftraten.

Verfolgen wir die Entwicklung, die letztlich zum Menschen führte, von der Zeit jenes kleinen, trippelnden Säugetieres bis heute, dann meinen wir einen unglaublichen Film im Zeitraffer zu sehen. Betrachten wir die Stadien der 65 Millionen Jahre währenden Geschichte:

- In den ersten Jahrillionen des Paläozäns (von 65 bis 54 Millionen Jahren vor unserer Zeit), entwickelt sich das Tier zu einem Baumbewohner. Es frißt Früchte und Insekten.
- Individuen mit längeren Hinterbeinen sind an das Leben in den Bäumen besser angepaßt, denn sie können gut klettern und sich von Ast zu Ast schwingen. Sie pflanzen sich im Zuge der natürlichen Selektion bevorzugt fort.
- Flache Finger- und Zehennägel ersetzen die Klauen, die denen der Ratten ähneln. Außerdem beginnt sich der Daumen zu entwickeln, der den Fingern gegenüber liegt und ein besseres Greifen erlaubt.





Ein Loris, der in Afrika und Asien lebt. Er ähnelt den frühen Primaten im Paläozän, vor 65 Millionen Jahren.



Oben: der fossile Schädel eines frühen Primaten aus dem Eozän vor rund 45 Millionen Jahren. Unten: der danach rekonstruierte Kopf.

Abb. 14.1: Frühe Primaten im Paläozän und im Eozän

- Die Finger werden länger und beweglicher, so daß das Greifen noch leichter wird.
- Während des Eozäns (55 bis 38 Millionen Jahre vor unserer Zeit) wird die Haltung aufrechter, der Kopf kann weiter gedreht werden, und das Gehirn wird größer (siehe auch Abbildung 14.1).
- Die Sehkraft wird besser, und die Augen werden, wie auch ihr Abstand, größer. Dagegen wird der Geruchssinn schwächer. Das deutet darauf hin, daß die natürliche Auslese hier das Sehen gegenüber dem Riechen bevorzugt; dementsprechend wird die Schnauze kürzer.
- Im Oligozän (38 bis 26 Millionen Jahre vor unserer Zeit) beginnt ein Teil der Halbaffen den heutigen Affen zu ähneln. Diese Tiere leben im tropischen Buschland in der Gegend des heutigen Ägypten.
- Die Zähne bekommen eine Form mit vier Höckern, wie sie nur den Primaten eigen ist.



Der *Aegyptopithecus* lebte im Oligozän, 38 bis 26 Millionen Jahre vor unserer Zeit. Diese Rekonstruktion beruht auf zahlreichen im 20. Jahrhundert gefundenen Fossilien dieses etwa sechs Kilogramm schweren Tieres.



Der *Proconsul* lebte im frühen Miozän, vor allem zwischen 23 und 14 Millionen Jahren vor unserer Zeit.

Abb. 14.2: Frühe Primaten im Oligozän und im Miozän

- Der vordere Knochen über den Augen und um die Augenhöhlen nimmt eine runde, geschlossene Form an, ähnlich wie beim Menschen.
- Im frühen *Miozän* (26 bis 7 Millionen Jahre vor unserer Zeit) wird das Tier größer, rund einen Drittel Meter lang. In der Folgezeit wird es infolge der natürlichen Auslese noch größer, weil die größeren Individuen weniger leicht zur Beute von Raubtieren werden.
- Das Tier verläßt die Bäume und kehrt auf den Erdboden zurück, weil es nun weniger Baumfrüchte gibt. Die Nahrung besteht jetzt vorwiegend aus Beeren, Wurzeln und Insekten. Das Tier beginnt auf den Fußsohlen und den Fingerknöcheln zu laufen (siehe Abbildung 14.2).
- Das Skelett paßt sich der neuen Art der Fortbewegung und der Lebensweise weiter an.
- Die Kiefer werden kleiner und das Gesicht vertikaler.
- Am Ende des *Miozäns* (rund 7 Millionen Jahre vor unse-



Der *Ramapithecus* lebte im späten Miozän, vor etwa sieben Millionen Jahren.



Der *Australopithecus* gehörte zu einer Familie der Primaten, die vor vier Millionen Jahren lebte.

Abb. 14.3: *Ramapithecus* und *Australopithecus*

rer Zeit) geht das Tier praktisch aufrecht und ist nun über einen Meter groß: ein kleiner Affe, der sogenannte *Ramapithecus*.

- Im *Pliozän* (7 bis 2,5 Millionen Jahre vor unserer Zeit) entwickelt sich das Tier weg vom afrikanischen Affen und wird zum Menschenaffen. Sein Gehirn wird größer, und es nimmt einige andere hominide (d.h. menschenähnliche) Merkmale an, vor allem die Fähigkeit, auf zwei Beinen zu gehen. Heute nennt man dieses Tier *Australopithecus* siehe Abbildung 14.3 Es ist behaart und verbringt noch viel Zeit in den Bäumen. Es lebt in Gruppen, jagt mit Stöcken und ist recht agil, neugierig, wachsam und intelligenter als die Paviane und die Affen, mit denen es in der afrikanischen Savanne um Nahrung konkurriert. Es hat noch keine Sprache, kommuniziert aber mit Artgenossen durch ein System von Lauten, Gesten und Körpersignalen. Seine Lebenserwartung liegt bei 15 bis 20 Jahren.
- Vor 2,5 Millionen Jahren begann das *Pleistozän* (das vor 10000

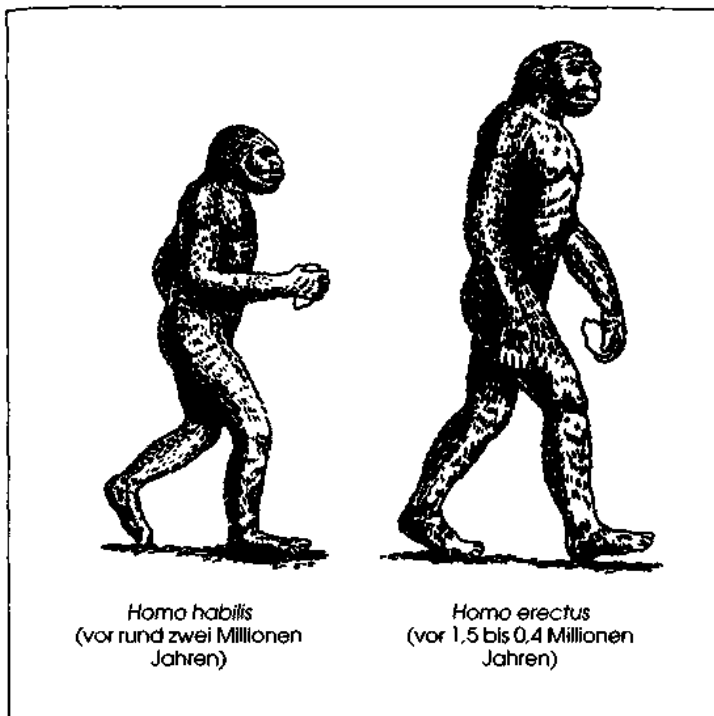


Abb. 14.4: *Homo habilis* und *Homo erectus*

Jahren endete und zum Quartär gehört, das heute noch andauert). In der ersten Million Jahre dieser Epoche wird die Kreatur weniger affenähnlich und ähnelt immer stärker dem Menschen. Irgendwann erreicht ihre Entwicklung ein Stadium, in dem wir sie *Homo habilis* nennen (lateinisch *habilis* = geschickt). Der *Homo habilis* fertigt erstmals rohe Steinwerkzeuge an und gräbt Höhlen. Sein Verhalten deutet damit auf weitere biologische Veränderungen seiner Hände und seines Mittelhirns hin, das ja die Hände steuert. Der *Homo habilis* erreicht eine Population von etwa 100000.

- Im Laufe der nächsten paar Jahrhunderttausende wird er rund anderthalb Meter groß. Sein Gehirn ist nun doppelt so groß wie das des *Australopithecus*. In der Zeit vor 1,5 bis 0,4 Millio-

nen Jahren entsteht aus dem *Homo habilis* eine neue Art: *Homo erectus*. Dieser ist das Bindeglied zwischen dem *Homo habilis* und dem frühen *Homo sapiens*. Der *Homo erectus* ist der erste Hominide, der Afrika verläßt und die übrige Erde zu bevölkern beginnt. Diese Art breitet sich über einige Kontinente aus, erreicht eine Population von rund einer Million. Im 20. Jahrhundert fand man Fossilien des *Homo erectus* in China, auf Java und natürlich in Afrika und Europa. Alle haben ein Schädelvolumen von knapp 1000 Kubikzentimetern und eine flache, fliehende Stirn, mächtige Augenbrauenwülste, einen flachen Schädel, große Zähne und Kiefer sowie ein kleines Kinn. Der *Homo erectus* (siehe Abbildung 14.4) baute sich Hütten und nutzte in jüngerer Zeit, seit etwa 700000 Jahren, das Feuer zum Erhitzen von Nahrungsmitteln. Er erfand Hilfsmittel zum Zerkleinern von Holz und Fleisch, zum Abhäuten von Tieren und zum Abschaben der Felle.

Der *Homo erectus* verständigte sich mit seinen Artgenossen in einfachen Sätzen und entwickelte nach und nach eine komplexere soziale Organisation als seine Ahnen. Die notwendigen Tätigkeiten wurden zwischen den Geschlechtern aufgeteilt, und die Familie oder die Sippe wurde als soziale Einheit bedeutsam. Es lebten meist Gruppen von 20 bis 50 Individuen zusammen, die sich zuweilen an festen Orten aufhielten. Die Lebenserwartung lag bei 20 bis 30 Jahren, war also nicht viel kürzer als die seiner späteren Nachfahren; beispielsweise lebten die Menschen im ausgehenden Mittelalter (um das 14. Jahrhundert) durchschnittlich 38 Jahre lang.

Aus den Fossilienfunden läßt sich die Entwicklung der Vorfahren des *Homo sapiens* nicht vollständig rekonstruieren. Es gibt immer noch Lücken und offene Fragen, so daß man auf Annahmen und Interpolationen angewiesen ist. Die oben beschriebene Chronologie stützt sich vor allem auf Fossilien, die in den letzten 75 Jahren gefunden wurden. Beispielsweise fand der Anatom Raymond A. Dart (1893-1988) im Jahre 1924 in der Kalahari-Wüste in Südafrika den Taung-Babyschädel (benannt nach dem Taung-Kalksteinbruch). Der zwei Millionen Jahre alte Schädel war das erste konkrete Indiz, das Darwins Theorie stützte und dessen

Voraussage erfüllte, es würden in Afrika Fossilien von Affenmenschen gefunden werden. Ähnliche Fossilien fand man ab 1936 in stalagmitischen Ablagerungen in Höhlen und Rissen, die sich in der südafrikanischen Provinz Transvaal im Kalkgestein gebildet hatten. Zu diesen Fossilien zählten Schädel, Ober- und Unterkiefer, Zähne, Gliedmaßen, Beckenknochen und Rückenwirbel. Ab 1924 forschte der kenianische Archäologe und Anthropologe Louis S. B. Leakey (1903-1972) in Ostafrika. Ihm gelangen einige wichtige Entdeckungen. Bekannt wurden seine umstrittenen Interpretationen eigener und anderer Funde.

Die Anthropologin Mary L. Leakey (1913-1996), Louis Leakeys Ehefrau, fand 1959 in der Olduvai-Schlucht in Tansania einen 1,7 Millionen Jahre alten vollständigen Hominidenschädel. Dies war der erste Fund eines solchen Schädels außerhalb von Südafrika. Zehn Jahre später fand ihr Sohn Richard Leakey (geb. 1944) einen ähnlichen Schädel, diesmal in einem ausgetrockneten Flußbett nahe beim Ostufer des Lake Turkana im Norden Kenias. Und 1974 schließlich gelang dem Paläoanthropologen Donald C. Johanson (geb. 1943) eine außergewöhnliche Entdeckung: Er fand das fast vollständige Skelett eines jungen Mädchens. Lucy, wie Johanson sie nannte, hatte vor 3,5 Millionen Jahren im Gebiet des heutigen Äthiopien gelebt. Dieser bemerkenswerte Fund wurde die Grundlage für die Einordnung des *Australopithecus* als Urahn des Menschen (siehe Abbildung 14.3). Das Skelett befindet sich heute in einem äthiopischen Museum, und ein bemalter Abguß wird im Museum für Naturgeschichte in Cleveland ausgestellt. Dort wirkte Johanson zur Zeit seiner Entdeckung als Kustos für Anthropologie. Zwischen 1988 und 1995 entdeckte die Anthropologin Meave Leakey (geb. 1942), Ehefrau und Kollegin von Richard Leakey, bedeutsame Fossilien, beispielsweise am Lake Turkana Zähne, Kiefer- und Beinknochen eines vier Millionen Jahre alten Hominiden. Diese Funde erweiterten unsere Kenntnisse über unsere Urahnen, vor allem hinsichtlich des Gehens auf zwei Beinen und der Gehirngröße.

Seit 1924 wurden in Afrika zahlreiche andere Fossilien entdeckt, vor allem im südlichen Äthiopien und beim Lake Turkana. Dadurch werden die Lücken in der Geschichte immer kleiner, und

wir wissen nun mehr über unsere Ahnenreihe der Primaten, die zu den intelligentesten Lebewesen in unserem Winkel des Universums werden sollten.

Diese frühen Vorfahren liefen auf zwei Beinen durch die Ebenen und waren physisch an ein nomadisches Leben gut angepaßt. Jene unter ihnen, denen die erfolgreichsten Strategien zur Jagd einfielen oder die die sichersten Höhlen für ihre Familien fanden, überlebten am ehesten. Die stärksten, schnellsten und vor allem die intelligentesten Mitglieder eines Stammes oder einer Sippe konnten ihre Gene mit höherer Wahrscheinlichkeit vererben. So wie in einem Löwenrudel die flinksten und gewandtesten Tiere dominieren, konnten bei unseren Urahnen die klügsten Hominiden das Feld beherrschen und die Entwicklung zum modernen *Homo sapiens* beeinflussen.

<b>Erste Vorläufer des Menschen</b>	<b>13:30</b>
<b>Erste Menschen</b>	<b>22:30</b>
<b>Verbreitete Anwendung von Steinwerkzeugen</b>	<b>23:00</b>
<b>Beginn der letzten Eiszeit</b>	<b>23:56</b>
<b>Aufkommen der Landwirtschaft</b>	<b>23:59:20</b>
<b>Erste Städte</b>	<b>23:59:35</b>
<b>Erste Dynastien in Ägypten</b>	<b>23:59:35</b>
<b>Aufkommen der Astronomie</b>	<b>23:59:35</b>
<b>Erste Schriften</b>	<b>23:59:51</b>
<b>Geburt Christi</b>	<b>23:59:56</b>
<b>Untergang des Römischen Reiches</b>	<b>23:59:56</b>
<b>Renaissance in Europa</b>	<b>23:59:59</b>
<b>21. Jahrhundert</b>	<b>Beginn des folgenden Jahres</b>

Tab. 14.3: Der 31. Dezember des Universum-Jahres

Blicken wir noch einmal auf unser Modell, bei dem die gesamte Geschichte des Universums auf ein Jahr projiziert wird. In Tabelle 14.3 sind einige bedeutsame Ereignisse am Nachmittag und Abend des 31. Dezember im Universum-Jahr aufgeführt. Nun wollen wir uns einige paläoanthropologische Befunde anschauen, die ein klareres Bild der ersten Menschen liefern, die sich etwa um 22:30 Uhr dieses letzten Tages im Universum-Jahr entwickelten.

## Der Neandertaler erscheint und verschwindet wieder

### *Rachitis, Arthritis und Neuankömmlinge*

Im Jahre 1856 fand der deutsche Naturforscher Johann Carl Fuhlrott (1803-1877) in einer Höhle im Neandertal nahe Düsseldorf 14 Knochenstücke, die aussahen, als stammten sie von einem verformten menschlichen Skelett. Der Schädel war lang, niedrig und breit. Das Wesen hatte starke Augenbrauenwülste, eine fliehende Stirn, kleine Backenknochen und große Zähne gehabt. Der Brustkasten war breit und die Glieder schwer, mit leicht gebogenen Oberschenkel- und Unterarmknochen sowie mit größeren Füßen und Händen als wir, deren Zehen und Finger relativ kurz waren.

Das war der älteste Schädel eines menschenähnlichen Wesens, der bis dahin als Fossil entdeckt wurde. Weil er im Tal des Flößchens Neander gefunden wurde, nannte man ihn Neandertaler. Darwins Werk *Die Entstehung der Arten* erschien 1859, also drei Jahre später. Aber auch jetzt schien noch niemand darauf vorbereitet, ein Wesen als Vorläufer des Menschen zu akzeptieren, das eher wie ein primitives Tier aussah, und ebensowenig nahm man die Vorstellung hin, daß die frühen Menschen in Höhlen lebten. Fuhlrott selbst nahm an, daß die Knochen wahrscheinlich durch Verwitterung verformt worden waren und daß sie zu einer unglücklichen Person gehörten, die durch die Sintflut in die Höhle gespült worden waren. Andere Wissenschaftler, die den Schädel untersuchten, kamen zu dem Ergebnis, er stamme von einem vor langer Zeit lebenden, an Schwachsinn leidenden Menschen. Der angesehene deutsche Anatom, Pathologe und Sozialpolitiker Rudolf Virchow (1821-1902) meinte, daß die Gebeine von einem mongolischen Reiter stammten, der in der Kindheit an Rachitis und im Alter an Arthritis gelitten hatte und durch Schläge auf den Schädel getötet worden war. Auch Darwins Freund und Anhänger Thomas H. Huxley, ein weltberühmter Biologe, untersuchte den Fund. Er sagte: »In keiner Hinsicht können die Neandertaler-Knochen als Überreste eines menschlichen Wesens angesehen werden, das ein Bindeglied zwischen Menschen und Affen darstellt.« Diese Aussagen brachten alle weiteren Spekulationen zum Schweigen.



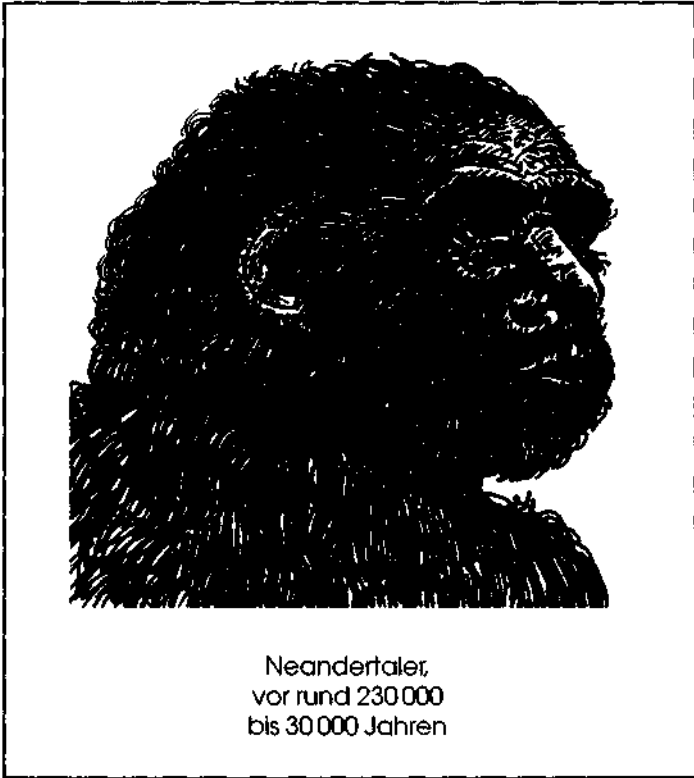


Abb. 14.5: Der Neandertaler

Im Jahre 1886 wurden zwei weitere Neandertaler-Skelette gefunden, diesmal bei der belgischen Stadt Spa. In der Nähe der Gebeine befanden sich primitive Steinwerkzeuge und Überreste ausgestorbener Tiere. Obwohl Virchow seine Theorie über kranke Menschen verteidigte, erkannten zahlreiche Wissenschaftler allmählich, daß die Vorstellung von primitiven Vorfahren vermutlich stichhaltig, wenn auch sehr befremdlich war. Seit 1908 fand man in Frankreich vollständigere Neandertaler-Gebeine und in den folgenden Jahren über dreihundert ähnliche Skelette an vielen Orten in Europa, Asien und Afrika.

Eine Zeitlang waren die meisten Paläoanthropologen über-

zeugt, daß die Neandertaler Vorfahren des *Homo sapiens* waren, die ungefähr vor rund 230000 bis vor 30000 Jahren lebten. Untersuchungen des genetischen Materials ergaben im Jahre 1997, daß die Neandertaler eine ausgestorbene Seitenlinie waren, also nicht unsere Vorfahren. Sie schienen eine relativ hohe Intelligenz zu haben, gingen aufrecht wie der *Homo sapiens*, und ihr Gehirn war mit rund anderthalb Kilogramm kaum kleiner als unseres. Um in der unwirtlichen und kalten Wildnis in der Zwischeneiszeit zu überleben, bewohnten sie Höhlen im Neandertal; sie nutzten das Feuer, auch Fackeln als Lichtquelle; sie jagten mit Speißen und fingen gelegentlich auch Fische; sie verwendeten vielfältige Werkzeuge, die sie aus Stein, Holz oder Knochen verfertigten. Sie beerdigten ihre Toten, hatten Ansätze zu einer Sprache und vielleicht auch eine primitive Religion. Aus den Knochenfunden kann man auch auf Kannibalismus schließen. Die Neandertaler lebten in Gruppen von bis zu 30 Mitgliedern. Sie breiteten sich im Norden bis nach England und im Süden bis nach Spanien aus. Ihre Spuren fand man ebenso in Asien und in Afrika. Sie starben meist mit 30 Jahren, und ihre Population lag bei maximal einigen Zehntausend.

Diese frühen »modernen« Menschen folgten dem *Homo erectus*. Die nachfolgenden Steinzeit-Menschen hingegen entwickelten bald eine neue, fortgeschrittenere Kultur und unterschieden sich von den Neandertalern: Sie hatten eine höhere Stirn, ein ausgeprägtes Kinn und ein flacheres Gesicht. Anatomisch glichen sie dem modernen *Homo sapiens*, und man nennt sie heute *Cro-Magnon-Menschen*.

## **Die Entdeckungen bei Cro-Magnon zeigen unsere direkten Vorfahren**

### *Lehm und gemahlene Knochen*

Man schrieb das Jahr 1868. Eisenbahnarbeiter, die an einer Kalksteinklippe bei dem Dorf Les-Eyzies-de-Tayac im südwestfranzösischen Departement Dordogne mit Ausschachtungsarbeiten beschäftigt waren, stießen auf Knochen und Werkzeuge. Die Wissenschaftler, die man herbeirief, entdeckten vier menschliche

Skelette: von einem Mann mittleren Alters, einem jungen Mann, einer jungen Frau und einem Säugling. Sie fanden außerdem Feuersteinwerkzeuge, Waffen und Verzierungen aus Muscheln und Tierzähnen. Der Fundort lag nahe der Höhle Cro-Magnon, die nach einem Einsiedler namens Magnon benannt war, der dort einmal gelebt hatte. Die Benennung *Cro-Magnon-Mensch* steht heute allgemein für die schon als modern anzusehenden Menschen, die an verschiedenen Orten auf der Erde im Zeitraum von vor 40000 bis vor 10000 Jahren lebten. Viele Paläoanthropologen glaubten damals, daß sich der Neandertaler zum Cro-Magnon-Menschen entwickelt hatte. Man weiß inzwischen aber — wie gesagt -, daß der etwas kleinere Neandertaler mit seinen schweren Gliedmaßen eine ausgestorbene Seitenlinie der menschlichen Entwicklung darstellt, die vom *Homo erectus* über den *Cro-Magnon-Menschen* zum *Homo sapiens* führte. Demnach sind die Neandertaler ausgestorben, weil sie während der rund 10 000 Jahre, die sie gleichzeitig mit den Cro-Magnon-Menschen lebten (von vor 40 000 bis vor 30 000 Jahren), diesen unterlegen waren. Damit sind die Cro-Magnon-Menschen die einzige direkte Verbindung zwischen uns und dem *Homo erectus*.

Viele der Cro-Magnon-Menschen lebten in Höhlen, aber manche errichteten einfache Hütten. Sie fertigten Werkzeuge und Waffen zum Jagen und Fischen an, darunter Netze, Spieße und Fallen. Auch ihre künstlerischen Fähigkeiten waren bemerkenswert. Wir erkennen sie in den Höhlenzeichnungen sowie in den Skulpturen aus Stein, Knochen oder Elfenbein. Sie nähten Kleidungsstücke, fertigten Schuhwerk an und wußten, wie man Feuer macht. Sie hatten spirituelle Zeremonien und Riten für die Jagd, für Begräbnisse und für andere Bräuche und Tätigkeiten. Bei Dolni Vestonice im heutigen Tschechien fand man rund 27 000 Jahre alte Brennöfen, in denen Mischungen aus Lehm und gemahlener Knochen zu Keramiken gebrannt worden waren. Das ist der älteste Beleg dafür, daß Menschen zwei unterschiedliche Substanzen kombinierten und behandelten, um einen ganz neuen Stoff zu erhalten. Sie schufen im Grunde die Voraussetzungen für die Zivilisation, die erst in der letzten Minute des Universum-Jahres aufkam.

Im Verlauf von fast vier Millionen Jahren entwickelte sich aus

der kleinen, dunklen Kreatur mit einem Knüppel in der Hand (dem *Australopithecus* in Zentralafrika) der *Homo sapiens*. Aber erst in den letzten knapp 40000 Jahren erhielt unsere Art die physischen und intellektuellen Merkmale, die wir heute als die dem Menschen eigenen ansehen. Die Cro-Magnon-Frauen und -Männer vor 30 000 oder 40 000 Jahren waren wohl ebenso intelligent wie der *Homo sapiens* heute. Wenn man einen Säugling aus der Cro-Magnon-Zeit heute aufziehen könnte, bemerkte man im täglichen Leben wie in der Schule wahrscheinlich keinen Unterschied gegenüber einem heutigen Kind. Das wäre jedoch bei der oben erwähnten Lucy oder beim Kind eines Neandertalers nicht der Fall. Indem wir auf den Erkenntnissen und Erfahrungen aller vorigen Generationen aufbauten, haben wir technische Fortschritte erzielt und die sozialen Institutionen geschaffen, die unsere moderne Kultur kennzeichnen.

## **Die Herausbildung unterschiedlicher Rassen ist eine Folge der natürlichen Selektion**

### *Der Homo erectus*

Auch innerhalb jeder einzelnen Art entwickeln sich unterschiedliche physische Merkmale, und zwar infolge bestimmter Einflüsse der Umgebung. Der dabei ablaufende Prozeß ähnelt dem der reproduktiven Isolation, die wir in Kapitel 13 besprachen. Jahrmillionen, nachdem sich die Hominiden von den anderen Primaten reproduktiv getrennt hatten, begannen auch zwischen ihnen Unterschiede zu entstehen, die ihren Grund in der geographischen Isolation hatten. Die Hominiden paßten sich den jeweiligen Umgebungsbedingungen an, wobei sich ihre Art allmählich zu der des *Homo sapiens* veränderte. Höchstwahrscheinlich wanderten kleine Gruppen oder Sippen des *Homo erectus* von Afrika in verschiedene Gegenden der Welt und lebten dort getrennt von den anderen Gruppen, während sie sich zum modernen Menschen hin entwickelten und dabei in einer feindlichen Umwelt ums Überleben kämpften. Diese Periode der Isolation war aber nicht lang genug, um zu einer Speziation, d. h. zur Entstehung separater Arten, zu führen. Mit anderen Worten: Alle Menschen

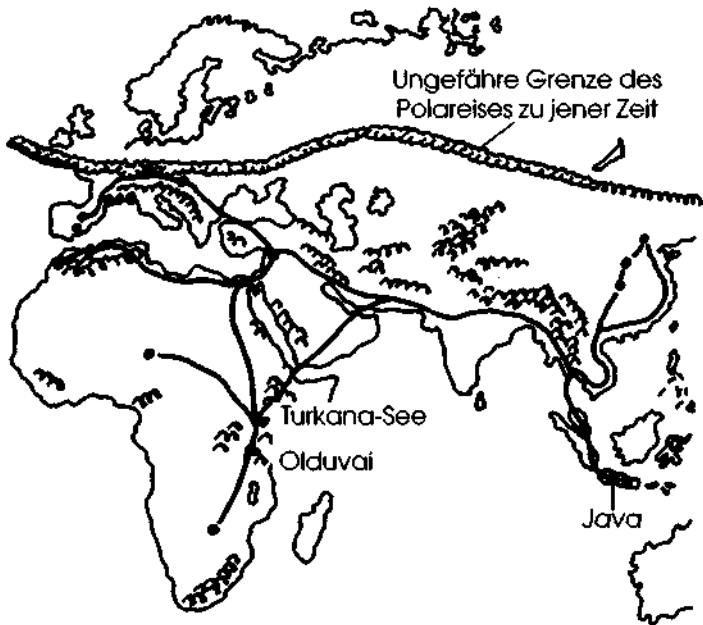


Abb. 14.6: Die wahrscheinlichen Wege, auf denen der *Homo erectus* die Erde bevölkerte

können mit den Angehörigen jeder anderen Rasse fruchtbare Nachkommen zeugen.

Mit unseren heutigen Kenntnissen der Verschiebungen in der Erdkruste, der Eiszeitzyklen und der Auswirkung der Umgebung auf jegliche Evolution können wir verstehen, wie geographisch isolierte Gruppen des *Homo erectus* jeweils besondere Merkmale zu entwickeln begannen. Durch die starke Einstrahlung von Ultraviolettlicht, das die Haut schädigen kann, bildeten die Menschen in Äquatornähe dunklere Hautpigmente aus als die in polnäheren Breiten lebenden Menschen. Im vorigen Jahrhundert erkannte der deutsche Biologe und Physiologe Carl Bergmann (1814-1865), daß die Menschen in kälteren Gebieten größer sind als die in wärmeren Regionen. Dieser Zusammenhang, der allgemein für Warmblüter gilt, wird heute Bergmannsche Regel genannt. Sie beruht darauf, daß größere Körper pro

Volumeneinheit weniger Wärme abgeben als kleinere. Außerdem haben die weiter vom Äquator entfernt lebenden Menschen tiefer liegende Augen, die durch etwas dickere Augenlider geschützt sind.

Auch andere Merkmale sind die Folge von Anpassungen an die Umgebung. Beispielsweise hängt die Form der Nase mit der Luftfeuchtigkeit zusammen, weil eine wichtige Aufgabe der Nase das Anfeuchten der eingeatmeten Luft ist. Die Lunge kann geschädigt werden, wenn die einströmende Luft nicht wenigstens eine relative Feuchtigkeit von 95 Prozent hat. Bewohner trockenerer Gebiete (beispielsweise in Zentralasien) haben daher schmalere Nasenlöcher, so daß die Luft beim Einatmen besser angefeuchtet wird. Die Ureinwohner Zentralafrikas haben dagegen recht breite Nasen mit großen Nasenlöchern. Es gibt noch viele andere physiologische Merkmale - darunter Körpergröße, Farbe und Struktur des Kopfhaares, Pulsfrequenz, Knochenwachstum, Fingerabdrücke und Blutgruppen -, die mit den Umgebungseinflüssen zusammenhängen, an die sich unsere Urahnen im Verlauf von Jahrhunderttausenden anpaßten.

Heute kann man den Prozeß der natürlichen Selektion bei bestimmten Tieren sogar beobachten. So berichtete im November 1994 ein Biologe der Universität von British Columbia über eine Population von Stichlingen, die ihre Gestalt und ihre Freßgewohnheiten innerhalb weniger Generationen zu ändern begannen, als ein neu aufgetretener Nahrungskonkurrent sie in eine andere ökologische Nische zwang. In den letzten Jahrzehnten untersuchte man unter diesen Aspekten auch viele andere Tierarten, beispielsweise die Finken auf den Galapagos-Inseln. Dabei ergaben sich stets Anzeichen für solche langsamen und stillen Anpassungsprozesse.

Die Evolution des Menschen wurde, wie schon angedeutet, ebenfalls durch geographische und klimatische Faktoren beeinflusst, ferner durch andere Einwirkungen, darunter Krankheiten, Wanderbewegungen und die Konkurrenz um Lebensraum und Nahrung. In der etwa eine Million Jahre dauernden Epoche des *Homo erectus* entwickelten die geographisch voneinander isolierten Populationen aufgrund solcher Einflüsse unterschiedliche Gengruppen. Die Anthropologen teilen daher die Menschen im

wesentlichen in neun Rassen ein: (1) europäisch-kaukasisch; (2) afrikanisch-negroid; (3) asiatisch-mongolisch; (4) australisch; (5) amerikanisch-indianisch; (6) asiatisch-indisch; (7) polyne-sisch; (8) melanesisch und (9) mikronesisch. Jede Gruppe bildete zudem ihre eigenen Sprachen und Kulturen heraus.

## **Die Existenz unterschiedlicher Rassen hatte politische Auswirkungen**

### *Das Tor der Götter*

Die simultan ablaufenden physiologischen und kulturellen Entwicklungen und Differenzierungen der Menschen in den verschiedenen Rassen wurden zu einem der bedeutendsten politischen Fakten in der menschlichen Geschichte. Vor rund 10000 Jahren wandelte sich der Mensch vom Sammler und Jäger allmählich zum Bauern, der Tiere hielt und den Acker bestellte. Sammler und Jäger streiften in Horden mit durchschnittlich rund 40 Mitgliedern umher und folgten auch Tierherden, um Nahrung zu finden. Aber nach der letzten Eiszeit entstand eine Fülle neuer Vegetationsarten. Die Menschen wurden nun seßhafter, zähmten Tiere und bauten Pflanzen an. Sie wurden zu Gestaltern der Landschaft.

Die Entwicklung der Kultur und des Verhaltens unserer Art änderte sich damit drastisch. Nun konnten die Menschen Ansiedlungen und Gemeinschaften gründen und sogar eine Zivilisation im heutigen Sinne schaffen. Vor dieser Umwälzung konnte kaum eine Technik entwickelt werden, weil die Nomaden ständig alles mit sich tragen mußten, was sie besaßen. Bei einer Lebensweise, die auf einfache und vor allem leichte Vorrichtungen beschränkt war, die auch nachts greifbar sein und am nächsten Tag wieder mitgenommen werden mußten, hatte man weder Raum noch Zeit für Kreativität, Innovation, Experimente oder die Erweiterung des geistigen Horizonts. Bevor der Mensch sich niederließ und stabile Gemeinwesen schuf, drehte sich alles um das reine Überleben. Einziges Bestreben war es, den Bräuchen der vorigen Generationen zu folgen und Nachkommen zu zeugen.

Bis vor rund 10 000 Jahren hatten die Menschen nur einfachste

Werkzeuge entwickelt, mit denen sie jagen und fischen konnten. Die raffiniertesten Erfindungen waren Brennöfen wie die der Cro-Magnon-Menschen. Bald danach kam das Kupferschmelzen auf, und im Nahen Osten (vielleicht auch in den Gebieten im Süden der ehemaligen Sowjetunion) wurde das Rad erfunden. Das ermöglichte natürlich bald eine relativ rasche technische Entwicklung, in der Landwirtschaft wie in vielen anderen Bereichen. Der Erfindung des Rades folgten Methoden zum Gerben von Fellen sowie zum Weben und zum Töpfern. Vor rund 6000 Jahren lernte man Kupfer und Zink zu Bronze zu verschmelzen, und das Verhütten von Eisen kam vor 3500 Jahren auf. Um 1000 v. Chr. stellte man in Indien Stahl her, der bald auch in anderen Teilen der Welt bekannt wurde. Es wurden immer mehr dauerhafte Siedlungen errichtet. Die neuen Errungenschaften förderten ein schnelles Anwachsen der Weltbevölkerung. Sie stieg in nur 4000 Jahren (10000 bis 6000 Jahre vor unserer Zeitrechnung) von rund 5 auf 86 Millionen, also um das 17fache.

Bis um 3000 v. Chr. hatte es der Mensch geschafft, Ochsen und Pferde zum Ziehen von Wagen abzurichten, und ab etwa 2000 v. Chr. konnte man auf Pferden reiten. Ungefähr zur selben Zeit baute man die ersten Segelboote. Mit Booten und Pferden sowie Wagen, Wegen und Brücken verfügten die Menschen nun über Transportmöglichkeiten. Die Bevölkerung nahm noch schneller zu. Außerdem gab man sich einem gewissen Abenteuergeist hin und begann Gebirge zu überschreiten, Flüsse hinunterzufahren und auch in See zu stechen. Die Menschen überwand jetzt größere Entfernungen, so daß zuvor isolierte Gruppen aufeinandertrafen. Wie angesichts des menschlichen Naturells nicht anders zu erwarten, gerieten die verschiedenen Gruppen miteinander in Konkurrenz. Sie stritten um Territorien und Nahrungsquellen, bekämpften sich aber auch aus unbedeutenderen Gründen. Man kam immer öfter in Kontakt mit Menschen, die eine andere Sprache hatten, eine andere Hautfarbe aufwiesen, vielleicht nur größer oder kleiner gewachsen waren, an einen anderen Gott glaubten, zu anderen Götzen beteten oder sich einfach nur anders kleideten. Wegen solcher Unterschiede hielt man sie oft für weniger menschlich«. Später, als die Reibereien intensiver wurden und das territoriale Denken sich zum Nationalismus



entwickelte, mußten derartige Unterschiede als Rechtfertigungen für Krieg und Unterdrückung erhalten.

In der provinziellen Sichtweise der Welt, wie sie in der mittelalterlichen Literatur Europas deutlich wird, galten physische Abweichungen von der europäischen »Norm« als Folge von Degeneration oder göttlicher Bestrafung für Sünden. Die Geschichte der meisten Kulturen ist durchsetzt von solcher Engstirnigkeit und Selbstüberschätzung. Völker und Stämme überall auf der Erde nannten sich selbst »Volk« oder »alle Menschen« und wiesen anderen Gruppen einen »unter-menschlichen« Status zu. Nicht von ungefähr hieß das Mittelmeer *Mare mediterraneum*, etwa »mittelländisches Meer«. Und jahrtausendlang nannte sich China das »Reich der Mitte«. Im antiken Griechenland war der Olymp (der Wohnsitz der Götter) das Zentrum des Landes, und dieses war auch die Mitte der Welt. Für die Hindus war der Mount Meru das Zentrum der Welt, ähnlich wie in Europa die Erde als Mittelpunkt des Universums galt, bis sich in der Renaissance schließlich das kopernikanische System durchsetzte. Babylon (soviel wie »Tor der Götter«) war der Ort, an dem die Götter auf die Erde herabstiegen. Für die Moslems war ihre Kaaba der wichtigste Punkt der Erde.

Die Geschichte ist natürlich sehr komplex. Konflikte, die immer wieder aufflammten, resultierten aus sehr unterschiedlichen Fakten und Zeitumständen. Aber ganz sicher trugen in den letzten Jahrtausenden die physischen und kulturellen Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen oder Nationen am meisten zu solchen Konflikten bei. Dazu gehören in jüngerer Zeit Spannungen zwischen Angehörigen verschiedener Rassen oder Glaubensrichtungen in vielen anderen Ländern. Solche Auseinandersetzungen begannen mit den ersten Stammeskämpfen und setzten sich bis in unsere Zeit mit unglaublicher Brutalität fort. Religiöse und kulturelle Konfrontationen forderten allein seit 1900 mehr Todesopfer als in allen vorigen Jahrhunderten zusammen.

Der *Homo erectus* bevölkerte allmählich immer mehr Teile der Erde, und es bildeten sich verschiedene Rassen und Kulturen heraus. Die Weltgeschichte ist voll von militärischen Konflikten, Unterwerfungen und Versklavungen von Völkern auf der ganzen Welt, ebenso von offenem Haß zwischen physisch und kulturell

differierenden Gruppen. Wenn wir die wirklichen Mechanismen und den Ablauf der menschlichen Evolution schon früher verstanden hätten, gäbe es dann weniger Gewalt und Zerstörung? Wenn die Menschen wüßten, daß ihre Gegenwart auf der Erde und ihre kulturellen Unterschiede Folgen der Evolution sind, auf keinen Fall jedoch Resultat göttlicher Inspiration oder Ausdruck einer angeborenen Überlegenheit, dann wären sie vielleicht weniger schnell bereit, andere zu verdammen, zu quälen oder zu töten.

Wir können es auch anders ausdrücken: Hätten sich alle Menschen in einem einzigen geographischen Gebiet auf der Erde entwickelt, und das bis vor kurzer Zeit (vielleicht nur innerhalb der letzten wenigen Jahrtausende), so hätte die natürliche Selektion keine Zeit gehabt, merkliche physische oder kulturelle Unterschiede zwischen den Menschen auszubilden. Dann könnten alle Menschen jetzt beispielsweise schwarze Haare, braune Augen, dunkle Haut und ziemlich einheitliche Körpergrößen und Erscheinungsformen haben. Noch wichtiger wäre, daß wir dann - als Mitglieder einer einzigen Gruppe - alle dieselbe Sprache sowie ähnliche kulturelle und religiöse Grundsätze hätten. Gesichter und Persönlichkeiten der einzelnen Menschen würden sich selbstverständlich auch dann voneinander unterscheiden, aber es gäbe insgesamt deutlich geringere Unterschiede zwischen uns. In einer solchen Welt müßten wir vielleicht die Fülle und die Faszination unserer so vielfältigen Kulturen vermissen, und die menschliche Geschichte wäre anders verlaufen. Vielleicht hätten die Völker in einer derart monokulturellen Welt andere Gründe gefunden, die jeweils anderen zu diskriminieren und zu unterwerfen. Hätte man die Tausende von Kriegen zwischen den Staaten, die Millionen von Getöteten, Verstümmelten oder auch die Versklavung von Völkern vermeiden können, die letztlich von den kulturellen und religiösen Differenzen herrührten ?

Diese Frage wird niemals zu beantworten sein. Doch können wir in größerer Harmonie leben, wenn wir die menschliche Evolution verstehen und uns vergegenwärtigen, daß wir alle zur selben Art gehören. Wir alle stammen vom gleichen kleinen Primaten, einem Lemur, ab. Und wie wir im nächsten Teil dieses Buches sehen werden, ist unser ältester gemeinsamer Urahn ein einzelli-

ges Tier, das erst am 25. September des Universum-Jahres auf den Plan trat.

Es ist fast paradox: Sobald die Evolution und unsere Entwicklung so weit fortgeschritten waren, daß unsere Denkprozesse differenziert genug waren, die Gesetze der Natur zu entdecken, wurde die natürliche Selektion weit weniger bedeutsam für unser tägliches Leben und auch für unser langfristiges Schicksal. Seit rund 10000 Jahren organisieren wir uns in kooperativen Gemeinschaften, und seitdem machte es für den einzelnen beispielsweise relativ wenig aus, wie schnell er rennen konnte. Die Menschen überlebten nun in einer feindlichen Umgebung häufiger dadurch, daß sie den Aufenthaltsort wechseln konnten, und seltener, indem sie sich durch natürliche Selektion an die Umgebung anpaßten. Wir erbtten all unsere physischen Fähigkeiten und Merkmale von derjenigen Art, die in früheren Zeiten in der Selektion erfolgreich war. Aber heute zeichnet sich unsere Art vor allem durch ihre Fähigkeit aus, über die Zukunft nachzudenken, sich ein Bild von sich selbst zu machen und die Umgebung umzugestalten - zum Besseren oder auch zum Schlechteren. Unsere unglaublichen Möglichkeiten sind im Grunde nur auf das Wirken der natürlichen Selektion zurückzuführen, die unseren Geist zu einer der mächtigsten Kräfte auf diesem Planeten machte.

Wir spielen heute nicht mehr nach den Regeln der natürlichen Selektion, sondern verändern unsere Umgebung nach eigenem Gutdünken. Wenn wir an Infektionen erkranken, entwickeln wir Medikamente, um die Erreger abzutöten. Wenn unsere Sehschärfe ungenügend ist, behelfen wir uns mit einer Brille, und wenn wir zu langsam sind, einen Hasen einzufangen, dann töten wir ihn mit einem Gewehr. Dank unserer zivilisatorischen Errungenschaften konnten wir es uns erlauben, körperlich schwächer und anfälliger für Infektionen zu werden, denn um zu überleben, kommt es mittlerweile immer mehr auf unsere geistigen Fähigkeiten an. Wie lange wir noch als Art bestehen werden, hängt davon ab, ob wir einen Plan konzipieren und realisieren können, unsere Umwelt zu erhalten. Milliarden anderer Lebewesen auf dieser Erde hängen vom jeweiligen Nahrungsangebot und von bestimmten Nischen zum Überleben ab; sie unterliegen also dem

Druck der natürlichen Selektion, der eine natürliche Balance auf der Erde aufrechterhält. Wir aber sind die einzige Art, die diese komplexen Prozesse durchschaut. Doch wir sind dabei, sie radikal und unwiderruflich zu verändern.

Obwohl wir den Prozeß der Evolution inzwischen gut verstehen, lassen wir uns emotional immer noch davon verwirren. Viele Menschen sprechen weiterhin von einer »Theorie«, um ihre irrationale Sichtweise der Evolution zu rechtfertigen. Im Jahre 1859 war die Evolution wirklich nur eine Theorie, aber heute ist sie ein unumstößliches Prinzip und eine unabweisbare Tatsache. Wenn man die inzwischen gesicherten Fakten und Kenntnisse ignoriert und nur von einer Evolutions-»Theorie« spricht, dann ist das nichts anderes als ein simples Wortspiel, eine krasse Fehlbenennung, die nichts mit einer wissenschaftlichen Debatte zu tun hat. Wie bei Tausenden anderer wissenschaftlicher Tatsachen auch, deren Beweise über jeden vernünftigen Zweifel erhaben sind, führen die Angriffe der Kreationisten gegen die Evolution zu einer »Kontroverse«, bei der die Glaubwürdigkeiten beider Seiten nicht annähernd vergleichbar sind. Huxley drückte das 1860 in seiner Entgegnung an Wilberforce sehr einfach aus: Da wir Menschen »von der Natur reiche Begabungen erhielten«, werden wir unserer Art nicht gerecht und verdienen die phantastischen Fähigkeiten des Lernens und der Vernunft nicht, wenn wir »den Spott in eine ernste wissenschaftliche Diskussion einbringen«.

# KAPITEL 15

## Die Kontinentalverschiebung

*»Die Kontinente sind voneinander losgelöst und treiben auf großen Fragmenten der Erdkruste. (...) Die Platten zittern und beben öfter als einmillionenmal im Jahr. Die >feste Erde< ist nicht so fest, wie wir glauben. Sie ist beweglich, dynamisch und im Grunde ruhelos. (...) Sie gestaltet stetig ihre eigene Oberfläche, zerstört und repariert sie und erneuert sie wie eine Haut.«*

Jonathan Weiner, *Planet Earth* (1986)

Schon lange bevor Darwin sein Werk *Die Entstehung der Arten* schrieb, erkannten die Menschen die komplexen wechselseitigen Beziehungen zwischen pflanzlichem und tierischem Leben im natürlichen Gefüge (den »Ökosystemen«) ebenso wie die Auswirkungen von Klima, Landschaftsform und anderen Umgebungsfaktoren auf das Überleben verschiedener Arten. Mit dem Aufkommen der Evolutionstheorie wurde die natürliche Selektion einbezogen. Aber eine neue und geradezu revolutionäre Entdeckung in der Geologie förderte seit den 60er Jahren unseres Jahrhunderts einen wichtigen Aspekt des Evolutionsprozesses zutage. Damals fanden Paläoanthropologen die Fossilien, durch die wir unsere Ahnenreihe rund 65 Millionen Jahre weit zurückverfolgen konnten. Zur selben Zeit ergaben sich neue geologische Aspekte. Diese erklärten eine überraschende, zuvor unbekannte Ursache für viele Veränderungen der äußeren Umgebung, die auf die natürliche Selektion einwirken.

An der San-Andreas-Spalte in Kalifornien gleiten zwei riesige Landmassen mit starker Reibung aneinander vorbei, nämlich die Pazifische Platte und die Nordamerikanische Platte. Das sind

zwei der zehn großen Platten der Erdkruste. Sie bewegen sich auf dem Erdmantel ungefähr so schnell, wie unsere Fingernägel wachsen. In rund 15 Millionen Jahren werden Los Angeles und San Francisco, heute 600 Kilometer voneinander entfernt, nahe benachbart sein. Die Reibung an den Spalten löst von Zeit zu Zeit starke Erdbeben aus. Sechs größere Spaltensysteme befinden sich direkt unter Los Angeles, und hundert aktive Spalten bedrohen ständig die vielen Menschen, die in jener Region leben. Man kann praktisch nichts tun, um diese Gefahren zu vermindern, aber wir kennen heute wenigstens ihre Ursachen und wissen, daß diese Vorgänge Teil eines globalen Phänomens sind, das seit Jahrmillionen bedeutende Auswirkungen auf alles Leben hatte, und nicht nur heute auf die Einwohner Kaliforniens. Die Entdeckung der Kontinentalplatten und unsere heutigen Kenntnisse über die Plattentektonik - die dynamischen Prozesse der Kontinentalverschiebung - hat die Geologen und die Evolutionsforscher auf bemerkenswerte Weise zusammengebracht.

**Erdbeben und Vulkane begründeten die Mythologie,  
weil sie Tod und Zerstörung über die Erde brachten**  
*Von Walen, Wildschweinen und Schlangen*

*Lissabon (Portugal), 1755:* Heftige Erdstöße vor der Küste töteten 60 000 Menschen, die in den dadurch ausgelösten Wellen ertrinken. 12000 Menschen werden von einstürzenden Gebäuden erschlagen oder verbrennen in den Feuersbrünsten, die nach den ersten Stößen auf dem Festland noch über sechs Tage lang andauern.

*Laki (Island), 1783:* Asche aus diesem Vulkan zerstört große Teile der Vegetation und führt zu einer Hungersnot und Epidemien, denen 10 000 Menschen zum Opfer fallen.

*Unzen-dake (Japan), 1792:* Schlammlawinen, die von diesem Vulkan ausgehen, zerstören Dörfer an seinen Hängen. Es kommen 10452 Menschen um.

*New Madrid (Missouri, USA), 1811:* Das erste einer Reihe von Erdbeben und Nachbeben dauert fast zwei Monate und ist noch in über 1500 Kilometer Entfernung zu spüren. Es löst ausgedehnte Überschwemmungen aus und verursacht große Schäden.

*Tambora (Indonesien), 1815:* Mehr als 12000 Menschen sterben, als dieser Vulkan Gestein und Asche ausstößt. Auch Landwirtschaft und Tierwelt werden stark geschädigt. Infolge der dadurch ausgelösten Hungersnot sterben 80 000 Menschen auf den benachbarten Inseln Sumbawa und Lombok.

*Krakatau (Indonesien), 1883:* Nachdem der Vulkan über 200 Jahre lang ruhte, speit er ab dem 20. Mai 1883 Aschewolken aus, die bis zu zehn Kilometer hoch steigen. Der Vulkan ist in den folgenden Monaten mit Unterbrechungen aktiv, bis am 27. August ein Höhepunkt erreicht wird. Diese Eruption ist vermutlich die heftigste seit Menschengedenken. Die Ausbrüche sind noch 3500 Kilometer entfernt in Australien zu hören, und die Asche steigt 75 Kilometer weit in die Atmosphäre empor. Die Eruption löst Meereswellen aus, die auf den nahegelegenen Inseln Java und Sumatra 36 000 Todesopfer fordern.

*Mount Pelée (Martinique), 1902:* Eine Wolke aus Asche und Lava dieses Vulkans tötet 29000 Menschen, als sie über der Stadt Saint-Pierre niedergeht.

*Kelud (Java), 1902:* Nach einem Ausbruch dieses Vulkans kommen 5100 Menschen in der Schlammlawine und durch die Überschwemmung um, die vom Wasser des Kratersees ausgelöst wird.

*San Francisco, 1906:* Am 18. April, morgens um 5.12 Uhr, verschiebt sich die San-Andreas-Spalte auf einem mehrere hundert Kilometer langen Stück. Dabei kommen 700 Menschen um, und das nachfolgende Feuer zerstört das Zentrum der Stadt mit zahlreichen Geschäfts- und Bürohäusern.

*Tokyo, 1923:* Ein heftiges Erdbeben fordert ungefähr 140000 Todesopfer, und fast die Hälfte aller Gebäude im Stadtgebiet stürzten ein.

*Chilenische Küste, 1960:* Auf einer Länge von rund 1600 Kilometern entlang der Küste sterben durch ein Erdbeben 5700 Menschen, und 3000 werden verletzt. Die seismischen Meereswellen erreichen Hawaii, Japan und die Pazifikküste der USA. Auch dort gibt es Tote und schwere Sachschäden.

*Tang-shan (China), 1976:* Am 28. Juli zerstört ein Erdbeben diese Bergbau- und Industriestadt östlich von Peking. Bei dieser wohl schlimmsten Naturkatastrophe in der neueren Geschichte kommen 240 000 Menschen um, und 500 000 werden verletzt.

Nach der Mythologie des Stammes Mayawyaw in Luzon auf den Philippinen verursachte eine Göttin namens *Aninito ad Chalom* alle Erdbeben. Gemäß den Überlieferungen des indischen Stammes Bhuiya stand die Göttin *Baski Mata* am Meeresboden auf dem Kopf und stützte die Erde mit ihren Füßen. Immer wenn sie ermüdete und ihre Haltung veränderte, gab es ein Erdbeben. Ureinwohner des heutigen Chile glaubten, daß sich in den Vulkanen ein ungeheuerlich großer Wal aufhielt. In Indien machte man einen gigantischen Maulwurf oder einen wilden Eber für die Vulkanausbrüche verantwortlich. In Indonesien schließlich meinte man, daß die Schlange *Hontobogo* mit ihren Bewegungen Erdstöße und Ströme glühender Lava auslöste. In Sumatra wurden Tiere geopfert, um die Geister zu beschwichtigen, die in den Vulkanen wohnten. Der Stamm Bagobo auf den Philippinen opferte dazu auch Menschen. Auch Mythen über Zyklopen und Titanen wurden durch vulkanische Aktivität inspiriert.

Aristoteles war überzeugt, daß Vulkanausbrüche und Erdbeben durch heiße Winde ausgelöst werden, die unter der Erde wehen und gelegentlich nach oben ausbrechen - eben in den Vulkanen oder bei Erdbeben. Er glaubte, daß diese heißen Winde durch Kompression entstehen, wenn sich die Meereswellen am Strand brechen und Luft in die Höhlen an der Küste pressen. Wie viele andere Theorien des Aristoteles hielt sich auch diese »pneumatische Theorie« über 2000 Jahre lang, um dann letztlich aber widerlegt zu werden.

Im März 1996 brach der bis dahin lange Zeit ruhende Vulkan El Popo (kurz für Popocatepetl, das aztekische Wort für »rauchender Berg«) aus. Dieser Berg, gut 60 Kilometer südöstlich von Mexico City gelegen, begann plötzlich wieder Asche und Dampf auszustoßen. Die Indianer im Dorf de Xalitzintla und viele andere der rund 400 000 Menschen im Schatten von El Popo zogen auf die mit Asche bedeckten Abhänge des 5400 Meter hohen Vulkans und brachten Früchte, Blumen und Chili-Sauce als Opfergaben dar, in der Hoffnung, der Vulkan werde nicht ausbrechen und sie unter seiner Lava begraben. In vielen Kulturen halten sich auch heute noch primitive Mythen. Mit ihnen will man die Welt verstehbar machen und Einfluß auf sie gewinnen, um Katastrophen



abzuwenden, die Furcht zu besiegen und auch der Machtlosigkeit, Unsicherheit und Verwirrung zu entrinnen, die überwältigende Naturphänomene wie Erdbeben und Vulkanausbrüche hervorrufen. Die Furcht schuf erst die Götter - die Furcht, daß gerade dieses Dorf als nächstes in der Asche versinken oder in seinen Grundfesten erschüttert werden könnte. Angesichts der vielen Fälle von Tod und Zerstörung durch Erdbeben und Vulkane ist es kein Wunder, daß man auf so vielfältige Weise versuchte, diese einst mysteriösen Aktivitäten zu erklären. So wurden diese Naturerscheinungen ein wesentlicher Bestandteil vieler Kulturen in der ganzen Welt.

Beginnend mit James Hutton und Charles Lyell, trugen die Geologen im 19. und im 20. Jahrhundert viel zum Verständnis der Ursachen von Erdbeben und Vulkanausbrüchen bei. Um die Mitte unseres Jahrhunderts zeichneten sich jedoch Veränderungen ab: Die Geologen erkannten, daß die Wahrheit noch merkwürdiger war als die Mythen über diese Phänomene. Obwohl Hutton und Lyell festgestellt hatten, daß sich die Erde ständig verändert, hätten sie sich niemals vorstellen können, was die heutigen Geologen schließlich über den Grund dieser Naturerscheinungen herausfinden sollten.

### **Massive Platten auf der Erdkruste verschieben langsam die Kontinente** *Pangäa und die Insel Indien*

Die Theorie der Kontinentalverschiebung wurde ursprünglich 1912 von dem deutschen Geophysiker und Meteorologen Alfred Wegener (1880-1930) aufgestellt. Als ihm die Ähnlichkeit der atlantischen Küstenlinien von Südamerika und Afrika auffiel, vermutete er, daß diese beiden Kontinente bis vor rund 250 Millionen Jahren zusammenhingen, und zwar als Teile des Superkontinents *Pangäa*. Diese Bezeichnung wurde abgeleitet von den griechischen Wörtern *pan* = alle und *gaia* = Erde.

Im Gegensatz zu anderen Theorien über die Verschiebung von Kontinenten besagte Wegeners *Pangäa*-Theorie, daß die Kontinente von *Pangäa* abgebrochen waren und sich allmählich Tau-



Abb. 15.1: Pangäa

sende von Kilometern weit entfernt hatten, ähnlich wie Stücke einer zerbrochenen Eisscholle. In seinem 1915 erschienenen Buch *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* führte Wegener aus, daß die Appalachen, ein Gebirge im Osten Nordamerikas, Teil einer Gebirgskette zu sein schienen, die durch die ostkanadische Provinz Neuschottland (Nova Scotia) sowie durch Schottland und Skandinavien verläuft. Außerdem stellte er fest, daß ein in Ost-West-Richtung verlaufendes Gebirge in Argentinien mit einem Gebirge in Südafrika zusammenpaßt und daß eine Hochebene in Brasilien mit einer ähnlichen Formation an der Elfenbeinküste in Afrika übereinstimmt. Die Beispiele, auf die er sich stützte, waren aber nicht auf die topographischen oder physikalischen Ähnlichkeiten beschränkt. Auch fossile Farne an be-

stimmten Orten auf der ganzen Welt stimmten so stark miteinander überein, daß dies nur durch die Pangäa-Theorie zu erklären war. Wegener starb 1930 auf einer Expedition in Grönland. Trotz seiner stichhaltigen Beweise taten die meisten Geologen zu jener Zeit seine Theorie der Kontinentalverschiebung ab, und die Vorstellung vom Superkontinent Pangäa geriet für Jahrzehnte in Vergessenheit. Noch Mitte der 50er Jahre beklagte man in Geologielehrbüchern die mangelnden Kenntnisse über Gebirge, Vulkane und Erdbeben. Ein Beispiel:

*»Die Entstehung der (...) Gebirgsmassive ist noch nicht aufgeklärt. (...) Solange man nicht genau weiß, wie (...) das Innere unseres Planeten beschaffen ist, (...) bleibt die Entstehung der Gebirgsmassive und der Vulkane unklar. (...) Geologische Befunde, die man mit Hilfe seismologischer Verfahren erhielt, (...) deuten auf eine neue, höchst interessante Epoche der (...) Forschung hin.«*

Und wirklich war die Geologie damals drauf und dran, einen großen Schritt nach vorn zu tun. Anhand der Ergebnisse intensiver Erkundungen des Meeresbodens während der Verfolgung von Unterseebooten im Zweiten Weltkrieg und aufgrund anderer geologischer Indizien, die sich in den 50er Jahren ergaben, entwickelte man eine detailliertere und zutreffendere Version der Kontinentalverschiebungs-Theorie. Sie wurde nun zu einer Theorie der Plattentektonik, deren Ansätze äußerst überzeugend waren. Unser heutiges Wissen vom Aufbau der Erde geht vor allem auf folgende Entdeckungen zurück: •

- *Ähnlichkeiten fossiler Organismen* in den Schichten auf voneinander entfernten Kontinenten, und zwar in solchen Gebieten, deren Küstenlinien zusammenpassen (wie die von Südamerika und Afrika).
- *Ähnlichkeiten der Gesteine und Formationen* auf voneinander entfernten Kontinenten in denselben Gebieten.
- *Störungen in der Erdkruste* an vielen Stellen. Beispielsweise wird die Australische Platte an ihrem Nordrand unter die Eurasische Platte gedrückt (wobei sich der Himalaya weiter aufaltet), und der Westrand der Pazifischen Platte gerät unter die

Asiatische Platte (was in Japan und dessen Umgebung immer häufiger zu Vulkanausbrüchen und Erdbeben führt).

- *Gestalt und Zusammensetzung der Meeresböden*, zum Beispiel die Grenze zwischen tektonischen Platten an dem über 60000 Kilometer langen Mittelozeanischen Rücken, verursacht durch die Bildung neuer Erdkruste, die aus dem heißen Erdmantel emporsteigt. Diese sogenannte Meeresbodenspreizung kann man durch Altersbestimmung der Mineralien und Sedimente am Meeresboden nachweisen.
- *Ausrichtung des Gesteinsmagnetismus am Meeresboden*, wie sie sich an den Streifen zeigt, die sozusagen die Wachstumslinien bei der Expansion der Ozeanischen Platten widerspiegeln.

Die Ausrichtung des Magnetismus der Mineralien am Meeresboden lieferte faszinierende und überzeugende Indizien für die Meeresbodenspreizung. Seit etlichen Jahren kann man die Intensität und die Richtung des Erdmagnetfelds mit sogenannten Magnetometern messen, die hinter Schiffen hergeschleppt werden. Außerdem weiß man heute, daß die Polarität dieses Feldes sich auf natürliche Weise in den letzten rund 700 000 Jahren änderte. Während der Gesteinsbildung an der Erdkruste, einschließlich des Meeresbodens, richtete sich der Magnetismus der Eisenatome im Gestein nach dem geomagnetischen Feld aus, wie es gerade herrschte. Magnetometrische Messungen ergaben bei bestimmten Gesteinen am Meeresboden Abweichungen um 180 Grad, vor allem an den Kämmen des Mittelozeanischen Rückens. Das bedeutet, aufeinanderfolgende Teile oder Streifen von Sediment hatten jeweils entgegengesetzte Richtungen des Magnetfelds.

Die beiden englischen Geophysiker Frederick J. Vine und Drummond H. Matthews postulierten im Jahre 1963, daß die bei diesen Sedimenten gefundenen Abweichungen der Magnetfeldrichtung von vulkanischem Gestein herrühren, das ständig aus der darunterliegenden Erdkruste emporstieg und sich in beiden Richtungen ausbreitete, während sich die Polarität des Erdmagnetfelds umkehrte. Als man die magnetischen Gesteine von beiden Seiten des Mittelozeanischen Rückens aneinandersetzte, stellte sich jeder parallele Streifen als Spiegelbild des gegenüberliegenden heraus. Das Gleiche ergab sich beim Aneinanderfügen



Abb. 15.2: Die Meeresbodenspreizung am Mittelozeanischen Rücken

von Gesteinsschichten aus entfernten Gebieten. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 15.2 dargestellt.

Die Meeresbodenspreizung schreitet in den verschiedenen Regionen mit einer Geschwindigkeit von 2 bis 12 Zentimetern pro Jahr voran. Die Folgerungen, die man aus den Untersuchungen über den Magnetismus der Gesteine zog, revolutionierten die Auffassungen über Ursprung und Alter des Meeresbodens und bestätigten das Phänomen der Meeresbodenspreizung. Das wiederum spielte eine große Rolle beim Wiederaufleben von Wegeners ursprünglicher Theorie über Pangäa und die Kontinentalverschiebung. Alfred Wegener hatte natürlich weder über ausgeklügelte Geräte und detaillierte Meßverfahren noch über Satellitenaufnahmen und Computersimulationen verfügt, mit denen man heute die Dynamik der Erde nachweisen und ihre Geschichte verfolgen kann. Aber wir sehen heute - Jahrzehnte später -, wie sich die Kontinente wirklich verschieben.

Jede kontinentale Platte ist Teil der Erdkruste, unter der sich der Erdmantel befindet. Die Dicke der Platten liegt zwischen einigen wenigen und hundert Kilometern, und jede Platte »schwimmt« auf dem ruhenden Erdmantel, dessen Material geschmolzen ist. Wie in Abbildung 15.3 zu sehen ist, haben die Plattenränder keine bestimmte Beziehung zu den Kontinenten oder zu den Küstenlinien, denn wo sich die Meere ausbreiten, hängt natürlich nur von der Höhe der umgebenden Landmassen ab und nicht von den Begrenzungslinien der Platten. Wenn einmal eine neue Eiszeit eintritt, dann werden die Gletscher und die Eiskappen an den Polen größer, so daß der Meeresspiegel weltweit sinkt

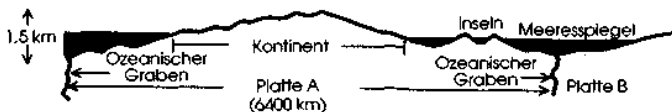


Abb. 15.3: Querschnitt durch eine Platte bzw. einen Kontinent

und insgesamt eine größere Landfläche aus dem Ozean herausragt. Wenn aber die Temperatur auf der Erde in den nächsten Jahrtausenden ansteigt, dann schmelzen die Polkappen ab, und es wird ein großer Teil der Landflächen überflutet sein, die heute über dem Meeresspiegel liegen.

Die Bewegungen der Platten selbst führten in den letzten Dutzenden von Jahrillionen zu drastischen Veränderungen der Küstenlinien, zusätzlich zu den globalen Änderungen des Verhältnisses von Meeres- und Eisflächen. Daher bezeichnen wir mit »Kontinenten« im Grunde nur den 25prozentigen Anteil der Platten, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Erdgeschichte aus dem Wasser herausragen. Die Bezeichnung »Kontinental«-Verschiebung ist eigentlich nicht korrekt, denn es driften ja die Platten, wobei ihre am höchsten gelegenen Teile in die Atmosphäre hineinragen, während sie sich in einem dynamischen Prozeß verschieben, durch den die Erdoberfläche ständig verändert wird. An einem Rand jeder Platte fließt geschmolzenes Gestein aus dem Erdmantel empor und drückt die Platten auseinander. Dies bewirkt die Meeresbodenspreizung, die in Abbildung 15.2 gezeigt wurde. Am anderen Rand der Platte wird altes Gestein in tiefere Zonen hinuntergedrückt, wo es wieder geschmolzen wird oder direkt auf einen anderen Plattenrand stößt. Vor knapp 50 Millionen Jahren war Indien eine Insel, die sich langsam auf Asien zubewegte. Indien ist heute zwar Teil des Kontinents Asien, aber tatsächlich ist es die Nordspitze der Australischen Platte, die nach oben gedrückt wurde, als sie mit der Eurasischen Platte zusammenstieß (vgl. Abb. 15.4).

Das Gebiet des heutigen Himalaya-Gebirges wurde durch dieses Aufeinandertreffen der Landmassen nach oben gedrückt. In den letzten 40 Millionen Jahren wurde der Mount Everest allmählich zur höchsten Erhebung auf der Erde. Das Gestein, aus dem er besteht, lag einst ruhig unten am Meeresgrund und wur-

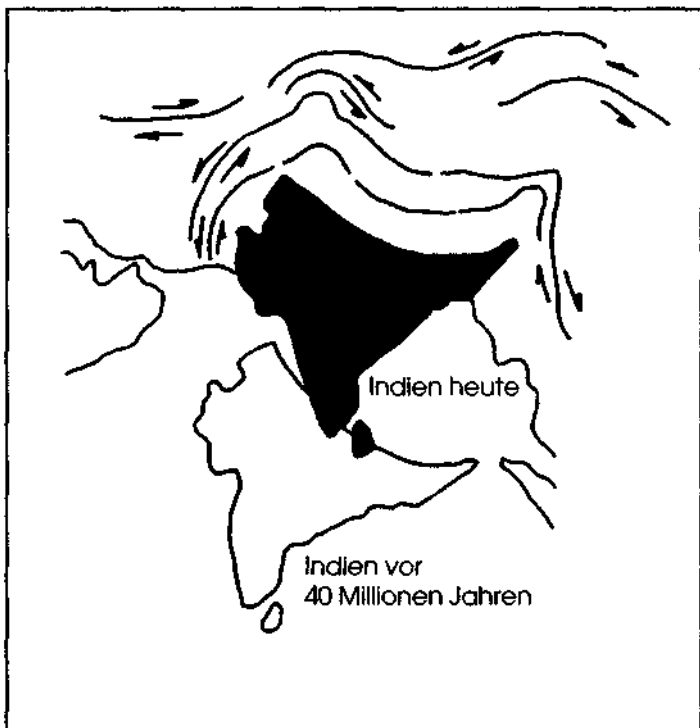


Abb. 15.4: Die Verschiebung des indischen Subkontinents zum Kontinent Asien hin. Es sind auch die Erdbebenspalten eingezeichnet.

de dann nach oben gestoßen. Analog dazu fanden Geologen im Frühjahr 1996 hoch oben in den Schweizer Alpen Gestein, das einst über 600 Kilometer tief im Erdmantel gelegen hatte. Es wurde durch ein Aufeinanderstoßen von Kontinentalplatten emporgedrückt, wie es noch heute zwischen der Australischen und der Eurasischen Platte stattfindet. Nordamerika ist, wie andere Kontinente auch, eine Anhäufung von Stücken aus Platten, die in den letzten 200 Millionen Jahren von größeren Platten abbrechen und zusammenstießen.

Erdbeben und Vulkane treten vor allem dort auf, wo sich Platten bei ihrer langsamen Bewegung auf der Erde aneinander reiben. Den Umriß der meisten Platten erkennt man daher leicht,

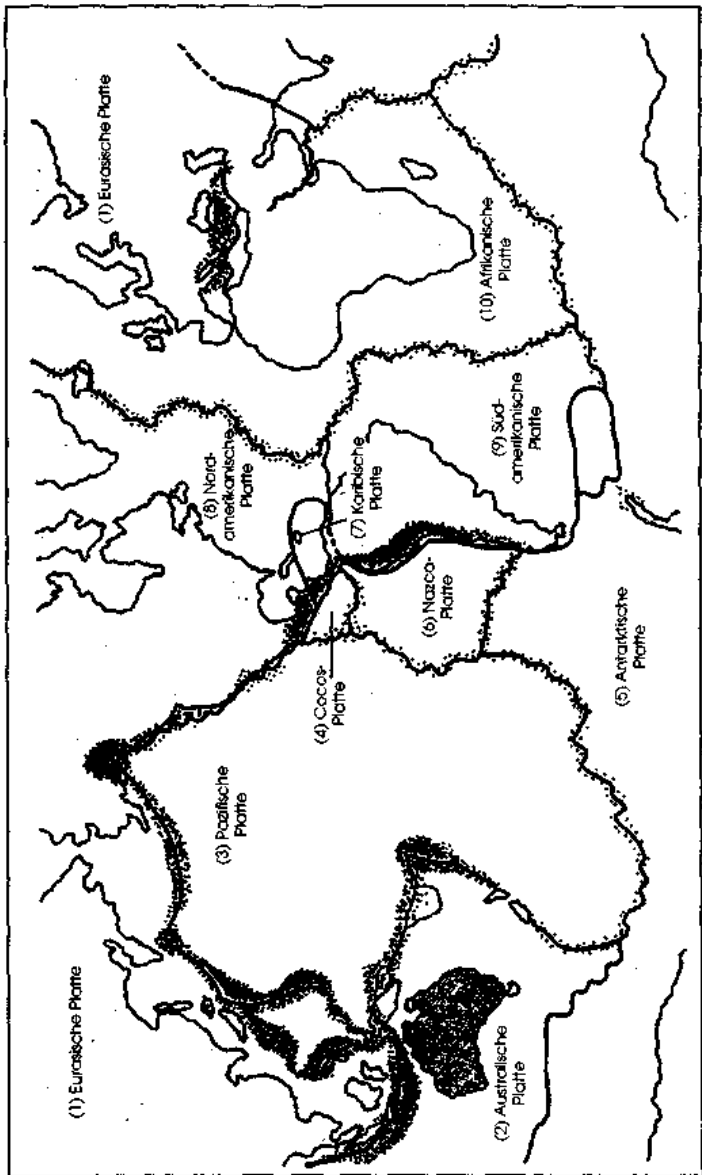


Abb. 15.5: Die größeren Platten mit den als Punkte eingezeichneten Epizentren von Erdbeben; man erkennt gut die Korrelation zu den Plattengrenzen.



wenn man die Erdbebengebiete und die Vulkane in eine Weltkarte einzeichnet. Dabei fallen beispielsweise die japanischen Inseln auf, die rund tausendmal pro Jahr von Erdbeben erschüttert werden. Auch Kalifornien und viele andere Gegenden werden häufig von starken Erschütterungen der Erdoberfläche oder von Vulkanen heimgesucht. Jedes Jahr ereignen sich auf der ganzen Erde rund eine Million leichtere Erdstöße oder Beben. Rund hundert davon sind so heftig, daß sie größere Schäden anrichten. Tokio wurde in den letzten 2000 Jahren rund alle hundert Jahre stark beschädigt. So ist es verständlich, daß Japan jährlich umgerechnet etwa 160 Millionen Mark in die Forschung für bessere Erdbebenvorhersagen investiert.

Erstaunlicherweise verdanken die japanischen Inseln ihre Existenz im Grunde etlichen Vulkanen, die letztlich auf dieselben Ursachen zurückzuführen sind wie die Erdbeben. Die Ostpazifische Erhebung (das Gegenstück des Mittelatlantischen Rückens) ist das Ergebnis der Meeresbodenspreizung, die die Pazifische Platte gegen Asien drückt. Während sich die Pazifische Platte nach Westen bewegt, gleitet sie unter die Eurasische Platte nach unten, zum Erdinneren hin. Dabei treten enorme Reibungskräfte auf, die schon zu einigen der heftigsten Erdbeben und Vulkanausbrüchen geführt hatten. Die japanischen Inseln haben sich infolge der vulkanischen Aktivität an dieser Plattengrenze in den vergangenen 30 Millionen Jahren aus dem Meer erhoben. Erst in jüngster Zeit, im April 1973, ließen Vulkanausbrüche südlich von Tokio Lavaströme aus dem Meer emporsteigen, so daß sich die neue Insel Nishimo bildete. Ein anderes Beispiel: Der untermeerische Vulkan Loihi, 33 Kilometer südöstlich der Insel Hawaii, ist seit nun 14 Jahren dauernd aktiv, und sein Gipfel - heute noch 1000 Meter unter dem Meeresspiegel - wird in rund 100 000 Jahren eine weitere Insel bilden.

Die Kräfte, die diese langsamen Bewegungen hervorrufen, entstehen im Erdkern und im Erdmantel. Der stark eisenhaltige Erdkern hat einen Durchmesser von über 2400 Kilometern. Der Druck ist hier 3,6 Millionen mal höher als an der Erdoberfläche, und die Temperatur liegt bei gut 4500 Grad Celsius und damit in derselben Größenordnung wie die der Sonnenoberfläche (5800 Grad Celsius). Wenn die enorme Wärmemenge des Erdkerns all-

mählich nach außen abgeleitet wird, entstehen Konvektionen (Materieströmungen) und dadurch Störungen im Erdmantel. Diese dichte Schicht unmittelbar unter der leichteren Erdkruste ist rund 2900 Kilometer dick. Die obersten gut 60 Kilometer des Erdmantels sind fest und bilden zusammen mit der Kruste die tektonischen Platten. Zu größeren Tiefen hin werden die Schichten des Erdmantels durch die Wärme des Kerns immer heißer und bewegen sich langsam, wie dicke Suppe, die man auf dem Herd erhitzt. Erdbeben und Vulkane sind die an der Oberfläche auftretenden Resultate dieser energiereichen Bewegungen und der aus dem Inneren unseres Planeten aufsteigenden Wärme.

### **Das Leben paßt sich den Plattenverschiebungen an** *Leben in totaler Finsternis*

Vom langsamen Reigen der gewaltigen tektonischen Platten wird auch das Leben beeinflusst. Alles pflanzliche und tierische Leben, das sich über die Kontinente und Ozeane ausbreitete, bedeckt seit einigen hundert Jahrmillionen die Platten. Diese trugen bei ihren Verschiebungen das Leben in andere Gegenden, wie ein Floß, das langsam flußabwärts gleitet. Einige Platten gerieten dabei von kühlen und trockenen Regionen in eine tropische Umgebung, während andere heftig gegeneinanderstießen und dabei gewaltige Gebirgsmassive auffalteten. Es gibt in Alaska Überreste tropischer Urwälder, und unter der Sahara kann man Spuren großer Gletscher nachweisen. Pflanzen und Tiere paßten sich den neuen Bedingungen an, die durch die Verschiebung »ihrer« Platte entstanden. Im Laufe von Jahrmillionen stieg das Land unter ihnen hoch und senkte sich wieder, und unterdessen bestimmte die natürliche Selektion die verschiedenen Merkmale der einzelnen Arten, die zu ihrem Überleben günstiger waren. Daher hat die Plattentektonik die Geschichte des Lebens auf der Erde ganz wesentlich beeinflusst.

Für solche Anpassungen sind lange Zeitspannen unerläßlich. Das kann man z. B. an den grünen Meeresschildkröten gut erkennen. Sie entwickelten auf bemerkenswerte Weise die Fähigkeit, zu der 2000 Kilometer von Brasilien entfernten winzigen

Himmelfahrts-insel (Ascension) inmitten des Atlantiks zu schwimmen. Warum bleiben sie nicht in Brasilien, sondern legen ihre Eier so weit entfernt gerade am Strand dieser Insel ab? Was erklärt den Instinkt der fast 200 Kilogramm schweren Tiere, eine so unmögliche Reise zu unternehmen - ohne Nahrung und tausenderlei Gefahren ausgesetzt? Wie können sie überhaupt wissen, daß dort eine Insel liegt?

Es gibt derzeit nur eine schlüssige Deutung. Sie geht davon aus, daß vor einigen Dutzend Jahrmillionen mehrere Inseln ganz dicht vor Südamerika lagen. Die Urahnen dieser Schildkröten mußten nur einen Steinwurf weit schwimmen, um ihre Eier dort ablegen zu können, wo diese und die ausgeschlüpften Jungtiere vor den natürlichen Feinden auf dem Festland geschützt waren. Durch die Meeresbodenspreizung und das Auseinanderbrechen des Superkontinents Pangäa trennten sich Afrika und Südamerika voneinander. Der dazwischenliegende Ozean wurde bald größer, damit auch die Ausdehnung der Wasserfläche zwischen Brasilien und einigen vulkanischen Inseln, die nahe bei Ascension nach und nach auftauchten und verschwanden. Von jeweils einer Generation zur nächsten paßten sich die Schildkröten unbeelegt an die pro Jahr nur einige Zentimeter ausmachende Entfernungszunahme an. Diese entstand, wie gesagt, durch das Hervorquellen von Lava zwischen den tektonischen Platten. Aber weil die Schildkröten an einer Art der Wanderung festhielten, die der Tradition ihrer Vorfahren entsprach, übergaben sie ihren Nachkommen im Laufe von Jahrmillionen eine immer schwierigere Aufgabe. Daher entwickelten sich die grünen Meeresschildkröten zu größeren Tieren, die ausdauerndere Schwimmer sind. Nur so konnte das eigene Überleben und das Hervorbringen von Nachwuchs gesichert werden. Die Tiere konnten bald dicke Fettdepots anlegen, und ihr ebenfalls veränderter Stoffwechsel ermöglichte es ihnen schließlich, die 2000 Kilometer weite, zwei Monate dauernde Reise ohne jegliche Nahrungsaufnahme zu bewältigen.

Wie bereits erwähnt, strömt an bestimmten Teilen des Mittelozeanischen Rückens Lava aus dem Erdmantel empor. In bestimmten, tief unter dem Meeresspiegel gelegenen »Oasen« hat sich inzwischen eine vielfältige Pflanzen- und Tierwelt ausgebildet.

det. Man entdeckte sie erst 1973, als Wissenschaftler in kleinen U-Booten das Tiefseetal mitten im Mittelatlantischen Rücken erkundeten. Sie fanden gigantische Muscheln, Krebse, Fische und Röhrenwürmer sowie außergewöhnliche Pflanzen. Alle hier lebenden Arten sind auf die Wärme und die Mineralien angewiesen, die aufgrund der tektonischen Aktivität aus der Tiefe aufsteigen. Als einmalige Nischen der natürlichen Selektion sind diese Spalten, die im Erdmantel entstanden, die einzigen Orte auf der Erde, an denen das Leben nicht direkt oder indirekt vom Sonnenlicht gefördert wird. Statt dessen verzehren die Pflanzen und Tiere in dieser Tiefe, in die niemals ein Sonnenstrahl gelangt, Bakterien, die ihre Energie aus Wasserstoffsulfid beziehen. Diese für uns hochgiftige Substanz entsteht, wenn Wasser auf geschmolzenen Basalt trifft, der sich unter dem Meeresboden befindet. So kann man sagen, daß die Lebewesen in den Tiefseetälern ihre Existenz im Grunde der Plattentektonik verdanken. Sie sind von ihr noch stärker abhängig als die weltreisenden Schildkröten mit ihren einzigartigen Fähigkeiten.

Die Plattentektonik war natürlich auch die direkte Ursache der reproduktiven Isolation (siehe Kapitel 13) seit dem Auseinanderbrechen von Pangäa. Wir hatten schon etliche Beispiele für die reproduktive Isolation gesehen - von den Unterschieden der Finkenschnäbel und der Schildkrötenpanzer auf den Galapagos-Inseln bis zu den besonderen physischen Merkmalen der Menschenrassen, die seit langem weit voneinander entfernt leben. Man entdeckt auch heute noch ständig weitere Auswirkungen der Plattentektonik. Im Herbst 1995 unternahm eine französische und englische Wissenschaftler eine Expedition in das noch weitgehend unerforschte Riwoche-Gebirge im nordöstlichen Tibet. In einem fast 30 Kilometer langen, teilweise eisbedeckten Tal, das an beiden Enden von 4800 Meter hohen Pässen eingeschlossen ist, fanden sie eine ganze Herde einer archaisch anmutenden Pferdeart, die den Biologen völlig unbekannt war. Dieses etwa 1,20 Meter große Tier hatte sich seit fünf Millionen Jahren von den anderen Pferdearten in einer reproduktiven Isolation fortentwickelt, die durch das Auffalten des Himalaya-Gebirgszuges entstanden war. Bei dieser Art blieben einige physische Merkmale erhalten, die sie von allen anderen Pferderassen unterscheidet, beispiels-

weise die kleine Gestalt und die dreieckige Kopfform. Diese ähnelt derjenigen der ausgestorbenen Pferde, die in den Höhlenzeichnungen von Cro-Magnon dargestellt sind.

Eine umfassende Theorie der Plattentektonik vereinigte Sichtweisen und verschiedene Befunde, die von Geologen, Biologen und Physikern beigetragen wurden. Die Wissenschaftler haben inzwischen erforscht, wie der Mittelozeanische Rücken und die großen Gebirgszüge entstanden. Außerdem können sie die meisten Erdbeben und Vulkanausbrüche auf unserem Planeten erklären, ebenso das Entstehen und Vergehen von Ozeanen sowie die Bewegungen der Kontinente. Und nicht zuletzt trugen sie entscheidend zu unseren Erkenntnissen über die Evolution bei.

# TEIL 6

## Zelle und Genetik

*Rund elf Milliarden Jahre nach dem Urknall vereinigten sich einige chemische Elemente auf unserem Planeten und leiteten einen erstaunlichen Prozeß ein: Aus der Ursuppe, aus leblosen elektrischen Ladungen, ging Leben hervor. Wir können das Lebendige inzwischen anhand seiner physischen Bestandteile und seiner Eigenschaften beschreiben - auch wenn solche Erklärungen zu kalt und distanziert erscheinen, um der Fülle und Vielfalt der Lebewesen gerecht zu werden.*

*Der Ursprung des Lebens auf der Erde, die Fortpflanzung von Lebewesen und Darwins Evolutionstheorie wurden im 20. Jahrhundert auf ihre physikalischen und chemischen Grundlagen zurückgeführt. Das ging so weit, daß wir heute die zuvor nicht erkennbaren Erbfaktoren sowie die Triebfeder und den Mechanismus der Evolution erkennen können. Zum ersten Mal verstehen wir die Wechselbeziehungen der drei Aspekte des Lebens: Ursprung, Fortpflanzung und Evolution.*

*Zunächst beschäftigen wir uns in diesem Teil des Buches mit der Zelle und der Genetik im allgemeinen, im nächsten Teil befassen wir uns mit dem Bauplan und dem »Rückgrat« des Lebens. Wir gehen also vom kosmischen Ei (siehe Teil 4) zum menschlichen Ei über, vom Kosmos zum Chromosom, von der Hubble'schen Expansion des Universums zu dem mikroskopisch Kleinen, Molekularen, Unsichtbaren, das unser Leben erhält, von der Atomenergie der Physiker zur Lebensenergie der Biophysiker, von der makroskopischen Sichtweise der Evolution des Lebens zur mikroskopischen Sichtweise der Biochemiker.*

*Die Geschichte von den Zellen, den Genen und den Molekülen*

*des Lebens wird zeigen, wie die Erkenntnisse Tausender von Forschern auf verschiedenen Gebieten zu einer einheitlichen Lösung der Fragen führten - und wie alles mit der Entdeckung der Zellen im Jahre 1673 und den akribischen Arbeiten eines unbekanntes Mönchs in Brunn um 1860 seinen Anfang nahm.*

## KAPITEL 16

### Ursuppe

»Die Biologie (...) ist vor allem eine beschreibende Wissenschaft, ähnlich wie die Geographie, und befaßt sich mit Struktur und Wirkung mehrerer besonders organisierter Wesen zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem bestimmten Planeten.«

John Desmond Bernal, *Science in History* (1965)

Darwin hatte eine Fülle von Befunden und Beispielen zusammengetragen, um seine Evolutionstheorie zu untermauern. In den folgenden Jahrzehnten stützten weitere Indizien die Evolutionstheorie. Dennoch fehlte ihr ein Beweis, den man innerhalb der lebenden Organismen finden könnte. Darwins Evolutionstheorie ließ also die Frage offen: Welcher Mechanismus steuert die natürliche Selektion? Mit anderen Worten: Was geschieht in den Lebewesen, damit eine Evolution stattfinden kann?

Schon lange vor Darwins 1859 vollendetem Werk *Die Entstehung der Arten* hatte man versucht, die Fortpflanzung der Lebewesen zu verstehen. Außerdem wollte man ergründen, was deren Wachstum lenkt, bestimmt und kontrolliert. Diese Fragen hatten wir in Kapitel 12 besprochen, als es um die Theorien der spontanen Erzeugung und der Präformation ging. Im vorigen Jahrhundert wurde, unter anderem mit der Evolutionstheorie, der Boden bereitet, um das Rätsel zu lösen, das tief in uns schlummerte. Bald konnten die fundamentalsten Fragen über das Leben beantwortet werden: Wie entstand das erste Leben auf der Erde? Wie pflanzen sich Organismen fort? Was ist die physische Grundlage der Evolution?



## **Die Zelle, ihr Kern und die Zellteilung werden entdeckt**

### *Winzigste Tierchen und entscheidende Signale*

Was dem Physiker das Atom, ist dem Biologen die Zelle. Das Atom ist der Grundbaustein aller Materie, und die Zelle bildet den Grundbaustein allen Lebens. Trotz der unglaublichen Vielfalt der Lebewesen auf der Erde gibt es eine ihnen allen zugrundeliegende Einheit. Alle Zellen wirken im wesentlichen auf dieselbe Weise, und der genetische Code, der die jeweilige Lebensform bestimmt, unterliegt in sämtlichen Arten demselben Prinzip. Das ist ein deutliches Indiz dafür, daß alle Lebensformen einen gemeinsamen Urahn haben, wie es Darwin 1871 in seinem Buch *Die Abstammung des Menschen* vorhergesagt hatte - lange bevor man die Bedeutung der Zelle für Vererbung und Fortpflanzung kannte. Inzwischen weiß man, daß jede Zelle eine winzige chemische Fabrik ist, die aus den Nährstoffen ihre Energie erzeugen und mit benachbarten Zellen kommunizieren kann. Zudem vermag sie sich in zwei identische Einheiten zu teilen. Diese Fähigkeit der Zelle, sich zu verdoppeln, ist der Schlüssel allen Lebens und allen Wachstums. Bestimmte einzelne Zellen können sogar lebensfähige Organismen sein, beispielsweise Bakterien oder Amöben. Andere Zellen erfüllen als Bausteine vielzelliger Organismen spezielle Funktionen.

Obwohl eine Zelle mittlerer Größe Billionen von Atomen enthält, ist sie viel zu winzig, als daß wir sie mit bloßem Auge sehen könnten. Um die Spitze einer Nähnadel zu bedecken, brauchte man rund 10000 menschliche Zellen. Daher konnte man sich die Existenz von Zellen nicht einmal vorstellen, bevor sie im Mikroskop sichtbar wurden. In seinem 1665 erschienenen Buch *Micrographia* (soviel wie »Kleine Zeichnungen«) prägte der englische Wissenschaftler Robert Hooke (1635-1703) das Wort »Zelle«, noch bevor man irgendeine lebendige Zelle sehen konnte. Hooke verwendete den neuen Begriff im Zusammenhang mit totem Pflanzengewebe und mikroskopisch kleinen Waben in Kork, denn die Cellulosewände im Kork erinnerten ihn an die kleinen Zimmer oder Zellen von Mönchen in einem Kloster.

Die ersten optischen Linsen kamen Mitte des 15. Jahrhunderts

auf. Ihre Vergrößerung war aber viel zu gering, um Zellen von Tieren oder Pflanzen sichtbar zu machen. Um 1600 gab es die ersten einfachen Mikroskope, und Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) erreichte ab 1670 bis zu 300fache Vergrößerungen. Im Jahre 1673 eröffnete sich ihm eine ganz neue Welt, als er im Blut »Zellen« entdeckte (er übernahm damit Hookes Benennung). Außerdem fand er Spermatozoen und einzellige Organismen, nämlich Bakterien und schwimmende Protozoen. Ähnlich wie Galileis erste Beobachtungen der Sterne mit dem Teleskop waren van Leeuwenhoeks erste Blicke auf die Zellen der Auftakt großartiger Entdeckungen in den folgenden drei Jahrhunderten. Niemand konnte damals ahnen, wie unermeßlich lang und ertragreich diese Reise ins Ungewisse werden sollte. Man sah ja gerade einmal ein paar Objekte, die dem bloßen Auge verborgen waren und deren Existenz man sich bis dahin nicht einmal vorstellen konnte.

Im 17. Jahrhundert fanden die Astronomen zahlreiche Sterne und klassifizierten sie, und im 18. Jahrhundert schuf der Biologe Carl von Linné ein System zur Einordnung der Lebewesen. Analog dazu führte Antoni van Leeuwenhoeks Entdeckung »winziger Tierchen« (*Animalculi*) zur Kategorisierung der einzelligen Tiere. In den nächsten Jahren erkannten Ärzte und Biologen unter dem Mikroskop verschiedene Arten von Gewebe. Beispielsweise fanden sie schleimbildende Zellen in den Atemwegen und im Verdauungstrakt, dagegen faserige Zellen im Bindegewebe unter der Haut und um die Muskeln herum. Außerdem entdeckte man drei Arten von Muskelzellen (im Herzmuskel, in den unwillkürlich sowie den willkürlich bewegten Muskeln) und auch andere spezialisierte Zellarten, etwa im Nervensystem und in den Fortpflanzungsorganen. Aber während derartige Entdeckungen im 18. Jahrhundert schnell aufeinanderfolgten, blieben Funktion und Aufbau der Zellen nach wie vor ein Rätsel.

Die frühen Mikroskope hatten nur geringe Vergrößerungen; daher konnte man noch keine Details in den Zellen erkennen. Zudem hielten sich noch einige überkommene Theorien über die Spontanzeugung und die Präformation. Deshalb setzten sich die neuen Erkenntnisse über die Zellen erst ab 1831 durch. In jenem Jahr fand der schottische Botaniker Robert Brown (1773-1858)

das Steuerzentrum der Zelle, das er »Kern« nannte. Er fand heraus, daß diese strukturelle Einheit allen pflanzlichen Zellen gemeinsam ist - diese Entdeckung war ähnlich bedeutsam wie später die des Atomkerns. Bald entdeckte man auch den Kern in den tierischen Zellen, und 1835 sah man erstmals in lebenden Zellen das »Protoplasma«, das flüssige Material, aus dem das Zellinnere besteht. Die beiden deutschen Biologen Matthias Schieiden (1804-1881) und Theodor Schwann (1810-1882) formulierten 1838/39 anhand dieser frühen Befunde erstmals eine Theorie der Zelle. Nach ihr sind die Zellen die Bausteine aller Pflanzen und Tiere und bestehen aus der umhüllenden Membran, dem Kern und dem Zellkörper.

In den folgenden Jahrzehnten kamen einige Theorien über die »Geburt« neuer Zellen auf, wurden aber wieder aufgegeben, als man die Zellteilung erkannte, also den Prozeß, bei dem aus einer Zelle zwei identische »Tochter«-Zellen entstehen. »Jede Zelle entstammt einer Zelle«, erklärte der berühmte deutsche Arzt und Biologe Rudolf Virchow (1821-1902). In seinem 1858 erschienenen Buch *Die Cellularpathologie* schrieb er, daß das Leben kein Resultat übernatürlicher Phänomene sei, sondern daß »Zellen das Bindeglied in der langen Kette der (...) Entstehung der Gewebe, Organe und Systeme sowie des Individuums sind«. Damit wurden die modernen Auffassungen über die Zellpathologie begründet. Diese befaßt sich mit der Untersuchung der Krankheitsprozesse, die auf der Ebene der Zelle beginnen. Nachdem Virchow und andere die Bedeutung der Zellteilung bewiesen hatten, wurden die Zellen Gegenstand intensiver Erforschung. Bald wurde allgemein akzeptiert, daß Lebewesen nur aus dem Samen ihrer Eltern hervorgehen können. Demnach wird Leben auf der Erde niemals von neuem erschaffen, sondern in einer ununterbrochenen Linie den Nachkommen weitergegeben. Virchows Buch erschien 1858, im selben Jahr, in dem Charles Darwin und Alfred Russel Wallace ihren gemeinsamen Artikel bei der Linne-Gesellschaft einreichten. Ein Jahr später brachte Darwin sein Werk *Die Entstehung der Arten* heraus. Aber es sollte noch Generationen dauern, bis die Evolutionstheorie und die Erkenntnisse über die Zelle zu einem konsistenten Gesamtbild kombiniert werden konnten.

## Die Organe der Zelle werden entdeckt

### *Gehirn, Magen und Skelett der Zelle*

In den folgenden Jahrzehnten fanden die Forscher in den Zellen nach und nach Teile, die jeweils eine bestimmte Funktion haben. Jede Zelle enthält mehrere sogenannte Organellen, die nicht zum »Protoplasma« gehören, wie man zuvor angenommen hatte. Die Organellen sind so winzig, daß ihre Details nur im Elektronenmikroskop sichtbar sind. Sie haben je nach ihrer Aufgabe unterschiedliche Form, Größe und Komplexität und enthalten spezielle Substanzen. In den Organellen vollziehen sich chemische Reaktionen mit Nährstoffen, Wachstumsfaktoren oder auch toxischen (giftigen) Stoffen, die in die Zelle hineingelangten oder von ihr wieder ausgeschieden werden.

- **Zellkern:** Er nimmt rund ein Zehntel des Zellvolumens ein und stellt ihr »Gehirn« dar. Er enthält die Gene und die Nucleinsäuren (DNA und RNA). Deren Strukturen legen die Proteine fest, die alle chemischen Prozesse im gesamten Organismus steuern. Die RNA-Moleküle, die die Gen-Instruktionen tragen, verlassen den Kern durch dessen Membran und gelangen dann

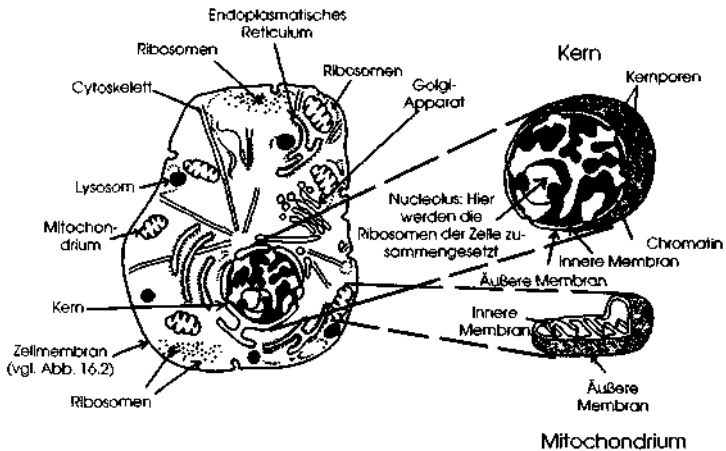
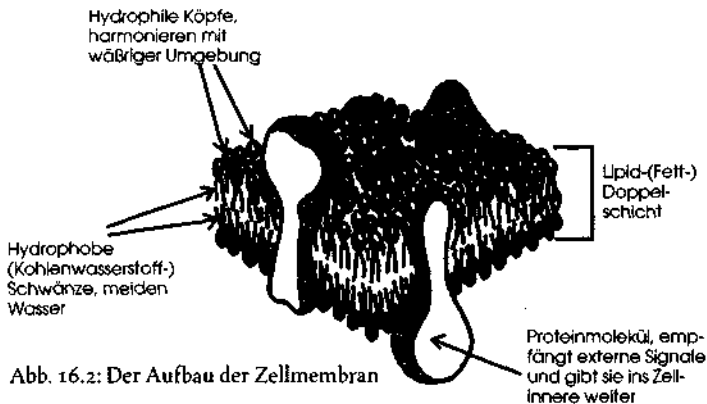


Abb. 16.1: Organellen einer typischen tierischen Zelle, die hier links im Querschnitt dargestellt ist. Sie befindet sich im Stadium der Interphase.

an die Ribosomen. Das sind die Organellen, in denen Proteine gebildet werden.

- *Ribosom*: Jede Zelle enthält Tausende oder gar Millionen von Ribosomen, je nachdem, wieviel Protein die Zelle produzieren muß. Die Ribosomen sind die Ankopplungsstellen für spezifische Boten-RNA-Sequenzen (Messenger-RNA-Sequenzen), die die Proteine festlegen, die im betreffenden Zelltyp zu produzieren sind.
- *Endoplasmatisches Reticulum*: Dieses, oft kurz als ER bezeichnet, ist ein zusammenhängendes System von Kammern und nimmt rund die Hälfte des Zellvolumens ein. In ihm erhält ein Teil der in den Ribosomen produzierten Proteine die endgültige chemische Struktur. Dazu werden den Proteinen an bestimmten Bindungsstellen verschiedene Zucker sowie Phosphate und andere Moleküle zugefügt.
- *Golgi-Apparat*: Dieser ist das einzige Organell, das nach einer Person benannt ist, nämlich nach dem italienischen Arzt und Biologen Camillo Golgi (1844-1926), der es entdeckte. Die meisten Zellen haben nur ein einziges solches glattes, membranartiges Gebilde. Der Golgi-Apparat speichert und verarbeitet Fette und bewirkt weitere Modifikationen der Proteine. Außerdem präpariert er diese für den Transport zu anderen Teilen der Zelle oder aus der Zelle heraus. Beispielsweise müssen die in der Leber produzierten Verdauungsenzyme an den Magen weitergegeben werden. Im Golgi-Apparat liefern bestimmte Zuckermoleküle, die an die Moleküle der Verdauungsenzyme angelagert sind, Informationen für die Weiterleitung des Proteins an dessen Bestimmungsort.
- *Lysosomen*: Mit Hilfe leistungsfähiger Enzyme bilden diese Organellen die »Mägen« oder Verdauungsräume der Zelle. Die Enzyme spalten die Nahrung, die wir zu uns nehmen, in ihre Bestandteile auf, die dann in verschiedenen anderen Zellen genutzt werden. Beispielsweise zersetzen sie die mit der Nahrung zugeführten Proteine zu einzelnen Aminosäuren, aus denen in der Zelle dann neue Proteine produziert werden.
- *Cytoskelett*: Dieses Netz äußerst dünner Proteinfilamente oder -faden erhält die Zellform, so daß sich die Zelle bewegen



kann. Außerdem stützt es die innere Struktur der Zelle mit den Organellen und überträgt Substanzen zwischen ihnen.

- *Mitochondrien*: Diese länglich-runden Gebilde aus gefalteten Membranen gewinnen Energie aus chemischen Umsetzungen von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen der Nahrung. Die Energie wird dann von den anderen Organellen für deren Funktionen genutzt. Erstaunlicherweise haben Mitochondrien ihre eigene DNA sowie ihre eigenen Ribosomen und teilen sich innerhalb der Zelle selbst. Diese Eigentümlichkeit und die Tatsache, daß sie wie Bakterien geformt sind, deuten darauf hin, daß die Mitochondrien einstmals Bakterien waren. Sie gelangten wohl ursprünglich als Parasiten in die Zellen und entwickelten sich später zu diesen eigentümlichen Organellen.
- *Zellmembran*: Die Zellmembran (auch äußere Plasmamembran genannt), hält nicht nur alle Organellen der Zelle im Inneren, sondern steuert auch Zufuhr und Abgabe von Substanzen, die für die Funktionen der Zelle wesentlich sind. Die Moleküle, aus denen die Membran besteht, haben einen hydrophilen (wasseranziehenden) »Kopf«, der die gleichartigen Köpfe anderer Membranmoleküle anzieht und mit dem wässrigen Inneren der Zelle harmoniert, und einen hydrophoben »Schwanz«, der die »Köpfe« und Wasser abstößt. Aufgrund dieser Konfiguration können Proteine in die Membran eingebettet werden oder auf beiden Seiten aus ihr herausragen. Ei-

nige dieser Proteine wirken daher wie Kanäle, die steuern, was in die Zelle hinein oder aus ihr heraus strömt. Andere Proteine bilden sogenannte Rezeptoren (Anheftungsstellen), die bestimmte externe Signale aufnehmen, so daß die Zellen auf Reize aus der Umgebung reagieren kann.

Jede Zelle enthält nur einen Kern, während die meisten anderen Organellen mehrfach oder vielfach vorhanden sind. Pflanzliche Zellen enthalten sogenannte Chloroplasten, die den Mitochondrien ähneln, aber die Energie mit Hilfe der Photosynthese erzeugen.

## **Biologen ermitteln die Phasen der Zellteilung** *Tod infolge Altersschwäche*

Große Fortschritte in der Zellforschung brachten ab 1870 die Arbeiten des deutschen Arztes und Anatomen Walther Flemming (1843-1905). Er verbesserte die Farbstoffe, die man zum Sichtbarmachen der Zellstruktur verwendete. 1879 fand er im Zellkern fadenähnliche Gebilde, die später Chromosomen genannt wurden. Flemming zeigte, daß sich die Fäden während der Zellteilung verkürzen und verdicken, um sich dann längs in zwei Hälften zu spalten. Die Teile entfernen sich voneinander und gelangen in das Innere zweier neuer, identischer Zellen. Flemming nannte diesen Zellteilungsvorgang »Mitose« und beschrieb ihn in seinem 1882 erschienenen Buch *Zellsubstanz, Kern und Zellteilung*. Damit begründete er die Cytogenetik, die Wissenschaft von den Vorgängen, die auf der Ebene der Zelle mit der Vererbung verknüpft sind.

Nach Flemmings Arbeiten wurden die Prozesse allmählich deutlicher, die innerhalb der Zelle ablaufen. Aber erst Mitte unseres Jahrhunderts konnte man klären, was genau in der Zelle und ihrem Kern die Funktionen der Zelle und des ganzen Organismus steuert. Wir werden uns im Teil 7 dieses Buches das Prinzip ansehen, nach dem die Zellen die komplexen Schritte zum Erzeugen einer neuen Zelle ausführen. Die beiden aus einer Zellteilung hervorgegangenen Zellen teilen sich erneut, so daß dann vier, da-

nach acht Zellen usw. entstehen. Nach etlichen Stufen liegen schließlich mehrere Billionen Zellen vor, aus denen beispielsweise ein komplexer Organismus wie der Mensch besteht. Wie alle chemischen und physikalischen Prozesse folgen die Vorgänge in jeder Zelle den Gesetzen der Chemie und der Physik. Das gilt auch für die zwei grundlegenden Schritte bei der Fortpflanzung, nämlich Zellwachstum und Zellteilung (Mitose).

Ein Großteil der Zellbestandteile dient dem Prozeß der Mitose. Der Grund dafür ist leicht einzusehen: Vielzellige Pflanzen und Tiere müssen in der Lage sein, Zellen zu ersetzen, die verletzt wurden oder auf natürliche Weise starben, und einzellige Organismen müssen fähig sein, sich fortzupflanzen. Gleichgültig, ob wir eine Leber- oder eine Lungenzelle im menschlichen Körper betrachten oder vielleicht eine Pflanzenzelle oder ein freischwimmendes Protozoon - der Prozeß der Zellteilung ist im wesentlichen derselbe, denn er hat im Grunde nur die Aufgabe, neue Zellen zu produzieren, die exakt denen gleichen, aus denen sie hervorgingen. Abbildung 16.3 zeigt den Ablauf der Mitose bei einer normalen Zelle. Zur besseren Übersicht sind im Zellkern nur zwei Chromosomenpaare dargestellt. In Wirklichkeit enthält der Kern jeder menschlichen Zelle 46 Chromosomen (23 Paare), ausgenommen Ei- und Samenzellen, die jeweils 23 Chromosomen aufweisen. Ferner haben rote Blutzellen keinen Kern und daher auch keine Chromosomen.

Eine Zelle durchläuft in ihrem Leben folgende fünf Stadien:

1. *Interphase*: Das ist die längste Phase im Leben einer Zelle. In diesem Stadium verdoppelt sie sich nicht, sondern führt wichtige Funktionen aus, darunter die Synthese von Proteinen, die Abspaltung von Lipiden (fettartigen, wasserunlöslichen Verbindungen) und die Produktion der Bindegewebs-Matrix, die den Körper zusammenhält. Das Tempo der Vorgänge in der Zelle hängt davon ab, was der Organismus zum betreffenden Zeitpunkt benötigt. Haben wir beispielsweise eine Mahlzeit zu uns genommen, dann müssen die Zellen in den Verdauungsorganen große Mengen an Enzymproteinen und Säuren zum Verdauen produzieren. Die Zellen befinden sich dabei in der »Interphase« des Zellzyklus. Sie erfüllen jetzt ausschließlich diese sekretorische Funktion und leben nur Wochen oder



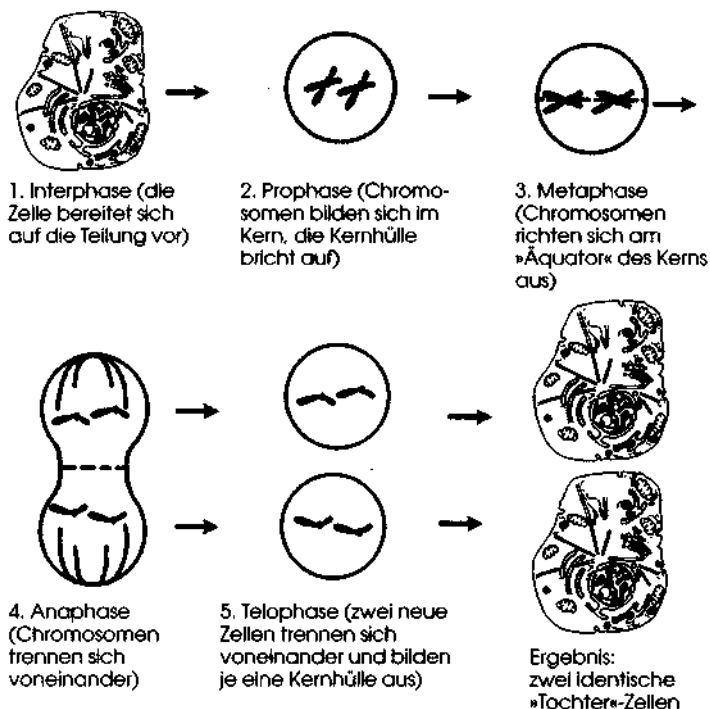


Abb. 16.3: Die Stadien der Mitose (Zellteilung)

Monate. Am Ende ihrer Lebensdauer werden sie in den Magen-Darm-Trakt freigesetzt. Während der Interphase empfangen die Zellen die Signale, die die Teilung einleiten.

- 2. Prophase:** Nachdem in der Interphase ein äußerer Reiz zur Teilung empfangen wurde, tritt die Zelle in die Prophase ein. Nun beginnen sich die langen, ungeordnet im Zellkern vorliegenden DNA-Fäden zu verdicken. Dabei treten bestimmte Strukturen deutlicher hervor, die man Chromosomen nennt. Die Zelle bereitet jetzt ihre Teilung vor. Deren Ziel ist die Produktion zweier neuer identischer Zellen, so daß die Zellverluste im Organismus ausgeglichen werden. Benachbarte Zellen können ja nach langer Lebensdauer, aber auch durch Einwirkung von toxischen Substanzen oder Krankheitserregern abgestorben sein. Zur Zellteilung müssen die Chromosomen

(d. h. die DNA, die die lebenswichtigen genetischen Information enthält) repliziert werden. Wir werden diese Replikation (Verdopplung) der DNA - das Ergebnis eines komplexen Gefüges biochemischer Reaktionen - im Teil 7 näher betrachten.

3. *Metaphase*: Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß sich alle Chromosomen am »Äquator« der Zelle ausrichten. Dadurch gelangen sie in Positionen, aus denen sie in eine der beiden neu zu bildenden Zellen übergehen können. Dieser entscheidende Vorgang wird durch den sogenannten Spindelapparat gesteuert, der die Chromosomen in die jeweilige Zelle führt. Der Spindelapparat gehört zum schon erwähnten Cytoskelett der Zelle, also zur dichten Anordnung mikroskopisch dünner Fäden und Röhren, die die Gestalt und die Bewegungen der Zelle bestimmen. Die Kernmembran, die während der Interphase und des größten Teils der Prophase deutlich ausgeprägt war, löst sich auf, so daß in der Zelle kein abgegrenzter Kern mehr erkennbar ist. Die Zelle widmet sich jetzt ausschließlich der Teilung in zwei neue Zellen. Nachdem die Metaphase begonnen hat, dauert der Prozeß der Zellteilung (inklusive der zwei Endstadien Anaphase und Telophase) normalerweise nur einige Minuten.
4. *Anaphase*: Sie markiert den Beginn der Trennung der Chromosomen, wobei sich jedes neu replizierte Chromosom vom ursprünglichen entfernt. Das bedeutet, die Chromosomen gelangen in die beiden neu entstehenden Zellen. Lange Zeit glaubte man, die Bewegung der Chromosomen werde durch einen »Zug« des Spindelapparats ausgelöst, aber inzwischen weiß man, daß sich die Chromosomen wie bei einem Ratschenmechanismus an den Fäden des Spindelapparats entlang bewegen.
5. *Telophase*: Jetzt haben die Chromosomen ihre jeweilige Zelle erreicht, und die beiden neuen Zellen bilden je eine neue Membran aus. Sie liegen Seite an Seite, beispielsweise in einem menschlichen Gewebe, und sind bereit, ihre Aufgaben zu erfüllen. Wenn es sich um Einzeller (Protozoen) handelt, werden sie sich voneinander entfernen. Die Chromosomenpaare werden bald nach der Teilung in eine Kernmembran eingeschlossen, und die Zellen treten zügig in die Interphase ein, so daß ein neuer Lebenszyklus beginnt.

Wodurch werden die einzelnen Phasen der Mitose ausgelöst? Vor allem aufgrund von Entdeckungen in den 70er und 80er Jahren wissen die Molekularbiologen heute recht viel über die Faktoren, von denen Wachstum und Teilung der Zellen abhängen. Jede Phase wird durch komplexe chemische Prozesse gesteuert, letztlich aber durch das DNA-Molekül, das sozusagen den Gesamtplan der betreffenden Lebensform enthält. Aber bevor wir uns ansehen, wie sechzig Billionen Zellen, aus denen beispielsweise ein menschlicher Körper besteht, gemeinsam als ein einziger Organismus funktionieren können, wollen wir die allererste Zelle betrachten, die sich auf der Erde gebildet hatte.

### **Das Leben entsteht aus der Ursuppe** *Tiefseetäler und Schlauchwürmer*

*Es gibt auf diesem Planeten keine Ozeane, weil er so heiß ist, daß das Wasser verdampfen würde. Seine Oberfläche besteht vor allem aus geschmolzenem Gestein. Seine Kruste ist dünn, spröde und unbeständig. Meteoriten stürzen durch eine dünne Atmosphäre aus Wasserstoff und Helium auf eine Mischung von Methan, Ammoniak, Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Stickstoff. Außerdem trifft von der Sonne eine so intensive Ultraviolettstrahlung ein, daß innerhalb kaum einer Stunde eine für jedes Lebewesen tödliche Strahlendosis erreicht wird. Die Gravitationsanziehung des Mondes, dieses Planeten in nur 17000 Kilometern Entfernung, bewirkt gewaltige Gezeiten des geschmolzenen Gesteins.*

Dies ist nicht die Schilderung des Jupiter oder eines Planeten in irgendeinem anderen Sonnensystem, sondern der Erde vor 4,6 Milliarden Jahren. Sie ging aus der Zusammenballung von Staub und Gasen hervor, die beim Urknall entstanden waren. Dieses kochende, strahlende Inferno scheint uns kaum der geeignete Ort zu sein, an dem Leben keimen könnte. Aber in den folgenden einigen hundert Jahrmillionen wurden die Meteoriteneinschläge seltener, und die enorme Hitze wurde in den Raum abgestrahlt. So konnte die Oberfläche abkühlen und stabiler werden. Es ent-

stand eine Atmosphäre aus schwereren Gasen, und ihre obere Schicht reicherte sich mit Ozon an, das die für Lebewesen schädliche Ultraviolettstrahlung weitgehend absorbiert.

In der ersten Jahrmilliarde herrschte auf der Erde eine geradezu »höllisch« hohe Temperatur. Jonathan Weiner schrieb in seinem Buch *Planet Earth*, daß »das Leben [entstand], nachdem der Planet der Hölle entstiegen war«. Die ersten Spuren von Leben, die man geologisch nachweisen kann, sind rund vier Milliarden Jahre alt; es waren einfache, einzellige Organismen. Was geschah eigentlich in der Ursuppe, damit sich das bilden konnte, was wir heute »Leben« nennen? Wie wir im Teil 7 dieses Buches sehen werden, besteht alles Lebendige vor allem aus bestimmten Substanzen, den sogenannten Aminosäuren. Sie sind die Bausteine aller Pflanzen und Tiere, denn sie bilden deren Proteine. Wir werden außerdem sehen, daß dabei gewisse Verbindungen, nämlich die Ribonucleinsäuren (RNA) für die Existenz unabdingbar sind, weil sie den Aufbau von Proteinen aus den Aminosäuren »organisieren« bzw. steuern. Allerdings werden die Aminosäuren und die RNA ihrerseits von den Lebewesen produziert. Das bedeutet, sie sind Produkte der komplexen Vorgänge in den Zellen der Lebewesen. Daher stehen wir vor demselben Dilemma wie bei der berühmten Frage, ob zuerst das Ei oder zuerst das Huhn da war. Wie kann sich Leben aus Aminosäuren und RNA entwickelt haben, wenn diese Substanzen Produkte lebendiger Zellen sind? Die Antwort liegt darin, daß jene beiden essentiellen Komponenten wahrscheinlich vor vier Milliarden Jahren in der Ursuppe vorlagen.

Zu jener Zeit gab es auf der Erde die chemischen Elemente, aus denen Aminosäuren und RNA bestehen. In den 50er Jahren arbeitete Stanley Miller an der Universität Chicago im Institut des berühmten Chemikers Harold Urey, der übrigens auch beim Manhattan-Projekt zum Bau der ersten Atombombe eine wichtige Rolle gespielt hatte. 1953 errichtete Miller eine riesige Anordnung aus miteinander verbundenen Glaskolben, in denen er die Bedingungen nachbilden wollte, wie sie auf der Erde in ihrer Frühzeit geherrscht hatten. Bei Millers Simulation entwich Dampf aus siedendem Wasser und vermischte sich mit Methan, Ammoniak, Wasserstoff und den beiden Kohlenstoffoxiden. Die-

se Gase waren, wie schon erwähnt, die Hauptbestandteile der frühen Erdatmosphäre. Miller zündete nun mit einer elektrischen Hochspannung von 60000 Volt Funken und Lichtbögen in dieser Gasmischung. Er simulierte also heftige Gewitter und wollte sehen, ob sich dabei die entscheidenden Aminosäuren bilden konnten. Nach einer Woche analysierte Miller das im Wasser gelöste Substanzgemisch und stellte fest, daß es zu einem guten Teil aus verschiedenen Aminosäuren bestand. Dieses berühmte Experiment wurde seit 1953 häufig reproduziert, und stets waren in der eigentlich unbelebten Mischung Aminosäuren entstanden. Angesichts des unvorstellbar langen Zeitraums und der dabei zwangsläufig aufgetretenen Milliarden an Zufallskombinationen von Molekülen auf der frühen Erde erklärten diese Laborexperimente plausibel die Bildung von Aminosäuren, die für das Leben unentbehrlich sind.

Man konnte jetzt auch beweisen, daß sich gleichzeitig mit den Aminosäuren die Bausteine der RNA in großer Menge gebildet hatten. Das bedeutet, es hatten sich bestimmte chemische Elemente (vor allem Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Phosphor) zu langen Molekülketten vereinigt, wobei sie denselben physikalischen Prinzipien der Bindung folgten, wie sie für einfache Moleküle gelten. Natürlich ergab sich auch eine Unzahl von Elementkombinationen, die für die Entstehung des Lebens nicht geeignet waren.

Die bloße Existenz von Aminosäuren und RNA-Molekülen erklärt noch nicht, wie diese Bausteine schließlich zu lebenden Organismen kombiniert bzw. konfiguriert wurden. Um Leben hervorzubringen, mußte die RNA zwei Fähigkeiten haben: Sie mußte erstens die Aminosäuren zu Proteinen kombinieren und zweitens sich selbst verdoppeln können, so daß sie weiterexistieren und diesen Prozeß fortführen konnte. Für die erstgenannte Fähigkeit reihten sich mehrere RNA-Moleküle zufällig aneinander, so daß bestimmte Aminosäuren zu einfachen Proteinen zusammentrateten. Diese Proteine könnten chemische Reaktionen gefördert haben, die eine bestimmte RNA-Konfiguration gegenüber anderen bevorzugten. Aber die RNA hat außerdem die unglaubliche Fähigkeit, solche Vorgänge selbst zu fördern. Dies konnten 1982 die Biochemiker Thomas R. Cech (geb. 1947) und

Sidney Altman (geb. 1939) im Labor beweisen. Das brachte ihnen 1989 den Nobelpreis für Chemie ein. Die von ihnen bestätigte Möglichkeit der »Selbstkatalyse« war entscheidend für die Entstehung des Lebens; sie führte von bloßen RNA-Mischungen zu einem Gefüge, bei dem die RNA die Produktion von Proteinen steuert. Wie wir im Teil 7 dieses Buches noch eingehender besprechen werden, ist die Proteinsynthese durch DNA und RNA die Basis allen Lebens.

Sogar die einfachste RNA hat das Potential zur Selbstreplikation (Selbstverdopplung), bei der gemäß den oben erwähnten Prinzipien der chemischen Bindung ein identisches, komplementäres RNA-Molekül entsteht. Sobald sie entstanden war, begann die primitive RNA mit der ersten Version der natürlichen Selektion. Wenn verschiedene Formen der RNA gleichzeitig existierten, hatte diejenige RNA-Form die besten Chancen zur Vermehrung und zum Bestimmen der für die weitere Synthese notwendigen Substanzen, die das vorteilhafteste Gefüge von Aminosäuren anzog und sich am schnellsten replizieren konnte. Also überdauerten diejenigen RNA-Moleküle, die die günstigen biologischen Reaktionen beschleunigten. Auf diese Weise vollzog sich die Evolution der RNA. In Abwandlung der von Darwin entdeckten Prinzipien kann man sagen, die natürliche Selektion wirkte allein durch jedes RNA-Molekül und zu dessen größtem Nutzen. Über Jahrmillionen hinweg wurden die RNA-Moleküle komplexer und unterschiedlicher, damit auch spezialisierter. Die RNA, die Proteine aus Aminosäuren synthetisiert, hat auch die für alle lebendigen Organismen kennzeichnende Funktion, nämlich sich selbst zu replizieren.

Einige Biologen meinen, daß Tiefseetäler an den tektonischen Plattengrenzen (siehe Kapitel 15) geeignete Orte für die Entstehung des Lebens waren. In dieser Tiefe war das entstehende Leben durch das Wasser gut vor der schädlichen Ultraviolettstrahlung geschützt. Zudem waren dort die notwendigen Elemente und Verbindungen wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Methan, Wasser und Ammoniak vorhanden, und auch die Temperaturen waren günstig. Weil die frühe Erde zahlreiche Stellen mit derartigen vorteilhaften Bedingungen aufwies, gab es reichlich Gelegenheiten für die richtige chemische Mixtur.

Die Ausbildung von Membranen um bestimmte Gruppen von RNA- und Proteinmolekülen, die aus Aminosäuren zusammengefügt worden waren, war vermutlich der nächste Schritt zur Entwicklung von Zellen. Wie schon erwähnt, sind in einer Zellmembran die Lipidmoleküle so angeordnet, daß eine innere und eine äußere Schicht vorliegen (siehe Abbildung 16.2). Aus einer solchen Abtrennung einzelner Bereiche durch Membranen gingen vermutlich die ersten Zellen hervor, die mit dieser Schutzhülle in verschiedenen wäßrigen Umgebungen existieren konnten. Wie die primitiven ersten RNA-Moleküle wetteiferten diese ersten Zell-»Wesen« miteinander um Nährstoffe, wobei allmählich Variationen von Zellen auftraten. Von ihnen überlebten jene, die ihren Nachkommen am effizientesten die Katalysatoren für die notwendigen chemischen Reaktionen sowie andere Merkmale zum Fördern der Duplikation weitergeben konnten.

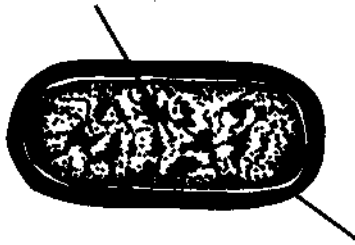
## **Bakterien werden die Urahnen aller Lebewesen**

### *Die Genetik der Resistenz*

In den folgenden drei Milliarden Jahren waren einzellige Organismen die einzigen Lebewesen auf der Erde. Wie die erste RNA und die später entstandenen vielzelligen Organismen unterlagen die Einzeller einem Evolutionsprozeß. Durch Analysen von Zellfossilien konnten die Biologen die wahrscheinlichsten Evolutionsschritte rekonstruieren, die sich in jenen drei Milliarden Jahren vollzogen. Zuerst überlebten unabhängige Zellen, indem sie ihre Energie durch Photosynthese aus dem Sonnenlicht bezogen. Bei den nächsten größeren Evolutionsschritten paßten sich die Zellen an die Atmosphäre an, die allmählich immer sauerstoffreicher wurde (zu Beginn hatte sie praktisch keinen Sauerstoff enthalten). Dieser Vorgang dauerte nach dem ersten Auftreten von Zellen rund 500 Millionen Jahre. Solche Zellen, die den steigenden Sauerstoffgehalt der Atmosphäre überlebten, nutzten ihn bald sogar zu ihrem Vorteil. Sie entwickelten eine primitive Form der Atmung und vermehrten sich stark, bis sie einen Großteil der frühen Erde bevölkerten.

Diese frühen Zellen entwickelten sich zu Bakterienarten, aus

Genetisches Material  
(aber kein abgegrenzter Zellkern)



Zellwand und -membran

Abb. 16.4: Eine typische Bakterienzelle

denen schließlich alle anderen Lebewesen hervorgehen sollten, sowohl Pflanzen als auch Tiere. Die Bakterien sind einzellige Organismen ohne einen deutlich abgegrenzten Zellkern und auch ohne Organellen. Man müßte rund 250000 Bakterien mittlerer Größe nebeneinanderlegen, um den Punkt am Ende dieses Satzes abzudecken. Abbildung 16.4 zeigt eine typische Bakterienzelle. Manche Bakterienarten haben starre, haarähnliche Fortsätze (Pili) an der Außenseite und manche eine schwanzähnliche Geißel (Flagelle) zur Fortbewegung.

Bei günstigen Bedingungen können sich einige Bakterienarten alle 15 Minuten durch Zellteilung vermehren. Die ältesten Urahnen der heutigen Bakterien gingen komplexe Beziehungen mit Algen (primitiven Pflanzenarten) ein, wobei hügelartige Gebilde von einigen Metern Höhe und Breite entstanden. Diese einfachen Ökosysteme, deren Fossilien man Stromatolithen oder Algenkalke nennt, bedeckten die flachen Küstengewässer der Meere. Auch heute noch findet man solche Gebilde, beispielsweise im seichten Wasser des Golfs von Kalifornien und beim Great Barrier Reef an der Nordostküste Australiens.

Man kennt heute rund 5000 Bakterienarten. Nur wenige von ihnen verursachen beim Menschen Krankheiten, und die meisten sind für andere Lebewesen, darunter den Menschen, harmlos, manche sogar lebensnotwendig. Einige Beispiele:

- Bakterien in den Mägen der Rinder sind notwendig zum Verdauen der Cellulose in deren Nahrung. Ähnliches gilt für die



Termiten; in ihrem Verdauungstrakt schließen bestimmte Bakterienarten die Cellulose im Holz auf, von dem sich die Termiten ernähren.

- Organische Substanzen, z. B. auch in Abwässern, werden von Bakterien teilweise zersetzt und in Stoffe umgewandelt, die für das Wachstum von Pflanzen nötig sind.
- Bestimmte Bakterienarten sind unentbehrlich beim Herstellen von Käse und anderen Molkereiprodukten, denn sie setzen bei ihrem Stoffwechsel gewisse Bestandteile der Milch um.
- Einige Bakterienarten binden den Stickstoff der Luft und führen dem Boden Stickstoffverbindungen zu, die dann von den Pflanzen genutzt werden können.
- Sogenannte coliforme Bakterien, die in unserem Magen-Darm-Trakt leben, sind für eine geordnete Verdauung unerlässlich. Wenn wir in fremde Länder verreisen und dort andere Bakterienarten mit der Nahrung aufnehmen, kann unsere Verdauung empfindlich gestört werden.

Von manchen Bakterienarten weiß man, daß sie Krankheiten hervorrufen. Diese Krankheitserreger oder Pathogene können praktisch jeden Körperteil infizieren. Auch dazu einige Beispiele:

- Meningokokken infizieren Rückenmark und Gehirn.
- Diphtheriebakterien haben eine besondere Affinität für den Rachenraum.
- Tuberkelbakterien dringen in die Lunge ein.

Bakterienarten verändern sich - wie alle anderen Arten von Lebewesen auch - nach den Prinzipien der natürlichen Selektion. So trat beispielsweise die tödliche Lungenkrankheit Tuberkulose, hervorgerufen durch *Mycobacterium tuberculosis*, in letzter Zeit erneut auf. Das ist ein recht unglückliches Kapitel in der Geschichte der Medizin. Der Grund für das Wiederauftauchen liegt auch im Prozeß der natürlichen Selektion bei diesem Bakterienstamm. Um die Mitte unseres Jahrhunderts schien es so, als sei die Tuberkulose praktisch besiegt; den infizierten Patienten gab man eine Kombination der beiden Wirkstoffe Rifampicin und Isoniazid. Jede Person kann durch Tuberkelbakterien infiziert werden. Wenn das Immunsystem intakt ist, erkrankt man nor-

malerweise nicht, weil die natürlichen Abwehrmechanismen die Bakterien abtöten oder in kleinen vernarbten Bereichen in der Lunge einschließen, so daß diese winzigen Organismen nicht mehr wachsen und das Lungengewebe zerstören können. Wenn das Immunsystem eines Menschen die Bakterien nicht isolieren oder unter Kontrolle halten kann, dann vermehren sie sich rasch, und die sich ausbreitende Infektion greift das Lungengewebe an. Die eben erwähnten Medikamente stoppen diesen Krankheitsprozeß nur, wenn sie über mehrere Monate hinweg regelmäßig eingenommen werden.

Ungefähr seit Mitte der 80er Jahre nimmt weltweit die Anzahl der Obdachlosen vor allem in den Großstädten zu. Viele dieser Menschen sind drogenabhängig oder leiden an AIDS, das heißt, sie haben ein in gefährlichem Ausmaß geschwächtes Immunsystem. Weil *Mycobacterium tuberculosis* in menschlichen Organismen mit angegriffenem Immunsystem relativ gut gedeiht, tauchte die Tuberkulose in innerstädtischen Bereichen wieder auf. Die Lebensweise jener besonders anfälligen Gruppen ist nicht dazu angetan, die medikamentöse Therapie vollständig und sorgfältig durchzuführen, um die Infektion zu beseitigen. Mit anderen Worten: Gerade diejenigen, die am gefährlichsten infiziert werden, nehmen die Medikamente nicht ordnungsgemäß und regelmäßig ein, so daß den Bakterien eine Chance gelassen wird.

Einige *Mycobacterium* -Organismen besitzen seit jeher Gene, die die erwähnten Arzneistoffe unwirksam machen. Infolge der natürlichen Selektion haben sich gerade diese Bakterien stärker vermehrt, so daß schließlich fast alle derartigen Bakterien gegen die bekannten Antibiotika resistent sind, also nicht mehr abgetötet werden können. Daher treten täglich Tausende neuer Fälle von Tuberkulose auf, die auf solche angepassten Bakterien zurückzuführen sind. Die Bakterien werden durch Husten, Niesen oder auch engen Kontakt übertragen, vor allem in den Großstädten. Derzeit entwickelt man neue Antibiotika, aber es werden noch viele Menschen an Tuberkulose sterben, bevor man die Genetik der Resistenz völlig klären kann und neue Medikamente die Krankheit erneut wirksam eindämmen können.

Bestimmte Bakterienarten können unabhängig von anderen

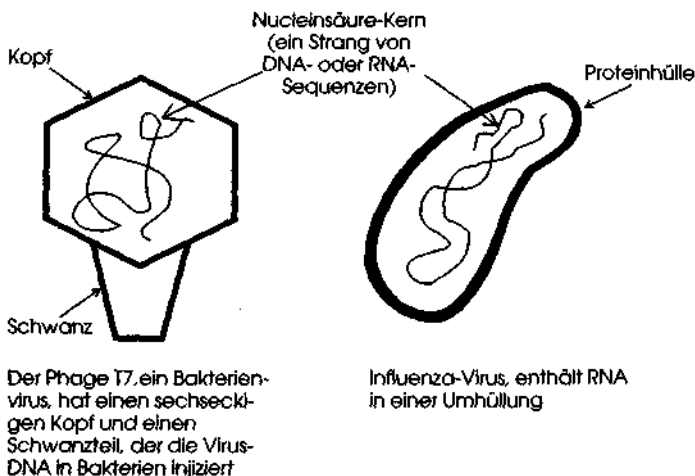


Abb. 16.5: Zwei typische Viren

Organismen überleben, während andere Parasiten, also auf einen Wirtsorganismus angewiesen sind. Dagegen sind Viren niemals völlig unabhängig, und es sind auch keine Zellen. Jedes Virus ist ein genetisches System, dessen Überleben von der Gegenwart von Zellen abhängt. Man kann auch sagen, Viren können nur im Inneren von Tieren, Pflanzen oder Bakterienzellen gedeihen. Sie sind viel kleiner und auch einfacher aufgebaut als Bakterien, und sie bestehen nur aus Nucleinsäuren, einer Umhüllung aus Protein und manchmal auch Fetten und Kohlenhydraten.

Einige Viren sind sogenannte Bakteriophagen, das heißt Bakterienfresser. Ein solcher ist in Abbildung 16.5 dargestellt. Er kann eine Spitze in Bakterien einführen, um die Enzyme und die Stoffwechselprozesse dieser größeren Organismen zur eigenen Fortpflanzung zu nutzen. Obwohl bestimmte Viren- und Bakterienarten beim Menschen und bei praktisch allen anderen Arten Krankheiten verursachen können, ist diese Schädigung offensichtlich nicht »beabsichtigt«. Die Viren oder Bakterien leben einfach in der jeweiligen Umgebung, an die sie sich angepasst haben. Hier pflanzen sie sich durch Teilung fort, wie viele andere Organismen auch.

## Aus der Ur-Zelle entwickeln sich alle anderen Organismen

### *Beweise in Schleimpilzen und Schwämmen*

Nachdem die ersten einzelligen Organismen entstanden waren, ergaben sich in den folgenden Hunderten von Jahrtausenden unter dem Druck der natürlichen Selektion zahlreiche weitere chemische Veränderungen. Dazu gehört die Entstehung der DNA, die allmählich die Aufgaben der Selbstreplikation von der RNA übernahm. Protozoen und andere Einzeller waren und sind in der Evolution ungeheuer erfolgreich. Aber am Menschen und allen anderen erfolgreichen vielzelligen Lebewesen (auch *Metazoen* genannt) sehen wir, daß es für die Organismen auch vorteilhaft wurde, aus mehr als einer Zelle zu bestehen. Vor rund 600 bis 800 Millionen Jahren traten die ersten vielzelligen Organismen auf den Plan. An Fossilien und heutigen Lebewesen kann man die Entwicklung von Einzellern zu Vielzellern recht gut erkennen. Ein starkes Indiz für einen solchen Verlauf der Evolution ist die Organisation »niederer Stämme«, beginnend mit einfachen vielzelligen Tieren, die sich aus den einzelligen Protozoen entwickelten.

Beispielsweise existiert der sogenannte Schleimpilz während bestimmter Phasen seines Lebenszyklus als Einzeller. Zu gewissen Zeiten treffen viele dieser Organismen aufeinander, ihre Zellmembranen verbinden sich, und eine große Masse mit Tausenden von Zellkernen bewegt sich fort; sie verhält sich wie ein einziger Organismus und nimmt Nährstoffe auf. Dieses faszinierende Gebilde aus Protoplasma produziert zum Fortpflanzen Sporen, wie es auch viele Pflanzen tun, und hat Eigenschaften pflanzlicher wie auch tierischer Zellen. Daher ist die Zuordnung nicht ganz eindeutig. Anscheinend repräsentieren die Zellen der Schleimpilze eine sehr frühe Lebensform, die viele der Merkmale hat, die wir von den Zellen kennen, die sich als erste auf der Erde verdoppelten.

Ein anderes Beispiel der frühen Evolution von einzelligen zu vielzelligen Organismen ist die Grünalge *Volvox*, die auf der ganzen Welt verbreitet ist und in Süßwasser gedeiht. Sie stellt einfach eine Ansammlung einzelliger Protozoen dar, die aneinan-

der haftend in einer Kolonie zusammenleben. Diese Konfiguration ist offensichtlich für das Überleben günstig und stellt einen frühen Evolutionsschritt in Richtung auf einen vielzelligen Organismus dar.

Eine solche Entwicklung können wir auch bei den nächst komplexen Lebensformen erkennen, nämlich den Schwämmen (*Poriifera*). Es gibt Hunderte verschiedener Arten von Schwämmen, aber alle bestehen aus drei einfachen Zelltypen, die jeweils bestimmte Funktionen haben und als ein einziger Organismus zusammenwirken: Ein Zelltyp bewegt das Wasser um eine offene Körperhöhle, ein anderer produziert ein silikathaltiges Gewebe zum Stützen des Organismus, und der dritte nimmt kleine Nahrungsteilchen auf, die im Wasser vorbeitreiben. Wenn die drei Zelltypen, die einen Schwamm bilden, voneinander getrennt wurden, dann können sie sich gegenseitig erkennen und sich wieder zusammenschließen. Die verschiedenartigen Zellen der Schwämme sind aber noch nicht zu Geweben organisiert.

Wir müssen in der Evolutionsleiter nicht sehr weit emporsteigen, um Zellen zu finden, die Gewebe bilden, also Zellgruppen von ähnlicher Struktur und Funktion, die miteinander in Wechselwirkung stehen, beispielsweise Haut-, Muskel- oder Nervenzellen. Wir finden Gewebe bereits bei Quallen, Seeanemonen und Seesternen. Diese Lebewesen sind recht einfach aufgebaut, können aber fühlen, und einige ihrer Arten können sich gut fortbewegen. Die Seesterne haben an den Enden ihrer Arme sogar Zellverbände, die Licht erkennen können.

Die nächsten Evolutionsschritte zu höherer Komplexität finden wir bei den Plattwürmern, den Fadenwürmern und schließlich den Ringelwürmern (siehe Abbildung 16.6). Die Arthropoden (Gliederfüßler, darunter Insekten und Krebstiere) folgten einige hundert Jahrmillionen später, bald auch die Amphibien, die Reptilien und die Säugetiere. Der Vorgang der Artbildung und der jeweilige Evolutionsdruck der natürlichen Auslese brachten allmählich Tausende neuer, immer komplexerer Arten hervor. Doch jede Zelle eines jeden Organismus funktionierte nach denselben Prinzipien der Energieerzeugung und der Replikation wie die Zellen von Protozoen, Schleimpilzen, Grünalgen und Schwämmen.

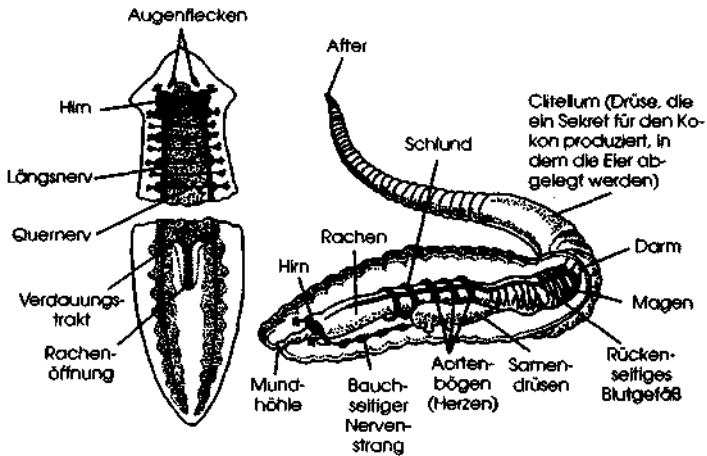


Abb. 16.6: Plattwurm und Regenwurm

Die Kenntnis von Funktion und Entwicklung der Zellen ist entscheidend für die Klärung der Evolution, ebenso für das Verständnis der Fortpflanzung und des Ursprungs allen Lebens aus der Ursuppe.

## Der verblüffende Aufstieg vom Einzeller bis zum Menschen

### *Makrophagen-Wachtposten und kriechende menschliche Zellen*

Während eines rund 70jährigen Lebens speichert unser Gehirn rund 100 Billionen Informationseinheiten (Bits). Zum Vergleich: Die gesamte *Encyclopedia Britannica*, das größte Nachschlagewerk der Welt, enthält nur rund 200 Millionen Bits. Die enorme Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns ist ein Resultat der natürlichen Selektion. Das gilt für jedes Merkmal, das sich als vorteilhaft für das Überleben erwiesen hatte. Wie in Kapitel 14 erwähnt, überlebten unsere Urahnen, die durch die afrikanischen Steppen zogen, schon eher durch List als durch bloße Kraft oder Schnelligkeit.

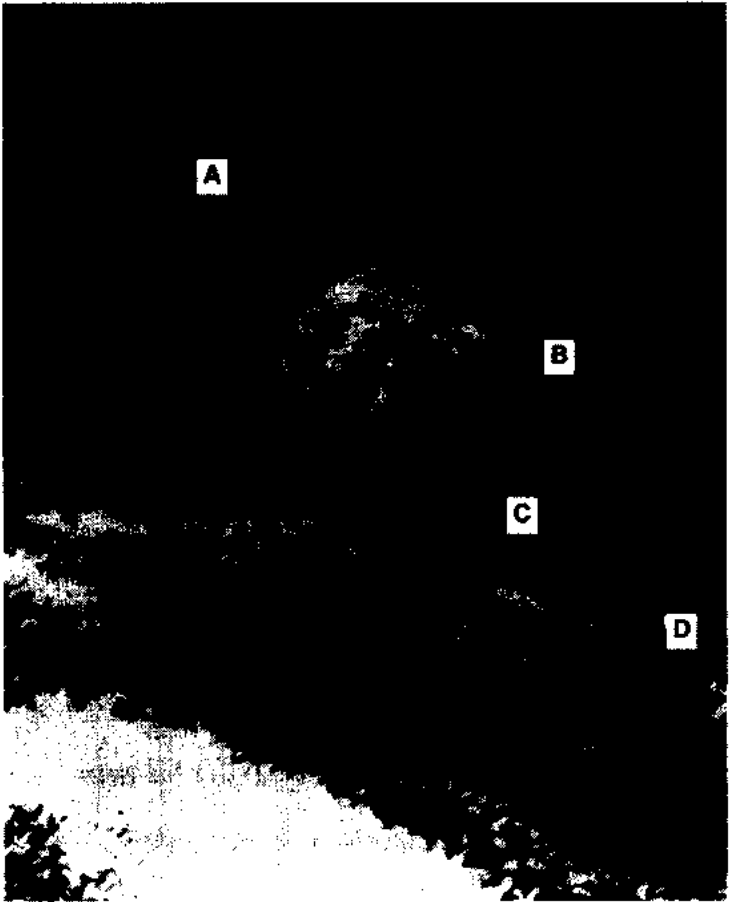


Abb. 16.7: Zwei Alveolarmakrophagen (B und C) im menschlichen Lungengewebe (A). Die rundliche, gekräuselte Zelle (B) ist stationär. Der Makrophage (C) im Vordergrund umhüllt gerade ein Fremdpartikel (D).

Unser Körper ist auch rein physisch recht kompliziert aufgebaut. Zu den rund 60 Billionen Zellen in unserem Organismus gehören nicht nur diejenigen, die die verschiedenen Gewebe bilden, sondern auch Millionen Einzeller, von denen unser Überleben abhängt:

- Alveolarmakrophagen (eine Alveole ist ein Lungenbläschen,

»makro« bedeutet groß, und »Phage« heißt Fresser) verschlingen inhalierte Staubteilchen und befördern sie aus der Lunge in die Luftröhre und von dort schließlich aus dem Körper heraus; siehe Abbildung 16.7.

- Bestimmte Arten von Makrophagen und wandernden Phagozyten (Freßzellen) werden mit dem Blut durch unsere Adern transportiert und nehmen abgestorbene Blutzellen auf, außerdem eventuell vorhandene Krankheitserreger.
- Andere Makrophagen und auch Blutzellen bekämpfen Zellen, die sich als krebsartig erweisen.
- Bekannter sind die weißen Blutkörperchen oder Blutzellen (Leukozyten), die auch im Eiter auftreten. Sie nehmen Bakterien, abgestorbene Gewebezellen, Protozoen und andere Fremtteilchen auf und entfernen sie aus dem Körper.

Die eben aufgeführten Zelltypen gehören alle zu den Abwehrmechanismen unseres Körpers. Wie die erwähnten Beispiele zeigen, verzehren und vernichten sie Bakterien, Viren und Fremdstoffen, aber auch abgestorbene und anomale Körperzellen. Sie werden im Knochenmark gebildet und schwärmen dann aus, um ihre Aufgaben an zahlreichen Stellen im ganzen Körper zu erfüllen. Sie ähneln in mancher Hinsicht den Bakterien und teilweise bestimmten Milben (wie sie beispielsweise auf unserer Haut leben), aber auch einigen frei lebenden einzelligen Amöben und Protozoen. Dennoch sind sie ein Produkt menschlicher Gene. Anders ausgedrückt: Unsere eigene DNA ist auch dazu programmiert, diese »lebendigen Tierchen« hervorzubringen, die also nicht erst später in unseren Körper gelangen wie Bakterien, Milben, Amöben oder Protozoen.

Wie schon bemerkt, weisen die Zellen trotz aller Verschiedenheit der Lebewesen eine eindeutige Einheitlichkeit auf. Wenn wir Zellen aus irgendeinem menschlichen Gewebe oder Organ (Haut, Nieren, Herz, Lunge usw.) herausschneiden und in eine Schale mit Nährstoffen geben, werden sie sofort beginnen, sich wie einzellige Organismen zu verhalten: Sie werden sich bewegen und Nährstoffe aufnehmen, und viele werden sich durch Zellteilung reproduzieren. Wenn sich eine Zelle bewegt, durchsucht sie sozusagen den Raum um sie herum. Sie kann dann an-



dere Zellen an sich binden, so daß in der Kulturschale das betreffende Gewebe - zumindest rudimentär - wieder entsteht.

Mit den 100 Billionen Bits an Informationen in unserem Gehirn und mit der Möglichkeit, sogar einzellige Organismen zu produzieren, die als Teil eines raffinierten Abwehrsystems unseren Körper schützen, sind wir unglaublich kompliziert aufgebaute Lebewesen, sowohl intellektuell als auch physisch. Auch wenn wir uns den 65 Millionen Jahre dauernden Evolutionsprozeß von den allerersten Primaten bis zum *Homo sapiens* (siehe Kapitel 14) vor Augen halten, akzeptieren wir nur ungern die Vorstellung, daß sich unsere Art letztlich - wenn wir zeitlich ganz weit zurückblicken - aus einem einzelligen Organismus entwickelt hat. Wie kann eine so einfache Zelle unser Urahn sein? Nun, im Teil 5 dieses Buches sahen wir, daß zum Verständnis von Darwins Theorie die immensen Zeiträume entscheidend sind. Innerhalb einer unvorstellbar langen Zeitspanne führte der Prozeß der natürlichen Selektion zur Evolution vielzelliger Lebewesen aus einzelligen Organismen. Emotionen und Mythen über den Ursprung des Menschen mußten den Fakten weichen, die wir heute kennen und verstehen.

War die Entwicklung komplexer Organismen wie der Menschen unausweichlich, oder beruhte sie nur auf Zufälligkeiten? Über diese Frage debattierte man jahrzehntelang und konnte dabei die Evolutionstheorie teilweise vervollständigen. Hier sind Stephen J. Goulds Theorie des unterbrochenen Gleichgewichts zu nennen, ebenso die neueren Theorien über Selbstorganisation und Komplexität. Ganze Bücher beschäftigen sich mit deren Prinzipien. So behauptet Stuart Kauffman in seinem Werk *At Home in the Universe*, daß es für komplexe biologische Systeme allgemeine Prinzipien gibt, nach denen Entstehung und Weiterentwicklung des Lebens durch natürliche Selektion zwangsläufig waren. Über den vom Mars stammenden Meteoriten, der anscheinend Spuren organischer Moleküle enthält, sagte James Ferris vom Rensselaer Polytechnic Institute: »Es liegt eine gewisse Zwangsläufigkeit darin. (...) Leben ist eine natürliche Folge physikalischer, chemischer und anderer Gesetze in unserem Universum.« Die Frage, ob die Entwicklung eher zwangsläufig oder eher zu-

fällig verlief, wird wohl niemals endgültig zu beantworten sein. In unserem Jahrhundert begannen wir, die Zelle und ihre Funktionen zu verstehen, und heute kennen wir auch physikalische Prozesse, die für Selbstreplikation und Wachstum verantwortlich sind und die Evolution einzelliger Organismen zu komplexen Pflanzen und Tieren sowie zum Menschen vorantrieben. Der Mensch war immer fasziniert von seiner Stellung und Bedeutung im Universum, ferner von der Frage nach den Anfängen: Entstehung des Universums, Beginn des Lebens, erste Menschen auf der Erde. Einstein meinte einmal, Kopernikus habe uns gelehrt, bescheiden zu sein, indem er uns zeigte, daß Erde und Menschheit nicht das Zentrum des Universums sind. Darwin sagte uns, wir dürften stolz sein, denn wir seien die höchste aller Lebensformen und die einzige Art, die sich ihrer selbst bewußt ist und ihr Schicksal sowie den Ablauf der Geschehnisse zu erkennen vermag. Inzwischen konnten die Forscher die Mischung der Elemente rekonstruieren, aus der sich die ersten organischen Moleküle bildeten, und sie konnten die Evolutionsgeschichte vor uns ausbreiten: von den ersten Zellen bis zu den 60 Billionen Zellen, die in unserem Körper zusammenwirken. Gleichgültig, ob dieser Weg der Evolution nun zwangsläufig oder zufallsbestimmt war - die Biochemiker und Biologen unseres Jahrhunderts erklärten uns das Wesen unserer Existenz.

## KAPITEL 17

### Perlen auf einer Schnur

*»Für Weismann sind die Samenzellen unsterblich. (...) Jede Generation gibt der nächsten den unaufhörlichen Strom weiter, der nicht durch die Erfahrungen des Organismus modifiziert ist. (...) Der Körper existiert nur vorübergehend. Sein hauptsächlich >Zweck< ist nicht sein individuelles Leben, sondern seine Fähigkeit, das so entscheidende Material für die Fortpflanzung zu bilden und zu übertragen. (...) [Aber] die Samenzellen müssen sich zuweilen verändern - sonst gäbe es keine Evolution. (...) Gibt es einen inneren, anfänglichen oder treibenden Impuls, der den Evolutionsprozeß einleitete? (...) Wir können darauf nur antworten, daß die Annahme einer inneren Kraft eine wissenschaftliche Erklärung unmöglich macht.«*

Thomas Hunt Morgan, *Heredity and Sex* (1913)

Die Stadt Brunn liegt am Zusammenfluß von Schwarzawa und Zwittera im heutigen Tschechien. Gegründet 1243, überstand sie die Verwüstungen durch Hussiten, Böhmen und Schweden, ebenso den Schlesischen Krieg und den Einfall der Truppen Napoleons. Im vorigen Jahrhundert wurden an der Universität Brunn etliche Experimente durchgeführt, die ein erstes Verständnis der Vererbung biologischer Merkmale ermöglichten. Dazu wurde untersucht, wie bestimmte Charakteristika von den Eltern auf die Nachkommen übertragen werden.

## **Mendel formuliert die Grundzüge der Genetik** *Nicht aufgeschnittene Buchseiten*

Die früher verbreitete Ansicht, daß die Vererbung von Merkmalen über unser Blut erfolgt, zeigt sich in vielen Ausdrücken wie »Blutsverwandte«, »Halbblut«, »blaublütig« oder »königliches Blut«. Auch diese unzutreffende Überzeugung geht auf Aristoteles zurück, und noch im gesamten 19. Jahrhundert folgten ihr die meisten Biologen, darunter Charles Darwin. Aber ausgerechnet die roten Blutzellen sind die einzigen Zellen unseres Organismus, die keine Gene enthalten, denn sie besitzen keinen Zellkern.

Gregor Mendel (1822-1884) trug ganz entscheidend dazu bei, den Irrglauben über die Vererbung von Merkmalen zu überwinden und die Vererbungslehre als Teil der biologischen Wissenschaft zu etablieren. Mendel wurde als Sohn eines armen Bauern im nordmährischen Heinzendorf geboren, das damals zu Österreich gehörte. Er interessierte sich früh für Landwirtschaft, denn er verbrachte seine Jugend auf dem kleinen elterlichen Bauernhof, zu dem auch ein Obstgarten gehörte. 1843 trat er in das Augustinerkloster Brunn ein und wurde vier Jahre später zum Priester geweiht. Der Orden unterstützte sein Interesse an den Naturwissenschaften auch finanziell; so konnte er an der Universität Wien Physik, Chemie, Mathematik, Zoologie und Botanik studieren. Er kehrte 1854 nach Brunn zurück und begann an der Oberschule Naturkunde zu unterrichten. Einige seiner Kollegen beschäftigten sich ebenfalls mit naturwissenschaftlichen Fragen und gründeten den »Naturforschenden Verein«. Mendel trat ihm bei und konnte nun seiner Neigung für die Botanik noch besser nachgehen. Hilfreich waren dabei vor allem die gut ausgestatteten Bibliotheken der Schule und des Klosters.

Im Jahre 1856 begann Mendel im Klostergarten mit Versuchen zur Kreuzung verschiedener Sorten von Erbsenpflanzen. Er wollte herausfinden, wie sich sieben ihrer Merkmale - darunter Farbe und Form des Samens sowie die Wuchshöhe - auf die folgenden Generationen verteilten. Beispielsweise notierte er, ob die Nachkommen einer hohen Erbsenpflanze, die mit einer kleinen »gepaart« worden war, hoch, niedrig oder mittelhoch ausfielen. Im Laufe mehrerer Jahre untersuchte Mendel buchstäblich Tausende

von Erbsenpflanzen und konnte dann seine Ergebnisse statistisch auswerten. Aus seiner Statistik ermittelte er schließlich fünf Prinzipien, die für alle Lebewesen gleichermaßen zutreffen:

1. Jedes physische Merkmal eines Lebewesens (vom einzelligen Protozoon bis zum Menschen) ist das Produkt eines spezifischen »Erbfaktors«, den sich Mendel als eine Art Teilchen vorstellte (wir nennen ihn heute »Gen«).
2. Die Erbfaktoren liegen in den Lebewesen paarweise vor. Beispielsweise kann das Paar der Mutter aus einem Faktor für grüne Augen und einem Faktor für braune Augen bestehen, das Paar des Vaters dagegen aus den Faktoren für grün und blau.
3. Für jedes Merkmal wird nur einer der zwei Faktoren der Mutter (z. B. für grüne Augen) und einer der zwei Faktoren des Vaters (z. B. für blaue Augen) auf ein Kind übertragen.
4. Die Wahrscheinlichkeiten der Vererbung sind für beide Faktoren der Mutter wie auch für beide Faktoren des Vaters jeweils gleich. So kann in diesem Beispiel das Kind eine der nachfolgend aufgeführten vier Kombinationen von Faktoren für die Augenfarbe erhalten:

Von der Mutter / vom Vater:

- grün / grün;
- grün / blau;
- braun / grün;
- braun / blau.

Die Augen des Kindes und alle seine anderen physischen Merkmale resultieren also niemals aus einer Mischung der Faktoren der Eltern.

5. Einige Erbfaktoren werden dominant vererbt, andere dagegen rezessiv. Wenn beispielsweise der Faktor für grüne Augen über die Faktoren für blaue oder braune dominiert und der Faktor für blau über den für braun, dann werden im Durchschnitt drei Viertel der Kinder dieses Elternpaares grüne Augen haben (gemäß den ersten drei Zeilen in der obigen Aufstellung). Dagegen wird im Durchschnitt nur ein Viertel der Kinder blaue Augen haben (vierte Zeile). Braune Augen könnte ein Kind dieser Eltern nur dann haben, wenn beide Eltern den rezessiven Faktor für die braune Augenfarbe vererbten.

Im Jahre 1865 (sechs Jahre nach dem Erscheinen von Darwins Werk *Die Entstehung der Arten*) reichte Mendel beim Naturforschenden Verein in Brunn zwei Abhandlungen mit dem Titel *Versuche mit Pflanzenhybriden* ein. Darin erläuterte er seine Arbeiten mit den Erbsenpflanzen. Doch niemand in dieser gelehrten Körperschaft erkannte, wie bedeutsam Mendels Erkenntnisse für das Ergründen der Vererbung oder der Evolution sein könnten. Mendel wies darauf hin, daß bis dahin noch kein Wissenschaftler in der Lage gewesen war, »die Anzahl der verschiedenen Formen unter den Nachkommen von Kreuzungen zu bestimmen oder (...) die statistischen Beziehungen zwischen ihnen festzustellen«. Einigen Mitgliedern der Vereinigung erschien seine Arbeit als rein mathematisch, also auf die Botanik oder überhaupt auf die Naturkunde nicht anwendbar. Sein Artikel wurde 1866 publiziert, zusammen mit den Sitzungsberichten des Vereins vom vorhergehenden Jahr. Exemplare des Bandes wurden wie üblich an wissenschaftliche Bibliotheken in London, Paris, Wien, Berlin, Rom und andere Großstädte in Europa und auch in den USA gesandt.

Mendels Artikel blieb praktisch unbeachtet. Nur einige kirchliche Würdenträger in Mähren kritisierten ihn für seine Ansichten, die sie für darwinistisch hielten, und erinnerten ihn an die Haltung der Kirche bezüglich der Evolution. Die letzten 18 Jahre von Mendels Leben verliefen in wissenschaftlicher Hinsicht ergebnislos. Er führte seine Arbeiten im Kloster weiter und wurde 1868 zum Abt gewählt. Seine Tätigkeiten für das Gemeinwesen brachten ihm Ehre und Anerkennung ein. Doch sein geradezu revolutionärer Artikel schlummerte unbeachtet in dunklen Bibliotheksregalen auf der ganzen Welt.

Mendel sammelte alle Artikel und Bücher von Darwin, die vor und nach der *Entstehung der Arten* erschienen waren. Wir haben jedoch keinen Hinweis darauf, daß die beiden Wissenschaftler jemals miteinander korrespondierten. Es ist schwierig zu sagen, welches Ergebnis ein solcher Kontakt gehabt hätte, aber vermutlich wäre die Geschichte der Vererbungslehre nicht anders verlaufen, vor allem weil der Beweis für Mendels Erb-»Faktoren« im Grunde die Resultate der Zellforschung (siehe Kapitel 16) voraussetzt. Und diese ermöglichte erst in unserem Jahrhundert das Aufkommen der Genetik.

Die Geschichte, die Darwin mit seiner *Entstehung der Arten* begonnen hatte, wurde gegen Ende des vorigen Jahrhunderts von Walther Flemming und August Weismann fortgeführt. Wie in Kapitel 16 erwähnt, beschrieb Flemming recht detailliert die Zellteilung. In seinem 1882 erschienenen Buch *Zellsubstanz, Kerne und Zellteilung* legte er dar, daß die Zellreproduktion (Zellfortpflanzung) den Übergang von Chromosomen von den Eltern- auf die »Tochter«-Zellen während der Mitose umfaßt.

Der deutsche Biologe August Weismann (1834-1914) kannte Flemmings Ergebnisse. Er bemerkte aber, daß sie noch Fragen hinsichtlich der Teilung der Ei- bzw. Samenzellen offen ließen. Fast kein Wissenschaftler wußte damals von Mendels Experimenten. Weismann postulierte nun, die Ei- und Samenzellen von Tieren hätten »irgend etwas für die jeweilige Art Wesentliches, etwas, das sorgfältig bewahrt und von einer Generation zur nächsten weitergegeben werden muß.« Nach dieser »Keimplasma«-Theorie, publiziert 1892 in seinem Werk *Das Keimplasma: Eine Theorie der Vererbung*, enthalten alle Lebewesen eine spezielle Erbsubstanz. Außerdem erkannte er folgendes: Würden alle Erbsubstanzen der beiden Eltern im befruchteten Ei kombiniert, so verdoppelte sich pro Generation die Menge dieser Substanzen, die dann in den Zellen bald nicht mehr unterzubringen wären. Nach Weismanns Theorie wird das Erbmaterial von Flemmings Chromosomen getragen, und es gibt eine bestimmte Art der Zellteilung. Bei diesem Vorgang, den man heute Meiose oder Reifeteilung nennt, erhält jeder »Tochter«-Zellkern von den Kernen der beiden Elternzellen jeweils nur die Hälfte der gepaarten Chromosomen. Wie Weismann vorausgesagt hatte, enthält beim Menschen jede Eizelle und jede Samenzelle ebenso viele Chromosomen - nämlich 23 -, wie die anderen Zellen des menschlichen Körpers Chromosomen-Paare aufweisen (abgesehen von den roten Blutzellen, die keinen Kern und daher auch keine Chromosomen haben).

Gegen Ende 19. Jahrhunderts überprüften mehrere Biologen Weismanns Ansätze und gewannen neue Erkenntnisse über das Verhalten von Samen- und Eizellen während der Meiose. Einige der dabei durchgeführten Experimente ähnelten denen, die Mendel 35 Jahre zuvor durchgeführt hatte. Und nun - an der Schwel-

le zu unserem Jahrhundert, in dem noch schier unglaubliche wissenschaftliche Erkenntnisse gelingen sollten - wurde Mendels wegweisender Artikel aus der Versenkung geholt. Im März 1900 publizierte der Holländer Hugo de Vries zwei Abhandlungen über die Kreuzung von Pflanzen. In einem der beiden Artikel bemerkte er, daß Mendels Arbeit »so selten zitiert wurde, daß ich sie selbst erst kennenlernte, als ich meine Experimente fast abgeschlossen hatte; so zog ich meine Folgerungen unabhängig davon«. Als andere Forscher in ihren Bibliotheken die Publikationen des Naturforschenden Vereins Brunn aus dem Jahre 1865 suchten, stellten sie fest, daß unter anderem die Seiten mit Mendels Artikel noch nicht einmal aufgeschnitten waren. (Nach dem Falzen der Druckbögen und dem Binden muß der Buchblock an den drei freien Kanten beschnitten werden. Dabei werden die Falzungen entfernt, so daß man die Seiten aufschlagen kann.) Das bewies, daß in den entsprechenden Bibliotheken noch niemand auch nur einen Blick auf Mendels Artikel geworfen hatte. Dieser hatte also 34 Jahre lang nicht das Licht der Welt erblickt, im wörtlichen wie im übertragenen Sinne. Aber bald sollten sich Mendels Ausführungen als Grundlage der Vererbungslehre erweisen.

## **Die Wissenschaft der Genetik entsteht** *Chromosomen-Kartierung*

Mendels Ansätze gingen nun in die Erforschung der Vererbung ein, und die Bedeutung von Flemmings Mitose und von Weismanns Meiose wurde offenbar. Der amerikanische Genetiker Walter S. Sutton (1877-1916) publizierte 1902 im *Biological Bulletin* einen Artikel, den er später überarbeitet unter dem Titel *Die Chromosomen in der Vererbung* herausbrachte. Hier präsentierte er erstmals überzeugende Indizien dafür, daß Chromosomen die Einheiten des Erbmaterials tragen und daß sie in einzelnen Paaren vorliegen, wie Weismann und Mendel angenommen hatten. Sutton leitete den Beweis aus seinen Befunden über die Spermienbildung bei Heuschrecken ab. Hier hatte er festgestellt, daß jedes Chromosom im Zellkern mit einem physisch ähnlichen Chromosom gepaart wird. Wie in Abbildung 17.1 gezeigt, kon-



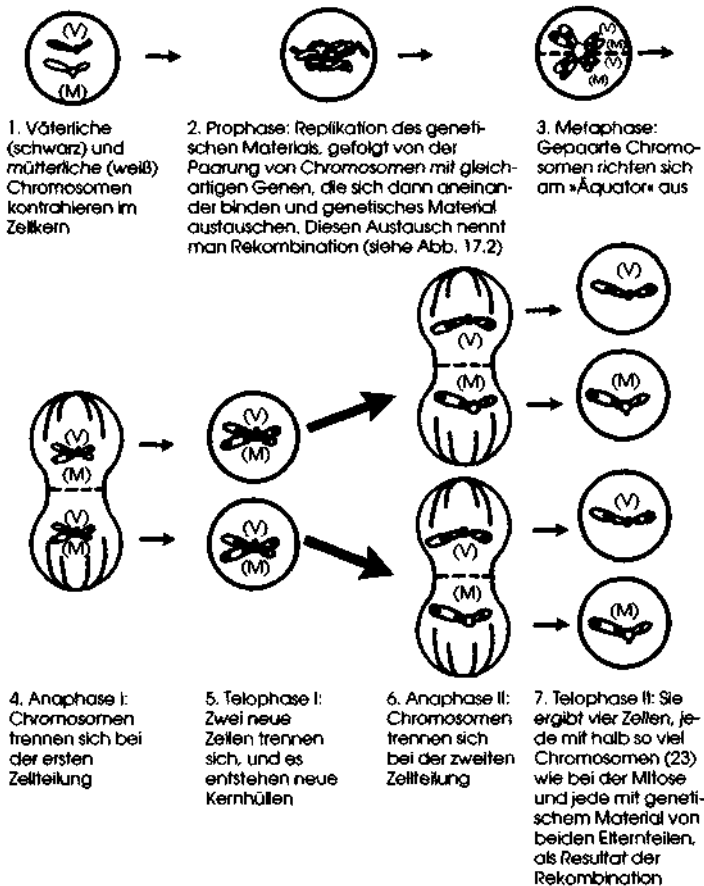


Abb. 17.1: Die Stadien der Meiose. Die Meiose ist eine Art der Zellteilung, die nur bei Ei- und Samenzellen auftritt.

trahieren sich die gepaarten Chromosomen, um sich dann zu duplizieren und anschließend voneinander zu trennen, wobei jedes auf eine andere Samen- oder Eizelle übergeht. Die physische Paarung der väterlichen und der mütterlichen Kopie jedes Chromosoms vollzieht sich nur bei der Meiose.

Im Gegensatz zur Mitose, bei der sich die väterlichen und die mütterlichen Chromosomen vor der Anaphase und der Trennung

einfach aneinander anreihen (vgl. Abbildung 16.3), replizieren sich die Chromosomen bei der Meiose und binden sich dann aneinander. Während bei der Mitose jede Zelle zwei neue Zellen produziert, die beide einen kompletten Satz gepaarter Chromosomen aufweisen, vollziehen sich bei der Meiose zwei separate Zellteilungen, die vier neue Zellen ergeben, jede mit halb so vielen Chromosomen wie andere Zellen. Zur besseren Übersicht zeigt Abbildung 17.1 nur zwei Chromosomen im Kern der Ei- oder Samenzelle. In Wirklichkeit enthält der Kern jeder menschlichen Ei- oder Samenzelle 23 Chromosomen. Die menschlichen Eizellen sind so groß, daß man sie mit bloßem Auge sehen kann.

Die Meiose unterscheidet sich von der Mitose auch dadurch, daß die »Inhalte« der Chromosomen (die Gene) in diesen Ei- und Samenzellen allein für die an die Nachkommen vererbten Merkmale verantwortlich sind. Während die Mitose sozusagen für das tägliche Leben einer Vielzahl von Zelltypen maßgebend ist, umfaßt die Meiose die fundamentalen Prozesse der Vererbung und der Evolution. Suttons Experimente zur Meiose machten aus Mendels abstrakter Statistik und Weismanns Vorhersagen nun eine physische Realität. Jetzt konnte man die Sortimente dieser Teilchen (später »Gene« genannt) als Erbfaktoren auf den Chromosomen identifizieren.

Die Meiose betrifft die Teilung von Ei- und Samenzellen, jedoch nicht die Befruchtung der Eizelle, d. h. die Fortpflanzung des gesamten Organismus (beispielsweise eines Menschen). Sobald man die Meiose aufgeklärt hatte, wurde deutlich, daß das Wesentliche bei der Vererbung die Duplikation der Gene ist, also der Träger der Erbinformation (der genetischen Information). Nachdem die Eizelle befruchtet ist, führt der in Kapitel 16 (siehe Abbildung 16.3) besprochene Prozeß der Mitose von der befruchteten Eizelle schließlich zu den Billionen Zellen des Organismus. »Gelenkt« durch die Gene, differenzieren sich diese Zellen in Hunderte verschiedener Arten, jede mit einer spezifischen Funktion (z. B. Leber-, Nerven-, Haut-, Gehirnzellen usw.). Wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, dauerte es nach den Arbeiten von Sutton und anderen Genetikern noch Jahrzehnte, bis man den chemischen Aufbau der Gene entschlüsseln konnte.

Die im folgenden genannten Forscher bauten in den ersten

Jahrzehnten unseres Jahrhunderts auf den Entdeckungen von Darwin, Mendel, Flemming, Weismann und Sutton auf. Sie gewannen neue Erkenntnisse über die Prinzipien, nach denen Eltern ihre genetische Ausstattung an die Nachkommen weitergeben:

- Herman Nilsson-Ehle (1873-1949): Dieser schwedische Biologe eröffnete der Genetik neue Forschungsfelder. Zwischen 1900 und seiner Emeritierung 1939 forschte er vor allem über die Genetik von Weizen und anderen Pflanzen. Er bestätigte die fünf Vererbungsprinzipien Mendels; außerdem klärte er einige Aspekte der Mutationen auf.
- Edward M. East (1879-1938): Seine 1900 begonnenen bahnbrechenden Arbeiten über Pflanzengenetik umfaßten vor allem Experimente mit Tabakpflanzen. Er erkannte, daß spontane Mutationen in deren Genen im Laufe einiger Generationen zu Variationen führen, auch wenn sich die Umgebungsbedingungen nicht ändern. Solche Mutationen können bei der natürlichen Selektion entscheidend sein, denn wenn eine Mutation ein vorteilhaftes Merkmal mit sich bringt, wird dieses wegen der besseren Überlebenschancen des betreffenden Organismus den Nachkommen mit höherer Wahrscheinlichkeit vererbt.
- Thomas Hunt Morgan (1866-1945). Dieser Genetiker und Zoologe experimentierte mit der Taufliege *Drosophila*, die innerhalb von zwei Wochen eine neue Generation hervorbringt. Morgan entdeckte die bedeutsame Tatsache, daß Chromosomen keine permanenten Strukturen sind. Im Jahre 1909 griff er die Bezeichnung »Gen« auf, die kurz zuvor von dem dänischen Botaniker und Genetiker Wilhelm Ludvig Johannsen geprägt worden war, und bezog sie auf einen von Mendels »Erbfaktoren«. In den folgenden Jahren konnte Morgan mit seiner Arbeitsgruppe an der Columbia University Suttons Theorie bestätigen, daß jedes Chromosom eine Anzahl Gene trägt, die »wie Perlen auf einer Schnur aufgereiht sind«. Zudem stellten die Forscher fest, daß die Position jeder dieser »Perlen« einer bestimmten Region der Chromosomen zugeordnet werden kann.

Noch wichtiger war, daß Morgan und sein Team erstmals bewiesen, daß während der Paarung der Chromosomen und ihrer

## Crossing-over

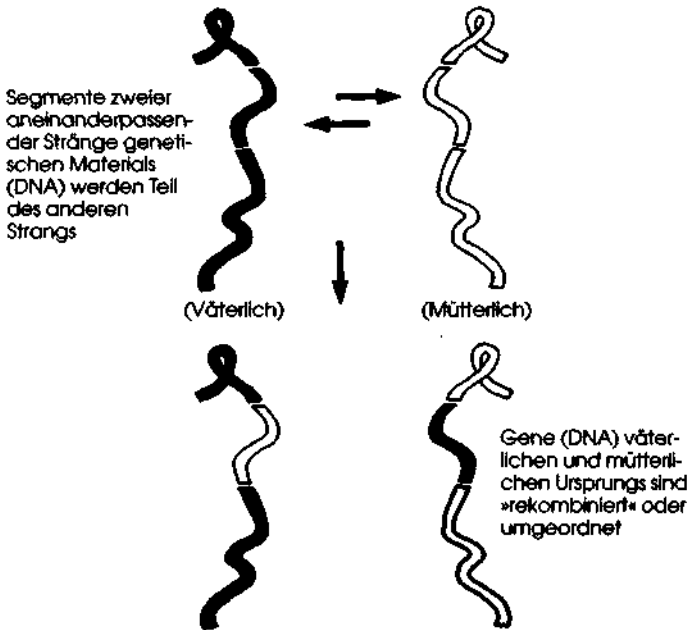


Abb. 17.2: Genetische Rekombination während der Meiose.

anschließenden Kontraktion genetisches Material zwischen Chromosomen mütterlichen und väterlichen Ursprungs ausgetauscht wird; dies ist beim Prophase-Stadium der Meiose in Abbildung 17.1 vermerkt. Diesen Austausch nennt man Crossing-over. Wenn sich »rekombinierte« Chromosomen in neu gebildeten Ei- oder Samenzellen separieren, enthalten diese neuen Zellen infolge des Austauschs in ihren Chromosomen eine einmalige Genanordnung.

Detaillierter als in Abbildung 17.1 ist der Austausch von Genen zwischen Chromosomen in Abbildung 17.2 gezeigt. Hier sind Stränge des genetischen Materials dargestellt, das die Chromosomen bildet. Heute weiß man, daß es sich hierbei um DNA handelt. Rekombination genetischen Materials tritt auch bei einzelligen Bakterien oder einfachen Pilzen auf, die sich

durch Zellteilung fortpflanzen. Aber im allgemeinen spricht man von Rekombination beim Austausch von DNA-Sequenzen (also Genen) zwischen väterlichen und mütterlichen Chromosomen während der Meiose bei menschlichen und tierischen Zellen.

Bei der Rekombination ist entscheidend, daß die Ei- und die Samenzellen die einzigen Zellen sind, die die vollständige genetische Ausstattung der Nachkommen bestimmen. An die folgenden Generationen wird das rekombinierte genetische Material weitergegeben. Morgans Arbeitsgruppe bewies, daß der Prozeß der Variation, auf dem die Evolution beruht, nicht etwa von signifikanten Variationen in jeder neuen Generation herrührt, sondern von der Rekombination der »Perlen auf einer Schnur« - eben der Gene. Morgan verknüpfte Darwins und Mendels Erkenntnisse. Er erkannte, daß die Mendelschen Erbfaktoren ihre physische Basis in der Chromosomenstruktur haben. Außerdem begründete Morgan die Theorie der linearen Anordnung der Gene in den Chromosomen. Im Jahre 1915 publizierte er mit seinen Mitarbeitern diese Erkenntnisse in dem Buch *Der Mechanismus der Mendelschen Vererbung*. Er erhielt 1933 für seine genetischen Arbeiten den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Im Rahmen des Human-Genom-Projekts (siehe Kapitel 19) versucht man derzeit, die exakten Positionen aller 100000 menschlichen Gene auf den DNA-Strängen sowie deren Beziehungen zueinander zu erfassen.

Die drei Genetiker Robert A. Fisher (1890-1962), John B. S. Haldane (1892-1964) und Sewall Wright (1889-1988) waren auch in Statistik bewandert. Sie berechneten in den 20er Jahren unabhängig voneinander, daß die geringen Abweichungen bei Chromosomen-Rekombinationen sowie die von Edward East postulierten spontanen Mutationen durchaus dafür verantwortlich sein können, daß sich die Lebewesen infolge der natürlichen Selektion so stark veränderten. Entscheidend waren für die Evolution die gewaltigen Zeiträume, die ja durch Fossilienfunde nachgewiesen wurden. Rund sechs Jahrzehnte nachdem Mendels Erkenntnisse vom Naturforschenden Verein in Brunn weitgehend ignoriert worden waren, begründeten

die genannten drei Wissenschaftler die Humangenetik und bewiesen mathematisch die Möglichkeit der natürlichen Selektion. Vor allem Ronald Fisher machte in seinem 1930 erschienenen Buch *Die genetische Theorie der natürlichen Selektion* deutlich, daß die allmähliche, aber ständige Veränderung von Genen und Chromosomen die Darwinsche Evolution erklärt. Schon in seiner Jugend hatte Sewall Wright eine kleine Schrift mit dem Titel *Wunder der Natur* verfaßt. Später faszinierte ihn die Genetik, nachdem er in der *Encyclopedia Britannica* über Gregor Mendel gelesen hatte. Im Jahre 1912 schrieb er als Doktorand bei Edward East seinen ersten wissenschaftlichen Artikel, und sein letzter erschien 1988. Er interessierte sich nicht nur für die Genetik, sondern war auch in Mathematik recht begabt. Wrights Arbeiten waren bahnbrechend für die mathematische Untermauerung der Populations- und der Humangenetik sowie für die Evolutionstheorie. Seine wichtigsten Abhandlungen erschienen in vier Bänden (in den Jahren 1968, 1969, 1977 und 1978) unter dem Titel *Evolution und die Genetik von Populationen*. 1988 endete mit dem Tod von Sewall Wright eine Ära; er war damals der einzige noch lebende von den Wissenschaftlern, die im frühen 20. Jahrhundert die moderne Genetik begründet hatten.

- Die Amerikanerin Barbara McClintock (1902-1992) hatte 1927 an der Cornell University in Botanik promoviert und lehrte einige Jahre lang Genetik und Botanik. Danach forschte sie am Cold Spring Harbor Laboratory in New York. Mit umfangreichen Experimenten zu den Farben von Getreidekörnern erzielte sie neue Erkenntnisse über die Rekombination, ferner über die Existenz und die Eigenschaften gekoppelter Gengruppen und die Beziehungen zwischen bestimmten Genen. Sie blieb 50 Jahre lang am Cold Spring Harbor Laboratory und erhielt 1983 den Nobelpreis für ihre bahnbrechenden Arbeiten, mit denen sie in den 40er und 50er Jahren Funktion und Organisation von Genen aufgeklärt hatte.

Nachdem die Gene endgültig als die entscheidenden, von Mendel postulierten »Erbfaktoren« identifiziert waren, wandte sich das Interesse der Forscher ein wenig von den Prinzipien der Verer-

bung ab. Im Vordergrund standen nun die physikalischen und chemischen Bestandteile dieses geheimnisvollen und außergewöhnlichen Stückchens Materie im Zellkern. 1932 hatte James Chadwick im Atomkern das dritte Elementarteilchen, das Neutron, entdeckt. Schon zehn Jahre später konnten die Physiker die ungeheure Energie freisetzen, die im Atomkern schlummert. Erstaunlicherweise dauerte es aber viel länger, bis man Struktur und Funktionen des Zellkerns klären konnte, obwohl er doch viel größer als ein Atomkern ist und aus Abertausenden von Atomen besteht, nämlich aus hochkomplexen organischen Molekülen, die alles Leben steuern. Jedoch war es gerade diese Komplexität, die die Lösung des Rätsels so lange verhinderte. Zur selben Zeit - zu Beginn unseres Jahrhunderts -, als Ernest Rutherford die Überzeugung vertrat, daß die Kräfte im Atomkern niemals völlig zu verstehen seien, bemerkte der Genetiker Thomas Hunt Morgan über die Gene im Zellkern, daß »eine innere Kraft die wissenschaftliche Klärung des Problems verhindert«. Eine Generation später wurde diese »innere Kraft« identifiziert, und man konnte ihre Struktur und Funktion beschreiben. Dieser siebenten, jüngsten großen wissenschaftlichen Entdeckung wenden wir uns nun zu. Damit schließt sich der Kreis der drei grundlegenden Aspekte allen Lebens: Ursprung, Fortpflanzung und Evolution.

## TEIL 7

# Die Struktur des DNA-Moleküls

*Die jüngste der sieben großen wissenschaftlichen Entdeckungen, die wir betrachten, betrifft die Struktur der Desoxyribonucleinsäure oder DNA. Wir gehen also vom Aufbau der Zelle und von den Prinzipien der Genetik über zu den Komponenten und den Reaktionen von Molekülen im Zellkern. Weil alle Aspekte der Lebewesen letztlich auf molekularer Ebene bestimmt werden, mußte man mehr über das Molekül des Lebens erfahren, um das Leben besser zu verstehen. In diesem siebten Teil werden wir die Struktur und die Funktion desjenigen Moleküls betrachten, das die Grundlage allen Lebens ist und an dem sich der Mechanismus der Evolution vollzieht. Wir werden dabei erfahren, wie es zwei Wissenschaftlern im Februar 1953 gelang, die Struktur der DNA zu enthüllen - knapp ein Jahrhundert nach dem Erscheinen von Darwins Hauptwerk Die Entstehung der Arten.*

*Die Genetik brachte verschiedene Wissenschaftsgebiete zusammen, vor allem Biochemie, Biophysik und Mikrobiologie. Die daraus hervorgegangene Molekulargenetik befaßt sich mit der Untersuchung der molekularen Struktur von Genen und der Art und Weise, wie Gene die Zellen steuern. Auf diesem weiten Feld erlangte man inzwischen fundierte Kenntnisse über den Prozeß, der die Moleküle des Lebens erzeugt, und über die Vorgänge, durch die sie den Aufbau der Organismen steuern. Man weiß heute recht genau, wie unser Körper aufgebaut ist, und man ist dabei, den gesamten genetischen Code des Menschen zu katalogisieren. Mit Hilfe dieses Wissens können genetisch bedingte Krankheiten geheilt oder vielleicht sogar verhindert werden. Schauen wir uns diese faszinierende Revolution und die Möglichkeiten näher an, die sie unserem Leben bieten kann.*



## KAPITEL 18

### Das Rückgrat des Lebens

*»Es sind keine neuen wissenschaftlichen Gesetze nötig, um die Komplexität und Organisation von Lebewesen zu erklären.(...) Das Kennzeichen des Lebens (...) ist die Fähigkeit von Lebewesen, Energie aus ihrer Umgebung aufzunehmen und sie zum Aufbau ihrer eigenen komplexen Strukturen wie auch zur Fortpflanzung zu nutzen.«*

Jo Gribbin, *In Search of the Double Helix* (1985)

*»Das Buch des Lebens ist sehr umfangreich; ein typisches chromosomales DNA-Molekül in einem Menschen besteht aus rund fünf Milliarden Nucleotidpaaren. Die genetischen Instruktionen auch aller anderen Lebensformen auf der Erde sind in derselben Sprache und im selben Code geschrieben. (...) Die gemeinsame genetische Sprache ist ein Indiz dafür, daß alle Organismen auf der Erde von einem einzigen Urahn abstammen, also von einem einzelnen Wesen, das vor gut vier Milliarden Jahren das erste Leben verkörperte.«*

Carl Sagan, *The Dragons of Eden* (1977)

Was sind Gene genau, und woraus bestehen sie? Um diese Frage zu beantworten, untersuchten die Wissenschaftler zuerst die chemische Zusammensetzung des genetischen Materials und dann seine Molekülstruktur. Wie Albert Lehninger in seinem Standardwerk *Prinzipien der Biochemie* ausführte, »bestehen Lebewesen aus leblosen Molekülen, [die] allen physikalischen und chemischen Gesetzen unterliegen, die das Verhalten der unbelebten Materie bestimmen«. Doch die Moleküle, die die Essenz des

Lebens darstellen, haben eine einmalige und außerordentlich komplexe Struktur. Diese zu entschlüsseln und die Funktionen dieser Moleküle bei der Fortpflanzung zu klären, waren faszinierende und schwierige Aufgaben, deren Lösung im 20. Jahrhundert gelang.

## **Die Nucleinsäuren werden identifiziert, und die Molekulargenetik kommt auf** *Der Vorschlag eines Geheimcodes*

Schon Jahrzehnte, bevor Genetiker wie Morgan und McClintock unsere Kenntnisse über die Beschaffenheit von Genen und Chromosomen erweiterten, hatten zahlreiche Chemiker die Zusammensetzung des Zellkerns untersucht. Sie konnten dabei nicht ahnen, daß ihre Arbeiten schließlich entscheidende Informationen über die Vererbung liefern sollten. Im Jahre 1869 vermutete der Schweizer Biochemiker Friedrich Miescher (1844-1895), daß alle Zellkerne eine besondere chemische Zusammensetzung haben. In den folgenden Jahren entdeckte er im Kern einige Substanzen, die er in Proteine und Säuren auftrennte. Darauf geht die heutige Bezeichnung »Nucleinsäuren« zurück.

Auch der in Rußland geborene Chemiker Phoebus Levene (1869-1940) brachte die Untersuchung der Nucleinsäuren voran. Er hatte 1891 sein Studium an der Medizinischen Akademie in St. Petersburg abgeschlossen und emigrierte dann wegen des in Rußland zunehmenden Antisemitismus nach New York. Er studierte Chemie an der Columbia University und befaßte sich von 1905 bis 1939 am Rockefeller-Institut mit chemischen Forschungsarbeiten. 1909 erkannte er die Ribose als den Zucker in einer der beiden Arten von Nucleinsäuren, nämlich der Ribonucleinsäure (RNA). Außerdem identifizierte er bestimmte Komponenten der anderen Nucleinsäure, der Desoxyribonucleinsäure (DNA). Angesichts der im Kern vorhandenen Nucleinsäuren und Proteine glaubten Levene und viele seiner Kollegen, daß die komplexen und reichlich vorhandenen Proteinmoleküle (und nicht die DNA) alle genetischen Informationen in den Chromosomen enthielten. Leider hingen die Forscher dieser

falschen Annahme noch jahrzehntelang an, während sie den Mechanismus der Genervielfältigung in den Proteinen zu entschlüsseln versuchten. Levenes Theorie über die Funktion der DNA - nach der sie lediglich die Proteinmoleküle zusammenhalten sollte - erwies sich später als unzutreffend.

Die Arbeiten, die schließlich auf den richtigen Weg führten, wurden 1928 von dem englischen Bakteriologen Frederick Griffith (1881-1941) begonnen. Er erforschte Pneumokokken; das sind Bakterien, die Lungenentzündung (Pneumonie) hervorrufen können. Dabei entdeckte er, daß eine noch unbekannt Substanz aus den Zellen eines Stammes abgetöteter Pneumokokken in einen anderen, lebenden Stamm gelangt sein mußte, so daß Erbmerkmale des toten Stammes auf die Nachkommen des lebenden Stammes übergangen. Einige andere Wissenschaftler, darunter Oswald T. Avery (1877-1955), erkannten die Bedeutung von Griffiths Arbeit und versuchten, die Substanz zu identifizieren, auf der die genetische Transformation in den Bakterien beruhte. Erst 1944, nach über zehn Jahren, konnte Avery mit seinen Mitarbeitern das Resultat seiner Forschungen präsentieren. Jetzt war klar, daß die DNA - und nicht die Proteine oder die RNA - die Erbinformationen transportierte. Mit diesen Arbeiten war ein neues Wissenschaftsgebiet entstanden: die Molekulargenetik.

Der österreichisch-amerikanische Biochemiker Erwin Chargaff (geb. 1905) untersuchte nun die Anteile von vier Verbindungen in der DNA, nämlich von Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T). Diese Substanzen gehören zur chemischen Stoffklasse der Basen. Das sind Verbindungen, die mit Säuren reagieren und dabei Salze bilden können. 1950 publizierte Chargaff seine Ergebnisse: In der DNA sind gleich viele Einheiten Guanin und Cytosin vorhanden sowie gleich viele Einheiten Adenin und Thymin. Also ist die Summe der Einheiten von Guanin und Adenin gleich der Summe der Einheiten von Cytosin und Thymin. Diese Relationen sind Teil der sogenannten Chargaff-Regeln und sollten noch eine entscheidende Rolle bei der Aufklärung der Struktur des DNA-Moleküls spielen.

In den späten 40er und frühen 50er Jahren erforschte der amerikanische Biologe Alfred D. Hershey (geb. 1908) die DNA von Bakteriophagen, also von Viren, die Bakterien infizieren. Dabei

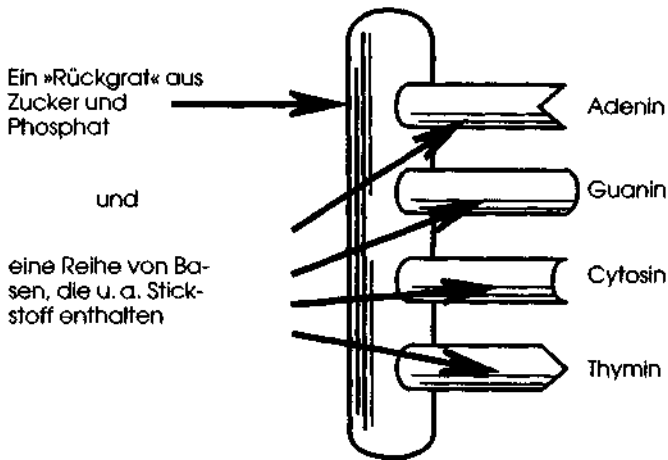


Abb. 18.1: Das »Rückgrat« und die Basen der DNA

konnte er die Ergebnisse von Avery und seiner Gruppe bestätigen, nach denen die DNA, und nicht das Protein, das genetische Material beinhaltet. Hershey erhielt 1969 den Nobelpreis für seine Arbeit. Die Untersuchungen der frühen Genetiker, wie auch die von Avery, Chargaff und Hershey, deuteten darauf hin, daß in der DNA eine Art genetischer Code festgelegt ist, der an die Nachkommen der betreffenden Lebewesen weitergegeben wird.

Wie schon erwähnt, gibt es zwei Arten von Nucleinsäuren: Die Ribonucleinsäure (RNA) und die Desoxyribonucleinsäure (DNA). In beiden Molekülen kommen die gleichen Basen vor, abgesehen davon, daß die RNA Uracil anstatt Thymin enthält. Die chemische Zusammensetzung der DNA ist in Abbildung 18.1 schematisch dargestellt.

Wie wir bald sehen werden, sind die Basen von DNA und RNA entscheidend, wenn man verstehen will, was ein Gen eigentlich ist.

## **Genetik und Chemie bringen zusammen mit der Physik den Durchbruch**

*Anleihen bei der Quantentheorie*

Die nächste Phase unserer Geschichte geht auf die Arbeiten von Wilhelm Conrad Röntgen zurück, der 1895 die heute nach ihm benannte Strahlung entdeckte, außerdem auf die Forschungen von Thomson, Becquerel, Rutherford, Bohr, Einstein, Planck und anderen. Wie in Teil 2 dieses Buches schon besprochen, wirkten vor allem diese Wissenschaftler daran mit, den prinzipiellen Aufbau des Atoms aufzuklären: Der positiv geladene Atomkern (der aus Protonen und Neutronen besteht) wird von negativ geladenen Elektronen umrundet, die sich jeweils in bestimmten Schalen aufhalten. Atome können zu Molekülen zusammentreten, indem sie Elektronen in den äußersten Schalen miteinander teilen. Die chemische Bindung zwischen den Atomen wird also durch die Elektronen bewirkt. Außerdem gibt es noch die sogenannten Wasserstoffbrücken-Bindungen, die etwas andere Eigenschaften haben als die »normalen« chemischen Bindungen. Dieselben Prinzipien, nach denen ein so einfaches Molekül wie das des Wassers ( $H_2O$ ) zusammenhält, gelten auch für die viel komplexeren - aus bis zu Milliarden Atomen bestehenden - organischen Moleküle, denen man in den Lebewesen begegnet.

Die Erkenntnisse der Chemiker und der Physiker wurden nun mit denen der Biologen kombiniert, um die wichtige Frage zu beantworten: Was ist ein Gen? Im Jahre 1935 publizierte der deutsch-amerikanische Physiker und Molekularbiologe Max Delbrück (1906-1981) gemeinsam mit zwei Biologen einen inzwischen berühmt gewordenen Artikel über die Frage, warum kurzwellige Strahlung Mutationen in genetischem Material hervorrufen kann. Delbrück fand heraus, daß die Frage mit Hilfe der Quantentheorie beantwortet werden kann, weil an Mutationen Moleküle im Zellkern beteiligt sind, die eine Energiebarriere überwinden müssen, wenn sie von einer stabilen Konfiguration zu einer anderen übergehen. Nach der Quantentheorie können die Moleküle Energie nur in bestimmten kleinsten Portionen (den »Quanten«) aufnehmen oder abgeben. Beeinflußt von Delbrücks Arbeiten, schrieb der bekannte österreichische Physiker Erwin

Schrödinger (1887-1961) im Jahre 1944 ein Buch mit dem Titel *Was ist Leben?* Hierin erläuterte er eingehend, wie die Quantenphysik die Stabilität der Moleküle in der genetischen Struktur erklärt. Damals waren die Ergebnisse von Oswald Averys Arbeiten über die DNA gerade erst publiziert worden, so daß Schrödinger in seiner Abhandlung nicht berücksichtigen konnte, daß die genetische Information in der DNA enthalten ist. Dennoch hatte sein Werk großen Einfluß auf einige andere Physiker, die auch an biologischen Themen arbeiteten; später wurde die Beziehung zwischen der DNA und Schrödingers Berechnungen deutlich.

Nach und nach erkannten auch andere Physiker die Bedeutung von Delbrücks und Schrödingers bahnbrechenden Publikationen. Außerdem gelangen den Biochemikern Linus Pauling (1901-1994) und John D. Bernal (1901-1971) wichtige Entdeckungen über die Struktur der Proteine. Davon angeregt, wandten sich nach dem Zweiten Weltkrieg etliche Physiker von der Grundlagendphysik ab und befaßten sich mit dem immer faszinierenderen und schneller expandierenden Gebiet der Biologie. Hier sahen sie die Möglichkeit, als Physiker entscheidend zum Klären biologischer Fragen beizutragen. Sie brachten in die Biologie ihre Denkweise ein, nach der alle materiellen Körper (auch organische Moleküle) Anordnungen vieler Atome sind und daß ihre Eigenschaften durch die Art und Weise zu erklären sind, wie die Atome in den Molekülen miteinander verbunden sind.

Dieses »Konvertieren« von Physikern zu Biologen war fast so, als würden Ärzte zu Ingenieuren, denn beide Gebiete schienen kaum etwas gemeinsam zu haben. Sich mit biologischen Fragen zu befassen, war also eine recht mutige Entscheidung. Die große Mehrheit der Physiker und Biologen bemerkte allerdings nicht, welche Vorteile eine solche Verknüpfung haben könnte. Aber die wenigen Forscher, die auf beiden Gebieten arbeiteten, begannen sich mit der Molekularbiologie zu befassen, und es kam der Begriff »Biophysik« auf. Sie war in ihren frühen Phasen lediglich eine Methode, die Kenntnisse über Atome und Moleküle auf biologische Fragen anzuwenden. Doch bald wurde sie ein wichtiger Teil der Molekulargenetik.

Auch Maurice H. E. Wilkins (geb. 1916), ein in Neuseeland geborener britischer Biophysiker, war von Schrödinger und seinen

Arbeiten beeinflusst. Er untersuchte mit Hilfe der Röntgenbeugung die Molekülstruktur der DNA. Bei der Beugung von Röntgenstrahlen bestimmter Wellenlängen ergibt sich aus der regelmäßigen Anordnung der Atome (vor allem in Kristallen) ein spezielles Strahlungsmuster, das man photographisch aufnehmen kann. Das Muster auf dem Röntgenfilm liefert über die Atomanordnung im untersuchten Material Informationen, die man anders nicht erhalten kann, weil die Atome so klein sind, daß sie auch in starken Mikroskopen nicht sichtbar sind. (Erst in jüngerer Zeit wurden Rasterelektronenmikroskope entwickelt, mit denen das teilweise möglich ist.) Wilkins lernte die Methoden der Röntgenbeugung kennen, als er während des Zweiten Weltkriegs zwei Jahre lang am Manhattan-Projekt (zur Entwicklung von Kernwaffen) mitwirkte und dabei auch mit Massenspektrographen arbeitete. Wieder nach England zurückgekehrt, führten er und Rosalind Franklin (1920-1958) Röntgenbeugungsuntersuchungen an Fäden aus reiner DNA durch. Ihre Aufnahmen sollten entscheidend dazu beitragen, die Struktur des DNA-Moleküls zu entschlüsseln. Gegen Ende der 40er Jahre wußten die Molekularbiologen natürlich, daß die DNA sozusagen das »Molekül des Lebens« ist, aber sie kannten seine Struktur nicht. Daher war noch unklar, wie es funktioniert und sich selbst repliziert. Doch die Zeit war reif für das Kombinieren genetischer Erkenntnisse mit neuen Befunden über die Chemie des Zellkerns. Zwei Forscher gingen nun daran, neue Ergebnisse der Biophysik mit denen anderer Fachgebiete zu verknüpfen, um - vor allen anderen - dem DNA-Molekül sein Geheimnis zu entlocken. Dieses schicksalhafte und letztlich erfolgreiche Unternehmen bescherte der Naturwissenschaft und der Menschheit einen der großartigsten Augenblicke.

### **Crick und Watson beginnen ihre Zusammenarbeit** *Eine Karriere aus reiner Neugier*

Francis Harry Compton Crick wurde 1916 in der englischen Stadt Northampton als ältester Sohn eines mittelständischen Unternehmers geboren, der mit seinem Bruder eine Stiefel- und Schuhfabrik betrieb. Northampton war damals berühmt für seine

Schuhfabrikation. Schon in jungen Jahren interessierte sich Francis sehr für wissenschaftliche Fragen. Als er acht war, kauften ihm seine Eltern das von Arthur Mee herausgegebene Kinderlexikon (*Children's Encyclopedia*), denn sie konnten seine ständigen Fragen nicht mehr beantworten. »Ich verschlang es geradezu«, schrieb Crick später. »Die Naturwissenschaften reizten mich am allermeisten. Wie sieht das Universum aus? Was sind Atome? Wie wachsen die Lebewesen?« Aber als er die faszinierenden Tatsachen bestaunte, über die er im Lexikon las, befiel ihn doch eine große Angst: »Als ich aufwuchs, (...) schien alles schon entdeckt zu sein.« Er vertraute sich mit dieser Furcht seiner Mutter an, und beide ahnten nicht, wie prophetisch ihre Beschwichtigung damals war: »Es wird noch genug übrigbleiben, was du entdecken kannst.« Nach eigener Aussage war Francis Crick in der Schule den anderen nicht voraus und zeigte auch keine hervorragenden Leistungen, aber seine Wißbegierde war kaum zu bändigen. Sein Bestreben, Antworten auf wichtige Fragen zu erlangen, die er sich schon als Kind gestellt hatte, außerdem seine ungewöhnliche Urteilskraft sowie sein streng logisches Denken sollten seinen weiteren Weg bestimmen.

Nachdem Crick 1937 sein Physikstudium am University College in London abgeschlossen hatte, forschte er über Hydrodynamik. In dieser Zeit lernte er die wissenschaftliche Methodik besonders schätzen. Zudem wurde ihm klar, daß in einigen wissenschaftlichen Disziplinen noch ebensolche Erfolge möglich sein müßten wie in der Physik des frühen 20. Jahrhunderts. Während des Zweiten Weltkriegs arbeitete Crick am Forschungsinstitut der Admiralität, wo er magnetische und akustische Minen konstruierte. Nach dem Krieg stand er mit knapp 30 Jahren vor der Frage, wie er seinen weiteren Berufsweg gestalten sollte. Wie er später schrieb, kam er zu dem Schluß: »Das, was dich am meisten interessiert, ist das, worüber du ständig redest«. Er wußte, daß das bei ihm nicht die Physik war, sondern die Biologie mit ihren damaligen Fortschritten. So traf Crick die Entscheidung über seinen weiteren Weg auf recht unkonventionelle Weise. Er wollte sich der Grundlagenforschung widmen und konzentrierte seine Interessen auf die »Grenze zwischen dem Lebendigen und dem Unbelebten«. Ihn beschäftigte dabei die Tatsache, daß noch



niemand erklären konnte, wie unbelebte Atome Leben bilden können oder wie Organismen ihre Merkmale vererben. Davon überzeugt, daß das Kriterium der Gesprächsthemen ihn zu seiner wirklichen Berufung geführt habe, gehörte er zu den wenigen waghalsigen Physikern, die nach dem Krieg zur Biologie wechselten.

Crick nahm 1946 eine Stelle am Strangeways Laboratory an, wo er die physikalischen Eigenschaften des Cytoplasmas der Zellen untersuchte. Nach rund zwei Jahren wurde ihm klar, daß »man die molekulare Struktur der Gene entschlüsseln muß«, um das Leben zu verstehen, und daß »das Nützlichste, was ein Gen tun könnte, die Steuerung der Proteinsynthese sein müßte, wahrscheinlich über eine RNA-Zwischenstufe«. Damals erfuhr Crick, daß an den Cavendish Laboratories der Universität Cambridge eine Forschungsgruppe eingerichtet wurde, die mit Hilfe der Röntgenbeugung die Struktur von Proteinen untersuchen sollte. Am gleichen Institut waren schon früher bedeutende physikalische Entdeckungen gelungen. Im Jahre 1949 trat Crick, gerade 33, in dieses Institut ein und begann im Grunde ein weiteres Aufbaustudium; nun lernte er, wie man die dreidimensionale Struktur von Proteinen ermittelt. Er hoffte dabei, daß der Ruhm dieses Instituts in der Physik sich auf die Biologie ausdehnen ließ.

In der Zwischenzeit hatte James D. Watson (geb. 1928) an der Universität von Indiana im Alter von nur 22 Jahren promoviert. Er arbeitete jetzt mit einem Stipendium der US-Regierung im Team des Biochemikers Herman Kalckar in Kopenhagen. Wie er selbst zugab, hatte er die grandiose, aber eitle Idee, er könne das Geheimnis des Lebens ergründen. »Mein Interesse an der DNA entsprang einem Wunsch, den ich zuerst am College verspürte: herauszufinden, was ein Gen ist. (...) Es war sicher besser, mir künftigen Ruhm vorzustellen, als ein angepaßter Akademiker zu werden, der niemals einen kühnen Gedanken wagte.« Führend in der DNA-Erforschung mit Röntgenbeugungsmethoden waren damals der schon erwähnte neuseeländische Biophysiker Maurice Wilkins und seine Mitarbeiterin Rosalind Franklin. Sie wirkten an der damals neu etablierten biophysikalischen Abteilung des King's College in London. Nachdem er im Frühjahr 1951 ei-

nen Vortrag von Maurice Wilkins gehört hatte, begann Watson, »sich zu überlegen, wo ich etwas darüber erfahren könnte, wie man Röntgenbeugungsaufnahmen entschlüsselt«. Ohne die Zustimmung der Behörde in Washington einzuholen, die sein Stipendium bewilligt hatte, verließ er seine Stellung und ging an die Cavendish Laboratories. Hier, wo auch Crick seit 1949 tätig war, untersuchte er die Röntgenbeugung an Kristallen.

Direktor der Cavendish Laboratories war seinerzeit der Physiker William Lawrence Bragg (1890-1971), der 1915 zusammen mit seinem Vater William Henry Bragg für ihre Arbeiten zur Röntgenbeugung den Nobelpreis erhalten hatte. Das nach ihnen benannte Braggsche Gesetz beschreibt die Beziehung zwischen dem Beugungswinkel und den Wellenlängen der Röntgenstrahlen sowie den Abständen der »Ebenen«, in denen die Atome im Kristall angeordnet sind. An den Cavendish Laboratories wollte James Watson an der Bestimmung der komplexen Struktur des Proteins Myoglobin arbeiten, das in den Muskeln vorkommt. Aber wie Wilkins und Crick hoffte Watson vor allem, daß mit Hilfe der Röntgenbeugung auch die spezielle Anordnung der Atome in der DNA zu entschlüsseln sei.

Wie Robert Shapiro in seinem Buch *The Human Blueprint* (soviel wie *Die menschliche Kopie*) schildert, kam Watson nach Cambridge »als ein im Umgang schwieriger, unordentlich gekleideter, nervöser, ehrgeiziger und angespannter junger amerikanischer Wissenschaftler«. Im Herbst 1951 lernte Francis Crick diesen brillanten, aber recht unverschämten jungen Forscher kennen. Die beiden fanden bald heraus, daß sie eine gemeinsame Passion für das so schwer faßbare Makromolekül DNA hatten, und waren beide davon überzeugt, daß dieses das Geheimnis des Lebens darstellte. So begann ihre Zusammenarbeit, die ziemlich bald zur siebten der hier behandelten großen wissenschaftlichen Entdeckungen führen sollte. Crick schrieb später, »Jim und ich kamen sofort gut miteinander aus, teils weil sich unsere Interessen verblüffend ähnelten, und teils weil - wie ich vermute - uns beiden eine gewisse jugendliche Arroganz und Skrupellosigkeit sowie etwas Ungeduld gegenüber unklarem Denken eigen war. Jim war deutlich freimütiger als ich, aber unsere Denkart war etwa die gleiche.« Es ist recht erstaunlich, daß weder Crick noch

Watson an den Cavendish Laboratories offiziell die DNA erforschten. »Ich versuchte, eine Doktorarbeit über die Röntgenbeugung an Polypeptiden und Proteinen zu schreiben«, erklärte Crick, »während Jim vorgeblich nach Cambridge gekommen war, um (...) Myoglobin zu kristallisieren«.

## **Die heimliche Suche wird zu einem Wettlauf mit den Amerikanern** *Der Pauling-Faktor*

Zu Beginn sagte Crick zu Watson, das Entschlüsseln der Röntgenbeugungsmuster der DNA-Fäden sei Maurice Wilkins und Rosalind Franklin zu überlassen. Jedoch waren sie bald unzufrieden mit den langsamen Fortschritten, die vor allem auf die gegenseitige Abneigung zwischen Wilkins und Franklin zurückzuführen waren. Daher übernahmen Crick und Watson die Analyse der Muster selbst. Aber Crick kam mit seinem Vorgesetzten, William Lawrence Bragg, nicht sonderlich gut aus. Außerdem informierte der Vorgesetzte von Wilkins und Franklin am King's College Bragg darüber, daß Crick und Watson die Arbeiten des King's College wiederholten. Daher verfügte Bragg im Herbst 1951 - schon bald nach dem Beginn der Zusammenarbeit von Crick und Watson -, daß sie ihre inoffizielle Suche nach dem Geheimnis des Lebens zu beenden und sich wieder ganz den Forschungsarbeiten zu widmen hätten, für die sie angestellt waren. Sie sollten also wieder über Protein und Myoglobin arbeiten.

Crick und Watson bekleideten weder einen Rang, noch hatten sie irgendwelche Resultate vorzuweisen, mit denen sie Bragg hätten umstimmen können. So blieb ihnen nichts anderes übrig, als ihren Neigungen heimlich nachzugehen. Wie Watson später in seinem Buch *Die Doppel-Helix* schrieb, konnten sie nicht einmal eine gelegentliche Frage an Maurice Wilkins riskieren, denn dies »hätte den Verdacht erregt, daß wir wieder daran arbeiten«. Zunächst beschränkten sie sich auf diskrete Unterhaltungen beim Mittagessen. Aber schon bald begann Watson, wie er später schilderte, »die dunklen und kühlen Tage damit zu verbringen, mehr über theoretische Chemie zu lernen oder wissen-

schaftliche Zeitschriften zu durchstöbern, in der Hoffnung, dort einen übersehenen oder vergessenen Hinweis auf die DNA zu finden«.

Doch schon bald schien auch die heimliche Fortsetzung des DNA-Projekts nicht mehr möglich, denn die Behörde in Washington widerrief im Januar 1952 Watsons Stipendium, weil er ohne Genehmigung von Kopenhagen nach Cambridge gegangen war, und verlangte seine sofortige Rückkehr in die Vereinigten Staaten. Um sein hartnäckig verfolgtes Vorhaben nicht aufgeben zu müssen, antwortete Watson ziemlich herausfordernd, daß er Cambridge intellektuell anregend finde und keineswegs plane, bald in die USA zurückzukehren.

Die beiden Wissenschaftler fühlten sich noch stärker angepornt, als sie aus dem California Institute of Technology hörten, der berühmte Biochemiker (und spätere zweimalige Nobelpreisträger) Linus Pauling sei kurz davor, die Struktur der DNA zu entschlüsseln. Dessen Sohn Peter Pauling forschte damals wie Crick und Watson an den Cavendish Laboratories; er verstärkte ihre Befürchtungen durch häufige Berichte über die Fortschritte seines Vaters hinsichtlich der DNA-Struktur. Aber eines späten Abends im Juni 1952 entwickelte Watson einen Röntgenbeugungsfilm, den er an einem DNA-Präparat aufgenommen hatte. »Als ich das noch feuchte Negativ gegen den Lichtkasten hielt«, sagte Watson später, »spürte ich, daß wir am Ziel waren. Ich sah deutliche Anzeichen für eine Helix«. Crick, der ja Physiker und Experte für Röntgenbeugung an Makromolekülen war, erkannte innerhalb von »kaum zehn Sekunden« das entscheidende Merkmal im Beugungsmuster und sah Watsons frühere Vermutung bestätigt, daß die DNA eine spiralige (helix-artige) und keine lineare Konfiguration hat.

Trotzdem waren die beiden Forscher gegen Ende des Jahres 1952 »keinen Schritt weiter als zwölf Monate zuvor«, denn sie hatten noch keinen Hinweis darauf, wie viele Stränge die Helix hatte, und konnten auch die molekulare Struktur der DNA nicht angeben. Das bedeutet, sie wußten nicht, wie die Komponenten der DNA (das Rückgrat und die vier Basen Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin) zusammenhängen. Als Peter Pauling im Dezember 1952 eines Morgens berichtete, sein Vater habe die

Struktur der DNA aufgeklärt, waren Watson und Crick sehr enttäuscht. Sie sahen den Wettlauf verloren und damit ihre Chancen auf einen Nobelpreis entschwinden. Doch es vergingen einige Wochen, ohne daß aus dem California Institute of Technology konkrete Neuigkeiten über Paulings Fortschritte kamen. Daraufhin vermuteten die beiden, Pauling habe die DNA-Struktur wohl doch nicht gefunden, vor allem weil er keinen Zugang zu den Röntgenbeugungsaufnahmen von Wilkins und Franklin am King's College gehabt hatte.

Schließlich zeigte Peter Pauling seinen Kollegen Crick und Watson das Manuskript seines Vaters. Zu ihrer unsagbaren Erleichterung zeigte es eine dreikettige Helix mit einem Zucker-Phosphat-Rückgrat in der Mitte. Sie hatten gut ein Jahr zuvor ebenfalls die Möglichkeit eines dreikettigen Moleküls erwogen, waren aber zu dem Schluß gekommen, daß sie ausscheidet. Watson erinnerte sich: »Alles, was ich über die Chemie von Nucleinsäuren wußte, deutete darauf hin, daß Phosphatgruppen niemals gebundene Wasserstoffatome enthalten. (...) Aber irgendwie war Linus Pauling, zweifellos einer der scharfsinnigsten Chemiker, zum entgegengesetzten Ergebnis gekommen. Wir waren also noch im Rennen.«

Crick und Watson wußten jedoch, daß Pauling - sobald er seinen Irrtum erkannte - noch vor ihnen die richtige Struktur finden könnte. Erstmals, seit Bragg ihnen die Arbeit an der DNA untersagt hatte, trugen ihm Crick und Watson ihre Angelegenheit offen vor, denn nun war es dringend geboten, daß sie sich wieder ausschließlich mit der DNA beschäftigten, um den Forschern jenseits des Atlantik zuvorzukommen. Crick und Watson schätzten, daß Pauling etwa sechs Wochen benötigte, um zu bemerken, daß seine Drei-Ketten-Theorie nicht haltbar war.

## **Röntgenbeugung und Quantenmechanik beantworten die Fragen**

*Keine Experimente, aber ein Modell  
aus Holz und Metall*

Crick und Watson hatten nun eine gewisse Galgenfrist. Zunächst mußten sie an die neuesten Resultate von Maurice Wilkins und Rosalind Franklin am King's College gelangen. Als Watson im Januar 1953 Wilkins aufsuchte, war er sehr verblüfft: Wilkins und Franklin hatten nicht nur eindeutige Indizien für eine Helix-Struktur ermittelt, sondern auch entscheidende Parameter, aus denen Watson und Crick unmittelbar folgern konnten, daß die Helix zwei Ketten hat. Obwohl die Röntgenbeugungsaufnahmen schon ein Jahr alt waren, hatten Wilkins und Franklin ihre Bedeutung sowie die Hinweise auf die Helix-Struktur nicht erkannt. Für Watson und Crick waren sie aber offensichtlich. Watson erklärte später: »Als ich die Aufnahmen sah, stand mir der Mund offen, und mein Puls beschleunigte sich.«

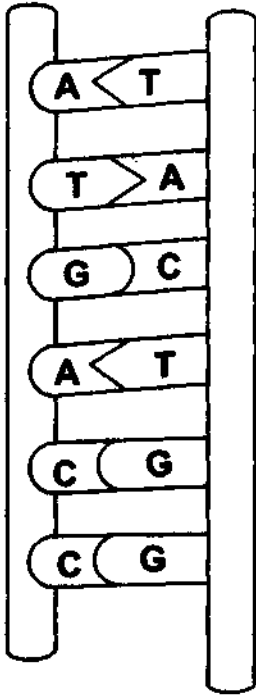
Watson eilte an die Cavendish Laboratories zurück und baute ein Helix-Modell mit zwei Ketten. »Wichtige biologische Objekte treten paarweise auf«, meinte er. Als Bragg hörte, was Watson im King's College erfahren hatte, ermunterte er ihn in seinem Wettlauf gegen Pauling, während Crick noch behutsam auftreten mußte, weil er Braggs Wohlwollen noch nicht ganz wiedererlangt hatte. Crick und Watson verrannten sich in den folgenden Wochen noch in etlichen Sackgassen. Der amerikanische Kristallograph Jerry Donahue brachte sie schließlich auf die richtige Spur: Er informierte sie über bestimmte quantenmechanische Aspekte der Wasserstoffbindungen und machte sie darauf aufmerksam, daß sich (gemäß den Chargaff-Regeln) Adenin nur mit Thymin und Guanin nur mit Cytosin verbindet. Gegen Ende Februar 1953, einen Tag nach ihrem Gespräch mit Donahue, erkannte Watson plötzlich, daß »ein von Wasserstoffbindungen zusammengehaltenes Adenin-Thymin-Paar dieselbe Form hat wie ein Guanin-Cytosin-Paar«. Diese Paarbildung löste ihr letztes Problem, denn sie erklärt die identischen Formen zweier verschiedener Basenpaare und die gleichmäßigen Drehwinkel der Doppel-

helix-Struktur. Das war das letzte Steinchen im Mosaik. Nun konnten sie die mathematischen Berechnungen abschließen und ein Modell aus Holz und Metall konstruieren.

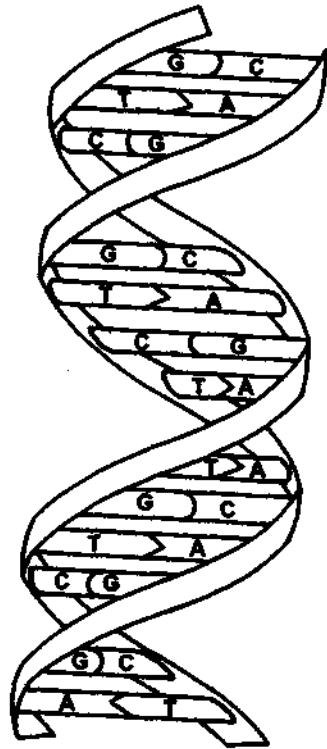
Es erscheint unglaublich, aber in ihrer 18monatigen Zusammenarbeit (vom Herbst 1951 bis zum März 1953) führten Crick und Watson kein einziges Experiment durch, um die Struktur des DNA-Moleküls zu bestimmen. Sie forschten auf Gebieten, die mit ihrer Suche nach der Doppelhelix zusammenhingen, untersuchten also die chemische Basenpaarung und erstellten Röntgenbeugungsaufnahmen des Tabakmosaikvirus; aber sie konzipierten keine Experimente zur DNA-Struktur. Sie führten nur theoretische Diskussionen und erstellten Modelle. Im Hinblick auf die relativ kurze Zeit, die sie der Ermittlung der Struktur wirklich widmeten, meinte Crick:

*»Wir befaßten uns bis Ende 1951 intensiv mit Modellvorstellungen, aber danach wurde mir verboten, (...) daran weiterzuarbeiten, weil ich noch Doktorand war. Im Sommer 1952 hatte ich etwa eine Woche lang experimentiert, um herauszufinden, ob ich Hinweise auf eine Basenpaarung in Lösung finden könnte. (...) Der letzte Anlauf [im Februar und März 1953] (...) dauerte nur ein paar Wochen.«*

Die erste von vier Publikationen erschien am 23. April 1953 in der Zeitschrift *Nature*. Darin wurde die Struktur der DNA beschrieben und dargelegt, daß diese die Produktion von Proteinen steuert, wie es Crick schon 1948 vermutet hatte. Die wesentlichen Aspekte der Doppelhelix, über die hier berichtet wurde, sind in Abbildung 18.2 gezeigt: zwei spiralförmige Ketten, die antiparallel verlaufen, mit einem außen liegenden Rückgrat aus Zucker und Phosphat sowie innen befindlichen Basen (Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin). Aufgrund der Bindungswinkel, die die Bestandteile der DNA einschließen, besteht jedes DNA-Molekül aus zwei parallelen, gewundenen Strängen, ähnlich wie die Geländer an einer Wendeltreppe. Daher rührt auch die sofort berühmt gewordene Bezeichnung *Doppelhelix* (soviel wie *Doppelwindung*).



Rückgrat und Basen  
(siehe Abb. 18.1)



Rückgrat und Basen in  
Form einer Doppelhelix

Abb. 18.2: Die Doppelhelix

Die Abbildung 18.2 stellt eine ähnliche Nucleinsäure dar wie Abbildung 18.1, aber zusammen mit ihrem Gegenstück. Dabei ist zu beachten, daß Adenin nur mit Thymin »zusammenpaßt«, ähnlich wie Guanin mit Cytosin. Das liegt an der jeweiligen Anordnung der Wasserstoffbindungen. Hieran wird deutlich, daß sich die Biologen mit denselben Kräften befassen müssen wie die Physiker und die Chemiker. Nur so konnte die DNA-Struktur aufgeklärt werden. Wie aus Abbildung 18.2 hervorgeht, sind die gepaarten Basen sozusagen übereinandergestapelt. Milliarden von



ihnen vereinigen sich zu fadenähnlichen Gebilden, den Chromosomen, die in fast allen Zellen der Lebewesen vorliegen. Im Stadium der Interphase (siehe Kapitel 16), in dem sich die Zellen nicht teilen, umfließt das DNA-Material (Chromatin) als eine Doppelhelix den Kern, ohne aber zu Chromosomen organisiert zu sein. Wenn die Zellen in der Interphase ein entsprechendes Signal empfangen und sich dann zu teilen beginnen, ballt sich die DNA zu den Strukturen zusammen, die wir in der Prophase als Chromosomen erkennen, wie es in Abbildung 16.3 gezeigt wurde.

## **Die Funktion der DNA verstehen** *DNA macht RNA macht Protein*

Wie auch andere bedeutende wissenschaftliche Erkenntnisse kann man Struktur und Funktion der DNA auf begrifflicher Ebene verstehen, ohne dabei die verschiedenen Aspekte des Moleküls oder die Röntgenbeugung genau zu kennen, die für Crick und Watson so wichtig waren. Die Tatsachen, daß das DNA-Molekül eine Doppelhelix ist und daß es sich selbst replizieren (verdoppeln) kann, werden stets betont. Dagegen wird seine entscheidende Funktion oft nicht angemessen beschrieben. Um die DNA wirklich zu verstehen, muß man die Fähigkeit oder Funktion betrachten, die dupliziert wird. Was genau tut die DNA? Sie steuert Aufbau, Struktur und Funktionen des gesamten Organismus, indem sie unmittelbar die Produktion von Proteinen lenkt. Sie kann präzise dupliziert werden, so daß jede neue Zelle, die gebildet wird, der ursprünglichen exakt gleicht. Die Fähigkeiten, Proteine zu produzieren und sich selbst zu replizieren, sind gleichermaßen einem Bakterium, einem Protozoon oder einer menschlichen Lungen- oder Leberzelle eigen.

Proteine werden nur aus Aminosäuren aufgebaut (im Unterschied zu den Nucleinsäuren DNA und RNA). Eines der Strukturmerkmale von Aminosäuren sind die vier Bindungen an jedem Kohlenstoffatom, das ja in seiner äußersten Elektronenschale vier ungepaarte Außen- oder Valenzelektronen aufweist. Auf diesen vier Bindungen beruht die Vielfalt der organischen Verbindungen, so daß der Kohlenstoff eines der wichtigsten che-

mischen Elemente in der belebten Natur ist. Es gibt nur zwanzig verschiedene biologisch bedeutsame Aminosäuren. Aber aus ihnen sind alle rund 50000 verschiedenen Proteine unseres Körpers aufgebaut, von denen die meisten übrigens nur bei unserer Art vorkommen. Das bedeutet, aus nur 20 Aminosäuren können 50000 verschiedene lange, gefaltete Molekülketten entstehen.

Weil die Aminosäuren die Bestandteile der Proteine sind, stellen sie die Grundbausteine des Lebens dar. Proteine sind keineswegs bloß Nährstoffe, die wir mit Fleisch oder anderen Nahrungsmitteln aufnehmen. Diese komplexen Moleküle haben in unserem Organismus vielfältige Funktionen, beispielsweise als Strukturkomponenten wie das Collagen (das unsere Organe zusammenhält), ferner als Hormone, Sauerstoffträger oder Antikörper (die im Blut zirkulieren, um uns vor Infektionen zu schützen). Weiterhin können sie essentielle Enzyme sein (die chemische Reaktionen und Veränderungen im ganzen Körper auslösen). Angesichts der Komplexität und Allgegenwart von Proteinen in jeder Zelle überrascht es nicht, daß Phoebus Levene und andere Biochemiker lange davon überzeugt waren, daß Gene aus Proteinen anstatt aus der DNA bestehen.

Die Abbildung 18.3 zeigt, daß Gene aus DNA bestehen und sich im Zellkern zu Chromosomen formieren. Rote Blutzellen haben keine Chromosomen, und jede menschliche Ei- oder Samenzelle hat 23 Chromosomen. Abgesehen von diesen Ausnahmen hat der Kern jeder menschlichen Zelle 46 Chromosomen, und zwar 22 Paare fast identischer Chromosomen sowie beim Mann die XY-Chromosomen bzw. bei der Frau die XX-Chromosomen. Bestimmte Gene, die sich auf dem Y-Chromosom befinden, sind also für die »Männlichkeit« notwendig. Jedes menschliche Chromosom besteht aus einer Doppelhelix mit durchschnittlich rund 100 Millionen Nucleotiden (also verschiedenen Sequenzen der Basen A, C, G und T) in jedem Strang.

Nun können wir die weiter oben gestellte Frage genauer beantworten, was ein Gen eigentlich ist:

Ein Gen ist ein Abschnitt der DNA, der für ein bestimmtes Erbmerkmal steht. Oft sind mehrere Gene für eines der unzähligen Erbmerkmale verantwortlich, z. B. Haarfarbe, Größe oder Nasenform. Die jeweiligen Sequenzen der Basen (A, C, G oder T), die das

DNA-Doppelhelix:  
A-A' ist identisch mit  
B-B'

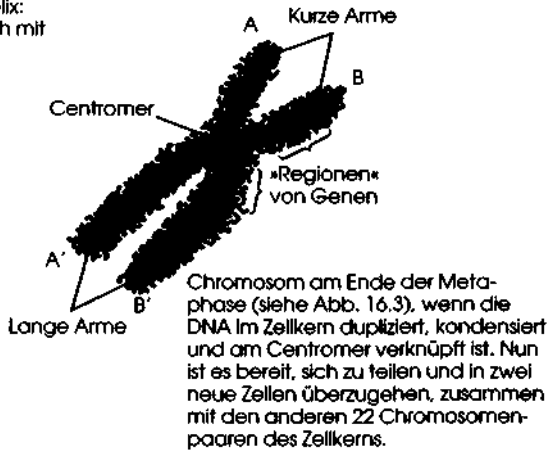


Abb. 18.3: Zeichnung nach einer elektronenmikroskopischen Aufnahme des menschlichen Chromosoms Nummer 12.

Gen ausmachen, entsprechen normalerweise einem einzigen Protein oder der komplementären RNA. Unter einem Gen versteht man daher eine komplette funktionale Einheit mit den DNA-Sequenzen, die das Protein festlegen (»das Protein codieren«), und den DNA-Sequenzen, die den Prozeß steuern, aber nicht selbst das Protein codieren. Jedes Chromosom ist eine Kette oder ein Strang aus Tausenden miteinander verbundener Gene. Das menschliche Genom oder Human-Genom (d. h. die gesamte genetische Ausstattung eines Menschen) besteht aus rund 100000 Genen, also aus 100000 spezifischen Sequenzen aus nur drei verschiedenen Buchstaben. Bestimmte Gene sitzen in bestimmten »Regionen« in jedem der 46 menschlichen Chromosomen.

Jeder DNA-Strang ist rund 600000mal länger, als er dick ist. Gestreckt wäre er fast einen Meter lang. Wenn sich die Zelle, ihr Kern und die Chromosomen teilen, dann dient jeder Strang als Matrize oder Schablone für die Bildung eines neuen, gleichartigen Stranges in jeder neuen Zelle. Die Grundlage dafür sind die Struktur und die Basenpaarung, die von Crick und Watson entdeckt wurden. Damit ist auch der Aspekt der DNA erklärt, den man normalerweise mit der Doppelhelix assoziiert, nämlich ihre

Fähigkeit, sich selbst zu replizieren. Mit anderen Worten: Wenn während der Zellteilung (die in unserem Organismus pro Sekunde mehrere tausend Male erfolgt) die DNA repliziert wird, dann wird auch ihre Fähigkeit übergeben, die Zell- und die Körperfunktionen zu steuern, indem sie die Proteinproduktion lenkt.

Damit sind wir wieder bei der Hauptfunktion der DNA, also der Steuerung der Proteinsynthese. Weil die wertvollen Gene im Zellkern geschützt vorliegen (wie es in Abbildung 16.1 angedeutet wurde), müssen so etwas wie Arbeitskopien der Gene erstellt werden, die den Zellkern verlassen können, um in anderen Teilen der Zelle die Proteinproduktion zu steuern. Diese »Blaupausen« von Genen werden durch die andere Nucleinsäure, nämlich die RNA, hergestellt, die aus Adenin, Cytosin und Guanin sowie Uracil anstatt Thymin besteht. Durch bestimmte Enzyme wird die DNA-Leiter in der Mitte der »Stufen« gespalten. Das bedeutet, der »Reißverschluß« der Basen wird längs der Mitte - an ihren Wasserstoffbindungen - geöffnet, und aus der Doppelhelix entstehen zwei Einzelspiralen mit »halben Stufen«, deren Enden freiliegen. Es werden also die Bindungen zwischen den beiden Strängen aufgebrochen, die A mit T sowie C mit G verknüpfen.

Wie wir in Kapitel 19 noch sehen werden, ist ein Codon, d. h. eine Sequenz von drei dieser vier Basenpaare, nötig, um ein »Wort« zu bilden, das für eine bestimmte Aminosäure steht; siehe Tabelle 18.1. Weil sich die Aminosäuren zur Bildung von Proteinen seitlich aneinander anreihen müssen, legen die Sequenzen dieser dreibuchstabigen Codons entlang der DNA-Stränge die Proteine fest, die für jeden von uns kennzeichnend sind.

- Eine spezifische dreibuchstabige Sequenz der Basen (ein Codon) entspricht einer der zwanzig Aminosäuren. Aber eine Aminosäure kann unterschiedlichen Codons entsprechen.
- Die Aminosäuren werden in einer bestimmten Reihenfolge miteinander verknüpft, so daß im menschlichen Körper rund 50000 verschiedenartige Proteine entstehen können. Jede zugehörige Kombination von Codons ist ein Gen.
- Beim Menschen sind rund 100 000 Gene in 46 Chromosomen angeordnet, die sich in jedem Zellkern befinden (außer in den roten Blutzellen). Sie verdichten sich während der Zellteilung zu dieser leicht erkennbaren Form (siehe Abbildung 18.3).

DNA-Triplett	RNA-Triplett	Aminosäure	DNA-Triplett	RNA-Triplett	Aminosäure
AAA	UUU	Phenylalanin (1)	ACA	UGU	Cystein (10)
AAG	UUC		ACG	UGC	
AAT	UUA	Leucin (2)	ACC	UGG	Fryptophan (11)
AAC	UUG		ATA	UAU	Tyrosin (12)
GAA	CUU		GCA	CGU	Arginin (13)
GAG	CUC		GCG	CGC	
GAT	CUA		GCT	CGA	
GAC	CUG		GCC	CCG	Histidin (14)
AGA	UCU	TCT	AGA		
AGG	UCC	TCC	AGG		
AGT	UCA	Serin (3)	GTA	CAU	Histidin (14)
AGC	UCG		GTG	CAC	
TCA	AGU	Prolin (4)	GTT	CAA	Glutamin (15)
TCG	AGC		TTA	AAU	Asparagin (16)
GGA	CCU		TTG	AAC	Lysin (17)
GGG	CCC		TTT	AAA	
GGT	CCA		TTC	AAG	Glycin (18)
GGC	CCG		CCA	GGU	
TAA	AUU	CCG	GGC		
TAG	AUC	Isoleucin (5)	CCT	GGA	
TAT	AUA		CCC	GGG	
TAC	AUG	Methionin (6)	CTA	GAU	Asparaginsäure (19)
TGA	ACU	Threonin (7)	CTG	GAC	
TGG	ACC		CTT	GAA	Glutaminsäure
TGT	ACA		CTC	GAG	
TGC	ACG		ATT	UAA	(Termination: Ende des Codes)
CAA	GUU	ATC	UAG		
CAG	GUC	ACT	UGA		
CAT	GUA	Alanin (9)			
CAC	GUG				
CGA	GCU				
CGG	GCC				
CGT	GCA				
CGC	GCG				

Tab. 18.1: Die genetischen Codes für die Aminosäuren

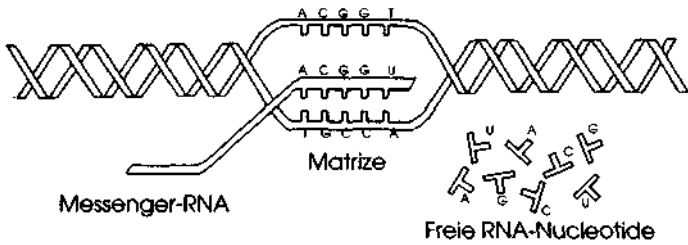


Abb. 18.4: Die Bildung der Messenger-RNA.

Bei der Bildung dieser Codes bewegt sich die RNA-Polymerase entlang des DNA-Moleküls und ermöglicht es den RNA-Molekülen, die im Kern frei vorliegen (und entsprechende Basensequenzen haben), sich zusammenzuballen und sich an die nun freiliegenden A-, C-, G- und T-Punkte der ursprünglichen DNA-Stränge anzureihen. Die RNA-Polymerase fertigt so eine exakte Transkription (d. h. Abschrift) der DNA an - abgesehen davon, daß hier Uracil anstatt Thymin mit Adenin verknüpft wird. Diese Kopie nennt man Boten- oder Messenger-RNA; siehe Abbildung 18.4.

Wenn die RNA-Polymerase am DNA-Molekül das »Stopzeichen« am Ende eines jeden Gens erreicht hat, trennt sie sich zusammen mit der neu entstandenen Messenger-RNA ab, die nun den Zellkern verläßt und auf eines der vielen Ribosomen in der Zelle übergeht. Das Ribosom liest die RNA-Botschaft (die in dreibuchstabigen »Wörtern« vorliegt) und fügt gemäß der jeweiligen Basensequenz des Codons eine Reihe von Aminosäuren zusammen, die dem in der Zelle frei vorliegenden Vorrat entnommen werden. Dieser Vorgang macht also aus der »Skizze« ein bestimmtes »ausgeschriebenes« Protein. Und die Sprache, in der dieses geschrieben wird, sind die ursprünglichen dreibuchstabigen Basensequenzen in der DNA, die aber im Zellkern verblieb. Jedes neu gebildete Protein reflektiert demnach einen kleinen Abschnitt der langen DNA-Stränge, die sämtliche dreibuchstabigen Codes für zigtausend verschiedene Proteine enthalten.

So wie sich die RNA-Polymerase nach und nach an die freiliegenden G-C- und A-T-Basenpaare anschmiegt, um die Messenger-RNA zu erzeugen, hangelt sich das Ribosom an der Messen-

ger-RNA entlang, um ein Protein hervorzubringen. Schritt für Schritt werden auf diese Weise alle lebenswichtigen Proteine in unserem Körper produziert. In jeder Sekunde führen Tausende von Ribosomen in jeder Zelle unseres Körpers Millionen von Reaktionen aus, die die in Tabelle 18.1 aufgeführten Aminosäuren hervorbringen. Somit bilden sich in jeder Sekunde rund 2000 neue Proteinmoleküle. Jedes Protein, das das Ribosom verläßt und aus der Zelle austritt, hat eine besondere Form, abhängig von den chemischen Bindungen der Aminosäuren, aus denen es besteht. Aufgrund der jeweiligen Molekülgestalt und chemischen Zusammensetzung kann jedes der 50000 verschiedenartigen Proteine seine spezifische Funktion im Körper wahrnehmen.

Und jetzt können wir das Prinzip der Vererbung verstehen. Weil die Nucleinsäuren (DNA und RNA) die Proteinsynthese steuern und weil die Gesamtheit der Proteine für jede Person charakteristisch ist, ist es letztlich die DNA, die alle Erbmerkmale festlegt. Jeder dreibuchstabile Code stellt die Instruktion für den Einbau einer bestimmten Aminosäure dar (siehe Tabelle 18.1). Das gilt ebenso für den Menschen wie für Insekten oder Mäuse. Aber auch innerhalb einer Art ist jedes Lebewesen ein wenig anders als die anderen. Jede Person ist einmalig, weil ihre Sequenz jener dreibuchstabigen Codons einzigartig ist. Man kann sagen, die Codesequenzen, die die Bildung von Haaren im Fell einer Maus bewirken, sind den Sequenzen ähnlich (aber nicht gleich), die den Haarwuchs auf unserem Kopf bewirken. Und die Codesequenzen für das Kopfhair zweier Menschen sind einander sehr viel ähnlicher als die entsprechenden Sequenzen von Mensch und Maus. Aber auch die jeweiligen Sequenzen zweier Menschen sind niemals gleich. Das ist der Schlüssel zum Verständnis des Erbmaterials und der Funktion der DNA, und deswegen lautet ein zentraler Lehrsatz der Molekularbiologie: »DNA macht RNA macht Protein«.

Crick schrieb Watson die entscheidende Entdeckung beim Aufklären der DNA-Struktur zu, nämlich die der Basenpaarung von Adenin mit Thymin bzw. von Guanin mit Cytosin. Laut Watson hatte dagegen Crick herausgefunden, welche Bedeutung die Chargaff-Regeln über die relativen Basenmengen haben, und er

hatte bemerkt, daß sich entsprechende Molekülteile aufgrund von gerichteten Kräften in den Molekülen anziehen. Das bedeutet, Crick erkannte das Schema der Gen-Replikation während der Zellteilung. Wie James Watson meinte, hatte »Francis [Crick] geahnt, daß bei der DNA-Replikation spezifische Anziehungskräfte zwischen den ebenen Oberflächen der Basen eine Rolle spielen«.

In ihrem ersten Artikel für die Zeitschrift *Nature* (über die Art und Weise, wie die DNA die Proteinsynthese steuert), übten sich Crick und Watson in wissenschaftlichem Understatement: »Es ist unserer Aufmerksamkeit nicht entgangen, daß die spezifische Paarung, die wir postulierten, unmittelbar einen möglichen Verdopplungsmechanismus für genetisches Material vermuten läßt«. Fünf Wochen später publizierten Crick und Watson einen zweiten Artikel in *Nature*, diesmal über die Fähigkeit des DNA-Moleküls, genetisches Material zu duplizieren.

Jahre später schrieb Crick, jene Vorstellungen, die zum Verstehen der DNA-Struktur nötig waren, seien

*»...lächerlich einfach, denn sie widersprechen nicht dem gesunden Menschenverstand. (...) Ich meine, es gibt einen guten Grund für die Einfachheit der Nucleinsäuren. Sie gehen wahrscheinlich auf den Ursprung des Lebens zurück. (...) Zu jener Zeit mußten die Mechanismen so einfach sein, sonst hätte sich das Leben nicht entwickeln können. Die Doppelhelix ist ein wirklich bemerkenswertes Molekül. Der moderne Mensch ist vielleicht 50000 Jahre alt, (...) aber DNA und RNA gibt es schon seit mindestens einigen Milliarden Jahren. (...) Wir sind die ersten Lebewesen auf der Erde, die die Existenz der DNA erkennen konnten.«*

Die Entdeckung der DNA-Struktur war der Höhepunkt von acht Jahrzehnten Forschung vieler Wissenschaftler. Während ihrer anderthalbjährigen Zusammenarbeit führten Crick und Watson dreißig oder vierzig einzelne Schritte (auch in falsche Richtungen) aus, bis sie zur Lösung gelangten. Dabei basierte jeder Schritt auf anerkannten wissenschaftlichen Fakten oder Theorien, die jeweils einem Vorgänger oder Zeitgenossen zugeschrieben werden konnten. Dazu zählten Persönlichkeiten wie Bragg, Chargaff, Pauling, Donahue, Wilkins und Franklin.



Die großspurige Voraussage des 22jährigen James Watson, er werde das Geheimnis des Lebens ergründen, und Francis Cricks Wunsch, die »Grenze zwischen Lebendigem und Unbelebtem« zu verstehen, ferner die Prognose seiner Mutter (»es wird noch genug übrig sein, was du entdecken kannst«) - alles hatte sich im Jahre 1953 bewahrheitet. Crick und Watson erhielten 1962 zusammen mit Maurice Wilkins den Nobelpreis.

## KAPITEL 19

### Das menschliche Genom

*»Wenn wir mit den Passagen unseres genetischen Textes experimentieren, stellen wir vielleicht fest, daß bestimmte Auswahlmöglichkeiten (...) besser als andere funktionieren. (...). Ein Ehepaar in der Zukunft könnte den Wunsch haben, daß ihr Kind zwei Kopien eines mit musikalischem Talent verknüpften Gens besitzen, aber eines verlieren sollte, das eine größere Anfälligkeit für umweltbedingten Krebs verleiht.«\**

Die Ergebnisse von Crick und Watson machten unmittelbar klar, daß es möglich sein muß, den genetischen Plan eines jeden Organismus zu lesen und zu interpretieren, obwohl dieser Plan beim Menschen aus drei Milliarden »Buchstaben« besteht, die die 100000 Gene bilden. Inzwischen kann man im Prinzip die exakte genetische Ausstattung von Menschen entziffern. Diese Möglichkeit verheißt die Prävention von Krankheiten und die Verbesserung der Lebensbedingungen.

#### **Das Entziffern des genetischen Codes** *Auch eine Mondlandung*

Wie wir in Kapitel 18 gesehen haben, stellt ein Gen (in Form einer Sequenz von G-C- und A-T-Nukleotiden) den chemischen »Code« dar, der seinerseits die Produktion eines Proteins spezifiziert.

\* Robert Shapiro, *Der Bauplan des Menschen. Das Genomprojekt*, Bern, München, Wien 1991, S. 379 u. 383

Der Physiker George Gamow leistete 1954 (ein Jahr nach der Entdeckung von Crick und Watson) einen bedeutenden Beitrag zur Genetik. Gamow war übrigens auch der Urheber des Tröpfchen-Modells des Atomkerns und der erste Wissenschaftler, der im Zusammenhang mit der Expansion des Universums vom »Urknall« sprach. Gamow postulierte nun, daß der genetische Code in Sätzen von je drei der vier Basen »geschrieben« sei, die man seitdem »Tripletts« (Dreiergruppen) von Nucleotiden nennt. Wir haben in Kapitel 18 schon besprochen, daß die Sequenz der Basen im DNA-Molekül auch festlegt, welche der zwanzig Aminosäuren in welcher Reihenfolge zum betreffenden Protein kombiniert werden. Mit jeweils zwei der vier Buchstaben A, C, G und T sind nur 16 verschiedene »Wörter« zu bilden. Aber es sind 64 »Wörter« oder Kombinationen möglich, wenn man jeweils drei der vier Buchstaben ansetzt. Das sind also mehr als genug Möglichkeiten, um die Synthese von Proteinen aus den 20 Aminosäuren zu codieren. Beginnend mit der ersten Ur-Zelle, entwickelte sich diese einfache »Konstruktions«-Vorschrift im Laufe der natürlichen Selektion, die wir in den Teilen 5 und 6 besprachen.

In Tabelle 18.1 wurden die DNA-Codes für alle 20 Aminosäuren aufgeführt, einschließlich der zugehörigen komplementären RNA. Im menschlichen Organismus können 12 Aminosäuren (die sogenannten nicht-essentiellen Aminosäuren) synthetisiert werden, während die restlichen 8 sogenannten essentiellen Aminosäuren mit der Nahrung zugeführt werden müssen. Wieder gilt der Grundsatz »DNA macht RNA macht Protein«. Außer bei einigen Viren wird die aus dreibuchstabigen Wörtern bestehende DNA-Sequenz bei allen Lebewesen durch die RNA kopiert, also durch den genetischen Boten (englisch: messenger). Dieser Kopiervorgang heißt Transkription. Die Boten-RNA lenkt die sogenannte Translation, also die Synthese oder Produktion von Proteinen. Die 20 Aminosäuren und die dreibuchstabigen Codes für jede von ihnen sind allen Lebewesen gemeinsam, aber die einzelnen Proteine, die aus den Aminosäuren erstellt werden, unterscheiden sich von Art zu Art.

Die meisten Proteinarten enthalten pro Molekül rund 100 Aminosäuren, so daß einige Aminosäuren im Proteinmolekül mehrfach vorkommen. Deshalb machen rund drei Milliarden

Buchstaben (A, C, G oder T) die 100000 Gene aus. Jede Zelle »kennt« ihren genetischen Code. Daher kann ein vielzelliger Organismus seine Funktionen einfach dadurch wahrnehmen, daß er Instruktionen ausführt, die zum Zusammensetzen des »Projekts« nötig sind. Wenn vielleicht 50 Instruktionen nötig sind, nach denen ein Möbelstück oder ein Motor zusammengebaut wird, dann ist das »Zusammensetzen« eines lebendigen Organismus gemäß einigen Millionen Instruktionen zwar quantitativ anders, aber im Prinzip dasselbe.

Ungefähr einmal bei je 10 Milliarden Duplikationen einer Basensequenz unterläuft der Replikations-»Maschinerie« ein Fehler, indem ein Buchstabe übersprungen, zugefügt oder fälschlich eingesetzt wird. Dadurch entsteht eine sogenannte Mutation, die an alle weiteren Zellgenerationen weitergegeben wird, denn falsche DNA-Sequenzen werden genauso kopiert wie richtige. Einige Mutationen sind »still«, das heißt sie beeinflussen nicht die Funktion des Proteins, das durch das mutierte Gen erzeugt wird. Wie in Kapitel 17 erwähnt, kann in seltenen Fällen eine Mutation ein Gen mit einer verbesserten Funktion hervorbringen. Dann kann sich die betreffende Art im Zuge der natürlichen Selektion allmählich in positiver Weise verändern. Viel häufiger aber variieren die Mutationen entscheidende Proteine, so daß der Organismus geschädigt wird oder gar stirbt.

Nachdem Crick und Watson die DNA-Struktur geklärt hatten, versuchten viele Wissenschaftler, die genetischen Instruktionen zu entziffern. 1956 entdeckte der englische Biochemiker Vernon Ingram (geb. 1924), daß die Sichelzellanämie auf einer Mutation einer Nucleotidsequenz beruht, die eine bestimmte Aminosäure (die Glutaminsäure) im roten Blutfarbstoff Hämoglobin codiert. Dieses Protein befördert den Sauerstoff in unseren roten Blutzellen. Damit war die entscheidende Verknüpfung zwischen den Codesequenzen und den Funktionen des Organismus bewiesen. Das betreffende dreibuchstabige Nucleotid-»Wort« (das Teil des DNA/RNA-Codes für Glutaminsäure ist) muß - wie man heute weiß - richtig »GAG« lauten; siehe Tabelle 18.1. Bei den an Sichelzellanämie leidenden Menschen lautet es dagegen »GTG«. Diese Mutation in einem Gen, also ein falscher Code für eine Aminosäure im Hämoglobin, bewirkt eine veränderte Form des

Proteinmoleküls, das deswegen den Sauerstoff schlechter transportiert. Rote Blutzellen mit solchen anomalen Hämoglobinmolekülen sind übrigens sichelartig verformt. Der Sauerstoffmangel kann zu Schäden in anderen Organen des Körpers führen, ferner zu Anfälligkeit gegenüber Infektionen und sogar zum Tod. Die Sichelzellanämie ist die bekannteste genetische Krankheit unter Farbigen. An ihr leiden Millionen Menschen auf der ganzen Welt - und das nur wegen eines einzigen falschen Buchstabens im genetischen Text.

Eine Mutation kann auch Folge eines korrekt codierten Gens sein, das aber an der falschen Stelle im Chromosom eingereiht wurde. Wie wir in Kapitel 16 sahen, sind während der Interphase und der Prophase der Zellteilung lange DNA-Fäden im Zellkern ungeordnet verknäult und beginnen sich zu den Chromosomen zu verdichten. In diesem Stadium sind die individuellen Codesequenzen, also die Gene, mit Hilfe spezieller Präparationsmethoden als diskrete (einzelne) Gruppen in den Chromosomen erkennbar. Normalerweise ordnet sich jedes Gen im selben Chromosom immer an derselben Stelle ein. Aber während der DNA-Replikation und der Chromosomenabtrennung können sich einige Gene, die in einem bestimmten Chromosom sitzen sollten, dort an der falschen Stelle oder gar in einem anderen Chromosom einreihen. Wie der Genetiker Edward East als erster erkannte, können solche chromosomalen Mutationen, wie auch Mutationen innerhalb der dreibuchstabigen Codes, entweder zu besseren oder zu schlechteren Überlebenschancen der Zelle oder des Organismus führen. Daher spielen sie eine entscheidende Rolle im Prozeß der natürlichen Selektion.

Der englische Biochemiker Frederick Sanger (geb. 1918) entwickelte in den 60er Jahren eine Methode zur RNA-Sequenzierung. Mit ihrer Hilfe kann man theoretisch die riesige Informationsmenge der DNA lesen, und nicht nur einzelne Beispiele. In der Folgezeit befaßten sich die Genforscher immer intensiver mit dem »Decodieren« der DNA, so daß man heute im Prinzip die Beziehung zwischen den einzelnen Genen und den körperlichen Merkmalen kennt, ebenso viele auf Gendefekten beruhende Krankheiten. Im Jahre 1975 fand der Molekularbiologe Walter Gilbert (geb. 1932) an der Harvard University eine neue Metho-

de zur chemischen Spaltung der DNA. Außerdem erkannte er, wie hilfreich sein Verfahren beim Entschlüsseln des Codes sein kann. Sanger wiederum konzipierte mit seinem Team an den Cavendish Laboratories im folgenden Jahr unabhängig davon die Methode des Kettenabbruchs für die DNA-Sequenzierung. Damit konnte man an einem einzigen Tag bis zu 300 Basensequenzen entziffern. Am 24. Februar 1977 publizierte Sanger in der Zeitschrift Nature die erste vollständige Sequenz einer Virus-DNA, nämlich der des Phagen Phi-X-174.

Diese vollständige DNA-Sequenz, also den gesamten genetischen Text eines Organismus, nennt man Genom. Mit Sangers neuer Methode wurde es theoretisch möglich, bei allen Organismen - auch beim Menschen - den kompletten genetischen Text zu ermitteln, der die Vererbung bestimmt. Aber im Vergleich zum erwähnten Virus ist die DNA des Menschen viel komplexer (wir empfangen von beiden Elternteilen jeweils drei Milliarden genetische Buchstaben). So liegt noch viel Arbeit vor den Wissenschaftlern, um das Genom ganz zu erfassen. 1980 erhielten Frederick Sanger, Walter Gilbert und Paul Berg, ein Wegbereiter des Klonierens, für ihre Arbeiten zur DNA-Sequenzierung den Nobelpreis für Chemie.

Trotz der bedeutenden Leistungen von Ingram, Sanger, Gilbert und anderen blieb die Entzifferung des menschlichen Genoms bis 1989 noch sehr bruchstückhaft. Inzwischen waren 36 Jahre vergangen, seit Crick und Watson ihr Holz- und Metall-Modell der DNA gebaut hatten. Jetzt richtete man in den USA ein nationales Projekt ein, das in seiner Größenordnung vielleicht nur mit dem Manhattan-Projekt zur Kernwaffenentwicklung oder mit den Raumfahrtprojekten der NASA vergleichbar ist. Niemand anderer als James Watson wandte sich 1989 an die in Washington versammelten Wissenschaftler. Der Titel der Tagung lautete »Genom I« und sollte deutlich machen, daß sich Molekulargenetiker und andere Forscher darin einig waren, es sei an der Zeit, das menschliche Genom vollständig zu entschlüsseln. Dessen »Text« würde den kompletten Bauplan und die Evolutionsgeschichte der menschlichen Art enthalten. Das »Projekt des menschlichen Genoms« wurde ins Leben gerufen. Es war in seiner Zielsetzung so klar und so faszinierend wie gut zwei Jahrzehnte zuvor das der Mondlandung.

## Das Projekt »Human-Genom« beginnt *Marker und Genkarten*

James Watson hatte sich von 1953 bis 1989 mit der Erforschung der DNA beschäftigt, wobei er von 1968 bis 1977 zwischen Harvard und dem Cold Spring Harbor Laboratory in New York pendelte. Francis Crick ging an das Salk Institute in San Diego, um sich der Erforschung des Gehirns und des menschlichen Bewußtseins zu widmen. Seit 1977 arbeitete Watson nur noch am Cold Spring Harbor Laboratory, und zwar als geschäftsführender Direktor. In den folgenden zehn Jahren konnte er seine akademische Reputation beträchtlich steigern. Es gelang ihm, das jährliche Budget von 600000 Dollar auf 28 Millionen Dollar zu erhöhen. Daher konnte sein Institut zum Hauptsitz des Human-Genom-Projekts werden.

Nach der Genom-I-Tagung von 1989 bewilligte der US-Kongreß für das Genom-Projekt drei Milliarden Dollar (jährlich 200 Millionen Dollar über 15 Jahre). James Watson wurde für einige Jahre Direktor des neugegründeten nationalen Zentrums zur Erforschung des menschlichen Genoms, das unter der Schirmherrschaft des US-Gesundheitsministeriums steht. Das Projekt Human-Genom begann offiziell am 1. Oktober 1990. Nach anfänglichen Unklarheiten, auch über die Mittelbewilligung, ist derzeit geplant, das Projekt schon vor dem vorgesehenen Endtermin (im Jahre 2005) zu beenden. Zur Zeit steckt man mitten in der gewaltigen Aufgabe, alle genetischen Informationen zu entschlüsseln, die uns Menschen zu einer so besonderen Art machen.

Bis 1990 hatte man schon rund 50 Millionen Informationseinheiten über verschiedene DNA-Moleküle erfaßt, von denen rund zehn Prozent menschlichen Ursprungs waren. Im Rahmen des Human-Genom-Projekts kam man beim Auswerten der schon in den 80er Jahre aufgenommenen Daten gut voran, ebenso beim Sammeln und Katalogisieren neuer Daten über die menschliche DNA. Beinahe wöchentlich gehen weitere Daten ein, sowohl von Universitäts- als auch von Industrielabors. Im folgenden sind einige Meilensteine des Fortgangs aufgeführt:

- *Dezember 1989*: Wissenschaftler am MIT entdecken ein Gen, dem sie entscheidende Bedeutung für die Ausbildung der menschlichen Immunabwehr zuschreiben. Man nennt dieses

RAG-1, wobei RAG für »rekombinations-aktivierendes Gen« steht. Der Befund wirft ein neues Licht auf die Komplexität des Immunsystems, das für die menschliche Gesundheit so wichtig ist.

- *Mai 1991*: Ärzte am Johns Hopkins Children's Center in Baltimore identifizieren das Stadium, bei dem im noch unbefruchteten Ei einer Mutter ein Fehler auftritt, durch den das Kind mit dem Down-Syndrom geboren wird. Das ist die bekannteste genetische Ursache für geistige Behinderung. Durch Analyse eines spezifischen Markers, des sogenannten DNA-Polymorphismus, kann man den Ursprung eines zusätzlichen Chromosoms und den Zeitpunkt erkennen, zu dem die Chromosomenteilung fehlerhaft wird.
- *August 1991*: Wissenschaftler an der Johns Hopkins School of Medicine, am Krebsinstitut in Tokio und an der Universität von Utah identifizieren in einer gemeinsamen Arbeit das Gen, das Dickdarmkrebs hervorruft. Es wird APC genannt (für adenomatöse Polyposis coli). Diese Entdeckung wird es den Ärzten ermöglichen, einen Dickdarmtumor schon im frühestmöglichen Stadium zu diagnostizieren.
- *März 1993*: Forscher geben bekannt, daß die Huntington-Krankheit die Folge von ungeklärtem »genetischem Stottern« ist, d. h. der Expansion eines bestimmten Gens auf dem Chromosom 4. Dadurch werden dem Protein, das durch dieses Gen codiert wird, zusätzliche Moleküle der Aminosäure Glutamin zugefügt.
- *August 1993*: Wissenschaftler am Medizinischen Zentrum der Duke University geben bekannt, daß Menschen mit einer bestimmten Variante des Gens APOe (für Apolipoprotein E) spätestens mit 70 Jahren wahrscheinlicher am Alzheimer-Syndrom erkranken als Menschen mit anderen Versionen desselben Gens.
- *Juni 1995*: Forscher an der Universität Toronto geben bekannt, daß ein Gen auf dem Chromosom 14 für rund 80 Prozent der Fälle ererbter Alzheimer-Krankheit verantwortlich ist.
- *August 1995*: Wissenschaftler am Zentrum für Gesundheitsforschung der Universität von Texas berichten, daß das BRCA1-Gen eine Rolle beim Brustkrebs spielt.



- *Dezember 1995*: Englische Wissenschaftler geben die Entdeckung eines weiteren Gens (BRCA2) bekannt, das mit dem Brustkrebs zusammenhängt.
- *Februar 1996*: Wissenschaftler identifizieren das Gen, das verschiedene Zelloberflächen-Proteine codiert, die ins Gehirn gelangen und bei der Regulierung des Körpergewichts mitwirken. Die Forscher vermuten, daß Übergewicht von einer Mutation in diesem Rezeptor-Gen herrührt.
- *März 1996*: Forscher am Zentrum für Gesundheitsforschung der Universität von Oregon berichten, daß gesunde Leberzellen, die in erkrankte Lebern transplantiert wurden, das dort fehlende Enzym FAH (für Fumarylacetoacetat-Hydrolase) produzieren. Dies läßt auf eine Gentherapie der Leber hoffen, durch die weniger Lebertransplantationen nötig würden.
- *März 1996*.- Forscher an fünf bedeutenden medizinischen Zentren geben bekannt, daß sie ein Gen gefunden haben, das das Risiko von Nierenerkrankungen und bestimmten Autoimmunkrankheiten erhöht. Die fehlerhafte Version dieses Gens codiert für ein Protein (Fc-Rezeptor genannt), das in seiner Immunfunktion weniger effizient als die normale Version ist.
- *April 1996*: Molekularbiologen vom Medizinischen Zentrum der Universität Seattle und von der Darwin Molecular Corporation geben bekannt, daß sie ein menschliches Gen gefunden haben, das Symptome des Alterns hervorruft. Sie vermuten, daß man bei bekannter Funktion dieses Gens den Alterungsprozeß aufhalten und außerdem seine Mitwirkung beim Auslösen von Herzerkrankungen, Krebs und Osteoporose modifizieren könnte.

Die am Human-Genom-Projekt beteiligten Forscher publizieren regelmäßig eine »Karte« des menschlichen Genoms. Inzwischen konnte man gut die Hälfte der 30000 »Marksteine« auf den Strängen des DNA-Materials lokalisieren, die unsere Chromosomen enthalten. Jede der oben erwähnten Entdeckungen von Genen bezieht sich auf eine oder mehrere Positionen auf einem bestimmten Chromosom. Wie erwähnt, sitzt das fehlerhafte Gen, das die Huntington-Krankheit verursacht, auf dem Chromosom 4. Im November 1996 fanden Forscher am US-amerikani-

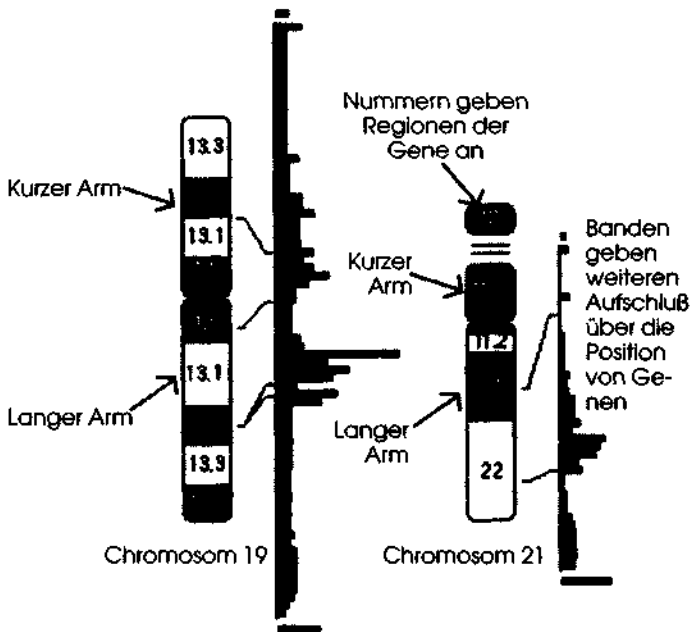


Abb. 19.1: Genomkarte der menschlichen Chromosomen 19 und 21

sehen National Institute of Health (NIH) auf demselben Chromosom auch die Position des Gens für die Parkinson-Krankheit. Die Atherosklerose (Erkrankung der Herzkranzgefäße) hängt mit einem Gen auf dem Chromosom 19 zusammen, und die Lou-Gehrig-Krankheit (amyotrophe Lateralsklerose, eine Nervenkrankheit) beruht auf einem Fehler in einem Protein, für das ein Gen auf dem Chromosom 21 codiert. In Abbildung 19.1 ist eine Genom-»Karte« aller Regionen von Genen auf den menschlichen Chromosomen 19 und 21 dargestellt. Dabei befinden sich der kurze Arm oben und der lange Arm unten (vgl. Abbildung 18.3). Die Zahlen entsprechen einem universellen System, nach dem die Wissenschaftler die Regionen auf DNA-Strängen lokalisieren, wenn diese sich zu Chromosomen kontrahiert haben. In der Abbildung stellen die schwarzen Balken rechts von jedem Chromosom sogenannte Banden (soviel wie Streifen) eines bestimmten Farbstoffs dar, mit dem man die einzelnen Gebiete

kenntlich macht, in denen spezifische Gene lokalisiert sind. Manche solcher Banden enthalten Tausende von Genen.

Das US-amerikanische National Institute of Health (NIH) publiziert regelmäßig die »menschliche Transkriptions-Karte«. Auf den NIH-Homepage im Internet kann man sozusagen die Chromosomen durchblättern. Dabei erhält man auch einen Eindruck von den Leistungen der Forscher, die sich mit dem menschlichen Genom befassen. Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt, enthalten die 46 menschlichen Chromosomen durchschnittlich jeweils rund 100 Millionen Nucleotide. Sie werden nach ihrer Größe nummeriert: Das Chromosom 1 enthält etwa 280 Millionen Nucleotide, das Chromosom 22 dagegen nur ca. 52 Millionen. Die Geschlechtschromosomen (X und Y) werden nicht in die Nummerierung einbezogen. Das Chromosom X ist mittelgroß, und das Chromosom Y ist eines der kleinsten.

### **Hoffungen, Ängste, Kontroversen - das Projekt bleibt umstritten** *Die Geschichte zweier Kerne*

Krankheiten, die von genetischen Mutationen herrühren, sind auf der ganzen Welt eine Hauptursache von Behinderungen, tödlichen Erkrankungen und damit menschlichen Tragödien. Zwei Prozent aller Neugeborenen leiden an genetischen Defekten. Vierzig bis fünfzig Prozent aller Fehlgeburten rühren von anomalen Chromosomen her. Rund vierzig Prozent aller Fälle von Säuglingssterblichkeit beruhen auf genetischen Krankheiten. Dreißig Prozent der Kinder und zehn Prozent der Erwachsenen müssen irgendwann einmal ins Krankenhaus, weil sie genetische Defekte aufweisen. Krebserkrankungen sind Folge mehrerer genetischer »Fehlfunktionen«, durch die die Steuerung des Zellwachstums ausfällt. Der Beweggrund für das Einrichten des Human-Genom-Projekts und auch für dessen Fortführung war und ist vor allem die Hoffnung, derartige Krankheiten heilen oder verhindern zu können. Neuere Erfolge der genetischen Forschung zeigen, daß diese Erwartung nicht ganz unbegründet war, was auch durch praktische Anwendungen bestätigt wird.

Aber es gab und gibt auch Widerstand gegen das Projekt. Ähnlich wie das Freisetzen der Energie des Atom-Kerns führte das Entschlüsseln der Geheimnisse des Zell-Kerns zu sehr heftigen Kontroversen. Man kennt die Prinzipien des genetischen Codes bereits so gut, daß man in naher Zukunft wahrscheinlich das menschliche Genom umbauen, also seine Instruktionen verändern kann. Viele Menschen sehen darin großartige Chancen, Krankheiten zu heilen und unsere Lebensbedingungen zu verbessern. Andere wehren sich aus ethischen und wissenschaftlichen Gründen heftig gegen eine solche Gentechnik (*genetic engineering*) und auch gegen derartige Gentherapien. Im Oktober 1993 klonete Robert Stillman, ein Spezialist für Befruchtung an der George Washington University, menschliche Embryos, wobei er Methoden wie auch beim Bebrüten von Tierembryos anwandte. Das war ein Laborexperiment ohne jeden Zusammenhang mit einer Schwangerschaft, aber es zeigte die Möglichkeit, eineiige Zwillinge zu »erschaffen« und sie in einem gewissen zeitlichen Abstand gebären zu lassen. Damit stellten sich weitreichende Fragen nach der ethischen und der gesetzlichen Zulässigkeit eines solchen Vorgehens.

Viele Menschen befürchten, daß man sich nicht auf das Heilen von Krankheiten beschränken wird, sondern mit Hilfe der Gentechnik den »perfekten Menschen« schaffen will, der gesünder, intelligenter oder auch nur attraktiver ist. Wer wird die jeweiligen Entscheidungen fällen? Philosophen, Wissenschaftler und Theologen führten als Beispiel an, daß man die Huntington-Krankheit und Krebs vielleicht heilen könnte, dabei aber Farbenblindheit, Hautfarbe oder anderes »fixiert« werden könnten. Sie befürchteten schwerwiegende Konsequenzen, bis hin zum Untergang der Menschheit, wenn man an den Genen herumpfuscht und dadurch in den natürlichen Ablauf der Evolution eingreift.

Vor einigen Jahren veröffentlichte eine Gruppe recht unterschiedlicher Persönlichkeiten - darunter Pat Robertson, Jerry Falwell, der Nobelpreisträger George Wald, außerdem 21 römisch-katholische Bischöfe sowie mehrere protestantische und jüdische Theologen - eine Resolution, nach der Wissenschaft und Gesellschaft nicht versuchen dürften, spezifische Merkmale in das menschliche Genom einzufügen. Sie gründeten ihre Ableh-

nung vor allem darauf, daß keine Person, Gruppe oder Institution jemals »das Recht oder die Macht beanspruchen darf, über alle derzeit lebenden Angehörigen der Art oder deren künftige Generationen zu entscheiden«. Wieder mit Bezug auf die Analogie zwischen Atomkern und Zellkern forderte die Gruppe außerdem, daß »die Gesellschaft gegen die Gentechnik mit demselben Mut und derselben Überzeugung eintreten soll, wie wir heute gegen die drohende Vernichtung der Welt durch die Atomenergie kämpfen«.

Diejenigen, die weitere Fortschritte der Gentechnik fordern, machen darauf aufmerksam, daß Erkenntnisse über die Vererbung auf frühe Zeiten zurückgehen und daß man das Steuern oder Kontrollieren der Merkmale von Nachkommen schon seit Jahrhunderten beim Züchten von Pflanzen und Tieren praktiziert. Sie weisen außerdem auf immer zahlreichere Anwendungen der genetischen Forschung hin, ebenso auf die glänzende Aussicht, die die Genetik für die Heilung menschlicher Krankheiten eröffnet. Die Korrektur des »Schreibfehlers« im DNA-Code für die Glutaminsäure des Hämoglobins könnte die Sichelzellanämie unterbinden. Zu anderen möglicherweise heilbaren genetisch bedingten Krankheiten oder Anomalien gehören Krebs, Zwergwuchs, Herzfehler, die Tay-Sachs-Krankheit, zystische Fibrose (= Mukoviszidose, eine Stoffwechselkrankheit), Gehirnlähmung, Gaumenspalte und geistige Behinderung.

Es ist nicht nur theoretisch möglich, die genetische Botschaft in der Samen- oder der Eizelle umzuschreiben, um vielleicht Hämophilie oder andere Krankheiten bei Kindern entsprechend vorbelasteter Eltern zu verhindern. Im Januar 1996 wurde einem chinesischen Elternpaar in New York ein gesunder Junge geboren. Diese Geburt war bemerkenswert, weil bei dem Fetus die *Alpha-Thalassämie* diagnostiziert worden war, ein tödlicher genetischer Defekt, der vor allem bei Thailändern und Chinesen auftritt. Dabei ist der Fetus nicht fähig, das Hämoglobin zu produzieren, das in den roten Blutzellen den Sauerstoff transportiert. Dieser Gendefekt führt normalerweise innerhalb von vier Monaten nach der Empfängnis zur Fehlgeburt. Aber das erwähnte Baby überlebte, weil ihm noch in der Gebärmutter Knochenmarkzellen transplantiert wurden.

Sollten wir beim Nutzen unserer wissenschaftlichen Fähigkeiten nicht die Chancen wahrnehmen, unser Leben zu verlängern und es gesünder zu machen? Weitere Anwendungen der Gentechnik und der experimentellen Embryologie, wie auch des Klonens und der Transplantationen, werden im 21. Jahrhundert die neuen Grenzen der biologischen und medizinischen Entwicklungen markieren. Aber es werden sich neue Kontroversen daraus ergeben.

## **Die Einzigartigkeit des Codes und ihr Nutzen für die Praxis**

*Was hatte man gegen O. J. Simpson in der Hand?*

Abgesehen von den Zielen des Human-Genom-Projekts können Analyse und Veränderung der DNA viele positive Auswirkungen auf unser Leben haben. Ein Beispiel wurde schon in Kapitel 16 erwähnt, nämlich die Forschungsarbeiten pharmazeutischer Unternehmen, bei denen die DNA neuer Stämme von Tuberkelbakterien analysiert wird. Der genetische Code, der alle Lebensformen bestimmt, ist ja bei allen Arten derselbe. Wir können diesen Code inzwischen lesen und die Produktion bestimmter Proteine stimulieren. Dank dieser Möglichkeit entstand in den letzten zwanzig Jahren ein völlig neuer Industriezweig: die Biotechnologie. Die dreibuchstabigen Instruktionen, die ein Gen eines Organismus (beispielsweise einer Pflanze) ausmachen, können in einen anderen Organismus eingeführt werden (hierfür sind Bakterien das wichtigste Beispiel). Dann werden diese Instruktionen vom anderen Organismus entziffert und befolgt. Auf diese Weise kann man genetisch veränderte Bakterien dazu bringen, beispielsweise menschliche Wachstumshormone zu produzieren. Das wird heute schon großtechnisch ausgenutzt. Nachdem man das entscheidende Prinzip («DNA macht RNA macht Protein») erkannt hatte, wurde es möglich, den Organismus beim Synthetisieren wichtiger Proteine notfalls zu unterstützen.

Im Jahre 1980 wurde die Firma Amgen Inc. gegründet, die seither bahnbrechende biotechnologische Resultate vorweisen kann. Sie vertreibt unter anderem die zwei wichtigen Produkte Erogen

und Neupogen. Epogen ist eine gentechnisch hergestellte Version des Proteins Erythropoietin (EPO), das die Produktion roter Blutzellen im Knochenmark stimuliert. Diese Substanz wird vor allem Dialysepatienten verabreicht, die an chronischer Anämie leiden, weil ihre Nieren nicht genügend natürliches EPO hervorbringen. Allein in den USA erhalten jährlich über 175 000 Patienten Epogen, das ihre Anämie beseitigt, so daß weniger Bluttransfusionen nötig werden.

Der andere wichtige Wirkstoff Neupogen regt die Bildung der Neutrophilen (Leukocyten) an, also der weißen Blutzellen, die entscheidend an der Infektionsabwehr des Organismus mitwirken. Wie Epogen ist auch Neupogen ein gentechnisch hergestelltes Protein, das mit dem natürlichen Protein identisch ist. Es wird Krebspatienten gegeben, deren natürliche Neutrophilen bei der Chemotherapie zerstört wurden. Die Substanz wehrt nicht nur Infektionen ab, sondern mit ihr vertragen die Patienten über längere Zeit höhere Dosen von Chemotherapeutika. Dadurch sind mehr Behandlungsoptionen möglich, und die Chancen steigen, den Krebs zu überstehen. Bis Mitte 1997 waren zwölf weitere DNA-Protein-Wirkstoffe von Amgen in der klinischen Erprobung. Im März 1996 berichtete das Unternehmen, daß eine Substanz namens GDNF bei Affen positiv wirkte, die Symptome der Parkinson-Krankheit zeigten.

Wie Amgen setzen auch andere Unternehmen langfristig auf Wirkstoffe, die mit molekularbiologischen Methoden produziert werden. Die Firma Millennium Pharmaceuticals, gegründet 1993, brachte 180 Millionen Dollar für Forschung und Lizenzzahlungen auf, um die Gene zu identifizieren, die zur Ausbildung von Atherosklerose, Übergewicht, Diabetes und Asthma beitragen. Im Jahre 1996 wurde der Monsanto Company ein Patent für eine Gruppe von Genen erteilt, die die Insektenabwehr von Getreide verbessern sollen. Die Mycogen Corporation und der Konzern Ciba-Geigy vertreiben ähnliche Produkte. Kürzlich wurde ein Patentprozeß um das Recht zur Entwicklung der Gene geführt, denn man erwartet, daß der Markt für solche Gene (produziert vom *Bacillus thuringiensis*) in den kommenden Jahren mehrere Milliarden Dollar ausmachen wird.

Schon seit einigen Jahren wendet man die Erkenntnisse über

den genetischen Code auch in der Kriminalistik an. Was hatte beispielsweise 1995 die Polizei von Los Angeles im Mordprozeß gegen O. J. Simpson in der Hand, und warum wurde und wird die DNA-Analyse zu einer fast ebenso genauen Methode wie der Fingerabdruck, wenn es um die Identität einer Person geht ? Diese Fragen bringen uns auf den Aspekt zurück, den wir in Kapitel 18 behandelten: Die G-C- und A-T-Sequenzen sind bei jedem Lebewesen anders. Zwar enthält das DNA-Alphabet nur diese vier »Buchstaben«, aber die Reihenfolge der schier unzähligen Sätze, Absätze und Kapitel der gesamten genetischen Ausstattung ist in jedem Organismus einzigartig, also für ihn kennzeichnend. Inzwischen kann man dieses genetische Buch lesen und verfügt damit über ein recht sicheres Verfahren, die Identität einer Person zu bestätigen, die irgendwo ihre DNA in Form von Blut, Sperma, Haar oder Haut hinterlassen hat. So konnten die Experten im Mordprozeß gegen O. J. Simpson beweisen, daß Blutspuren am Tatort des Doppelmordes und in seinem Ford Bronco von ihm stammten.

Seit Mitte der 80er Jahre entwickelten die Molekularbiologen verschiedene Tests zum Identifizieren von Individuen, nicht nur bei Kriminellen, sondern auch bei Vermißten oder bei Vaterschaftsfragen. Beim konventionellen Haartest wird im Prinzip nur ermittelt, ob das gefundene Haar in Farbe und Stärke mit dem des Probanden übereinstimmt. Hier kann - wie auch beim herkömmlichen Test von Blut oder Sperma - eine Person nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 bis 95 Prozent zugeordnet werden. Dagegen kann man mit der DNA-Charakterisierung eine Person fast mit Gewißheit identifizieren. Die Zuverlässigkeit der DNA-Charakterisierung wird im allgemeinen mit 1 zu 5 Milliarden bis 1 zu 30 Milliarden angegeben. Weil bei einer so geringen Fehlerwahrscheinlichkeit die Zuordnung zur betreffenden Person über jeden vernünftigen Zweifel erhaben ist, wird diese es schwer haben, den Beweis anzufechten. Er kann sich nur noch auf Fragen der Vorgehensweise beschränken: Wie wurden die Proben genommen und behandelt, und wurden die Tests korrekt durchgeführt? Auf diese Weise gelang es O. J. Simpsons Verteidigern, Zweifel an dessen Schuld zu begründen. Seit Mitte der 80er Jahre erlangte die DNA-Charakterisierung allgemeine Akzeptanz in



der Wissenschaft und in der Rechtsprechung. Sie half bereits, Tausende von Kriminalfällen und Vaterschaftsfragen zu klären.

Die Manipulation der DNA ermöglichte auch enorme Fortschritte in der Zahnmedizin. Die Wurzelhauterkrankung ist eine der häufigsten Ursachen für Zahnverlust. Seit es DNA-Sonden gibt, kann man bestimmte Bakterien identifizieren und mit antibakterieller Therapie bekämpfen. Dieses Verfahren beruht darauf, zunächst spezifische Ziel-DNA von einigen vermuteten bakteriellen Krankheitserregern zu reinigen. Deren DNA-Strang wird in kleine Stücke geteilt und radioaktiv markiert. Der Zahnarzt nimmt dann vom Belag im Mund des Patienten eine Probe und schickt sie zur Analyse ins Labor. Dort wird die Bakterien-DNA aus dem Belag extrahiert und in einem Filter aufgefangen. Proben der DNA aus dem Belag werden dann mit jeder der radioaktiv markierten Bakterien-DNA-Sonden gemischt. Wenn die Probe aus dem Mund des Patienten die verdächtige Bakterienart enthält, so wird die Test-DNA sich an sie binden, da sie gleich aufgebaut ist. Dies kann man erkennen, indem man jede Proben-Sonden-Mischung auf einen photographischen Film gibt, denn die Strahlung der radioaktiv markierten DNA wird den Film schwärzen. Je mehr Bakterien-DNA vorhanden ist, desto stärker wird die Schwärzung ausfallen. Die im betreffenden Belag häufigsten, sozusagen schuldigen Bakterien können auf diese Weise schließlich identifiziert werden, und man kann die zu ihrer Bekämpfung geeigneten Antibiotika auswählen.

Die Genforscher experimentieren sogar mit einem Bakterien-Gen, das eine Substanz ähnlich dem Polyester produziert. In eine Baumwollpflanze eingesetzt, soll es eine Faser hervorbringen, die die Struktur einer Baumwollfaser hat, aus der man aber besser warm haltende Gewebe herstellen kann. Man kann heute Baumwollpflanzen genetisch so verändern, daß sie resistent gegen Insekten sind. Bei weiteren Projekten versucht man, knitterfreie und nicht schrumpfende Baumwollfasern zu erzeugen. Mit Hilfe bakterieller DNA konnte man bereits Stämme von Tomaten, Kartoffeln, Mais und Kürbis züchten, die nicht von Insekten befallen werden, gegen Herbizide beständig sind und außerdem langsamer nachreifen als die normalen Stämme.

Mit der Aufklärung der DNA-Struktur im Jahre 1953 schloß sich der Kreis, der 94 Jahre zuvor mit Darwins subtiler Untertreibung in seinem Werk *Die Entstehung der Arten* begonnen hatte: »Es wird einiges Licht auf den Ursprung des Menschen und seiner Geschichte geworfen werden.« Zur Verknüpfung des Ursprungs der Lebewesen und der Evolution mit der Aufklärung der DNA-Struktur schrieb Francis Crick:

*»Jeder Organismus, jede Zelle und alle größeren biochemischen Moleküle sind das Endergebnis eines langen, komplizierten Prozesses, der oft schon einige Milliarden Jahre zuvor begonnen hatte. (...) Was man in der Biologie findet, ist die Wirkungsweise, sind die Mechanismen, die auf chemischen Komponenten beruhen und oft durch andere, neuere Mechanismen modifiziert werden, die den früheren zugefügt werden. (...) Die Natur konnte nur auf dem aufbauen, was schon vorhanden war.«*

Crick wunderte sich darüber, daß in unserer modernen Kultur so wenige Menschen die natürliche Selektion wirklich verstehen. »Sie verstehen sie nicht«, vermutete er, »weil dieser Prozeß sehr langsam ist und wir daher ihr Wirken kaum direkt wahrnehmen können«. Zudem gebe es einen Kontrast und einen Widerspruch »zwischen hochorganisierten und verwickelten Resultaten des Prozesses - allen Lebewesen um uns herum - und der dahintersteckenden Zufälligkeit«. Crick meinte weiter:» Einigen Menschen widerstrebt die Vorstellung, die natürliche Selektion habe keine Voraussicht. (...) Es sei die Umgebung, die die Richtung vorgibt.«

Mit seinem Werk *Die Entstehung der Arten* vollzog Charles Darwin 1859 den ersten Schritt hin zu einem Verständnis des inneren Mechanismus, der den Ursprung des Lebens und die Fähigkeit der Organismen zu Fortpflanzung erklärt. Einige Jahre später schrieb Gregor Mendel die Vererbung gewissen, seinerzeit unsichtbaren »Erbfaktoren« in den Lebewesen zu. Kaum ein Jahrhundert später beantworteten Crick und Watson die Frage, was ein Gen eigentlich ist. Das verknüpfte ihre Arbeiten unauflöslich mit den Vermächtnissen von Darwin und Mendel. Und heute enthüllt das Projekt des menschlichen Genoms die unglaubliche Geschichte, die in unseren Genen verborgen ist.

# EPILOG

*Während der langen tausend Jahre des Mittelalters verharrte die abendländische Kultur in einer Haltung, die dem rationalen Denken abgeneigt war. Aus dieser Lähmung wurde sie durch eine Handvoll europäischer Gelehrter befreit, die den Weg bereiteten, der schließlich zur Renaissance führte. Der bemerkenswerte Fortschritt der Wissenschaft begann mit der kopernikanischen Theorie im 16. Jahrhundert und erlebte in unseren Zeiten ein beeindruckendes Crescendo.*

*In der verhältnismäßig kurzen Zeitspanne der letzten hundert Jahre lernten wir die Natur auf der Erde und das Universum auf eine neue Weise verstehen. Wie ein Foto, das in der Dunkelkammer entwickelt wird, wurde das Bild immer klarer und schärfer. Die neuen Erkenntnisse in den Naturwissenschaften hatten Auswirkungen auf unser tägliches Leben, denn sie wurden zur Grundlage eindrucksvoller technischer Leistungen in unserem Jahrhundert.*

*Wir wollen in diesem Epilog das inzwischen so komplex gewordene Gefüge der Wissenschaften beleuchten, außerdem die erstaunliche Synthese zuvor separater Fachgebiete. Wir werden Erfolge, aber auch Fehlschläge kennenlernen. Dabei wird deutlich werden, daß die Wissenschaftler nur begrenzten Einfluß darauf haben, wie wissenschaftliche und technische Fortschritte in der Gesellschaft angewandt werden. Schließlich wollen wir kurz untersuchen, wie wichtig die freie Meinungsäußerung und das rationale Denken für die Wissenschaft sind.*

# SYNTHESE

*»Es gibt unter all den Fähigkeiten des Menschen eine, die ihn von den Tieren unterscheidet: (...) sein großes Vergnügen, zu probieren und seine Fertigkeiten zu erweitern. (...) Entdeckungen bestehen in einer doppelten Verknüpfung von Analyse und Synthese. Bei der Analyse prüft man, was vorhanden ist. (...) Bei der Synthese werden die Teile derart zusammengesetzt, daß der kreative Geist mehr als das bloße Grundgerüst der Natur erkennt.«*

Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (1973)

*»Bei anscheinend voneinander unabhängigen Ereignissen, einzelnen wissenschaftlichen Entdeckungen, technischen Fortschritten und religiösen Auffassungen kann man im Verlauf der Historie stets eine Entwicklung beobachten, (...) bevor sich eine neue Struktur herauskristallisiert. (...) Es ist, als blickte man in eine chemische Retorte, in der gerade einige seltene und vielgestaltige Kristalle entstehen. In einem Moment ist alles gelöst, (...) aber im nächsten Augenblick geht eine bestimmte Form wie aus dem Nichts hervor.«*

Loren Eiseley, *Darwin's Century* (1961)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts ritten wir noch auf Pferden, und an seinem Ende reisen wir in Raumschiffen. Wir starben Anfang dieses Jahrhunderts an Typhus und Pocken und haben diese Krankheiten inzwischen praktisch besiegt. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren Organtransplantationen noch völlig undenkbar, und inzwischen konnten viele Menschen überleben, weil ein anderer Mensch ihnen das Herz, die Leber oder ein ande-

res lebenswichtiges Organ spendete. Um 1900 lag die Lebenserwartung bei rund 47 Jahren; heute beträgt sie 75 Jahre. Zur Kommunikation über nicht allzu große Entfernungen hinweg bediente man sich zu Anfang dieses Jahrhunderts des gerade erfundenen Radios, und heute senden wir sogar farbige Bilder über Millionen von Kilometern durch den Weltraum.

Wir gingen in das 20. Jahrhundert, ohne irgendeine Vorstellung von der Unermeßlichkeit des Universums zu haben. Wir glaubten, daß es jenseits der Milchstraße nichts mehr gäbe und daß die Sterne ruhten. Und nun wissen wir, daß wir auf einer winzigen Kugel in der Nähe eines Sterns sitzen, der sich in einer rotierenden Galaxis befindet, inmitten Milliarden anderer Galaxien und Sterne, die nach einer unvorstellbar heftigen Explosion vor rund 15 Milliarden Jahren immer noch in Bewegung sind.

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts waren wir mit Newtons Physik zufrieden, und an seinem Ende wissen wir, daß Einsteins Relativitätsprinzipien nötig sind, um das Universum zu erklären. Als unser Jahrhundert begann, hatten wir gerade angefangen, Leukipps Atom näher zu erforschen. Inzwischen können wir es sogar zertrümmern, und eine einzige Atombombe setzt eine unvorstellbare Energiemenge frei.

Um 1900 konnten wir nur vermuten, daß Darwin recht hatte. Hundert Jahre später sind nun alle Zweifel ausgeräumt, denn wir haben die Gebeine von Lucy und anderen Urahnen gefunden. Wir verstehen nun die komplexe Funktionsweise der Zellen und vermögen auch das DNA-Molekül zu entschlüsseln, Tiere zu klonen und den genetischen Code zu entziffern.

## **Das rationale Denken wird zum Kern der Wissenschaft**

### *Mythen in den Händen von Demagogen*

Im Jahre 1560 gründete der italienische Physiker und Dramatiker Giambattista Della Porta (1535-1615) die erste Organisation, die sich dem Gedankenaustausch zwischen Wissenschaftlern verschrieb. Seine *Accademia Secretorum Naturae* (Akademie für die Geheimnisse der Natur) war allerdings umstritten und bestand

nicht lange. Doch sie markierte in der Renaissance den Beginn einer Epoche wissenschaftlicher Entdeckungen. Im Jahre 1620 gab der englische Philosoph Francis Bacon (1561-1626) sein Werk *Novum Organum* heraus, eine moderne Version von Aristoteles' *Organum*. Bacon, Mitglied des Parlaments und Lordkanzler unter König James I., stellte erstmals detaillierte Regeln für eine ausschließlich rationale Vorgehensweise in der Wissenschaft auf. Man schreibt ihm die Konzeption der wissenschaftlichen Methodik zu, die dann von seinem Zeitgenossen Galileo Galilei weiter ausgearbeitet wurde.

In der Renaissance begann man zu erkennen und zu akzeptieren, was die Wissenschaftler herausfanden. Die Sichtweisen von Aristoteles und der katholischen Kirche hinsichtlich des Universums wurden nach und nach aufgegeben. Astronomen wie Brahe und Galilei beobachteten die Himmelskörper und entwickelten danach ihre Hypothesen. Gemäß der neuen wissenschaftlichen Methodik wurden Annahmen, die einer genauen Überprüfung standhielten, zu Theorien, und Theorien, die man nicht zu widerlegen vermochte, wurden zu wissenschaftlichen Gesetzen und Prinzipien. Dazu mußten die Experimente und Beobachtungen wiederholbar sein, auch bei intensiven Bemühungen, sie zu entkräften.

Im 17. und 18. Jahrhundert begannen einige Regierungen in Europa, die wissenschaftliche Forschung finanziell intensiv zu unterstützen. Nach dem Inquisitionsverfahren gegen Galilei wurde in Italien, England, Frankreich und Deutschland die wissenschaftliche Methodik mit Experimenten und Theorien immer öfter gegen den Widerstand der Kirche verteidigt. Die Wissenschaft hatte nicht nur neue Institutionen und Verfahrensweisen hervorgebracht, sondern letztlich einen sicheren Hafen gefunden, eine »Zone der Freiheit«, in der sie allmählich gedeihen konnte.

Zum Ende des 20. Jahrhunderts sind wir mehr und mehr in neue Wissensgebiete vorgedrungen, in das, was Newton »das weite Meer der Erkenntnis« nannte. Was wir dabei erfuhren, hätte ihn und andere phantasievolle Geister vergangener Generationen sehr verblüfft. Die Wissenschaft mit ihrer Tradition des rationalen Denkens muß eines der vorrangigsten Ziele der

Menschheit bleiben und von den Regierungen in einer moralischen Gesellschaft angemessen genutzt werden. Wissenschaftliche Entdeckungen haben unseren Geist freigemacht und das Vertrauen in unsere einzigartigen Fähigkeiten gerechtfertigt.

Die Erforschung des Universums und des Menschen selbst muß weiterhin das Ziel der Wissenschaft sein. Dafür allerdings bedarf es einer freien und gerechten Gesellschaftsordnung. Wir müssen uns stets vor Augen halten, wie flüchtig diese Freiheit sein kann. Wissenschaftlicher Fortschritt hängt in allen Bereichen von der Freiheit ab. Jegliche intellektuelle Entwicklung wird unterdrückt, wenn die Gedanken- und Meinungsfreiheit bedroht ist. Wenn sich ein Wandel langgehegter Überzeugungen abzeichnet, neigen viele Menschen dazu, den freien Gedankenaustausch zu behindern, der solche Veränderungen fördert. Daher hängen der Mangel an intellektueller Freiheit und die Furcht vor Erneuerungen eng miteinander zusammen. Das Beharren auf dem Status quo rührt oft von Aberglauben oder Mythen her und ist nicht unbedingt ein bewußtes Unterdrücken der Wahrheit. Aber ein solches Denken kann die Freiheit noch stärker bedrohen als glatte Lügen. John F. Kennedy sagte 1962 in einer Rede an der Yale University: »Der große Feind der Wahrheit ist sehr oft nicht die vorsätzliche, unehrenhafte Lüge, sondern der beharrliche Mythos oder Aberglaube, der so überzeugend und realistisch erscheint.« Auch heute noch sind Mythen verbreitet und beherrschen in vielerlei Hinsicht das Denken auf der ganzen Welt.

Freiheit wird nicht einfach durch Gesetze verfügt. Vielmehr muß die Öffentlichkeit das freie, rationale Denken zu schätzen wissen, das der Kern aller Wissenschaft ist. Sobald es unterdrückt oder aufgegeben wird, füllen totalitäre oder anarchische Systeme das Vakuum und dominieren Wissenschaft und Gesellschaft. Wohin würde es beispielsweise führen, wenn eine Gesellschaft das rationale Denken aufgäbe und zuließe oder veranlaßte, daß in den öffentlichen Schulen wieder die Theorie des Kreationismus gelehrt wird? Die in Washington ansässige parteiunabhängige Gesellschaft People For the American Way, die sich den verfassungsmäßigen Freiheiten verschrieben hat, gibt alljährlich einen Bericht über Zensur und ähnliche Beschränkungen öffentlicher Bildung und Information heraus. In ihrem Report von 1996 ist

die Rede von »neuerlichen Bemühungen, den Kreationismus in den naturwissenschaftlichen Unterricht einzuführen«, und davon, daß Möchtegern-Zensoren »zunehmend die Legislative für den Versuch einspannen wollen, ihre ideologischen (...) Grundsätze in den Schulen durchzusetzen«. Zahlreiche - allerdings gescheiterte - Gesetzesinitiativen der jüngsten Zeit hätten dazu geführt, daß Lehrer entlassen würden, die die Evolutionstheorie lehren. Aber solche Bestrebungen werden zunehmend unterstützt, und es wird immer wahrscheinlicher, daß derartige Gesetze bald erlassen werden. Eine Gesellschaft, die solche irrationalen Regelungen gutheißt, könnte leicht auch andere abwegige Vorschriften zu sozialen Grundsätzen billigen, beispielsweise hinsichtlich Hautfarbe oder Religion. Dann würde jeglicher intellektuelle, künstlerische und wissenschaftliche Fortschritt unterbunden, so wie es in diesem Jahrhundert in Deutschland der Fall war und noch heute in einigen totalitären Staaten an der Tagesordnung ist.

Der in der damaligen Sowjetunion verschiedenen Repressalien ausgesetzte russische Kernphysiker und Bürgerrechtler Andrej Sacharow (1921-1989) schrieb, daß »intellektuelle Freiheit für die menschliche Gesellschaft unabdingbar ist. (...) Freiheit des Denkens ist die einzige Garantie gegen eine Verbreitung von Irrlehren, mit denen Heuchler und hinterhältige Demagogen die Diktatur herbeiführen können«. Geisteshaltungen und Weltanschauungen können nicht per Dekret geändert werden. Sie sind nur durch offene Diskussionen zu formen oder zu verändern, wenn sich die Gesellschaft nicht scheut, alte Denkweisen abzulegen, und wenn sie daran interessiert ist, ihre Horizonte zu erweitern. Im 20. Jahrhundert gab es, wie in der Vergangenheit auch, etliche unheilvolle Perioden mit ausgeprägtem Antirationalismus. Diese Gesinnung ist heute, kurz vor dem Eintritt ins dritte Jahrtausend, wieder bemerkenswert lebendig. Daher gilt es jetzt, mehr denn je, die Freiheit des Denkens durchzusetzen und zu bewahren, ebenso unser Vertrauen auf die Vernunft und das rationale Denken.



## **Wissenschaftlicher Fortschritt wird durch politische und soziale Institutionen kontrolliert**

*Bläulich leuchtendes Pulver und 14 Milliarden  
Menschen*

In Kapitel 19 besprachen wir die Kontroverse über das Projekt des menschlichen Genoms und über die Gentechnik. Auch die Debatten um Kernenergie, Atombomben und andere Anwendungen wissenschaftlicher Erkenntnisse dauern noch an. Die Wissenschaft und die Wissenschaftler werden wegen der negativen Auswirkungen vieler Entdeckungen häufig angegriffen. Doch die Entscheidungen über deren Anwendung und über die Verteilung von Ressourcen werden von der Gesellschaft als Ganzes getroffen, die dabei im wesentlichen von den Regierungen und deren Institutionen vertreten wird. In vielen Ländern streiten jene, die die Technik für Kampf und Zerstörung einsetzen wollen, gegen jene, die der Gesundheitsvorsorge und anderen sozialen Bedürfnissen den Vorrang geben. Einige Länder sind militärisch hoch gerüstet, aber der Bevölkerung mangelt es am Nötigsten, beispielsweise an Wohnraum, sanitären Einrichtungen, Medikamenten und Bildungsmöglichkeiten. Trotz beeindruckender Fortschritte der Wissenschaften leben unzählige Menschen in Armut und Unwissenheit. Einstein war überzeugt: »Rationales Denken reicht nicht aus, um die Probleme unseres Gemeinwesens zu lösen.« In jeder Stunde sterben über 400 Kinder an Krankheiten wie Cholera, Typhus, Ruhr und Hepatitis. Und in jedem Jahr verhungern Millionen von Menschen, vor allem Kinder. Wo sind in diesen Ländern die Errungenschaften der Zivilisation und der Fortschritt der Wissenschaft?

Aber nicht nur zu Kriegszeiten hängen wissenschaftliche Erkenntnisse und technische Entwicklungen mit Tod und Zerstörung zusammen. Am 3. Dezember 1984 trat in einer chemischen Fabrik der Union Carbide Corporation im indischen Bhopal das hochgiftige Gas Methylisocyanat aus. Über 3000 Menschen kamen dadurch um. Am 26. April 1986 entwich aus dem durchgeschmolzenen Kernreaktor in Tschernobyl in der damaligen Sowjetrepublik Ukraine eine radioaktive Wolke. Sie verstrahlte weite Gebiete Europas, in denen Millionen von Menschen leben. Die

freigesetzte Strahlung war 200mal stärker als bei den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki im Jahre 1945. Bei Tschernobyl starben durch die Strahlung 32 Menschen sofort, und Hunderttausende erkrankten schwer. Man schätzt, daß 150000 Menschen letztlich daran starben. Im Schatten des Beton- und Stahlsarkophags, der jetzt den Reaktor Nr. 4 umschließt, ist aus der einst blühend sowjetischen »Modellstadt« Pripyat mit 40 000 Einwohnern eine Geisterstadt geworden. Aber es leben immer noch über 270 000 Menschen in verstrahlten Gebieten.

Im Jahre 1987 brachen neugierige Jugendliche in einer aufgegebenen radiologischen Klinik im brasilianischen Goiania eine 150 Kilogramm schwere Bleikapsel auf, die eine Verbindung des Caesium-137 enthielt. Dieses radioaktive Material wird für die Bestrahlung von Krebskranken verwendet. Das bläulich leuchtende Pulver im Behälter verstrahlte 249 Menschen. Mehrere von ihnen starben inzwischen, andere erkrankten schwer, und bei einigen mußten Gliedmaßen amputiert werden.

Auch die enormen Fortschritte in der Medizin haben paradoxerweise eine Kehrseite: Sie ermöglichten eine Zunahme der Weltbevölkerung, die mittlerweile bedrohliche Ausmaße annimmt. Sehen wir uns die Zahlen an:

- Im Jahre 1850 lebten auf der Erde 1,2 Milliarden Menschen.
- Bis zum Jahre 2000 werden es insgesamt 6,2 Milliarden sein.
- Die Hälfte aller jemals geborenen Menschen lebt heute.
- In den nächsten nur 15 Jahren wird die Weltbevölkerung um mehr Menschen zunehmen, als im Jahre 1850 insgesamt lebten (1,2 Milliarden).

Wie schon erwähnt, stieg die Lebenserwartung von 47 Jahren zu Anfang unseres Jahrhunderts auf heute 75 Jahre. Also hat sich im Laufe zweier Lebensspannen die Weltbevölkerung mehr als verfünffacht! Durch Reduzieren weiterer Risikofaktoren (etwa Bluthochdruck, Übergewicht und Rauchen) könnte die Lebenserwartung bald sogar 98 oder 99 Jahre betragen. Wenn der Anteil der älteren Bevölkerung zunimmt, werden mehr Menschen an chronischen und altersbedingten Krankheiten leiden, beispielsweise Blindheit, Arthritis, Alzheimer-Syndrom, Nachlassen der

Sinne und Osteoporose. Dies wird alle Nationen ökonomisch stärker belasten. Die Weltbevölkerung steigt pro Sekunde um drei Menschen; alle drei Jahre kommen über 275 Millionen Menschen hinzu (das ist die derzeitige Einwohnerzahl der Vereinigten Staaten). Die größte Zunahme ist in den ärmsten Ländern zu verzeichnen, und gerade diese sind am wenigsten in der Lage, das Bevölkerungswachstum zu verkräften und dabei noch in ihre Zukunft zu investieren. Experten warnen davor, daß die Weltbevölkerung in den nächsten 100 Jahren auf 14 Milliarden anwachsen wird, wenn der Trend nicht umgehend gestoppt wird.

Ein schneller Bevölkerungszuwachs gefährdet den volkswirtschaftlichen Standard, den viele Länder erreicht haben. Dadurch werden die Chancen für eine ausgewogene Entwicklung des jeweiligen Landes verschlechtert oder ganz genommen. Dabei ist nicht die absolute Einwohnerzahl eines Staates entscheidend, sondern das Tempo ihrer Zunahme. Dieses verhindert, daß der betreffende Staat die landwirtschaftliche Produktivität und die Gesundheitsfürsorge aufrechterhalten sowie neue Arbeitsstellen schaffen und andere Errungenschaften bewahren kann. Die explodierende Weltbevölkerung bringt zunehmende Gewaltbereitschaft und andere Gefahren für das soziale Gefüge mit sich. Daher sind Geburtenkontrolle bzw. Familienplanung entscheidend für die Bewahrung des Weltfriedens. Aufgrund der jeweiligen sozialen und politischen Gegebenheiten hat die Hälfte aller Frauen auf der Welt keine Möglichkeit, sich über Familienplanung beraten oder gar dabei betreuen zu lassen. Doch gerade diese Frauen müssen angesprochen und angemessen informiert werden, wenn die Entwicklungsländer das Bevölkerungswachstum aufhalten wollen. H. G. Wells sagte einmal, die Zivilisation befinde sich im Wettlauf zwischen Fortschritt und Katastrophe. Die Katastrophe ist gerade dabei, das Rennen zu gewinnen, und zwar in Form des ausufernden Bevölkerungswachstums.

Die Wissenschaftler spielen bei den sozialen Mißständen in der Welt nur eine indirekte Rolle. Die Lösung der Probleme liegt nicht in ihrer Macht. Unsere Schwächen sind nicht auf die Naturwissenschaften zurückzuführen, sondern liegen in sozialen und kulturellen Strukturen und Institutionen, die wir geschaffen haben, denn Politik, Regierung und unsere Moral bestimmen, wie

Wissenschaft und Technik angewandt werden sollen. Einstein bemerkte einmal, »die Wissenschaft kann nur feststellen, was ist, nicht was sein sollte. (...) Bewertungen aller Art sind außerhalb ihres Bereichs vorzunehmen«. Robert Oppenheimer sagte über seine Rolle bei der Entscheidung, ob die Atombombe abgeworfen werden sollte, er habe als Leiter des Manhattan-Projekts »keine Befugnis gehabt, Politik zu betreiben«. Ähnlich arbeiten Wissenschaftler, die am Human-Genom-Projekt beteiligt sind, am wissenschaftlichen Fortschritt und nicht auf dem Gebiet der Sozialpolitik.

Es ist nicht Sache von Wissenschaft und Technik, die Natur zu erobern oder die Menschen zu bezwingen. Kepler und Newton versuchten, das Universum zu verstehen. Watson und Crick wollten ergründen, wie die Strukturen des Lebens beschaffen sind. Marie Curie nannte die Wissenschaft die erhabenste Verkörperung des menschlichen Geistes und ein ideales Werkzeug, um der Menschheit zu dienen. Als Institution versucht die Wissenschaft vor allem, die physische Welt in einem logischen und einheitlichen Denksystem zu verstehen.

## **Im 20. Jahrhundert vermischen sich verschiedene Wissenschaftsgebiete**

### *Fruchtbarkeit gekreuzter Arten*

Zu Beginn dieses Epilogs haben wir eine Passage von Loren Eiseley zitiert. Er bezog sich darin auf die Geschichte der Evolutionstheorie. Aber seine Aussage über diverse wissenschaftliche Entdeckungen, die eine neue Struktur hervorbringen, trifft ebenso auf die gesamte Wissenschaft im 20. Jahrhundert zu. Bis heute verbanden sich alle Zweige und Disziplinen der Wissenschaft zu einem fachübergreifenden, komplexen Geflecht der Erkenntnis, das uns nun den Weg in die Zukunft weist. Die Grenzen, durch die Astronomie, Physik und Biologie früher klar voneinander getrennt waren, wurden, zusammen mit anderen Fachgebieten und Teildisziplinen, zu fruchtbaren Feldern gemeinsamer Interessen und vereinter Bemühungen. Wie wir im Teil 7 über die DNA gesehen haben, wandten sich in den letzten Jahrzehnten etliche

Physiker der Biologie zu, während Biologen und Genetiker manche Antworten mit Hilfe der Chemie fanden. In unserem Jahrhundert nutzten die Astronomen auch Ergebnisse der Physiker und der Chemiker, und die Geologen enthüllten entscheidende Aspekte des Ursprungs und der Entwicklung des Lebens. »In einem Augenblick scheint alles geklärt«, schrieb Eiseley, »aber gleich darauf geht eine andere Form wie aus dem Nichts hervor«.

Die Naturwissenschaftler des 20. Jahrhunderts sind vorwiegend Experimentatoren und keine Theoretiker. Sie sind Molekulargenetiker, Biochemiker, Biophysiker, Kosmologen oder auch Experten in anderen Kombinationen von Bereichen, wie sie in früheren Zeiten unbekannt waren. Im 16. Jahrhundert machte Kopernikus lediglich 27 Beobachtungen am Himmel und kam dann durch logische Überlegung darauf, daß die Sonne das Zentrum des Sonnensystems darstellt. Ähnlich verkörperten Newton, Darwin und Einstein den einzelnen Wissenschaftler, der Beweise sammelt und auswertet, bis er schließlich eine Theorie formulieren kann. Vier der fünf großen Entdeckungen des 20. Jahrhunderts - nämlich Atombau, Urknall, Zelle und DNA-Struktur - wurden möglich, weil die wissenschaftliche Arbeit des einzelnen von der Teamarbeit abgelöst wurde. Im 20. Jahrhundert wurde die Wissenschaft sozusagen symbiotisch, und ihre Teilbereiche überlappen sich jetzt. Die Wissenschaftler wollten nicht länger auf ein definiertes Gebiet beschränkt sein. Sie erkannten die Notwendigkeit der gegenseitigen Anregung und wissen nun, daß sie die Entwicklungen auf anderen Gebieten verfolgen und Informationen mit deren Vertretern austauschen müssen.

Erste Anzeichen für Zusammenhänge zwischen Astronomie und Physik gab es Anfang des 17. Jahrhunderts, als Kepler die Gesetze der Planetenbewegung entdeckte. Die beiden Fachgebiete vereinigten sich dann im 20. Jahrhundert, als die Urknalltheorie Gestalt annahm. Ab 1936 entwickelte George Gamow die erste Theorie, die eine Verbindung zwischen den Prozessen im Atomkern und dem Urknall herstellte. In den letzten Jahrzehnten entwickelten sich die Teildisziplinen Biophysik, Biochemie und Molekulargenetik. Später haben Biologen, Chemiker und Genetiker ihre Kenntnisse in vielfältigster Weise kombiniert, so daß ihre Fachgebiete nicht mehr separat vorstellbar sind. Kohlenstoff,

Stickstoff, Sauerstoff und Phosphor sind wichtige Bausteine der Moleküle lebendiger Organismen. Die Proteine, die unerlässlich für alles Leben sind, können sich nur bilden, wenn Stickstoff aufgenommen wird. Stickstoff ist auch ein essentieller Bestandteil der DNA. Auch andere Elemente sind für das Leben bedeutsam: Natrium und Kalium spielen in Nervensystem und Gehirn eine große Rolle, und Calcium ist unter anderem für den Aufbau von Knochen und Muschelschalen unentbehrlich.

In seinem berühmten Buch *Eine kurze Geschichte der Zeit* stellte der Physiker Stephen Hawking auch Verknüpfungen zwischen Atomphysik und Biologie her. Wenn die elektrische Ladung des Elektrons nur ein wenig anders wäre, so erklärte er, könnte entweder in der Sonne und anderen Sternen keine Kernfusion stattfinden (bei der Wasserstoff in Helium umgewandelt wird), oder viele Sterne wären nicht explodiert. In beiden Fällen hätte sich das Leben, wie wir es auf der Erde kennen, nicht entwickeln können, weil entweder das Sonnenlicht gefehlt hätte oder weil es keine schwereren Elemente gäbe, denn diese werden ja in den Sternen gebildet und bei deren Explosion in den Weltraum geschleudert.

Hinsichtlich der Geschichte der klassischen Genetik bemerkte Francis Crick, daß »es entscheidend war, sie mit der Biochemie zu kombinieren«. In seinem Buch *What Mad Pursuit* befaßte er sich mit dem Entstehen wissenschaftlicher Entdeckungen und erklärte, daß sich Genetiker und Proteinchemiker erst sehr spät dessen bewußt wurden, daß sie sich auch mit dem jeweils anderen Gebiet befassen mußten, um aussagekräftige Experimente konzipieren zu können. Nur so war das Rätsel des DNA-Moleküls zu lösen.

Noch 1954 (nach der Entdeckung der Doppelhelix) waren die meisten Genetiker nicht bereit, sich Kenntnisse auf dem Gebiet der Proteinchemie anzueignen; Entsprechendes galt umgekehrt. Wie wir in Kapitel 19 sahen, identifizierte der Chemiker Vernon Ingram im genetischen Code für eine Aminosäure des Proteins Hämoglobin eine bestimmte Veränderung, die für die Sichelzellanämie verantwortlich ist. Crick würdigte Ingrams Forschung als »eine einschneidende Änderung im Verhältnis« zwischen Genetikern und Proteinchemikern. Er bemerkte, daß die Wissen-

schaftler auch ihre Lektion über die Synthese verschiedener Disziplinen lernen müssen. »In der Natur«, so konstatierte Crick, »sind gekreuzte Arten normalerweise unfruchtbar, aber in der Wissenschaft ist oft das Gegenteil der Fall. Mischungen verschiedener Aspekte sind häufig erstaunlich fruchtbar. (...) Wenn ein wissenschaftliches Teilgebiet zu rein bleibt, stirbt es gewöhnlich aus«. Gegenseitige Anregungen führten auch zu vielen medizinischen Fortschritten, die man im 20. Jahrhundert feiern konnte.

## **Im 20. Jahrhundert erzielt die Wissenschaft nur noch schrittweise Erfolge**

### *Anonymität und Nobelpreiswürde*

Das bessere Verständnis wissenschaftlicher Prinzipien führte zur stärkeren Spezialisierung der Forscher. Jeder neue Aspekt, jede aufgeworfene Frage und jede Theorie gehen heute auf das Wirken zahlreicher Wissenschaftler zurück, die sozusagen auf ein kollektives Ergebnis hinarbeiten. Aber jeder von ihnen konzentriert sich auf sein eigenes, eng umrissenes Spezialgebiet. Anders als bei den in diesem Buch behandelten sieben bedeutenden Theorien, die die Wissenschaft revolutioniert haben, ergaben sich in den letzten Jahrzehnten nur schrittweise Erfolge, also detaillierte Erkenntnisse in Teilbereichen, abgeleitet aus Experimenten und Untersuchungen in Forschungslabors auf der ganzen Welt. Diese Arbeiten trugen in ihrer Gesamtheit zu einem noch tieferen Verständnis bestimmter Entwicklungsphasen des Universums oder der Lebewesen bei. Louis Pasteur meinte einmal: »Wissenschaft schreitet fort durch vorsichtige Antworten auf eine Reihe immer subtilerer Fragen, die tiefer und tiefer in das Wesen der natürlichen Vorgänge hineinführen.«

Heute liegt das Schwergewicht auf Forschungen, mit denen man einzelne Aspekte bereits bewiesener Fakten klären will. Zudem sind vermutlich kaum noch wissenschaftliche Enthüllungen möglich, die ähnlich bedeutsam sein können wie die hier vorgestellten sieben Entdeckungen. In seinem Buch *The End of Science* prophezeite John Horgan, daß »dies das Zeitalter ist, in dem die fundamentalen Naturgesetze entdeckt werden. (...) Aber solche

Tage werden niemals wiederkommen«. Die Wissenschaft des 20. Jahrhunderts befaßt sich eher mit dem unendlich Kleinen als mit dem Unendlichen. Sogar die Erforschung der Materie im Universum wurde zu derjenigen der Elementarteilchen. Hier suchen die Wissenschaftler mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern nach der »Großen Vereinheitlichten Theorie«. Sie soll eine Brücke zwischen den kleinsten Quanten und dem Kosmos schlagen. Nach ihr hatte Albert Einstein vierzig Jahre lang vergeblich gesucht. Sie würde Chemie, Elektromagnetismus, Astrophysik, Mechanik und die gesamte übrige Physik in einem einzigen Satz von Gleichungen vereinigen, die alles erklären.

Die Wissenschaft im 20. Jahrhundert bedient sich gleichermaßen der Elektronenmikroskope wie der Weltraumteleskope. In Hunderten von Instituten wird Grundlagenforschung betrieben, die zum Teil privat finanziert wird. Das ist nicht mehr die Wissenschaft, bei der ein Naturkundler Spuren und Hinterlassenschaften von Finken auf den Galapagos-Inseln sammelt. Das Brookhaven National Accelerator Laboratory in Upton auf Long Island ist eines der drei staatlichen US-Institute für Teilchenphysik. Auf seinem 2000 Hektar großen Campus arbeiten über 3000 Forscher. Das sogenannte Forschungs-Dreieck zwischen Raleigh, Durham und Chapel Hill im US-Staat North Carolina hat über 300 Beschäftigte und beherbergt auch das staatliche Institut für Umwelt und Gesundheit. In weiteren Instituten untersucht man beispielsweise, ob bestimmte Chemikalien in unserer Umwelt Krebs oder Mißbildungen auslösen, oder man erforscht, ob die Expression gewisser Gene zu einigen Krebsarten führt. Im Cold Spring Harbor Laboratory in New York, an dem James Watson über zwanzig Jahre lang wirkte, wird der Prozeß erforscht, der die Genexpression steuert. Hier ist auch die Zentrale des Human-Genom-Projekts angesiedelt.

Die Wissenschaft im 20. Jahrhundert verknüpft individuelle Beiträge aus der ganzen Welt zu einer Wissenschaft vieler. Sie ist also nicht mehr die Wissenschaft einzelner. Durchbrüche und Entdeckungen werden von Teams erzielt, teils auch von den Mitarbeitern ganzer Labors oder Institute, praktisch nie von Einzelnen. Sogar die Benennung neuer Elemente, bisher dem Entdecker vorbehalten, obliegt heute einem Gremium der IUPAC (Internationa-





Abb. E.1: Die sechs Stufen des Ansehens in der Wissenschaft

tional Union for Pure and Applied Chemistry), der Internationalen Vereinigung für reine und angewandte Chemie.

Trotz des Trends zur Teamarbeit werden individuelle Leistungen anerkannt und honoriert, zuweilen durch den Nobelpreis. Er ist die Krönung jeder Forscherlaufbahn. Die Nobelpreise, erstmals 1901 vergeben, werden von einer Stiftung finanziert, die 1896 mit dem hinterlassenen Vermögen des schwedischen Chemikers und Ingenieurs Alfred Bernhard Nobel (1833-1896) eingerichtet wurde. Nobel, übrigens der Erfinder des Dynamits, hatte in seinem Testament verfügt, daß jährlich Preise an jene Wissenschaftler zu vergeben seien, »die im vorangegangenen Jahr am entscheidendsten zum Wohle der Menschheit beitragen«. Außer dem Friedens- und dem Literaturnobelpreis werden Nobelpreise in vier Bereichen verliehen: Ökonomie, Physik, Chemie und Physiologie oder Medizin.

Die Abbildung E.1 zeigt sechs Stufen, in die man wissenschaftliche Leistungen und das entsprechende Ansehen einteilen kann. An der Spitze der Pyramide stehen erwartungsgemäß die Nobelpreisträger. Zu ihnen gehörten beispielsweise Curie, Einstein,

Crick und Watson. Den zweiten Rang könnte man als nobelpreiswürdig bezeichnen. Die Arbeiten dieser Forscher sind ebenso einflussreich, bahnbrechend und für die Menschheit bedeutsam wie die der Nobelpreisträger, aber eben nicht die ersten auf dem betreffenden Gebiet. Auf der dritten Stufe finden wir jene Forscher, die in den angesehensten wissenschaftlichen Zeitschriften publizieren, darunter *Science*, *Nature* und *Cell*. Beispielsweise werden in den USA die Arbeiten dieser Wissenschaftler kontinuierlich finanziert, und zwar aus privaten und aus staatlichen Mitteln, etwa über das National Institute of Health und die National Science Foundation. Auf Stufe vier stehen die Wissenschaftler, die auf ihrem jeweiligen Spezialgebiet bekannt sind und darin beträchtliche Fortschritte erzielten. Sie publizieren regelmäßig in angesehenen Spezialzeitschriften und gelegentlich in den berühmteren allgemeinen Zeitschriften. Die Angehörigen der fünften Stufe publizieren natürlich ebenfalls, aber meist in fragwürdigeren und weniger verbreiteten Zeitschriften. Sie geben ihrem Fachgebiet keine besonderen Impulse und haben in Ländern wie den USA (mit nicht so durchgängiger öffentlicher Finanzierung) zuweilen Schwierigkeiten, an Forschungsmittel zu kommen. Forscher im untersten, sechsten Rang können im allgemeinen keine bemerkenswerten Publikationen vorweisen und genießen kaum finanzielle Förderung für ihre wissenschaftlichen Projekte. Es gibt weltweit Zehntausende von Wissenschaftlern, die man in dieser Pyramide einordnen könnte. Viele von ihnen tragen zur schrittweisen Erweiterung der Erkenntnisse bei.

Die Teamarbeit in der Forschung führte - obwohl die individuelle Leistung immer noch anerkannt wird - zu einer paradoxen Situation. Auch die bedeutendsten Forscher des 20. Jahrhunderts, die auf der obersten Stufe der Pyramide stehen und äußerst anspruchsvolle Arbeiten durchführen, sind der Öffentlichkeit kaum bekannt. Wie wir in den vorigen Kapiteln gesehen haben, gehörten beispielsweise Marie Curie, Ernest Rutherford, Albert Einstein, Niels Bohr, Edwin Hubble, Thomas Morgan, Francis Crick, James Watson, Arno Penzias und Robert Wilson zu den hervorragendsten Wissenschaftlern unseres Jahrhunderts. Von ihnen sind Crick, Watson, Penzias und Wilson noch tätig. Fragt man aber irgend jemanden auf der Straße nach den Namen einiger Nobel-

preisträger, dann wird oft nur Einstein genannt, vielleicht auch Curie.

Die letzte der sieben bedeutenden wissenschaftlichen Entdeckungen war die von Crick und Watson im Jahre 1953. Gab es in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts keine großen Wissenschaftler mehr? Doch, aber die Chancen für einen hohen Bekanntheitsgrad sind geringer geworden, weil die Arbeiten mittlerweile so ungeheuer komplex und detailliert sind und daher nur langsam sichtbare Fortschritte zeigen. Zwar werden jedes Jahr die Nobelpreise für die Naturwissenschaften an Einzelpersonen vergeben, doch die Einzelresultate, für die diese Preise zuerkannt werden, bleiben immer tiefer im Labyrinth der modernen Wissenschaft verborgen.

### **Die sieben bedeutendsten wissenschaftlichen Entdeckungen in der Geschichte...**

Während wir weiterhin über politische Strukturen und religiöse Anschauungen streiten und immer noch nicht wissen, wie wir die nötigen Güter am besten herstellen und verteilen oder wie wir die armen Ländern fördern können, wissen wir inzwischen doch einiges über die Natur. Wir haben in letzter Zeit Erkenntnisse gewonnen, von denen noch vor hundert Jahren keiner zu träumen gewagt hätte.

Alle Materie im Universum befindet sich immer noch in einer Bewegung, die vom Urknall vor rund 15 Milliarden Jahren herrührt. Während der ersten gut 10 Milliarden Jahre des Universums formte sich unser Planet aus dem Staub und den Gasen, und später bildeten sich die ersten Zellen von Lebewesen. Innerhalb von gut drei Milliarden Jahren entwickelten sich diese Zellen zu vielzelligen Organismen. Es entstanden Pflanzen, die mit Hilfe der Energie des Sonnenlichts aus Wasser und Kohlendioxid Kohlenhydrate bilden. Dabei wird - sozusagen als Abfallprodukt - Sauerstoff frei, den die Tiere und auch der Mensch einatmen. Bei deren Stoffwechsel fällt Kohlendioxid an, das wiederum von den Pflanzen benötigt wird, wie eben beschrieben. Alle Lebewesen sind natürliche Produkte unseres Planeten, dieser rotieren-

den Kugel, die einen ganz gewöhnlichen, 150 Millionen Kilometer weit von ihr entfernten Stern, unsere Sonne, umrundet. Das Ganze spielt sich in einem Spiralarm der Milchstraße ab, die nur eine von Milliarden von Galaxien ist.

Nachdem die ersten Säugetiere die Erde bevölkerten, vergingen ein paar hundert Jahrmillionen, bis der *Australopithecus* auf den Plan trat. In den nächsten drei Millionen Jahren ging aus diesem Wesen, das in der Landschaft nur herumstreifte, der *Homo sapiens* hervor, der zum Gestalter eben dieser Landschaft werden sollte. Er wurde intelligent genug, sich Fragen über das Universum und auch über sich selbst zu stellen. Wir sind inzwischen sechs Milliarden Individuen, deren Organismus letztlich aus winzigsten, schwer faßbaren und fein aufeinander abgestimmten elektrischen Teilchen besteht, die sich zu 60 Billiarden Zellen vereinigen. Sie werden durch das Wechselspiel der gleichen Ladungen auf der Erde festgehalten.

### **... und die Menschen, die sie machten**

Newton trat in die Fußstapfen Keplers und Galileis und führte die Menschheit an die Grenzen der damaligen Erkenntnismöglichkeiten. Ernest Rutherford, Marie Curie und Niels Bohr entdeckten das von Leukipp postulierte kleinste Teilchen. Albert Einstein identifizierte die enorme Energie, die in diesem Teilchen schlummert, und definierte Zeit und Raum neu. Edwin Hubble blickte durch das Teleskop und sah, daß sich die Galaxien voneinander entfernen. Charles Darwin beschäftigte sich mit der großen Vielfalt des Pflanzen- und Tierreichs und sah einen gemeinsamen Urahn. Mit ihren Mikroskopen erkannten Schleiden, Schwann, Flemming und Weismann schließlich den Kern allen Lebens und Wachstums. An einigen Generationen von Erbsenpflanzen bemerkte Gregor Mendel, daß gewisse Erbfaktoren durch einen damals noch ungeklärten Prozeß weitergegeben werden. Diesen Vorgang konnten East, Morgan und andere später identifizieren. Francis Crick und James Watson entzifferten den geheimen Text des Lebens, dessen erste Worte vor vier Milliarden Jahren in die erste Zelle geschrieben wurden.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse werden auch in Zukunft unser Schicksal bestimmen. Der Homo sapiens wird weiterhin nach den Antworten auf immer neue Fragen suchen. Wir werden neue Begriffe und neue Theorien entwickeln, und wir werden unsere Bemühungen fortsetzen, die Natur zu verstehen. Wir Menschen unterscheiden uns von den Tieren. Wir dürfen nicht aufhören, zu entdecken, zu erschaffen, zu erforschen und zu erfinden. Wir müssen neue Verfahren zur Heilung und zur Bewahrung des Lebens finden, denn wir sind Entdecker, Erschaffer, Erforscher und Erfinder. Wir suchen das Unbekannte - die Tiefe, die Dunkelheit, die nie zuvor jemand durchdrang -, und wir tragen in uns die Möglichkeit zu weiterreichenden Einsichten und Erkenntnissen.

Wir stehen an der Schwelle zur Zukunft. Wir fanden unseren Platz, indem wir zurückschauten und die Geschichte verstanden. So treten wir in das 21. Jahrhundert ein. Der Amerikaner Orville Wright meinte: »Wir müssen nicht allzu weit sehen, um die Zukunft zu erkennen. Wir können bereits sehen, daß sie großartig sein wird.«

Wir haben eine 15 Milliarden Jahre dauernde Reise vollendet.

## Danksagung

Dieses Buch wäre nicht möglich gewesen ohne die Mithilfe vieler fähiger und großzügiger Personen. Zunächst wollen wir hier unseren Cousin Stephen Karon nennen, der schon mit zehn Jahren einiges über Astronomie, Physik und Elektromagnetismus wußte. Heute ist er Direktor des Museums für Wissenschaft und Technik in Syracuse, New York. Viele Jahre lang wirkte er beratend und lehrend auf verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten. Wir danken ihm für seine sorgfältige Durchsicht des gesamten Manuskripts und für seine wertvollen Beiträge. Kenneth und Bette Brody, beide Chemielehrer und Experten für Wissenschaftsgeschichte, nahmen sich die Zeit, einige Kapitel kritisch zu lesen. Ihnen verdanken wir zahlreiche Verbesserungsvorschläge und etliche nützliche Quellen.

In den frühen Stadien unserer Recherchen ließ uns Joseph Broz, ein kenntnisreicher Physiker mit fundiertem Einblick in die Beziehungen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft, an seinem Wissen teilhaben, vor allem über die Relativitätstheorie und die Geschichte der Naturwissenschaften. Auch ihm verdanken wir mehrere ausgezeichnete Quellen. Robert C. Amme, in den letzten dreißig Jahren Physikprofessor an der Universität Denver, verbrachte viele Stunden damit, Entwürfe des Teils 3 dieses Buches durchzusehen und uns manche Erläuterungen zu geben. Seine Kollegen Becke McGee und Brad McKim lasen diesen Teil ebenfalls und unterbreiteten uns verschiedene Vorschläge, die wir gern einarbeiteten. Diese vier Personen halfen uns dabei, die Relativitätstheorie so zu schildern, daß wir hoffen dürfen, diese so schwer begreifbare Theorie von Raum und Zeit unseren Lesern nahegebracht zu haben.

Wir danken Peter Jordan für seine Anmerkungen zum Teil 5 (Evolution) und für manche Information über Geologie und Plattentektonik, schließlich auch für Hinweise auf bemerkenswerte wissenschaftliche Entdeckungen und Beiträge, die von seinen schottischen Landsleuten stammen.

Davids Frau Susan las das gesamte Manuskript und machte viele konstruktive Anmerkungen. Wir danken ihr hierfür und auch für ihre Geduld, ebenso wie für die Unterstützung und Ermutigung, die sie uns gab. Daniel Buttermann verdanken wir einen wertvollen Beitrag zu Kapitel 19 (DNA-Struktur), und zwar hinsichtlich der Methoden, die Bakterien zu identifizieren, die eine Erkrankung der Zahnwurzel hervorrufen. Gary Sattin machte uns darauf aufmerksam, wie wichtig es ist, die bedeutenden Entdeckungen in ihrem jeweiligen gesellschaftlichen Kontext zu betrachten.

Wir danken der Penrose-Bibliothek an der Universität Denver, ebenso der Norlin-Bibliothek an der Universität von Colorado sowie den verschiedenen städtischen Bibliotheken und dem Museum für Naturgeschichte in Denver. Alle Angehörigen dieser Institutionen waren äußerst kooperativ und gewährten uns Zugang zu ihren umfassenden Informationsquellen.

Großer Dank gebührt Elizabeth Kaplan von der literarischen Agentur Ellen Levine in New York. Sie machte dieses Buch möglich, indem sie uns schon früh dabei beriet, wie wir es angehen sollten, welche Ausrichtung es nehmen und in welchem Verlag es erscheinen sollte. Die Lektorin bei Perigee Books, Suzanne Bober, unterstützte dieses Projekt seit Anbeginn unserer Zusammenarbeit sehr intensiv. Wir danken ihr für das gründliche und einfühlsame Lektorieren des Manuskripts, wie auch für die fachkundige Führung durch alle Stadien bis zum Erscheinen. Der Redakteur, Kim Mohan, machte uns in meisterhafter Weise auf zahlreiche Wörter, Sätze und Begriffe aufmerksam, die deutlicher formuliert oder verändert werden mußten. Wir danken ihm nicht nur für sein ausgezeichnetes Redigieren, sondern auch für das Einbringen seiner Kenntnisse wissenschaftlicher und historischer Details.

Bonnie Rothschild tippte und überprüfte auf beispielhafte Weise viele Entwürfe des Manuskripts, die im Laufe einiger Jahre

nötig waren. Wir danken ihr für ihre qualifizierte Arbeit sowie für ihre Schnelligkeit und für die Zuverlässigkeit, mit der sie unsere Termine einhielt. Oft genug mußte sie dazu die ganze Woche fast rund um die Uhr arbeiten.

David E. Brody  
Arnold R. Brody



# BIBLIOGRAPHIE

## TEIL 1

### Gravitation und die Grundgesetze der Physik

- Andrade, E. N. da C. *Sir Isaac Newton*. New York: Doubleday, 1958.
- Augros, Robert M. und George N. Stansciu. *The New Story of Science*. New York: Bantam Books, 1984.
- Baumgardt, Carola. *Johannes Kepler, Life and Leiters*. New York: Philosophical Library, 1951.
- Caspar, Max. *Johannes Kepler*. GNT-Verlag, 1995.
- Caspar, Max. *Kepler*. New York: Abelard-Schuman Ltd., 1959.
- Christianson, Gale E. *In the Presence of the Creator*. New York: The Free Press, 1984.
- Clarke, Arthur C. und Gentry Lee. *Die Wiege der Zukunft*. München: Heyne, 1989.
- Cohen, I. Bernard. *Introduction to Newton's Principia*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978.
- Cooper, Lane. *Aristotle, Galileo, The Leaning Tower of Pisa*. New York: Ithaca Press, 1935.
- Drake, Stillman. *Discoveries and Opinions of Galileo*. New York: Doubleday Anchor Books, 1957.
- Drake, Stillman. *Galileo at Work*. Chicago: The University of Chicago Press, 1978.
- Drake, Stillman. *Galileo Studies*. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1970.
- Drake, Stillman. *Galileo: Pioneer Scientist*. Toronto: University of Toronto Press, 1990.
- Ferris, Timothy. *Das intelligente Universum. Ein Blick zurück auf die Erde*. Byblos, 1992.
- Ferris, Timothy. *Das Weltall und ich. Eine unterhaltsame Einführung in die neuen Wissenschaften von Mensch, Erde und Kosmos*. Frankfurt/M.: Insel, 1995.

- Koestler, Arthur. *The Watershed*. Lanham, MD: University Press of America, 1960.
- Koyre, Alexandre. *Leonardo, Galilei, Pascal. Die Anfänge der neuzeitlichen Naturwissenschaft*. Frankfurt: Fischer, 1998.
- Koyre, Alexandre. *Newtonian Studies*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1965.
- Motz, Lloyd und Jefferson Hane Weaver. *The Concept of Science*. New York: Plenum Press, 1988.
- Sagan, Carl. *Unser Kosmos*. München: Droemer Knaur, 1982/1991.
- Sagan, Carl. *Signale der Erde. Unser Planet stellt sich vor*. München: Droemer Knaur, 1980.
- Thoren, Victor E. *The Lord of Uraniborg*. New York: Cambridge University Press, 1990.
- Westfall, Richard S. *The Life of Isaac Newton*. New York: Cambridge University Press, 1993.
- Westfall, Richard. *Isaac Newton. Eine Biographie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.
- Ziegler, Philip. *The Black Death*. Wolfeboro Falls, NH: Alan Sutton Publishing Inc., 1991.

## TEIL 2

### Der Aufbau des Atoms

- Asimov, Isaac. *Understanding Physics: The Electron, Proton, and Neutron*. New York: New American Library, 1966.
- Asimov, Isaac. *Vom Kosmos zum Chaos. Eine Reise durch die Welt der Elementarteilchen*. München: Knaur, 1993.
- Atkins, P. W. *Im Reich der Elemente. Ein Reiseführer zu den Bausteinen der Natur*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1997.
- Brady, James E. und John R. Holum. *Fundamentals of Chemistry*. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- Crease, Robert P. und Charles C. Mann. *The Second Creation*. New York: Macmillan Publishing Company, 1986.
- Curie, Eve. *Madame Curie. Die weltberühmte Biographie der Nobelpreisträgerin, die das Radium entdeckte*. Frankfurt: Fischer, 1980.
- Davies, Paul. *Der Plan Gottes. Das Rätsel unserer Existenz und die Wissenschaft*. Frankfurt/M.: Insel, 1995.
- Feinberg, J. G. *The Story of Atomic Theory and Atomic Energy*. New York: Dover Publications, 1960.
- Feynman, Richard P. *Sie belieben wohl zu scherzen, Mr. Feynman! Abenteuer eines neugierigen Physikers*. München: Piper, 1997.
- Gamow, George. *Atomic Energy in Cosmic and Human Life*. New York: Macmillan, 1947.

- Holden, Alan. *The Nature of Atoms*. New York: Oxford University Press, 1971.
- Ihde, Aaron J. *The Development of Modern Chemistry*. New York: Dover Publications, 1984.
- Lossau, Norbert. *Röntgen. Eine Entdeckung verändert unser Leben*. Köln: vgs, 1995.
- Malone, Leo J. *Basic Concepts of Chemistry*. Weinheim: Wiley/VCH, 1997
- Morris, Richard. *The Edges of Science*. New York: Prentice Hall Press, 1990.
- Packard, Edward. *Imagining the Universe*. New York: Perigee Books, 1994.
- Pflaum, Rosalynd. *Grand Obsession: Madame Curie and Her World*. New York: Doubleday, 1989.

### TEIL 3

#### **Das Relativitätsprinzip**

- Bondi, Hermann. *Mythen und Annahmen in der Physik*. Braunschweig: Vandenhoeck, 1971.
- Clark, Ronald W. *Einstein, The Life and Times*. London: Hodder and Stoughton, 1973.
- Einstein, Albert und Leopold Infeld. *Die Evolution der Physik*. Hamburg: Rowohlt, 1995.
- Einstein, Albert. *Einstein sagt. Zitate, Einfülle, Gedanken*. München: Piper, 1997.
- Einstein, Albert. *Mein Weltbild*. Berlin: Ullstein, 1998.
- Frank, Philipp. *Einstein, His Life and Times*. New York: Alfred A. Knopf, 1947
- Hawking, Stephen W. *Anfang oder Ende?* München: Heyne, 1994.
- Hawking, Stephen W. *Eine kurze Geschichte der Zeit. Die Suche nach der Urkraft des Universums*. Hamburg: Rowohlt, 1988.
- Jeans, James. *Physics and Philosophy*. New York: Dover Publications, 1981.
- Kern, Stephen. *The Culture of Time and Space 1880-1918*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1983.
- Michelmores, Peter. *Einstein, Profile of the Man*. New York: Dodd, Mead & Co., 1962.
- Pais, Abraham. „Raffiniert ist der Herrgott“ *The Science and the Life of Albert Einstein*. New York: Oxford University Press, 1982.
- Pais, Abraham. *Ich vertraue auf Intuition. Der andere Albert Einstein*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1995.

- Russell, Bertrand. *Das ABC der Relativitätstheorie*. Frankfurt: Fischer, 1997.
- Sartori, Leo. *Understanding Relativity*. Berkeley: University of California Press, 1996.
- Sayen, Jamie. *Einstein in America*. New York: Crown Publishers, 1985.
- Schupp, Paul Arthur (Hrsg.). *Albert Einstein: Philosoph - Scientist*. New York: The Library of Living Philosophers, 1949.
- Swenson, Lloyd S., Jr. *Genesis of Relativity*. New York: Burt Franklin & Co., 1979.

#### TEIL 4

#### **Der Urknall und die Entstehung des Universums**

- Asimov, Isaac. *Kosmos, Erde, Materie, Technik*. München: Knaur, 1988.
- Barrow, John. *Der Ursprung des Universums. Wie Raum, Zeit und Materie entstand*. München: Berteismann, 1998.
- Davies, Paul. *Die letzten drei Minuten. Das Ende des Universums*. München: Berteismann, 1997.
- Duschl, Wolfgang und Michael T. Scholz. *Planeten, Sonnen, Galaxien. Ein Grundriß der Astronomie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1998.
- Fall, S.M. und D. Lynden-Bell (Hrsg.). *The Structure and Evolution of Normal Galaxies*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1981.
- Ferris, Timothy. *Galaxien*. Basel: Birkhäuser, 1996.
- Hazen, Robert M. und James Trefil. *Science Matters*. New York: Doubleday, 1991.
- Heiserman, David. *Radio Astronomy for the Amateur*. Blue Ridge Summit, PA: TAB Books, 1975.
- Heuer, Kenneth. *The End of the World*. New York: Rinehart & Company, 1953.
- Hey, J. S. *The Evolution of Radio Astronomy*. New York: Science History Publications, 1973.
- Hodge, Paul W. *Atlas of the Andromeda Galaxy*. Seattle: University of Washington Press, 1981.
- Hodge, Paul W. *Galaxies*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1986.
- Islam, Jamal N. *The Ultimate Fate of the Universe*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1983.
- Kaufmann, William J., III. *Galaxies and Quasars*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979.
- Kühn, Ludwig. *The Milky Way*. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- Longair, Malcolm S. *Das erklärte Universum*. Berlin: Springer, 1998.

- Macvey, John W. *Where Will We Go When the Sun Dies?* New York: Stein and Day, 1983.
- Morris, Richard. *The Fate of the Universe*. New York: PEI Books, 1982.
- Motz, Lloyd. *The Universe*. New York: Charles Scribner's Sons, 1975.
- Parker, Barry. *Colliding Galaxies*. New York: Plenum Press, 1990.
- Parker, Barry. *Invisible Matter and the Fate of the Universe*. New York: Plenum Press, 1989.
- Piddington, J. H. *Radio Astronomy*. New York: Harper & Brothers, 1961.
- Ronan, Colin A. *The Natural History of the Universe*. New York: Macmillan, 1991.
- Silk, Joseph. *Der Urknall. Die Geburt des Universums*. Basel: Birkhäuser, 1990.
- Sullivan, W. T. (Hrsg.). *The Early Years of Radio Astronomy*. New York: Cambridge University Press, 1984.
- Sutton, Christine (Hrsg.). *Building the Universe*. New York: Basil Blackwell Ltd., 1985.
- Time-Life: *Galaxien*. 1989.
- Trefil, James und Robert M. Hazen. *The Sciences. An Integrated Approach*. Weinheim: Wiley/VCH, 1997.
- Verschuur, Gerrit L. *The Invisible Universe*. London: The English University Press Ltd., 1974.
- Verschuur, Gerrit L. *The Universe Revealed*. New York: Springer-Verlag, 1987.
- Weinberg, Steven. *Die ersten drei Minuten. Der Ursprung des Universums*. München: Piper, 1992.

## TEIL 5

### **Evolution und das Prinzip der natürlichen Auslese**

- Angela, Piero und Alberto Angela. *The Extraordinary Story of Human Origins*. New York: Prometheus Books, 1993.
- Bronowski, Jacob. *The Ascent of Man*. Boston: Little, Brown and Company, 1973.
- Burkhardt, Frederick und Sydney Smith (Hrsg.). *The Correspondence of Charles Darwin*. (9 Bände). New York: Cambridge University Press, 1985.
- Campbell, Bernard G. *Humankind Emerging*. Boston: Little, Brown and Company, 1985.
- Cox, Allan (Hrsg.). *Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals*. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1973.
- Darwin, Charles. *Die Abstammung des Menschen*. Wiesbaden: Fourier, 1996.

- Darwin, Charles. *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*. Stuttgart: Reclam.
- Dawkins, Richard. *Und es entsprang ein Fluß in Eden*. München: Bertelsmann, 1996.
- Dennett, Daniel C. *Darwins gefährliches Erbe. Die Evolution und der Sinn des Lebens*. Hamburg: Hoffmann u. Campe, 1997.
- Durant, John (Hrsg.). *Darwinism and Divinity*. New York: Basil Blackwell Ltd., 1985.
- Eiseley, Loren. *Darwin's Century*. New York: Doubleday & Company, 1958.
- Eldredge, Niles and Ian Tattersall. *The Myths of Human Evolution*. New York: Columbia University Press, 1982.
- Eldredge, Niles. *Quantensprünge des Lebens. Das unterbrochene Gleichgewicht in der Evolution*. Hamburg: Rowohlt (noch nicht erschienen)
- Eldredge, Niles. *Wendezzeiten des Lebens, Katastrophen in Erdgeschichte und Evolution*. Frankfurt: Insel, 1997.
- Erickson, Jon. *Plate Tectonics*. New York: Facts on File, 1992.
- Fagan, Brian M. *Aufbruch aus dem Paradies, Ursprung und frühe Geschichte der Menschen*. München: C.H. Beck, 1991.
- Gould, Stephen Jay (Hrsg.). *Das Buch des Lebens*. Köln: vgs, 1993.
- Gould, Stephen Jay. *Wonderful Life*. New York: W. W Norton & Company, 1989.
- Humphrey, Nicholas. *Die Naturgeschichte des Ich*. Hamburg: Hoffmann u. Campe, 1995.
- Johanson, Donald und James Shreeve. *Lucys Kind. Auf der Suche nach den ersten Menschen*. München: Piper, 1992.
- Kearey, Philip und Frederick J. Vine. *Global Tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- Leakey, Richard und Roger Lewin. *Der Ursprung des Menschen. Auf der Suche nach den Spuren des Humanen*. Frankfurt: Fischer, 1993.
- Leakey, Richard. *Die ersten Spuren. Über den Ursprung des Menschen*. München: Bertelsmann, 1997.
- McCrone, John. *The Ape That Spoke*. New York: William Morrow and Company, 1991.
- Morris, Desmond. *Der nackte Affe*. München: Knauer, 1992.
- Poirier, Frank E. *Understanding Human Evolution*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- Reeder, John. *Man on Earth*. Austin: University of Texas Press, 1988.
- Sagan, Carl und Ann Druyan. *Schöpfung auf Raten. Neue Erkenntnisse zur Entwicklungsgeschichte des Menschen*. München: Knauer,
- Sagan, Carl und Ann Druyan. *Shadows of Forgotten Ancestors*. New York: Random House, 1992.
- Sagan, Carl. *Broca's Brain*. New York: Ballantine Books, 1979.

- Sagan, Carl. *Signale der Erde. Unser Planet stellt sich vor*. München: Droemer Knaur, 1980.
- Sagan, Carl. *The Dragons of Eden*. New York: Ballantine Books, 1977.
- Weiner, Jonathan. *Der Schnabel des Finken. Oder: Der kurze Atem der Evolution*. München: Droemer Knaur, 1996.
- Weiner, Jonathan. *Planet Earth*. New York: Bantam Books, 1986.

## TEIL 6

### Zelle und Genetik

- Alberts, B. et al.: *Molekularbiologie der Zelle*. Weinheim: Wiley/VCH, 1995.
- Leadbetter, Edward R. und J. S. Poindexter. *Bacteria in Nature*. New York: Plenum Press, 1985.
- Moody, Paul A. *Genetics of Man*. New York: W. W Norton & Company, 1967.
- Morgan, Thomas H. *Heredity and Sex*. New York: Columbia University Press, 1913.
- Peacocke, Arthur. *Gott, der Kosmos und die Freiheit. Biologie, Philosophie und Theologie im Gespräch*. Würzburg: Echter, 1996.
- Rensberger, Boyce. *Biology*. New York: Fawcett Columbine, 1996.
- Rosen, Robert. *Life Itself*. New York: Columbia University Press, 1991.
- Wright, Sewall. *Evolution and the Genetics of Populations*. Bd. i. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.

## TEIL 7

### Die Struktur des DNA-Molekiils

- Alberts, B. et al.: *Molekularbiologie der Zelle*. Weinheim: Wiley/VCH, 1995.
- Crick, Francis. *What Mad Pursuit*. New York: Basic Books, 1988. (Deutsche Ausgabe: *Ein irres Unternehmen*.)
- Gribbin, John. *In Search of the Double Helix*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985.
- Kornberg, Arthur. *DNA Replication*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980.
- Shapiro, Robert. *Der Bauplan des Menschen. Das Genomprojekt*, Bern, München, Wien: Scherz, 1992.
- Watson, James D. *Die Doppelhelix. Ein persönlicher Bericht über die Entdeckung der DNS-Struktur*. Hamburg: Rowohlt, 1997.

## Weitere Quellen

- Adler, Mortimer J. (Hrsg.). *Encyclopaedia Britannica*. 29 Bände. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., 1996.
- Bernal, J. D. *Science in History*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1969.
- Boorstin, Daniel J. *The Discoverers*. New York: Random House, 1983.
- Brennan, Richard R. *Dictionary of Scientific Literacy*. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- Bronowski, Jacob. *A Sense of the Future*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1977.
- Burke, James. *Connections*. Boston: Little, Brown and Company, 1978.
- Burke, James. *The Day the Universe Changed*. Boston: Little, Brown and Company, 1985.
- Campbell, Joseph. *Die Kraft der Mythen. Bilder der Seele im Leben des Menschen*. Düsseldorf: Artemis, 1994.
- Capra, Fritjof. *Wendezeit. Bausteine für ein neues Weltbild*. München: dtv, 1992.
- Carnegie Library of Pittsburgh. *The Handy Science Answer Book*. Detroit: Visible Ink Press, 1994.
- Clarke, Arthur C. und Gentry Lee. *Die Wiege der Zukunft*. München: Heyne, 1989.
- Cohen, I. Bernard. *Revolutionen in der Naturwissenschaft*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1994.
- Eiseley, Loren. *The Man who Saw Through Time*. New York: Charles Scribner's Sons, 1973.
- Feldman, Anthony und Peter Ford. *Erfinder und Wissenschaftler. Die Entstehung unserer Zivilisation, von den Anfängen bis heute*. Neuer Kaiser, 1980.
- Gardner, Martin (Hrsg.). *Great Essays in Science*. Buffalo, NY: Prometheus Books, 1994.
- Gillispie, Charles Coulston. *The Edge of Objectivity*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1960.
- Goldstein, Thomas. *Dawn of Modern Science*. Boston: Houghton Mifflin Company, 1980.
- Golob, Richard und Eric Brus (Hrsg.). *The Almanac of Science and Technology*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1990.
- Hagihara, Nobutoshi (Hrsg.). *Experiencing the Twentieth Century*. Tokio: University of Tokyo Press, 1985.
- Hart, Michael H. *The 100*. New York: A&W Visual Library, 1978.
- Hutchins, Robert Maynard (Hrsg.). *Great Books of the Western World*. 60 Bände. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1986.
- Ingpen, Robert und Philip Wilkinson. *Encyclopedia of Events That Changed the World*. New York: Penguin Books, 1991.
- Knight, David. *The Age of Science*. New York: Basil Blackwell Ltd., 1986.
- Kohlstedt, Sally Gregory und Margaret W. Rossiter (Hrsg.). *Historical*



- Writing on American Science*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1985.
- Kühn, Thomas S. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1973.
- Medawar, Peter. *The Threat and the Glory*. New York: HarperCollins Publishers, 1990.
- Moyers, Bill. *A World of Ideas*. New York: Doubleday, 1989.
- Patterson, Orlando. *Freedom*. New York: HarperCollins Publishers, 1991.
- Porter, Roy (Hrsg.). *Man Masters Nature*. New York: George Braziller, 1988.
- Ronan, Colin A. *Science*. New York: Facts on File, 1982.
- Rose, Steven und Lisa Appignanesi (Hrsg.). *Science and Beyond*. New York: Basil Blackwell Ltd., 1986.
- Russell, Bertrand. *Denker des Abendlandes. Eine Geschichte der Philosophie*. München: dtv, 1992.
- Seldes, George (Hrsg.). *The Great Thoughts*. New York: Ballantine Books, 1985.
- Serres, Michael (Hrsg.). *Elemente einer Geschichte der Wissenschaften*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1995.
- Simonton, Dean Keith. *Greatness*. New York: The Guilford Press, 1994.
- Thomas, Lewis. *The Fragile Species*. New York: Charles Scribner's Sons, 1992.
- Tipler, Frank J. *Die Physik der Unsterblichkeit. Moderne Kosmologie, Gott und die Auferstehung der Toten*. München: Piper, 1995.
- Williams, Trevor I. *Science*. New York: Oxford University Press, 1990.
- Zeldin, Theodore. *Eine intime Geschichte der Menschheit. Über die Kunst des Lebens*. Stuttgart: DVA, 1997.

Trotz aller Bemühungen konnte der Verlag nicht alle Rechteinhaber der Zitatquellen ausfindig machen. Er ist für entsprechende Hinweise dankbar. Rechtsansprüche bleiben gewahrt.