

Oliver Morsch

Licht und Materie

Eine physikalische
Beziehungsgeschichte

ERLEBNIS
wissenschaft



Oliver Morsch
Licht und Materie

Erlebnis Wissenschaft bei WILEY-VCH

J. Audretsch (Hrsg.)
Verschränkte Welt
Faszination der Quanten
2002, ISBN 3-527-40318-3

H. Bolz
GenComics
2001, ISBN 3-527-30420-7

U. Deichmann
Flüchten, Mitmachen, Vergessen
Chemiker und Biochemiker in der NS-Zeit
2000, ISBN 3-527-30264

J. Emsley
Parfum, Portwein, PVC ...
Chemie im Alltag I
1997, ISBN 3-527-29423-6

H. Emsley
Sonne, Sex und Schokolade
Chemie im Alltag II
1999, ISBN 3-527-29774-X

J. Emsley, P. Fell
Wenn Essen krank macht
2000, ISBN 3-527-30261-1

J. Emsley
Phosphor – ein Element auf Leben und Tod
2001, ISBN 3-527-30421-5

H. Genz
Gedankenexperimente
1999, ISBN 3-527-28882-1

P. Häußler
Donnerwetter – Physik
2001, ISBN 3-527-40327-2

H. Hellmann
Zoff im Elfenbeinturm
Große Wissenschaftsdispute
2000, ISBN 3-527-29984-X

R. Hoffmann
Sein und Schein
Reflexionen über die Chemie
1997, ISBN 3-527-29418-X

F. Krafft
Vorstoß ins Unerkannte
Lexikon großer Naturwissenschaftler
1999, ISBN 3-527-29656-5

G. Kreysa
Fusionsfieber
1998, ISBN 3-527-29627-1

J. Koolman, H. Moeller, K.-H. Röhm
(Hrsg.)
Kaffee, Käse, Karies ...
Biochemie im Alltag
1998, ISBN 3-527-29530-3

O. Morsch
Licht und Materie
Eine physikalische Beziehungsgeschichte
2003, ISBN 3-527-30627-7

M. Pehnt
Energiewelt Brennstoffzelle?
Perspektiven – Fakten – Anwendungen
2001, ISBN 3-527-30511-4

H.-J. Quadbeck-Seeger, A. Fischer (Hrsg.)
Die Babywindel und 34 andere
Chemiegeschichten
2000, ISBN 3-527-30262-X

D. Raabe
Morde, Macht, Moneten
Metalle zwischen Mythos und Hightech
2001, ISBN 3-527-30419-3

M. Reitz
Gene, Gicht und Gallensteine
Wenn Moleküle krank machen
2001, ISBN 3-527-30313-8

M. Reitz
Auf der Fahrt der Zeit
Mit naturwissenschaftlichen Methoden
vergangene Rätsel entschlüsseln
2003, ISBN 3-527-30711-7

M. Schneider
Teflon, Post-it und Viagra
Große Entdeckungen durch kleine Zufälle
2002, ISBN 3-527-29873-8

E. Unger
Auweia Chemie
1998, ISBN 3-527-29538-0

H. Zankl
Fälscher, Schwindler, Scharlatane
Betrug in Forschung und Wissenschaft
2003, ISBN 3-527-30710-9

Oliver Morsch
Licht und Materie

Eine physikalische Beziehungsgeschichte

Mit einem Geleitwort von Wolfgang Ketterle



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA

Dr. Oliver Morsch
Università di Pisa
Dipto. di Fisica
Via Buonarroti 2
I-56127 Pisa
Italien

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information Der Deutschen
Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese
Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

© 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA,
Weinheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenzeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Satz: TypoDesign Hecker GmbH, Leimen
Druck und Bindung: Ebner & Spiegel GmbH, Ulm

ISBN 3-527-30627-7

ISBN ePDF 978-3-527-64105-5

ISBN ePub 978-3-527-64104-8

ISBN Mobi 978-3-527-64106-2

Inhalt

Geleitwort

Einleitung

1

Haben Sie eines gesehen?

Die Geschichte der Atomhypothese 1

2

Das Geheimnis des Regenbogens

Eine kurze Geschichte des Lichts 25

3

Von Rosinenkuchen und Planetensystemen

Atommodelle und die Geburtsstunde der Quantentheorie 49

4

Lichtwellen im Gleichtakt

Der Laser und seine Anwendungen 71

5

Der Widerspenstigen Zähmung

Sirup aus Licht und zornige Götter 97

6

Die Entdeckung der Langsamkeit

Anwendungen der Laserkühlung 125

7

Gleich und gleich gesellt sich gern

Einstein, Bose und das Superatom 153

8

Vertauschte Rollen

Wie man Licht zum Stillstand bringt 185

9

Gefangene im Dienst der Wissenschaft

Einzelhaft und Quantensprünge 201

10

Zeilingers Zaubertricks

Von geheimen Botschaften und parallelen Welten 215

11

Unternehmen Zukunft

Atome, Licht und neue Technologien 235

Internet-Adressen 243

Literaturempfehlungen 247

Literaturverzeichnis 249

Glossar 253

Namensregister 259

Sachregister 263

Danksagung

Ein Buch zu schreiben, kann mitunter eine recht nervenaufreibende Sache sein. Umso angenehmer ist es dann, wenn die Lektorin einen stets aufmuntert und beruhigt. Dafür danke ich Frau Gudrun Walter von WILEY-VCH, die dieses Buch von der Planung bis zur Fertigstellung mit ruhiger Hand betreut hat.

Außer guten Nerven und einem ruhigen Gegenpol braucht ein Autor aber auch »Versuchskaninchen«, die sein Manuskript probenlesen und ihm sagen, an welchen Stellen das Geschriebene überhaupt keinen Sinn mehr ergibt. Mein Dank gilt daher André Morsch, Katharina Neuser-von Oettingen, Beate Sauter-Köder, Heinrich Stauff und Thomas Weber, die Teile dieses Buchs gelesen und zahlreiche Verbesserungsvorschläge gemacht haben. Für das, was auch jetzt noch unlesbar oder unverständlich ist, trage ich natürlich die alleinige Verantwortung.

Den Physikern Eric Cornell, Wolfgang Ketterle und William D. Phillips danke ich für interessante Gespräche und Informationen aus erster Hand vor allem zur Geschichte der Laserkühlung und Bose-Einstein-Kondensation. Meiner Kollegin Donatella Ciampini gebührt Dank für ihre Mithilfe beim Erstellen einiger Abbildungen.

Ein umfassender Dank von Herzen für all das, was ich hier nicht aufzählen kann, geht schließlich an meine Eltern, Heidi und Arnold Morsch. Ihnen widme ich dieses Buch.

Atome sind die Bausteine der Natur. Da Atome so klein sind, können wir sie nicht direkt sehen, und der Nachweis der atomaren Struktur der Materie ist eine große Errungenschaft der Wissenschaft. Laserlicht hat sich als einzigartiges Werkzeug erwiesen, Atome zu kontrollieren und Materie mit neuartigen Eigenschaften zu erzeugen. Forschung mit Licht und Atomen hat in den letzten Jahren wissenschaftliche Schlagzeilen gemacht – von der kältesten Materie im Weltall über die Teleportation bis zur Verlangsamung von Licht. Diese dramatischen Ergebnisse illustrieren in einer anschaulichen Weise Konzepte moderner Physik und erlauben es Laien, die Welt der Materiewellen und der Quantenmechanik kennen zu lernen. Oliver Morsch vermittelt dies in seinem Buch in einzigartiger Weise. Als Wissenschaftler steht er selbst an der vordersten Front der Forschung und ist mit allen Aspekten der jüngsten Entwicklungen vertraut. Ihm ist es gelungen, seine Sachkenntnis ohne Formeln in einfacher Sprache auszudrücken, die selbst für den Laien verständlich ist. Er erfüllt hiermit einen Anspruch, den ich an mich und andere Wissenschaftler stelle. Wenn man sein Gebiet voll versteht, kann man Sachverhalte in einfachen Bildern ausdrücken und das Wesentliche kurz und prägnant ohne technische Details vermitteln. Dies ist wichtig – nicht nur im Dialog mit der Öffentlichkeit, sondern auch unter Wissenschaftlern.

Oliver Morschs Buch vermittelt nicht nur interessante Wissenschaft, sondern erzählt auch eine spannende Geschichte, eine Geschichte von aufregenden Entdeckungen und Forschern, die mit Liebe und Leidenschaft zu immer tieferen Einblicken in die Natur kommen. Herr Morsch schreibt über Wissenschaftler, die er nicht nur als Autor interviewt hat, sondern als Kollegen seit vielen Jahren kennt. Das Ergebnis ist ein Buch, das sowohl die wissenschaftliche

als auch die menschliche Seite moderner Forschung in einer Weise schildert, die selbst mir unter die Haut geht.

Boston, November 2002 *Wolfgang Ketterle*
John D. Mac Arthur Professor für Physik
Massachusetts Institute of Technology
– Nobelpreis für Physik 2001 –

Einleitung

Wenn man an einem wolkenlosen Sommertag auf dem Balkon liegt und die Sonnenstrahlen auf der Haut spürt, dann kommen einem viele Gedanken. Südsee und Sandstrand sind sicher darunter, und vielleicht erinnert man sich auch daran, am Abend noch die Blumen zu gießen. Aber wer denkt bei einem Sonnenbad schon an CD-Spieler oder Atomuhren?

In diesem Buch wollen wir genau das tun. Es geht dabei um eine Beziehungsgeschichte, deren Hauptpersonen auch beim Sonnenbad vorkommen: Licht und Materie. Dass das Sonnenlicht unsere Haut wärmen und bräunen kann, wissen wir. Doch Licht und Materie können noch auf ganz andere Art und Weise aufeinander einwirken. Wer hätte zum Beispiel gedacht, dass Licht nicht nur wärmen, sondern auch äußerst gut kühlen kann? Oder dass man mit gebündeltem Licht nicht nur Löcher in Papier brennen, sondern auch einzelne Atome festhalten kann? Und was haben Lichtteilchen mit Geheimcodes zu tun? All das wollen wir uns in diesem Buch ansehen.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat sich unser Wissen vom Aufbau der Materie und vom Wesen des Lichts explosionsartig vermehrt. Dieses Wissen führte schließlich zu technologischen Revolutionen wie der Elektronik und dem Laser, und ständig kommen neue Anwendungen hinzu. Einen kleinen Abriss dieser Entwicklung will dieses Buch geben. Über all den nützlichen und segensreichen Anwendungen möchte ich aber auch zeigen, dass Physiker in ihrer Forschung vor allem von einer Kraft angetrieben werden: der Neugier. Auch wenn es im Rückblick oft so erscheint, als sei ein bestimmtes Gerät zielstrebig von schlaun Wissenschaftlern entwickelt worden, so ist die zeitliche Reihenfolge doch meist umgekehrt.

Das Gebiet, das auf den folgenden Seiten dargestellt werden soll, ist so umfangreich, dass ich notwendigerweise nur einen kleinen

Ausschnitt behandeln kann. Nach den einführenden Kapiteln zur Atomphysik und zur Geschichte des Lichts werden wir daher gleich in die aktuelle Forschung springen, die in den letzten Jahren für einige Schlagzeilen und Nobelpreise gesorgt hat. Insbesondere den Nobelpreis des Jahrs 2001 für die Bose-Einstein-Kondensation und die möglichen Anwendungen, die sich aus dieser Forschungsrichtung ergeben, werde ich ausführlich besprechen.

Dieses Buch wendet sich in erster Linie an Nicht-Physiker, die wissen möchten, was es mit der Atom- und Laserphysik auf sich hat. Daher habe ich auf ein umfangreiches Verzeichnis der Originalliteratur verzichtet. Wer aber dennoch Informationen aus erster Hand sucht, der wird sie in den Übersichtsartikeln und Fachbüchern finden, die jeweils im Text erwähnt werden.

Auch eine ausgewogene Darstellung der Leistungen einzelner Forschungsgruppen war in der Kürze eines populärwissenschaftlichen Buchs nicht möglich. Die Erwähnung bestimmter Forscher oder Institutionen ist daher in den meisten Fällen keine bewusste Hervorhebung, sondern eine willkürliche Auswahl meinerseits, um dem Leser einen Einblick in die Welt der Physik zu geben.

1

Haben Sie eines gesehen?

Die Geschichte der Atomhypothese

Wer heute an der Westküste der Türkei Urlaub macht und sich ein wenig von den Touristenhotels und Ferienclubs entfernt, der stößt auf einen Reichtum an Überresten antiker Kulturen, wie es ihn nur in wenigen Gegenden der Welt gibt. Zwischen den beliebten Ferienzeilen Izmir und Bodrum findet man unzählige Orte mit klingenden Namen: Efesus, Bergama (Pergamon) und Troja lassen erahnen, dass hier vor mehr als 2000 Jahren der »Mittelpunkt der Welt« war, wie die Bewohner Ioniens (so hieß dieser Landstrich damals) selbst von sich behaupteten. Im Mündungsgebiet des Menderes liegt das von Touristen häufig zugunsten von Didim (mit dem berühmten Orakel) und Troja links liegen gelassene, unscheinbare Örtchen Milet. Dort beginnt um das Jahr 600 v. Chr. unsere Geschichte. [Eine ausführliche Geschichte der Atomhypothese findet sich in Pullman (1998). Die Darstellung in diesem Kapitel stützt sich hauptsächlich auf Informationen aus Pullmann (1998), Berr (1997) und Lindley (2001).]*

Vorspiel in Griechenland

Damals war die Westküste Kleinasiens natürlich noch ein Teil des antiken Griechenland, und Milet kein verschlafenes Dörfchen, sondern eine wichtige Seemacht, mit vier Häfen und Kolonien bis hinauf an die Schwarzmeerküste. Die Einwohner Milets fühlten sich damals vermutlich aus den gleichen Gründen so wohl dort, aus denen heute in Scharen Besucher an die Ägäis kommen: »Der

* Hinweise auf die Literatur werden – zum Teil mit Kommentaren – durch den Namen des Autors und dem jeweiligen Erscheinungstermin im Text in eckigen Klammern verankert. Die ausführlichen Literaturhinweise finden Sie auf Seite 249 in alphabetischer Reihenfolge der Autoren.



Die Westküste der Türkei, mit den geografischen Bezeichnungen des antiken Griechenland.

schönste Himmel und das beste Klima der Welt« [de Crescenzo (1990)], schrieb Herodot, und das allgemeine Wohlbefinden trug sicherlich auch dazu bei, dass der Handel florierte und sich so mancher Mileter dazu bemüßigt fühlte, nicht nur fleißig Geld zu verdienen, sondern auch »über Gott und die Welt« nachzudenken.

Und so begann der Ingenieur Thales von Milet zu jener Zeit, sich darüber Gedanken zu machen, woraus die ihn umgebende Welt aufgebaut sei. Natürlich hatten schon vor ihm Menschen über den Anfang der Welt nachgedacht, über die Entstehung der belebten und unbelebten Natur. Doch bis dahin war dies alles in einem mehr oder weniger religiösen Rahmen geschehen, und die treibenden Kräfte waren die Götter gewesen. Thales aber schlug ein neues Kapitel auf, da er als einer der Ersten versuchte, aus alltäglichen Beobachtungen natürlicher Phänomene Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Veränderungen der Materie zu ziehen. Damit begann die lange

Tradition der Naturphilosophie, die Fragen an die Natur stellte und sich später zu den modernen Naturwissenschaften entwickelte.

Was nun hatte Thales entdeckt? Aus heutiger Sicht müsste man wohl nüchtern antworten: ziemlich wenig. Thales spekulierte, dass das Wasser der Urstoff (griechisch *archè*) aller Dinge sei. Zu dieser Auffassung kam er durch die Beobachtung, dass alles Lebendige feucht ist und nach dem Tode austrocknet; Wasser erschien ihm daher als Lebensspender eine äußerst wichtige Substanz zu sein. So banal solche Feststellungen heute auch klingen mögen, so steckt doch die eigentliche Bedeutung der Philosophie des Thales nicht in den Antworten, die er auf seine Fragen an die Natur fand, sondern in den Fragen selber. Durch seinen Versuch, die Welt alleine durch Beobachtungen und den Einsatz der Vernunft zu erklären, wurde er zum Vorreiter der modernen Wissenschaft.

In den folgenden Jahrhunderten versuchten sich mehrere Philosophen daran, einen Urstoff zu benennen, und ihr Einfallsreichtum dabei war bemerkenswert. Anaximander von Milet, ein Schüler und möglicherweise sogar Verwandter des Thales, ging in der Abstraktion gleich einen enormen Schritt weiter als sein Lehrer. Anstelle einer konkreten, aus der Alltagserfahrung vertrauten Substanz erkor er das *apeiron*, das eine Art »unendlichen Stoff« darstellte, zum Ursprung aller Dinge. Angetrieben von ständiger Bewegung und geregelt durch die »ewige Gerechtigkeit«, so stellte Anaximander sich vor, bildeten sich daraus durch Abstoßung die gegensätzlichen Stoffe und Stoffeigenschaften wie Feuer und Wasser oder Hitze und Kälte.

Zu etwas konkreteren Ideen kehrte dann der ebenfalls aus Milet stammende Anaximenes zurück. Ihm zufolge war die Luft der Urstoff, aus dem durch Verdichtung und Verdünnung alle anderen Substanzen entstanden. Wenn auch das Ersetzen des Thales'schen Wassers durch Luft nicht besonders originell erscheint, so brachte Anaximenes doch durch die Idee des Verdichtens und Verdünnens eine gewisse Bewegung in die Entstehung der Materie, die bei Thales in dieser Form noch gefehlt hatte.

Einige Kilometer nördlich von Milet, in Ephesus, lebte um 500 v. Chr. der Philosoph Heraklit. Während er wohl vor allem durch seine philosophischen Betrachtungen zur Natur des ewigen Wandels bekannt sein dürfte – der Ausspruch »Man kann nicht zweimal in den gleichen Fluss steigen« stammt von ihm –, so hatte auch er

einen Urstoff gefunden, aus dem die Welt bestehen sollte (die, nebenbei bemerkt, seiner Meinung nach »von keinem Gott und keinem Mensch geschaffen wurde«): das Feuer. »Feuer« ist dabei nicht unbedingt wörtlich als »Flamme« zu verstehen, sondern stellt eher eine Form von »Urenergie« dar [Störig (1992), S. 136], aus der sich durch den ewigen Wandel der Welt Wasser und Erde bilden können.

Noch etwas weiter Richtung Norden, in Kolophon, wurde um 565 v. Chr. Xenophanes geboren, der dem Reigen der Urstoffe einen weiteren – die Erde – hinzufügte und wahrscheinlich sogar als zusätzlichen Urstoff das Wasser annahm und somit eine »Zwei-Elementen-Lehre« vertrat. Bekanntster allerdings sind seine dem *pantarrhei* (»alles fließt«, das heißt verändert sich) des Heraklit direkt entgegengesetzten Ansichten, was Änderung und Wandel betrifft. Seiner Meinung nach gab es überhaupt keine Veränderung, vielmehr war das Wesen der Welt in der Unveränderlichkeit begründet. Dies war die Grundannahme der eleatischen Schule (so benannt nach dem kleinen Städtchen Elea in Süditalien, in dem Xenophanes am Ende seines Lebens wirkte), deren bedeutendste Vertreter Parmenides und Zenon waren. Sie stellten sich das Universum vollständig mit unveränderlicher Materie ausgefüllt vor und ließen also auch keine Leere, kein »Vakuum« zu. Das Vakuum wird uns im Laufe dieser Geschichte als wichtiger Streitpunkt noch häufiger begegnen.

Eine gewisse Außenseiterrolle unter den Philosophen des 7. bis 5. Jahrhunderts v. Chr. nehmen Pythagoras und die von ihm begründete Schule der Pythagoreer ein. Diese sahen zwar einerseits, wie später auch Empedokles, die vier Urstoffe Feuer, Wasser, Erde und Luft als essenzielle Bestandteile der Materie an, andererseits aber führten sie die Zahlen als Grundlage aller Erscheinungen ein. Auf ihre Art waren sie damit die Vorreiter einer mathematischen Beschreibung der Welt, wenn auch die Art und Weise, wie sie die Welt in Zahlen zu fassen versuchten, aus heutiger Sicht eher Zahlenmystizismus war als ein mathematisches Modell. Die Zahl 8 beispielsweise repräsentierte das Konzept der Liebe, und die Zahlen 1 bis 4 hatte man sich jeweils als Punkt, Linie, Fläche und Körper zu denken (was schon etwas mehr an uns geläufige Interpretationen erinnert). Pythagoras bezeichnete sich, nebenbei bemerkt, als Erster als *philosophos*, also »Liebhaber der Weisheit«, da ihm das schlichtere *sophos* (»der Weise«) zu anmaßend erschien.

Ähnlich wie Pythagoras suchte auch Plato das Wesen der Materie im Abstrakten. An die Stelle der Zahlen der Pythagoreer traten bei Plato aber geometrische Formen, die die Schönheit der »besten aller möglichen Welten« widerspiegeln. Plato orientierte sich dabei an der Vier-Elementen-Lehre des Empedokles von Agrigent. Dieser hatte Wasser, Feuer, Luft und Erde als Bausteine aller Dinge gesehen, aus denen sich durch Mischung und Trennung die Vielfalt der materiellen Erscheinungen ergab. In seiner geometrischen Theorie der Urstoffe identifizierte Plato die Elemente des Empedokles mit den regelmäßigen Körpern, die nach ihm auch als platonische Körper bezeichnet werden: das Feuer mit dem Tetraeder, die Erde mit dem Würfel, die Luft mit dem Oktaeder und das Wasser mit dem Ikosaeder. Der fünfte regelmäßige Körper, der Dodekaeder, war, so meinte Plato, von Gott zusätzlich geschaffen worden, um das Universum vollkommen zu machen.

Das Atom betritt die Bühne

Dem Leser wird nicht entgangen sein, dass das Wort »Atom« bisher noch kein einziges Mal erwähnt worden ist. Platos regelmäßige Körper kamen der Idee eines Atoms zwar schon recht nahe, doch konnte beispielsweise ein Ikosaeder (Wasser) in zwei Oktaeder (Luft) und einen Tetraeder (Feuer) geteilt werden. Zudem konnten diese Urkörper mit der Zeit »ausleiern« und sich nicht mehr so gut zu komplizierteren, sichtbaren Objekten zusammensetzen lassen.

Doch schon lange bevor Plato seine geometrische Interpretation der Welt konstruierte, war irgendwo in der Gegend von Milet im Kopfe eines gewissen Leukipp bereits die Idee des atomaren Aufbaus der Welt gereift. Von Leukipp selbst ist nicht viel bekannt, nicht einmal, wann genau er gelebt hat (dass er gelebt hat, scheint allerdings unumstritten, obwohl zum Beispiel Epikur daran zweifelte). Der Zeitraum seines Wirkens wird meist um die Mitte des 5. Jahrhunderts v. Chr. angesiedelt, und als einziges Originalfragment ist uns von ihm der Ausspruch überliefert: »Kein Ding entsteht planlos, sondern alles aus Sinn und Notwendigkeit« [Störig (1992), S. 139]. Spätere Autoren wie Cicero und Diogenes Laertius berichten uns, dass Leukipp als Erster das Atom und die Vorstellungen des »Vol-len« und des »Leeren« als Prinzip angenommen hat.

Viel besser aber wissen wir über ihn Bescheid durch seinen herausragenden Schüler Demokrit von Abdera. Bei Demokrit wollen wir denn auch ein wenig länger verweilen, da er uns die Gelegenheit gibt, den Atombegriff genauer unter die Lupe zu nehmen. Zum Leben des Demokrit sei hier erwähnt, dass er ein beträchtliches Vermögen von seinem Vater geerbt hatte und dieses darauf verwandte, ausgedehnte Studienreisen zu unternehmen, die ihn unter anderem in so ferne Gegenden wie Persien, Indien und Ägypten führten. Für die damalige Zeit war das schon eine recht außergewöhnliche Leistung, und so behauptet Demokrit auch nicht ganz uneingebildet von sich selbst, er sei von seinen Zeitgenossen »[...] am weitesten auf der Erde herumgekommen, wobei ich am weitgehendsten forschte, und habe die meisten Himmelsstriche und Länder gesehen und die meisten gelehrten Männer gehört ...« [Störig (1992), S. 140]. Von einem so universal gelehrten Mann darf man Großes erwarten, und in der Tat hatte Demokrit einige vollkommen neue Ideen, die noch über 2000 Jahre später brillante Wissenschaftler zum Grübeln bringen sollten.

Wie der Name (griechisch *atomos*, »unteilbar«) schon sagt, ging Demokrit davon aus, dass Atome nicht in kleinere Teile zerlegbar und daher völlig homogen, also »aus einem Guss« sind. Es gibt unendlich viele Atome, die ständig in Bewegung sind. Verschiedene Arten von Atomen unterscheiden sich durch Form und Größe (und Gewicht, wobei diese Qualität möglicherweise erst später von Epikur eingeführt wurde), aber alle Atome einer Spezies sind sich untereinander vollkommen gleich. Verglichen mit den vagen Äußerungen seiner Vorgänger zu den verschiedenen Urstoffen hatte Demokrit also schon sehr genaue Vorstellungen davon, wie die hypothetischen kleinsten Teilchen aussehen sollten.

Demokrit ging übrigens auf seine Vermutung, dass Atome in ständiger Bewegung seien, nicht weiter ein. Während sich Jahrhunderte später Philosophen und Wissenschaftler darüber stritten, ob eine solche Bewegung von göttlicher Hand geführt werden müsse oder die Welt einfach ein mechanisches Uhrwerk sei, das – unter Umständen einmal von Gott aufgezogen – nach den Naturgesetzen weiterlaufe, nahm Demokrit eine solche Bewegung einfach als Arbeitshypothese an. Insofern war sein Vorgehen aus heutiger Sicht ausgesprochen wissenschaftlich und pragmatisch, nach dem Motto: »Irgendwo muss man ja anfangen.« Für Demokrit war die Atom-

vorstellung die beste Möglichkeit, viele Naturphänomene zu verstehen – wie zum Beispiel die Eigenschaften von festen und flüssigen Stoffen, die er mit den verschiedenen Formen der Atome erklärte, oder die Verbindungen zwischen Stoffen, zu denen Demokrit sich die Atome mit Haken und Ösen ausgestattet vorstellte.

Etwa hundert Jahre später erreichte mit den Schriften des Epikur der von Leukipp und Demokrit begründete Atomismus im antiken Griechenland wohl seinen Höhepunkt, gleichzeitig aber auch bereits sein Ende. Epikur, der den Menschen durch eine rationale Erklärung der Natur die Furcht vor dem Leben (und dem Tod) nehmen wollte, übernahm die Lehren des Demokrit und baute sie weiter aus. Obwohl viele antike Schriftsteller behaupten, er habe Demokrits Ideen nur wiedergegeben, ohne ihnen eigene Erkenntnisse hinzuzufügen, so hat Epikur doch zweifellos zwei neue Konzepte in die Atomhypothese eingebracht. Zum einen behauptete er, dass verschiedene Körper im luftleeren Raum gleich schnell zu Boden fallen sollten. Natürlich wissen wir heute, dass dem tatsächlich so ist, doch Epikur war darauf aus rein philosophischen Überlegungen gekommen und nicht etwa auf Grund eines Experiments.

Seine zweite Ergänzung zu Demokrits Theorien war allerdings etwas gewagter. Da Epikur annahm, dass alle Körper – und damit auch alle Atome – in geraden Linien zu Boden fielen, war damit ausgeschlossen, dass sich je mehrere Atome begegnen und zu einem größeren Objekt zusammenfinden konnten. Um dieses Problem zu umgehen, erfand Epikur den Begriff des *clinamen*. Das *clinamen* erlaubte es den Atomen, hin und wieder aus ihrer geradlinigen Fallbewegung auszubrechen und so mit anderen Atomen zusammenzustoßen. Epikur betrachtete allerdings das *clinamen* nicht etwa als Anziehungskraft zwischen den Atomen, sondern eher als eine Art »freien Willen« oder »Seele« der Atome.

Der römische Dichter Lukrez verarbeitete im 1. Jahrhundert v. Chr., also 200 Jahre nach Demokrit, die Lehren der griechischen Atomisten zu einem Gedicht unter dem Titel *De rerum natura* (»Über die Natur der Dinge«). Wie viele antike Schriften geriet auch das Werk des Lukrez über Jahrhunderte in Vergessenheit und wurde erst wiederentdeckt, als ein Kirchengelehrter 1417 eine Abschrift des Gedichts dem Vatikan übergab, die er auf einer Rundreise durch Frankreich und Deutschland in einem Kloster entdeckt hatte [Lindley (2001), S. 4]. Von Lukrez, der während der Amtszeit des

Julius Cäsar lebte, sind uns die meisten Informationen über Leukipp, Demokrit und Epikur überliefert. Wie poetisch Lukrez die Atomlehre veranschaulichte, kann man selbst an ein paar Zeilen über das Wäschetrocknen sehen: »Kleider, aufgehängt über einem von der Brandung genässten Strand/ werden feucht; In der Sonne ausgebreitet, trocknen sie wieder./ Doch ist es uns nicht klar, wie/ Die Feuchtigkeit sich an den Stoff hängt, oder der Hitze entflieht./ Wasser ist also in Teilchen verstreut, / Atomen, zu klein um sichtbar zu sein« [Lindley (2001), S. 4, Übersetzung des Verfassers].

Lukrez' Gedicht wurde zwar nach seiner Veröffentlichung durchaus beachtet, doch das vorläufige Ende des Atomismus konnte es dennoch nicht aufhalten. Zum einen wurde es von Kaiser Augustus heftig angegriffen, vor allem wegen seines offenen Atheismus. Augustus versuchte, dem im Untergehen begriffenen römischen Reich durch eine Wiederbelebung der alten vorchristlichen Religion etwas von seinem alten Glanz zurückzugeben, und atheistische Atomtheorien störten dabei nur.

Zum anderen hatte bereits im 4. Jahrhundert v. Chr. der Philosoph Aristoteles die Lehren der Atomisten scharf verurteilt und damit einen Anti-Atomismus geschaffen, der bis in die Neuzeit einflussreich bleiben sollte. Vor allem die Idee eines Vakuums, also eines »Nichts«, war Aristoteles ein Dorn im Auge. Die Atomisten benötigten dieses Vakuum, da ja bereits die Idee eines Atoms, also eines »Etwas«, voraussetzte, dass um dieses »Etwas« herum »Nichts« sei. Im Mittelalter wurde diese Ansicht des Aristoteles zum *horror vacui*, also dem »Schrecken (der Natur) vor dem Nichts«, als fundamentales Konzept ausgebaut.

Der Gegenentwurf des Aristoteles zur Atomlehre stützte sich im Wesentlichen auf die Vier-Elementen-Lehre des Empedokles. Aus den vier Qualitäten »warm«, »kalt«, »feucht« und »trocken« bildeten sich durch Mischung und Trennung die Elemente Wasser, Feuer, Erde und Luft und daraus wiederum alle Dinge. Das fünfte Element, der Äther, füllte Aristoteles zufolge den Raum zwischen den Gestirnen aus (und sollte als Konzept bis ins 19. Jahrhundert bestehen bleiben, wie wir später noch sehen werden). Ein wichtiger Bestandteil der Philosophie des Aristoteles war die Zielgerichtetheit der Natur. So war Regen zum Beispiel kein zufällig entstehendes Phänomen, sondern die fürsorgliche Natur, die es regnen ließ, damit die Pflanzen wachsen konnten.

Ein Ausflug nach Indien

Bevor wir die Antike endgültig verlassen, wollen wir noch einen kurzen Abstecher nach Indien machen. Auch wenn für den weiteren Verlauf unserer Geschichte die griechische Atomphilosophie eindeutig die wichtigere Rolle spielt, so ist doch auf jeden Fall erwähnenswert, dass in Indien etwa zeitgleich mit den Lehren des Demokrit ebenfalls Atomtheorien entstanden. Über mögliche Verbindungen zwischen der griechischen und der indischen Philosophie jener Zeit ist viel spekuliert worden, und wir erinnern uns, dass Demokrit selbst eine Reise nach Indien unternommen hatte. Wahrscheinlicher ist aber, dass sich die Atomlehren in Indien und Griechenland unabhängig voneinander entwickelt haben [Pullman (1998), S. 77].

Zwischen dem 8. und 6. Jahrhundert v. Chr. entstanden in Indien die Upanischaden, eine Sammlung von Texten, welche die Veden des Brahmanismus kommentierten und interpretierten. Die Veden waren über einen Zeitraum von sieben Jahrhunderten geschrieben worden, enthielten aber noch keine atomistischen Theorien. In den Upanischaden dagegen finden sich die Grundzüge einer Urstofftheorie, die wir bereits von den griechischen Philosophen kennen: Feuer, Wasser, Erde und Luft werden als Grundstoffe aller Materie angesehen. Der indische Philosoph Kanada entwickelte im 1. Jahrhundert v. Chr. diese Ideen in der »Vaisheshika Sutra« weiter zu einem frühen Atomismus, weshalb er hin und wieder auch als der »indische Demokrit« bezeichnet wird. Die philosophische Richtung der Nyaya-Vaisheshika, der Kanada angehörte und die aus dem Brahmanismus als philosophisches System hervorgegangen war, unterschied vier Uratome, die den vier Urstoffen der Upanischaden entsprachen.

Wie die Atome der griechischen Naturphilosophen waren diese unzerstörbar, unteilbar, ohne Struktur und von ewiger Existenz. Zu den Uratomen kamen noch die Ursubstanzen Äther, Raum und Zeit sowie die *manas*, die eine Verbindung zwischen den materiellen Objekten und der Seele darstellten. Und als ob es bis dahin nicht schon kompliziert genug wäre, führten die Philosophen der Nyaya-Vaisheshika zudem noch 24 Qualitäten ein, durch die sich die verschiedenen Arten von Atomen voneinander unterschieden. Durch Kombinationen mehrerer Atome konnten sich größere Einheiten und

aus diesen wiederum die sichtbaren Substanzen bilden. Diese Substanzen formten sich über genau festgelegte Schritte: Aus zwei Atomen bildete sich zunächst eine Dyade, von denen sich wiederum drei zu einer Triade (bestehend also aus insgesamt sechs Atomen) zusammenschließen konnten. Eine Dyade stellte den Atomisten der Nyaya-Vaisheshika zufolge die kleinste mit den menschlichen Sinnen wahrnehmbare Einheit dar, die in der Praxis einem Staubkorn entsprach, das man in einem Sonnenstrahl sehen konnte. Die »praktische« Definition des Atoms lautete denn auch: »Das Atom ist der sechste Teil eines in einem Sonnenstrahl sichtbaren Teilchens« [Pullmann (1998), S. 80]. Auch wenn der »sechste Teil« hier rein spekulativ war, so stellte diese Definition doch einen Versuch dar, aus einem wahrnehmbaren Phänomen indirekt Rückschlüsse auf die Größe eines Atoms zu ziehen, was noch mehrere Jahrhunderte später eine wichtige Rolle spielen sollte.

Schon an diesem kurz umrissenen Beispiel sehen wir, dass die Atomvorstellungen der indischen Philosophen im Kern denen ihrer griechischen Kollegen recht ähnlich waren. Wenn wir uns in unserer Erzählung der Geschichte der Atomhypothese weitgehend auf die griechische Philosophie als Urquelle konzentrieren, so liegt das daran, dass diese ohne Zweifel für die Entwicklung der westlichen Wissenschaft in den folgenden zweieinhalb Jahrtausenden wesentlich bedeutsamer war als ihr indisches Pendant.

Wenn wir uns die griechischen und indischen Atomtheorien der Antike ansehen, so fragen wir uns unwillkürlich, wie viele der heute als gesichert anzusehende Erkenntnisse im Keim bereits in den Lehren der Atomisten enthalten waren. Lukrez zum Beispiel schreibt (in Anlehnung an Epikur) über die Bewegung von Staubteilchen: »Es geziemt sich, diese Korpuskeln mit größerer Aufmerksamkeit zu betrachten, deren ungeordnete Bewegung in Sonnenstrahlen beobachtet werden kann: Solch chaotische Bewegung spiegelt die unsichtbare und versteckte Bewegung der Materie wider [...]« [Pullman (1998), S. 40]. Wenn man so will, ist das eine Beschreibung der Brown'schen Bewegung – 2000 Jahre bevor man ihr diesen Namen gab!

Zweifellos ist die Fantasie und das logische Schlussfolgern der antiken Philosophen bewundernswert, und viele Ideen des Demokrit und des Epikur haben die Physiker des 19. und 20. Jahrhunderts – als zum ersten Mal eine experimentelle Überprüfung der Atom-

hypothese möglich wurde – in ihren Ansichten und Meinungen beeinflusst. Andererseits waren die Lehren der Atomisten aber fast ausschließlich reine Spekulationen oder, wie der englische Philosoph Bertrand Russel es formuliert hat: »Durch Glück stießen die Atomisten auf eine Hypothese, für die mehr als zweitausend Jahre später schließlich einige Beweise gefunden wurden, doch ihre Ansichten entbehrten seinerzeit nichtsdestotrotz jeder soliden Grundlage« [Lindley (2001), S. 11]. Doch immerhin: Über zwei Jahrtausende hinweg fielen den Gelehrten keine Theorien ein, die den Aufbau der Welt besser hätten erklären können.

Der Faden reißt ab

Wollten wir die Entstehung der Atomhypothese mit einem Theaterstück vergleichen, so müssten wir dem Autor zugestehen, dass er uns ein spannendes und abwechslungsreiches Vorspiel geboten hat. Das Aufkeimen der Naturphilosophie, die Suche nach dem Urstoff, all das lässt auf ein interessantes Drama hoffen. So hat uns denn auch der erste Akt, in dem Leukipp und Demokrit zum ersten Mal das Wort »Atom« erwähnen und über dessen Eigenschaften spekulieren, nicht enttäuscht. Doch leider entpuppt sich Aristoteles, der die Atomlehre scharf verurteilt, gegen Ende des ersten Akts als Spielverderber. Die Natur, so sagt er, habe Angst vor dem Nichts, und deshalb könne es auch keine kleinsten Teilchen geben, zwischen denen ein Vakuum herrsche.

Unter dem Einfluss dieses Machtworts des großen Denkers beginnt denn auch der zweite Akt eher schleppend. Eigentlich sollten sich hier die im ersten Akt vorgestellten Ideen weiterentwickeln, doch der Zuschauer wird arg enttäuscht. Zwar tritt Lukrez mit seinem wunderbaren Gedicht über die Beschaffenheit der Natur auf, doch das war es dann auch schon. Etliche Jahrhunderte lang passiert danach, was das Atom betrifft, erst einmal gar nichts. Das lag allerdings nicht nur an Aristoteles' kategorischer Ablehnung der Atomhypothese. Vielmehr gab es einen Bruch in der Überlieferung und Weiterentwicklung der griechischen Philosophie im Abendland, der spätestens mit der Schließung der platonischen Akademie in Athen im Jahre 529 einsetzte. Kaiser Justinian hatte diese Schließung befohlen, woraufhin die Gelehrten in Scharen aus Athen flohen. Viele

von ihnen gelangten bis nach Persien, wo sie am Hof Khursos des Ersten Exil fanden.

Die Entstehung des Islam im 7. Jahrhundert brachte neuen Schwung in die Beschäftigung mit den antiken Philosophen, und Bagdad wurde zu einer intellektuellen Hochburg. Dort setzte man sich eingehend mit den alten Schriften auseinander, und viele davon wurden zu jener Zeit ins Arabische übersetzt. Als die Türken schließlich 1453 Konstantinopel eroberten und viele byzantinische Gelehrte aus der Stadt flohen, wurden etliche der antiken griechischen Schriften ins Lateinische übertragen und Übersetzungen arabischer Texte (die zum Teil ihrerseits auf griechischen Originalen basierten) angefertigt. Auf diese Weise fanden die Atomvorstellungen von Demokrit und Lukrez wieder ihren Weg in den Westen.

Wann und wo genau der dritte Akt unseres Schauspiels beginnt, lässt sich schwer festlegen. Nach der klassischen Theorie des Dramas sollte er die Spannung, die in den ersten beiden Akten geschaffen wurde, hinauszögern und durch eine plötzliche Wendung das Interesse des Zuschauers erhalten. Einigermaßen interessant wird es aber frühestens wieder, als Galileo Galilei sich zu Beginn des 17. Jahrhunderts mit der Atomhypothese befasst. Ganz pragmatische Überlegungen waren es, die Galilei zum Nachdenken über den *horror vacui* des Aristoteles anregten.

Man hatte nämlich beim Abpumpen von Wasser aus Kohleschächten bemerkt, dass die Wassersäule unter dem Pumpkolben nicht höher als etwa zehn Meter sein durfte, da sie sonst einfach »abriss« und das Wasser der Pumpbewegung des Kolbens nicht mehr folgte. Galileo erkannte, dass dieses Phänomen nicht mit dem *horror vacui* vereinbar war. Wenn nämlich die Natur das Vakuum so verabscheute, dann sollte sie auf keinen Fall zulassen, dass ein solches zwischen dem Kolben der Pumpe und der Wassersäule entstand. Da sie es aber offenbar doch zuließ, musste das Wasser beim Pumpen von einer anderen Kraft gegen den Kolben gedrückt werden.

Diese geheimnisvolle Kraft war der Luftdruck der Erdatmosphäre, wie er vom Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke 1663 eindrucksvoll vorgeführt wurde. Bei einer Vorführung vor dem großen Kurfürsten in Berlin ließ er 16 Pferde an zwei Halbkugeln ziehen, deren Innenraum zuvor luftleer gepumpt worden war. Doch selbst mit 16 PS war es nicht möglich, gegen die Kraft der von außen gegen die Kugeln drückenden Luft anzukommen.

Bereits 1643 hatte Galileis Schüler Evangelista Torricelli (nach dem die Einheit »Torr« für den Luftdruck benannt ist) den Effekt des Luftdrucks nachgewiesen und dabei das Quecksilberbarometer erfunden. Dazu füllte er eine einseitig offene Glasröhre mit dem flüssigen Metall und stellte sie dann mit der Öffnung nach unten in ein Quecksilberbecken. Aus der Tatsache, dass das Quecksilber daraufhin in der Röhre absank und im oberen Teil der Röhre ein leerer Raum entstand, folgerte er, dass es die Luft sein musste, die von außen auf das Quecksilber drückte und es auf eine Höhe von etwa 76 Zentimetern anhub. Die Natur hatte also, wie Galileo bereits vermutet hatte, keineswegs Angst vor dem Vakuum. Die Phänomene, die dieser Angst zugeschrieben worden waren, ließen sich vielmehr durch ein einfaches mechanisches Kräftegleichgewicht erklären. Torricelli schrieb dazu: »Wir leben untergetaucht auf dem Grund eines Meers von elementarer Luft, deren Gewicht ohne jeden Zweifel nachgewiesen ist« [Berr (1997), S. 24].

Nur fünf Jahre später konnte der Franzose Blaise Pascal (auch nach ihm wurde eine Luftdruckeinheit benannt) zeigen, dass der von Torricelli entdeckte Luftdruck auf dem Gipfel eines Bergs (dem Puy de Dôme nahe Clermont) geringer war als im niedrig gelegenen Paris. Genau das hatte man nach Torricellis Erklärung mit Hilfe des »Luftmeers« erwartet, und der Bann des *horror vacui* war damit endgültig gebrochen. Zumindest von dieser Seite waren der Atomhypothese also keine Grenzen mehr gesetzt.

Doch wenn auch die Angst der Natur vor der Leere als Konzept widerlegt worden war, so blieb doch eine andere Angst, die wesentlich mächtiger war: Die Angst der Kirche vor der Gottlosigkeit der Atomhypothese. Die Allmacht Gottes wurde durch die Idee kleinster Teilchen, die wahl- und ziellos im Nichts umher schwirren, zu sehr untergraben, als dass ein Gläubiger die Existenz von Atomen hätte akzeptieren können.

Umso mehr überrascht es daher, dass ausgerechnet ein Geistlicher bereits 1646 die Größe eines Atoms – oder zumindest eines hypothetischen kleinsten Teilchens – abschätzte [Berr (1997), S. 28]. Immerhin nahm Johann C. Magnien als Substanz ein Weihrauchkorn und stellte fest, dass dieses beim Verbrennen den gesamten Innenraum einer Kirche mit seinem Duft ausfüllen konnte. Da die »Duftelemente« zweifellos kleinste Teile des ursprünglichen Weihrauchkorns waren und der Raum, den sie nach dem Verbrennen

ausfüllten, fast eine Milliarde Mal größer war als das Volumen des Korns selber, konnte Magnien die Größe eines »Weihrauchatoms« abschätzen. Dazu musste er allerdings einige Annahmen machen, vor allem was die Anzahl der Atome in einem Weihrauchkorn anging. Seiner Schätzung nach befanden sich in einem Korn eine Milliarde Teilchen, und durch Multiplikation mit der Anzahl von Weihrauchkörnern, die in ein Kirchenschiff passten, kam er auf die unvorstellbar große Zahl von rund 10 hoch 18 Atomen (eine Eins mit 18 Nullen dahinter) pro Weihrauchkorn. Da Magnien ein erbsengroßes Korn annahm, sollte damit der Durchmesser eines Atoms bei etwa zehn milliardstel Meter liegen. Zwar ist der tatsächliche Wert etwa hundert Mal kleiner, doch blieb Magniens Schätzung bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts die genaueste.

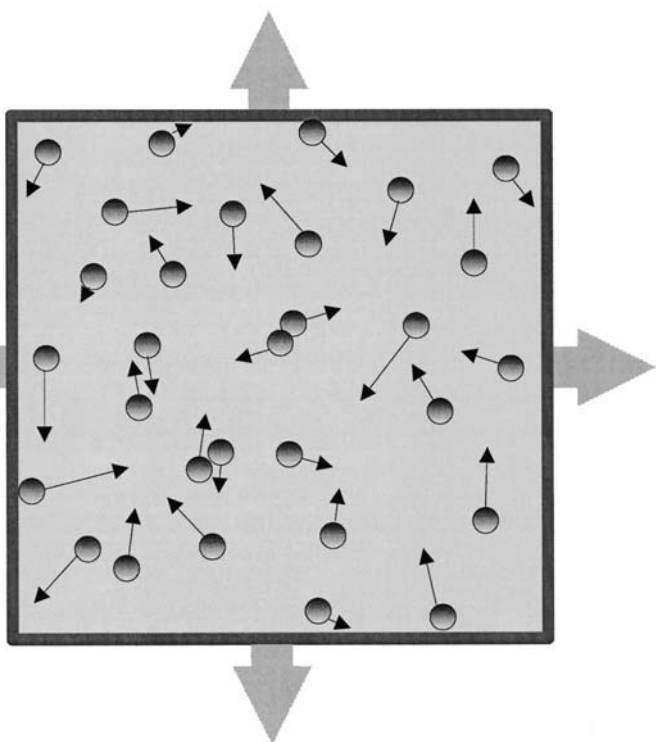
Frischer Wind um 1800

Wirklichen Auftrieb bekam die Atomhypothese erst wieder im 19. Jahrhundert. Zwar hatte bereits im Jahre 1738 Daniel Bernoulli (einer der vielen Bernoullis, die eine ganze Wissenschaftlerdynastie bildeten) eine Art kinetische Theorie (dazu gleich mehr) entwickelt, die auf der Annahme beruhte, dass Materie aus kleinsten Teilchen aufgebaut ist, die in einem Gas frei umher fliegen können. Doch Beachtung fanden seine Berechnungen nicht. Auch der britische Ingenieur John Waterston musste 1845, mehr als hundert Jahre später, feststellen, dass die Zeit für solche Theorien noch nicht reif war. Waterston reichte ein Manuskript zur Veröffentlichung in den *Philosophical Transactions* der Royal Society ein, das jedoch mit den eindeutigen Worten »Nichts als Unsinn!« rundweg abgelehnt wurde [Lindley (2001), S. 1].

Auch wenn es uns heute selbstverständlich erscheint, dass in den Naturwissenschaften Theorien aufgestellt werden, auch wenn man diese nicht vollständig überprüfen kann, so war dies zu Anfang des 19. Jahrhunderts keineswegs offensichtlich. Die theoretische Physik als eigenständige Disziplin war erst im Entstehen, und die Physik war im Wesentlichen eine rein beobachtende Wissenschaft. Zu postulieren, dass es Atome gab, und daraus die Eigenschaften der Materie herzuleiten, erschien vielen Forschern überflüssig und irre-

führend: Da man Atome nicht unmittelbar sehen konnte, waren sie als Grundlage für eine Theorie der Materie untauglich.

Ein anderer Zankapfel der Physik des 18. und 19. Jahrhunderts war die Wärme. Da wir uns mit ihr im Laufe dieses Buchs noch eingehender beschäftigen werden, sei hier nur erwähnt, dass die kinetische Theorie nicht zuletzt auch ein Gegenentwurf zu anderen Theorien der Wärme war, die davon ausgingen, dass Wärme eine stoffliche Substanz sei. Dieser *caloricum* genannte Stoff konnte von einem Körper zum anderen fließen, wodurch erklärt wurde, wie ein heißer Körper (der viel »Wärmestoff« besitzt) einen kälteren erwärmen konnte. Die kinetische Theorie dagegen erklärte die Wärme als



Kinetische Theorie der Wärme. Die Atome des Gases bewegen sich ungeordnet in alle Richtungen und stoßen mit den Wänden des Behälters zusammen, wodurch sie eine Kraft auf dessen Wände ausüben. Je höher die Temperatur, desto größer ist die mittlere Geschwindigkeit der Atome und damit auch der Druck auf den Behälter.