

Jörg Resag

Die Entdeckung des
Unteilbaren

Quanten, Quarks und der LHC

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

Die Entdeckung des Unteilbaren

Jörg Resag

Die Entdeckung des Unteilbaren

Quanten, Quarks und der LHC

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

The logo for Spektrum Akademischer Verlag, featuring the word "Spektrum" in a large, bold, serif font, with "AKADEMISCHER VERLAG" in a smaller, all-caps, sans-serif font directly beneath it. A horizontal grey bar is positioned below the text.

Autor

Jörg Resag
www.joerg-resag.de

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag, der Herausgeber und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

10 11 12 13 14 5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Dr. Andreas Rüdinger, Bettina Saglio
Redaktion: Dr. Annette Heß
Satz: klartext, Heidelberg
Umschlaggestaltung: SpieszDesign, Neu-Ulm
Titelfotografie: © The ATLAS Experiment at CERN

ISBN 978-3-8274-2484-6

Vorwort

Kaum eine andere Naturwissenschaft hat in den letzten gut 100 Jahren eine so stürmische Entwicklung erfahren wie die Physik. Sie hat Entdeckungen hervorgebracht, die weit über den Rahmen dieser Wissenschaft hinausreichen und die unser Weltbild entscheidend verändert haben. Als wichtige Meilensteine seien hier genannt: die Formulierung der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein in den Jahren 1905 und 1916, die Entwicklung der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie seit 1925 durch Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac, Richard Feynman und andere sowie schließlich die Formulierung des modernen Standardmodells der Elementarteilchen in den Jahren seit etwa 1962, insbesondere durch Glashow, Salam, Ward, Weinberg, Gell-Mann, Fritzsche und Zweig. Dieses Standardmodell bildet die Grundlage für unser heutiges Verständnis der Physik der Elementarteilchen und wurde an den großen Teilchenbeschleunigern immer wieder getestet und glänzend bestätigt, insbesondere am großen Elektron-Positron-Collider (LEP, *Large Electron-Positron Collider*) des europäischen Forschungszentrums CERN bei Genf.

Das Standardmodell basiert auf den beiden Grundpfeilern *spezielle Relativitätstheorie* und *Quantentheorie* und beschreibt die Naturgesetze mithilfe von zwölf Teilchen (sechs Quarks und sechs Leptonen) sowie drei Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen (die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung). Die Gravitation bleibt dabei außen vor, d. h. sie wird nicht im Rahmen des Standardmodells beschrieben.

Im März 1995 wurde das letzte noch fehlende der sechs Quarks am Tevatron-Beschleuniger des Fermilabs bei Chicago entdeckt: das *top*-Quark – ein Ereignis, das sogar auf den Titelseiten vieler Zeitungen Eingang fand. Nur das Higgs-Teilchen fehlt noch (Stand Juni 2010). Nach ihm wird in den nächsten Jahren am Large Hadron Collider LHC intensiv gesucht werden.

Im Rahmen des Standardmodells sind wir heute in der Lage, die Struktur der Materie bis zu Abständen von etwa einem Zehntel Fermi (d. h. einem zehntausendmilliardstel Millimeter) detailliert zu beschreiben. Wir kennen heute die physikalischen Gesetze zwischen Elementarteilchen bis zu Teilchenenergien von etwa 100 GeV sehr genau und können damit im Rahmen des Urknallmodells die Entwicklung unseres Universums bis zu einem Zeitpunkt zurückverfolgen, als seine Temperatur etwa eine Millionen-Milliarde Grad betrug. Das Universum existierte zu diesem Zeitpunkt noch nicht einmal eine hundertstel Sekunde lang.

Haben wir mit dem Standardmodell der Elementarteilchen womöglich bereits die sagenumwobene Weltformel, die allumfassende fundamentale physikalische Theorie der Naturgesetze unseres Universums, gefunden? Sind wir mit unserer Suche nach den wirklich unteilbaren Bausteinen der Materie am Ziel angekommen? Die Antwort, die wir aller Wahrscheinlichkeit nach auf diese Frage geben müssen, lautet: Nein! Von einer solchen Weltformel sind wir heute sicher noch ein gutes Stück entfernt. Im Gegenteil: Es gibt viele gute Gründe, die darauf hindeuten, dass es eine Physik jenseits des Standardmodells geben

muss und dass der gerade in Betrieb gegangene Large Hadron Collider LHC ein Fenster in diese neue Welt öffnen wird.

In jedem Fall wird das Standardmodell ähnlich wie die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg zu einer fundamentalen Theorie der Naturgesetze sein. Genauso, wie man das Standardmodell ohne die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik nicht verstehen kann, so wird man eines Tages auch eine hypothetische allumfassende Theorie nicht verstehen können, ohne sich mit dem Standardmodell befasst zu haben.

In diesem Buch möchte ich den Versuch wagen, die Reichweite und Schönheit der modernen physikalischen Theorien einem breiten Publikum näherzubringen und damit auch Nicht-Experten an der Faszination teilhaben zu lassen, die von ihnen ausgeht. Neben der Darstellung der neuesten Entwicklungen und Entdeckungen habe ich den nötigen Grundlagen für das Verständnis der modernen Teilchenphysik breiten Raum eingeräumt. Dabei habe ich mich bemüht, den Leser nicht durch halb wahre Überveranschaulichungen zu verwirren. Ich werde versuchen, möglichst klar zu beschreiben, *was* man tut und tun muss, um die Gesetze der Natur zu formulieren, nicht aber, *wie* man es tut.

Aufgrund der Komplexität des Themas war es mir nicht möglich, ein einfaches Buch zu schreiben. Dennoch werden vom Leser im überwiegenden Teil des Buches keine besonderen mathematischen oder physikalischen Vorkenntnisse erwartet. Auf mathematische Formeln wollte ich aber nicht ganz verzichten, da sie an einigen Stellen zum Verständnis des Buches nützlich sein können. Ich hoffe aber, dass die verwendeten Formeln für den Leser keine größeren Schwierigkeiten darstellen. Im Übrigen ist es problemlos möglich, die Formeln einfach zu überspringen, ohne dass das Verständnis in stärkerem Maße darunter leiden sollte. Wer sich für weitere Details sowie den neuesten Stand der Entdeckungen am LHC interessiert, der findet diese auf den Webseiten zu diesem Buch unter

<http://www.joerg-resag.de/>

Inhalt

Vorwort	V
1 Atome, Bausteine der Materie	1
1.1 Die ersten Anfänge	1
1.2 Atome und Moleküle	3
1.3 Die Struktur der Atome	7
1.4 Kräfte und Wechselwirkungen	11
2 Seltsame Quantenwelt	21
2.1 Das Problem der Stabilität der Atome	21
2.2 Licht besteht aus Teilchen	23
2.3 Elektronen als Welle	25
2.4 Das Planck'sche Wirkungsquantum	34
2.5 Die Heisenberg'sche Unschärferelation	36
2.6 Die Bewegung der Elektronen in der Atomhülle	40
2.7 Spin und Pauli-Prinzip	44
2.8 John Stewart Bell und die Suche nach verborgenen Informationen	48
3 Atomkerne und spezielle Relativitätstheorie	65
3.1 Der Atomkern	65
3.2 Die spezielle Relativitätstheorie	69
3.3 Maßstäbe der Natur	82
3.4 Neue Rätsel	84
4 Teilchenzoo, Quarks und Wechselwirkungen	87
4.1 Neue Teilchen und eine neue Wechselwirkung	87
4.2 Ordnung im Teilchenzoo: Quarks und Leptonen	92
4.3 Die starke Wechselwirkung	106

5	Quanten und Relativität	115
5.1	Relativistische Quantenfeldtheorien	115
5.2	Richard Feynmans Graphen	132
5.3	Wechselwirkungen und das Eichprinzip	146
5.4	Die gleitende Ladung	152
5.5	Quark-Physik mit dem Supercomputer	159
5.6	QCD mit Nebenwirkungen: die starke Kernkraft.	162
6	Das Standardmodell der Teilchenphysik	167
6.1	Schwache und elektromagnetische Wechselwirkung vereinigen sich	167
6.2	Das Standardmodell auf dem Prüfstand	188
6.3	Der Umgang mit divergierenden Graphen: Renormierung	198
6.4	Was ist ein Teilchen?.	204
7	Gravitation	211
7.1	Einsteins Gravitationstheorie	211
7.2	Quantengravitation	224
8	Aufbruch in neue Welten.	237
8.1	Supersymmetrie, Stringtheorie und andere Ausblicke	237
8.2	Higgs-Teilchen und neue Physik am LHC	250
8.3	Abschließende Bemerkungen	262
	Anhang: Zeittafel	265
	Index	269

1

Atome, Bausteine der Materie

Woraus besteht Materie? Ist sie kontinuierlich und in immer kleinere Stücke teilbar, oder besteht sie aus vielen kleinen Bausteinen? Die letztere Idee existierte bereits im antiken Griechenland, doch erst die zunehmende Entwicklung der Chemie und Physik in den letzten gut 300 Jahren brachte zunehmend die Gewissheit, dass es diese Bausteine tatsächlich gibt.

1.1 Die ersten Anfänge

Vor etwa 2 500 Jahren besaß man im antiken Griechenland bereits ein umfangreiches Wissen über die physikalischen Eigenschaften der verschiedensten Materialien. Man versuchte daher, Ordnung in die Vielfalt dieser Materialien und ihrer Bearbeitungsmöglichkeiten zu bringen und übergreifende Prinzipien zu finden, um des wachsenden Wirrwarrs von Einzelinformationen Herr zu werden. Dabei wurde schon recht bald die Frage nach der inneren Struktur der Materie gestellt und verschiedene Philosophen versuchten, zu schlüssigen Antworten zu gelangen.

So vertrat Thales, der aus einer griechischen Stadt in Kleinasien namens Milet stammte, etwa um 600 vor Christus die Auffassung, Wasser sei die Grundsubstanz aller Materie. Anaximander von Milet dagegen vertrat die Ansicht, Luft sei der Urstoff und könne die anderen Grundstoffe Wasser und Erde hervorbringen. Auch andere Möglichkeiten für das Auftreten einer einzigen Grundsubstanz wurden diskutiert.

Das Problem mit diesen Ideen bestand aber darin, eine Erklärung dafür zu finden, wie sich ein einziger Urstoff in so unterschiedliche Materieformen wie Luft, Wasser oder Eisen verwandeln konnte.

Um dieses Problem zu lösen, ging etwa 100 Jahre später Empedokles bereits von vier Grundsubstanzen (Erde, Wasser, Feuer und Luft) und zwei Grundkräften (Liebe und Hass) aus. Empedokles verwendete also mehrere Grundstoffe und unterschied zwischen Stoff und Kraft. Alle Veränderungen in der Natur erklärte er dadurch, dass sich die vier Grundstoffe in verschiedenen Verhältnissen miteinander mischen und wieder voneinander trennen. Gerade diese Vorstellung hat sich lange bis ins Mittelalter hinein behaupten können. Sie spiegelt bereits einen Grundgedanken unserer heutigen Sicht wider, nämlich dass verschiedene Grundstoffe über gewisse Kräfte aufeinander einwirken.

Es bleibt bei diesen Ansätzen jedoch unklar, ob Materie als kontinuierlich oder als aus einzelnen fundamentalen Teilchen bestehend aufgefasst wird. Überlegen wir uns die Konsequenzen dieser beiden Alternativen.

Nimmt man an, Materie sei kontinuierlich, so lässt sich ein beliebig kleines Stück Materie immer in noch kleinere Stücke desselben Stoffes zerlegen. Auch diese winzigen Bruchstücke müssen noch alle Eigenschaften aufweisen, die für die spezielle Substanz charakteristisch sind, wie beispielsweise Farbe, Dichte, Geruch oder Festigkeit.

Mit der Vorstellung kontinuierlicher Materie stößt man nun schon recht bald auf Schwierigkeiten. So liefert sie keine Erklärung dafür, warum ein und derselbe Stoff in Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur) mal fest, mal flüssig und mal gasförmig sein kann. Auch die chemische Reaktion von zwei Substanzen zu einer neuen Substanz kann in diesem Bild nicht recht dargestellt werden, d. h. der Mechanismus, der einer chemischen Reaktion zugrunde liegt, bleibt im Dunkeln.

Wenden wir uns daher dem atomistischen Standpunkt zu. Zwischen 450 und 420 vor Christus entwickelten der griechische Philosoph Leukipp und sein Schüler Demokrit das erste atomistische Modell, bei dem Materie aus einer großen Anzahl winziger, unzerstörbarer Bausteine aufgebaut ist. Leukipp und Demokrit nannten diese Bausteine *Atome*, was soviel wie *das Unteilbare* bedeutet. Um die vielen verschiedenen Materieformen zu erklären, gingen sie davon aus, dass es unendlich viele verschiedene Atomsorten in der Natur geben müsse.

Erst diese neue Sichtweise ermöglichte Ansätze zur Erklärung von Vorgängen wie Schmelzen und Verdampfen oder von chemischen Prozessen, bei denen sich die Atome umgruppieren und neu formieren. Wie die Atome aber genau aussehen, darüber gab es im Laufe der Zeit die unterschiedlichsten Vorstellungen. Eine denkbare Möglichkeit wäre beispielsweise, dass sich verschiedene Atomsorten durch ihre äußere Gestalt unterscheiden. Aufgrund außen angebrachter Haken und Ausbuchtungen könnten sie sich miteinander verhaken und so chemische Reaktionen ermöglichen.

Der atomistische Ansatz besitzt jedoch auch seine Probleme. So ist nicht zu erwarten, dass die Atome den Raum lückenlos ausfüllen können. Insbesondere bei gasförmigen Substanzen sollte man aufgrund der geringen Dichte sogar erwarten, dass sie den Raum viel weniger dicht ausfüllen als bei einem flüssigen oder festen Stoff. Was aber befindet sich dann zwischen den Atomen? Die uns heute gewohnte Konsequenz, dass sich dazwischen eben einfach Nichts, also leerer Raum befindet, erschien bis in die Neuzeit hinein vielen Menschen als nicht akzeptabel. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Vorstellung eines den ganzen Raum erfüllenden Stoffes geboren, den man Äther nannte und dem viele recht ungewöhnliche Eigenschaften zugeschrieben wurden, um die im Laufe der Zeit anwachsende Fülle von Beobachtungen und experimentellen Resultaten erklären zu können.

Ein weiteres Problem des atomistischen Ansatzes besteht darin, die Eigenschaften der Atome wie Gestalt, Größe und Masse zu erklären. Löst man dieses Problem durch die Annahme, Atome seien eben nicht elementar und bestünden ihrerseits aus anderen elementaren Objekten, so verschiebt sich dadurch das Problem lediglich um eine Stufe und stellt sich für die neuen Elementarobjekte erneut.

Wir sehen also, dass keine der beiden beschriebenen Alternativen uns wirklich zufriedenstellen kann, auch wenn der atomistische Ansatz weniger Probleme aufzuweisen scheint und mehr Potenzial für die Erklärung der physikalischen Materie-Eigenschaften bietet.

Jeder im Laufe der Zeit erdachte Lösungsversuch wies ähnliche Probleme auf. Erst mithilfe der direkten Befragung der Natur durch die Experimente der Neuzeit und mithilfe der abstrakten Sprache der Mathematik sind wir in den letzten gut 300 Jahren der Lösung dieses Rätsels ein gutes Stück nähergekommen. Statt weiter zu spekulieren, wollen wir uns daher nun der Methode des physikalischen Experiments bedienen, um die Frage zu entscheiden, welche der beiden Alternativen in der Natur realisiert ist. Dabei dürfen wir gespannt sein, wie die Natur die angesprochenen Probleme gelöst hat.

1.2 Atome und Moleküle

Betrachten wir ein beliebiges Stück Materie und versuchen, etwas über sein Innenleben herauszufinden. Wir wollen dies am Beispiel eines gewöhnlichen Kochsalzkristalls tun. Dabei gehen wir (wie sich herausstellt, zu Recht) von der Annahme aus, dass es letztlich nicht darauf ankommen wird, mit welchem Stoff wir unsere Untersuchung beginnen. Ein Kochsalzkristall hat jedoch einige Vorteile, wie wir noch sehen werden.

Zunächst einmal fällt uns seine würfelförmige Gestalt auf. Betrachten wir andere Kochsalzkristalle, so sehen wir, dass die Würfelform tatsächlich die bevorzugte Gestalt von Kochsalzkristallen ist. Kristalle anderer Salze wie z. B. Alaun bevorzugen dagegen andere regelmäßige Formen. Das Auftreten dieser regelmäßigen Formen ist der erste Hinweis darauf, dass zumindest Salzkristalle aus einer regelmäßigen Anordnung kleiner Bausteine zusammengesetzt sein könnten. Eine solche regelmäßige Struktur kann beispielsweise dadurch zustande kommen, dass sich kugelförmige Bausteine gegenseitig anziehen und zu einem möglichst kompakten Objekt zusammensetzen wollen.

Mit bloßem Auge ist jedoch von Atomen nichts zu sehen. Wir müssen also einen ersten Schritt weg aus der unseren Sinnen unmittelbar zugänglichen Welt machen und mithilfe eines technischen Gerätes versuchen, mehr zu erfahren. Das Gerät, das sich zunächst anbietet, ist ein Mikroskop. Ich erinnere mich noch, wie ich als Kind mein erstes Mikroskop in den Händen hielt und etwas enttäuscht war, dass darin keine Atome zu sehen waren und ich lediglich gewöhnliche Pantoffeltierchen entdecken konnte, was andererseits auch nicht allzu schlecht war. Vielleicht aber lag dies nur an der unzureichenden Ausrüstung. Bewaffnen wir uns also mit einem modernen optischen Hochleistungsmikroskop. Doch auch hier kommen wir nicht weiter. Es stellt sich heraus, dass ab einer gewissen Vergrößerungsstufe eine weitere Vergrößerung des Bildes keine weiteren Details mehr enthüllt. Das Bild wird zwar größer, verliert aber dafür an Schärfe. Die kleinsten Details, die in unserem Mikroskop gerade noch erkennbar sind, haben dabei eine Größe von einigen Zehntausendstel Millimetern.

Der Grund für diese Einschränkung liegt in der Wellennatur des Lichts. Licht lässt sich als eine sogenannte elektromagnetische Welle verstehen, bei dem sich oszillierende elektrische und magnetische Felder durch den Raum ausbreiten und sich gegenseitig am Leben erhalten. Diese klassische Beschreibung von Licht reicht in sehr vielen Fällen aus, um die physikalischen Phänomene zu beschreiben. Wir werden aber später auch Phänomene kennenlernen, bei denen eine detailliertere Beschreibung mithilfe sogenannter Photonen notwendig ist. Für die Analyse optischer Instrumente ist die Wellenbeschreibung aber ausreichend.

Die Wellenlänge, also der Abstand zweier benachbarter Wellenberge (bezogen auf den Betrag des elektrischen Feldes), beträgt bei blauem Licht etwa vier zehntausendstel Millimeter, bei rotem Licht etwa acht zehntausendstel Millimeter. Die anderen Farben haben dazwischenliegende Wellenlängen. In einem Mikroskop, das mit sichtbarem Licht arbeitet, lassen sich nun aufgrund der Wellennatur des Lichts generell keine Details erkennen, die deutlich kleiner als die verwendete Lichtwellenlänge sind.

Die Idee liegt daher nahe, ein Mikroskop zu verwenden, das auf Wellen mit kürzeren Wellenlängen als der von sichtbarem Licht basiert. Tatsächlich gibt es in der Natur solche elektromagnetischen Wellen. Diese Wellen sind allerdings für das menschliche Auge nicht sichtbar. Ihre Existenz ist aber jedem bewusst, der schon einmal einen Sonnenbrand hatte. Ursache für den Sonnenbrand sind die von der Sonnenoberfläche abgestrahlten elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen vier zehntausendstel und einem millionstel Millimeter, die sogenannte ultraviolette Strahlung. Allerdings

reicht auch diese Strahlung immer noch nicht aus, um den Bausteinen der Materie auf die Spur zu kommen.

Noch kürzere Wellenlängen besitzen die Röntgenstrahlen. Leider eignen sich Röntgenstrahlen nicht gut dazu, um damit ein Mikroskop zu bauen, da sich Linsen zur Ablenkung der Röntgenstrahlen nicht herstellen lassen (allerdings lassen sich heutzutage immerhin Röntgenspiegel herstellen, wie sie bereits bei der Vermessung der aus dem Weltall kommenden Röntgenstrahlung von Satelliten aus eingesetzt wurden). Für die Untersuchung unseres Kochsalzkristalls mithilfe von Röntgenstrahlen ist aber glücklicherweise ein Röntgenmikroskop nicht erforderlich. Es genügt, den Kristall aus einer bestimmten Richtung mit Röntgenstrahlen einer festen Wellenlänge zu bestrahlen. Auf der Rückseite des Kristalls stellen wir dann in einigen Zentimetern Abstand eine Photoplatte auf und bestimmen später anhand der geschwärzten Stellen, in welche Richtungen die Röntgenstrahlen durch den Kochsalzkristall abgelenkt wurden. Die Bestrahlung des Kristalls müssen wir nun für verschiedene Wellenlängen durchführen und jedes Mal die Photoplatte entwickeln und auswerten. Dabei machen wir die folgende interessante Beobachtung:

Für Wellenlängen aus einem bestimmten Bereich zeigen sich auf der Photoplatte sehr hübsche regelmäßige Muster aus schwarzen Punkten, d. h. das Röntgenlicht wurde durch den Kristall in ganz bestimmte Richtungen abgelenkt. In die anderen Richtungen werden dagegen praktisch keine Röntgenstrahlen gestreut (siehe Abb. 1.1).

Was bedeutet dieses Ergebnis nun für den Kristall? Das geometrische Muster auf der Photoplatte scheint anzudeuten, dass irgendetwas auch in dem Kristall geometrisch angeordnet sein muss, so wie es ja bereits durch die Würfelform des Kristalls nahegelegt wurde. Es gibt nun ein schönes Experiment, mit dem man die Bedeutung des regelmäßigen Musters auf der Photoplatte direkt veranschaulichen kann. Dazu wird zunächst aus vielen Holzkugeln und kleinen Metallverbindungsstangen ein regelmäßiges, würfelförmiges Gitter zusammengebaut, das den Salzkristall vertritt. Anstelle der Röntgenstrahlen verwendet man Schallwellen einer festen Tonhöhe (entsprechend einer bestimmten Wellenlänge) aus einem Lautsprecher, und statt der Photoplatte wird ein Mikrofon aufgestellt, mit dem man den durch das Gitter in verschiedene Richtungen abgelenkten Schall misst. Nach Einjustieren der richtigen Tonhöhe stellt man fest, dass es nur ganz bestimmte Richtungen gibt, in die viel Schall durch das Gitter abgelenkt wird (erkennbar an einer hohen Lautstärke). In die anderen Richtungen wird hingegen nur wenig Schall abgelenkt. Man erhält also ein ähnliches Versuchsergebnis wie bei unserem Versuch mit den Röntgenstrahlen. Wir folgern daraus, dass analog zum Holzkugeligitter auch der Kochsalzkristall aus einer regelmäßigen Anordnung von Bausteinen bestehen muss.

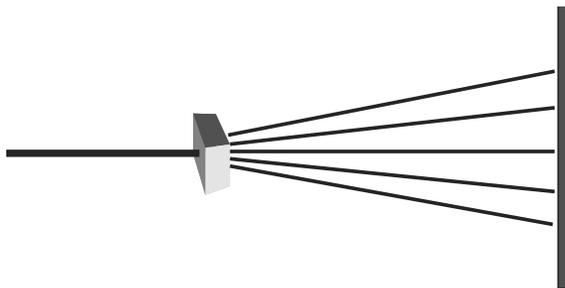


Abb. 1.1 Beschießt man einen Salzkristall mit einem Röntgenstrahl, dessen Wellenlänge sich innerhalb eines gewissen Bereichs befindet, so treffen die abgelenkten Röntgenstrahlen nur an bestimmten Punkten auf der Photoplatte auf und ergeben dort ein regelmäßiges Muster.

Unser Versuchsergebnis lässt sich in beiden Fällen auf die gleiche Weise erklären. Trifft eine Welle auf einen Baustein im Gitter, so wird sie von diesem Baustein mehr oder weniger gleichmäßig nach allen Seiten abgelenkt. Dies trifft für alle Bausteine des Gitters auf die gleiche Weise zu. Jeder Baustein sendet nach allen Seiten hin Kugelwellen aus, ähnlich den Wellen bei einem ins Wasser geworfenen Stein. Diese Kugelwellen addieren sich zu einer Gesamtwelle auf. Trifft dabei ein Wellenberg der einen Kugelwelle auf ein Wellental einer anderen Kugelwelle, so löschen sich die Wellen dort gegenseitig aus – man sagt, sie interferieren destruktiv. Umgekehrt können sich aber auch zwei Wellenberge zu einem größeren Wellenberg aufaddieren, sodass dann die Wellen positiv miteinander interferieren. Die genaue Analyse zeigt, dass es bei sehr vielen regelmäßig angeordneten Bausteinen nur ganz bestimmte Richtungen gibt, in denen sich die abgelenkten Wellen gegenseitig verstärken können. Entsprechend empfängt das Mikrofon nur in ganz bestimmten Richtungen eine hohe Lautstärke, und entsprechend wird die Photoplatte nur an ganz bestimmten Stellen geschwärzt.

Sowohl beim Kochsalzkristall als auch beim Holzkugeligitter gilt, dass ein solches sogenanntes Interferenzmuster nur dann auftritt, wenn die Wellenlänge der verwendeten Wellen nicht allzu weit von dem Abstand der Bausteine des Gitters abweicht. Die Wellenlänge kann also direkt als Anhaltspunkt für den Abstand der Bausteine und damit für die Größe der Bausteine selbst verwendet werden. So beträgt die Wellenlänge der Schallwellen, bei denen gut erkennbare Interferenz auftritt, einige Zentimeter, die Wellenlänge der Röntgenstrahlen dagegen beträgt nur einige hundert Millionstel (10^{-8}) Millimeter.

Die hier beschriebene Streuung und Interferenz von Röntgenstrahlen an Kristallen wurde im Jahre 1912 von Max von Laue und seinen Mitarbeitern Walter Friedrich und Paul Knipping zum ersten Mal durchgeführt. Es konnte damit erstmals direkt nachgewiesen werden, dass ein Kristall tatsächlich aus einer periodischen Anordnung einzelner Bausteine besteht, die sich in einem Gitter regelmäßig anordnen. Aus der Struktur des Interferenzmusters kann man sogar die Anordnung der Bausteine im Gitter bestimmen.

Fassen wir unser Versuchsergebnis noch einmal zusammen: Wir haben nachgewiesen, dass zumindest Kochsalz aus einem regelmäßigen Gitter kleiner Bausteine besteht, wobei der Abstand benachbarter Bausteine einige hundert Millionstel Millimeter beträgt. In Anlehnung an Leukipp und Demokrit nennen wir diese Bausteine Atome.

Kochsalz besteht also aus Atomen! Besteht jede andere Substanz ebenfalls aus Atomen? Wie viele verschiedene Atomsorten gibt es? Können sich Atome zu komplexeren Atomgruppen zusammenfinden?

Zur Klärung all dieser Fragen sind viele weitere Experimente nötig, auf die wir hier aber nicht näher eingehen wollen. Das Ergebnis sieht folgendermaßen aus:

Tatsächlich ist die gesamte uns umgebende Materie aus Atomen aufgebaut. Dabei können sich auch mehrere Atome zu größeren Atomgruppen, den Molekülen, zusammenfinden.

Die verschiedenen Atomsorten unterscheiden sich durch ihre Größe, ihre Masse und ihre chemischen Eigenschaften, also durch ihr Bestreben, sich mit anderen Atomen zu Molekülen zusammenzulagern.

Manche Stoffe bestehen nur aus einer einzigen Sorte von Atomen oder aus Molekülen, die nur aus Atomen dieser einen Sorte aufgebaut sind. Beispiele dafür sind das Gas Helium und die Hauptbestandteile unserer Luft, also Stickstoff und Sauerstoff, aber auch feste Substanzen wie Kohlenstoff in Form von Graphit oder Diamant. Diese Stoffe nennt man auch chemische Elemente. Die Atome, aus denen sie bestehen, werden entsprechend dem Namen des chemischen Elements Heliumatome, Wasserstoffatome, Kohlenstoffatome usw. genannt.

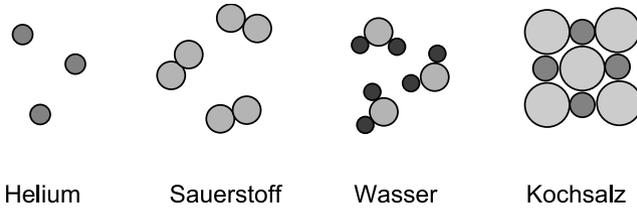


Abb. 1.2 Stoffe können aus einzelnen Atomen bestehen (z. B. Helium), aus Molekülen (z. B. Sauerstoff oder Wasser) sowie aus Atomgittern (z. B. Kochsalz).

Andere Stoffe dagegen bestehen aus Molekülen, die ihrerseits aus mindestens zwei verschiedenen Atomsorten aufgebaut sind (siehe Abb. 1.2). So besteht ein Wassermolekül aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen.

Eine dritte Möglichkeit ist in unserem Kochsalzkristall realisiert. Er besteht aus elektrisch negativ geladenen Chloratomen (sogenannten Chlor-Ionen) und positiv geladenen Natriumatomen (also Natrium-Ionen), die sich aufgrund ihrer gegenseitigen starken elektrischen Anziehungskraft zu einem regelmäßigen Kristallgitter zusammenfinden. Eine saubere Unterscheidung einzelner Moleküle gibt es hier nicht. Wieso Atome elektrisch geladen sein können, bleibt aber zunächst im Dunkeln.

Die Erkenntnis, dass Materie eine atomistische Struktur besitzt, erscheint den meisten von uns heute als selbstverständlich. Aber wir sollten bedenken, wie lange die Menschheit gebraucht hat, um sich über diese Tatsache klar zu werden. Viele der großen Gelehrten, unter ihnen Platon, Aristoteles, Descartes und Kant, lehnten eine atomistische Vorstellung der Materie zumindest zeitweilig ab. Und es hätte ja auch anders kommen können. Wie sähe wohl unser Weltbild heute aus, wenn wir bei der Suche nach den Bausteinen der Materie nur immer kleinere Bruchstücke derselben Substanz gefunden hätten, ohne irgendwann auf einen tieferen Bauplan zu stoßen?

Wie in der Physik üblich hat die Beantwortung einer Frage viele weitere Fragen aufgeworfen. Warum gibt es über 100 verschiedene Atomsorten? Warum besitzen Atome eine räumliche Ausdehnung? Warum können Atome elektrisch geladen sein? Warum verbinden sich gewisse Atome zu Molekülen, andere dagegen nicht?

Alle diese Fragen münden letztlich in einer einzigen Frage zusammen: Sind Atome elementare Objekte, wie das Wort Atom suggeriert, oder besitzen sie eine Substruktur? Woraus bestehen Atome, und was legt die Eigenschaften eines Atoms fest?

Wir sehen hier das grundlegende Problem, das uns bei der Suche nach den fundamentalen Bausteinen der Materie immer begleitet: Die Fragen, die wir durch das Aufdecken einer Substrukturebene gelöst zu haben glauben, kehren auf der neu erschlossenen Ebene in der gleichen Form wieder zurück. Wir können immer wieder fragen, wodurch die Eigenschaften der gerade als elementar betrachteten Bausteine eigentlich festgelegt werden. Beantworten wir die Frage dadurch, dass wir den Bausteinen eine Substruktur zugehen, so stellt sich die Frage für die neuen Bausteine auf dieser Strukturebene erneut.

Man könnte daher glauben, dass entweder die Suche nach den elementaren Bausteinen der Materie niemals enden kann, da immer neue Sub-Sub-Sub-Strukturen aufgedeckt werden, oder aber dass wir beim Erreichen der untersten Ebene auf unseren Fragen sitzen bleiben, die ja nun nicht durch eine weitere Substruktur gelöst werden können. Dieses Problem ist auch heute noch nicht abschließend gelöst worden, aber es zeichnet sich allmählich ab, wie die Natur mit diesem Paradoxon fertig geworden sein könnte.

1.3 Die Struktur der Atome

Widmen wir uns also nun der Frage, ob Atome elementare Objekte sind, wie die Griechen der Antike oder später die Chemiker der beginnenden Neuzeit annahmen, oder ob eine tiefere Strukturebene der Materie existiert.

Zunächst einmal stellen wir fest, dass Atome eine Größe von einigen zehn Millionstel Millimetern haben, wie wir in unserem Röntgenstrahl-Interferenzexperiment feststellen konnten. Dies wirft natürlich die Frage auf, ob man nicht ein Stück aus einem Atom heraus schneiden kann. Falls dies möglich ist, so kann ein Atom kaum als elementares Objekt gelten. Weiterhin stellen wir fest, dass es eine große Zahl verschiedener Atomsorten gibt: Man kennt über 80 stabile Atome, was sich nur schwer mit der Idee von Atomen als elementare Objekte vereinbaren lässt. Genau diese Überlegungen werden uns immer wieder bei der Suche nach den wirklich elementaren Objekten begegnen.

Die Entdeckung und Aufklärung der Struktur der Atome begann in den Jahren zwischen 1911 und 1913, als Ernest Rutherford (siehe Abb. 1.3) sein berühmtes Streuexperiment durchführte. Dabei ließ er sogenannte Alphateilchen, die von einem radioaktiven Material ausgesandt wurden, auf eine sehr dünne Goldfolie auftreffen und beobachtete mithilfe von Photoplatten, ob diese Teilchen die Folie durchdringen konnten und wie weit sie aus ihrer Bahn abgelenkt wurden. Was aber sind eigentlich Alphateilchen?

Allein schon ihre Existenz zeigt, dass die Welt außer Atomen noch andere Objekte enthalten muss, denn Alphateilchen sind selbst keine Atome, auch wenn sie von einem Stück Materie ausgesendet werden können. Um die Natur der Alphateilchen zu verstehen, müssten wir eigentlich die Struktur der Atome bereits als bekannt voraussetzen. Stattdessen sei hier vorweggenommen, dass es sich bei Alphateilchen um Atomkerne von Heliumatomen handelt. Sie sind elektrisch positiv geladen, haben eine Größe von etwa einem Zehntau-

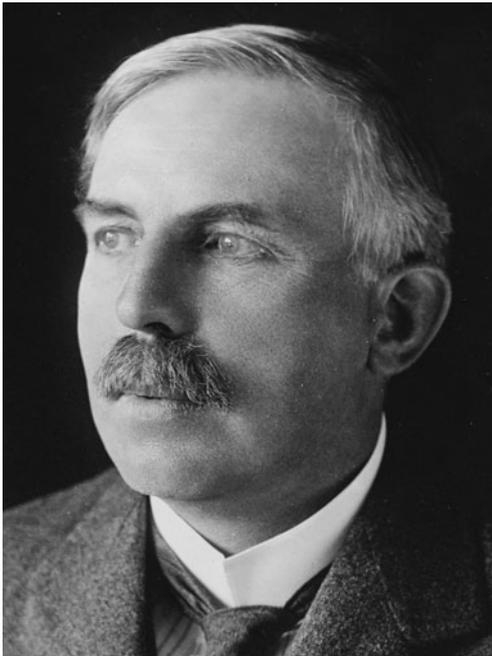


Abb. 1.3 Sir Ernest Rutherford (1871–1937). Bildquelle: Library of Congress.

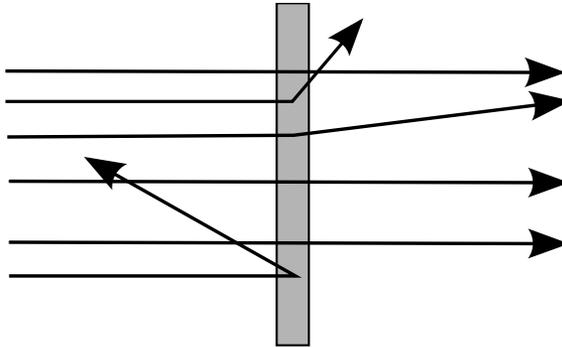


Abb. 1.4 Rutherford'scher Streuversuch.

sendstel eines Atoms und werden beim radioaktiven Zerfall gewisser Atomkerne mit großer Geschwindigkeit aus diesen herausgeschleudert.

Das Ergebnis des Rutherford'schen Streuversuchs ist sehr überraschend (siehe Abb. 1.4). Es zeigt sich, dass die Mehrheit der Alphateilchen die Metallfolie fast ungestört durchdringt! Die Goldatome stellen für Alphateilchen kaum ein Hindernis dar und machen hier keineswegs einen besonders massiven und undurchdringlichen Eindruck, wie wir das von den Bausteinen der Materie eigentlich erwartet hätten. Einige wenige Alphateilchen werden aber doch abgelenkt, wobei die Zahl dieser Teilchen mit der Größe der Ablenkung stark abnimmt. Immerhin gibt es aber sogar Alphateilchen, die um ca. 180 Grad abgelenkt werden und wieder dahin zurückfliegen, wo sie hergekommen sind.

Die genaue Analyse dieses sowie anderer Experimente ergibt das folgende Bild über den Aufbau der Atome:

Atome bestehen im Wesentlichen aus leerem Raum, sodass die meisten Alphateilchen die Folie ungehindert durchdringen können. Da es aber doch einige wenige sehr stark abgelenkte Alphateilchen gibt, muss sich in jedem Atom ein sehr kleines, positiv geladenes, recht massives Objekt befinden, dem man den Namen *Atomkern* verliehen hat. Wenn ein Alphateilchen einem Atomkern zufällig nahe kommt, so wird es von diesem elektrisch abgestoßen und entsprechend deutlich abgelenkt.

Eine detaillierte Vermessung der Ablenkungen ergab, dass die Alphateilchen im Rutherford'schen Versuch den Atomkern gar nicht berührten. Die Größe des Atomkerns konnte von Rutherford daher zunächst nicht ermittelt werden. Erst später gelang dies mit energiereicheren Alphateilchen und anderen Folien. Es ergab sich, dass Atomkerne nur etwa ein Zehntausendstel der Größe eines Atoms besitzen, aber dennoch fast die gesamte Masse des Atoms tragen.

Mit den gewohnten Längeneinheiten wie Millimetern geraten wir nun langsam in Schwierigkeiten. Wir wollen daher zu anderen Einheiten übergehen, die der Welt der Atome und Atomkerne besser angepasst sind. Für Atome ist die Einheit *Angström* recht günstig (Kurzform: Å). Dabei ergeben zehn Millionen Angström gerade einen Millimeter ($1 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ mm} = 10^{-10} \text{ m}$). Der Radius von Atomen bewegt sich zwischen einem halben und etwa drei Angström. Zum Vergleich: Sichtbares Licht besitzt Wellenlängen zwischen 4000 und 8000 Angström, je nach Farbe. Kein Wunder also, dass man mit einem Lichtmikroskop keine Atome sehen kann!

Ein Atom ist nun allerdings kein scharf begrenztes Objekt. Die Größenangaben sind also eher als grobe Anhaltspunkte zu verstehen, da wir für eine einwandfreie Definition des Radius eines Atoms an dieser Stelle noch nicht gerüstet sind.

Für Atomkerne werden wir eine noch kleinere Maßeinheit verwenden: das *Fermi* (oder Femtometer, Kurzform: fm), wobei 100 000 Fermi gerade ein Angström ergeben ($1 \text{ fm} = 10^{-5} \text{ \AA} = 10^{-15} \text{ m}$). Ein Fermi entspricht damit einem billionstel (10^{-12}) Millimeter. Typische Atomkerne sind nur einige Fermi groß; sie sind damit gut 10 000-mal kleiner als Atome.

Haben wir damit bereits den Bauplan der Atome entschlüsselt? Offenbar nicht, denn Atome sind im Allgemeinen nicht elektrisch geladen, d. h. die positive elektrische Ladung der Atomkerne muss durch weitere entgegengesetzt geladene Objekte kompensiert werden. Wären Atome elektrisch geladen, so würden sie sich gegenseitig mit sehr großen elektrischen Kräften abstoßen und Materie, wie wir sie kennen, könnte nicht existieren. Es muss also neben der positiven Ladung des Atomkerns auch negative Ladung in jedem Atom existieren. Außerdem bedarf die Tatsache, dass Atome sehr viel größer als Atomkerne sind, noch einer Erklärung.

Anders als die Atomkerne führen die Träger der negativen Ladung im Atom aber bei den Alphateilchen zu keiner merklichen Ablenkung aus der Flugbahn. Entweder besitzen diese negativen Ladungsträger also nur eine geringe Masse, oder aber die negative Ladung ist über das ganze Atom verschmiert und nicht in kleinen Bausteinen lokalisiert.

Ein bekanntes Experiment, dem wir später noch einmal begegnen werden, ist in der Lage, das Geheimnis zu lüften. Lässt man Licht im Vakuum auf eine Alkalimetalloberfläche fallen, und ist die Frequenz dieses Lichts hinreichend groß (was einer hinreichend kurzen Wellenlänge entspricht), so werden winzig kleine negativ geladene Teilchen aus den Atomen des Metalls herausgeschlagen (siehe Abb. 1.5). Diesen Teilchen hat man den Namen *Elektronen* gegeben. Dieses Herausschlagen von Elektronen ist unter dem Namen *Photoeffekt* bekannt (es sei hier erwähnt, dass Elektronen eigentlich nicht durch dieses Experiment entdeckt wurden, sondern im Jahre 1897 von J. J. Thomson auf andere Weise nachgewiesen wurden; da wir den Photoeffekt aber noch in einem anderen Zusammenhang benötigen, wollen wir bereits hier darauf eingehen).

Aufgrund vieler weiterer Experimente ergab sich im Laufe der Zeit das folgende Bild: Elektronen sind tatsächlich die gesuchten, noch fehlenden Bausteine der Atome. Sie sind winzige, negativ geladene Teilchen mit einer sehr kleinen Masse, die mehrere Tausend Mal kleiner ist als die Masse typischer Atome. Fast die gesamte Masse eines Atoms rührt daher von seinem Atomkern her. Jedes Atom besteht aus einem kleinen, schweren, positiv geladenen Atomkern in seinem Zentrum, um den sich ein oder mehrere winzige negativ geladene Elektronen bewegen und so dessen Ladung nach außen hin abschirmen (siehe Abb.

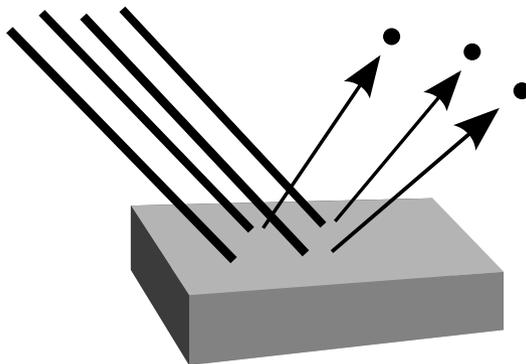


Abb. 1.5 Der Photoeffekt: Licht kann aus einer Alkalimetalloberfläche einzelne Elektronen heraus-schlagen.

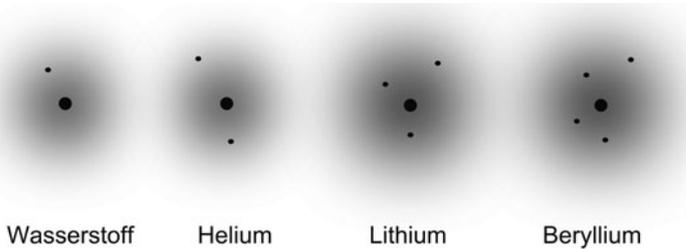


Abb. 1.6 Der innere Aufbau der vier leichtesten Atome. Im Zentrum der Atome befindet sich der schwere positiv geladene Atomkern (großer schwarzer Kreis), um den sich die winzigen negativ geladenen Elektronen bewegen (kleine Kreise).

1.6). Die elektrische Anziehungskraft zwischen Elektronen und Atomkern hält das Atom zusammen. Auf welche Weise sich die Elektronen in einem Atom bewegen, können wir allerdings erst in einem späteren Kapitel genauer verstehen.

Mit dem Elektron ist uns bereits das erste Objekt begegnet, bei dem bis heute keinerlei Anzeichen auf eine Substruktur bekannt sind. So hat man noch keine messbare Ausdehnung dieses Teilchens feststellen können. Wenn das Elektron eine Ausdehnung besitzt, so muss es zumindest kleiner als ein zehntausendstel Fermi sein. Das Elektron ist nach heutigem Wissen ein elementares Teilchen.

Die negative elektrische Ladung hat bei allen Elektronen denselben festen Betrag, nämlich $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Wir werden diesen Ladungsbetrag einfach als eine negative *Elementarladung* (abgekürzt: e) bezeichnen, womit wir eine der Welt der Teilchen angepasste Ladungseinheit eingeführt haben. Die Ladung eines Elektrons beträgt also gerade minus eine Elementarladung, wobei das Minuszeichen die negative Ladung kennzeichnet, gemäß der Konvention, die Ladung der Atomkerne als positiv zu bezeichnen.

Der Grund für den speziellen Namen dieser neuen Ladungseinheit wird klarer, wenn wir die positive Ladung der verschiedenen Atomkerne näher betrachten. Sie beträgt nämlich immer ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung, also eine, zwei, drei oder mehr Elementarladungen. In den zugehörigen elektrisch neutralen Atomen bewegen sich dann entsprechend ein, zwei, drei oder mehr negativ geladene Elektronen um den Atomkern und kompensieren so exakt dessen positive Ladung nach außen hin. Trotz einiger theoretischer Ansätze (es seien hier die sogenannten magnetischen Monopole erwähnt) ist die Tatsache, dass der Betrag der elektrischen Ladung freier Teilchen immer ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ist, bis heute nicht wirklich verstanden. Auch im Standardmodell der Elementarteilchen, von dem in diesem Buch noch häufig die Rede sein wird, kann diese Tatsache nicht begründet werden – ein Hinweis auf noch nicht gelüftete Geheimnisse der Physik.

Unsere Kenntnis über den inneren Aufbau der Atome versetzt uns nun in die Lage, genau zu spezifizieren, was die Atome verschiedener Elemente eigentlich unterscheidet: Es ist die elektrische Ladung des Atomkerns, durch die bei elektrisch neutralen Atomen auch die Zahl der Elektronen in der Atomhülle festgelegt ist. So trägt der Atomkern des Wasserstoffatoms eine Elementarladung, bei Helium sind es zwei, bei Lithium drei usw., wobei zu jeder Zahl auch tatsächlich ein entsprechendes Atom in der Natur vorkommt. Damit sind wir in der Lage, eine vollständige Liste der chemischen Elemente bzw. der verschiedenen Atomsorten anzulegen, geordnet nach der Ladung der Atomkerne. Dieses sogenannte Periodensystem der Elemente wurde im Jahre 1868 von Dmitri Iwanowitsch Mendelejew aufgestellt (übrigens noch ohne unser Wissen über den inneren Aufbau der Atome).

Man findet in der Natur 80 verschiedene chemische Elemente mit stabilen Atomen. Es gibt also eine obere Grenze für die Ladung der Atomkerne. Atomkerne mit mehr als 82 Elementarladungen sind nicht mehr stabil, sondern zerfallen zufällig mit gewissen Wahrscheinlichkeiten in leichtere Atomkerne, wobei Alphateilchen, sehr kurzweilige elektromagnetische Strahlung (Gammastrahlung) oder schnelle Elektronen bzw. sogenannte Positronen ausgesendet werden können. Man spricht vom *radioaktiven Zerfall*. Das letzte noch stabile Atom ist mit 82 Elementarladungen im Kern das Bleiatom. Das Bismutatatom (auch Wismutatatom genannt) ist mit 83 Elementarladungen im Kern bereits radioaktiv, wenn auch nur sehr schwach. Unterhalb von 82 Elementarladungen sind nur das Technetiumatom (43 Elementarladungen) und das Promethiumatom (61 Elementarladungen) instabil.

Wir sehen also, dass die Welt der Atomkerne noch einige Geheimnisse für uns bereithält. Die Tatsache, dass die Ladung der Atomkerne ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ist, sowie die messbare Ausdehnung der Atomkerne deuten darauf hin, dass Atomkerne wohl keine elementaren Objekte sein werden. Die Frage nach dem inneren Aufbau der Atomkerne wollen wir aber noch etwas aufschieben und uns zunächst zwei anderen Themen zuwenden.

Zuerst werden wir uns mit Kräften und Wechselwirkungen zwischen Objekten beschäftigen und die zwei bekanntesten Wechselwirkungen näher betrachten: die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung.

Dann stellen wir uns die Frage, auf welche Weise sich die Elektronen der Atomhülle im elektrischen Anziehungsfeld des Atomkerns bewegen. Dabei werden wir auf sehr merkwürdige Phänomene stoßen, die die gesamte Fragestellung nach dem inneren Aufbau der Materie in einem völlig neuen Licht erscheinen lassen.

1.4 Kräfte und Wechselwirkungen

Der griechische Philosoph Empedokles hatte bereits in der Antike die Vorstellung geprägt, die Welt könne mithilfe einiger Grundsubstanzen sowie einiger zwischen ihnen wirkender Grundkräfte erklärt werden. Im modernen Sprachgebrauch entsprechen die Grundsubstanzen den Elementarteilchen, und die Grundkräfte werden etwas allgemeiner als Wechselwirkungen bezeichnet. Wenn wir uns also ein Bild vom Aufbau der Materie machen wollen, müssen wir uns sowohl mit den elementaren Teilchen als auch mit den Eigenschaften der Wechselwirkungen zwischen ihnen befassen.

Betrachten wir zunächst Teilchen und ihre Wechselwirkungen im Rahmen der klassischen nichtrelativistischen Mechanik. Grundlage der klassischen Mechanik sind die zwei Bewegungsgesetze, die Isaac Newton (siehe Abb. 1.7) um das Jahr 1687 formuliert hat. Sie machen eine Aussage darüber, wie sich Körper unter dem Einfluss von Kräften bewegen.

Das erste Gesetz besagt, dass ein kleiner Körper, auf den eine bestimmte Kraft wirkt, eine Beschleunigung in Richtung dieser Kraft erfährt, die proportional zur Stärke der Kraft und umgekehrt proportional zur Masse des Körpers ist. Die Beschleunigung gibt dabei an, um welchen Betrag und in welcher Richtung sich der Geschwindigkeitspfeil eines Teilchens pro Zeiteinheit ändert. Sie besitzt also neben ihrem Betrag eine Richtung und lässt sich daher als Pfeil im dreidimensionalen Raum darstellen. Die physikalische Dimension der Beschleunigung ist die Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit, also $(\text{m/s})/\text{s}$ oder zusammengefasst m/s^2 .

Die bekannte Kurzformel für das erste Newton'sche Gesetz lautet:

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$$

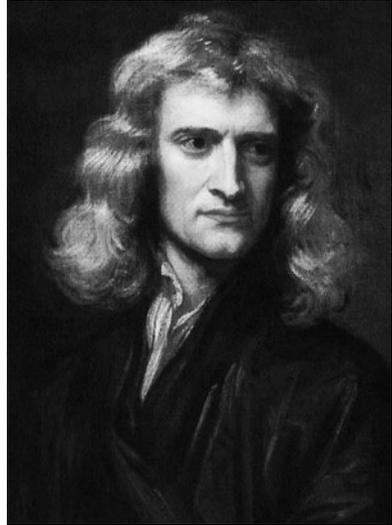


Abb. 1.7 Sir Isaac Newton (1642–1727), gemalt von Godfrey Kneller im Jahr 1689.

oder in Kurzform $F = m \cdot a$, wobei F für die Kraft, m für die Masse und a für die Beschleunigung steht. Die Richtung der Beschleunigung a stimmt dabei mit der Richtung der wirkenden Kraft F überein. Dies kann man dadurch kennzeichnen, dass man das erste Newton'sche Gesetz als eine Gleichung für Pfeile (Vektoren) schreibt. Das haben wir oben getan, indem wir die Pfeile durch Fettdruck gekennzeichnet haben. Eine Kraft kann daher einen Körper nicht nur im üblichen Sinne beschleunigen, sondern ihn auch abbremsen oder aus seiner Bahn zur Seite ablenken (siehe Abb. 1.8).

Man kann dieses erste Bewegungsgesetz auch als Definition für den Begriff der Kraft auffassen. Dies macht schon die Definition der Krafteinheit *Newton* (abgekürzt: N) deutlich: Ein Newton ist definiert als die Kraft, bei der ein Körper von einem Kilogramm Masse in einer Sekunde eine Geschwindigkeitszunahme von einem Meter pro Sekunde erfährt, wenn die Kraft in Bewegungsrichtung wirkt (Kurzform: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$).

Das erste Newton'sche Bewegungsgesetz erhält daher erst dann seine eigentliche physikalische Bedeutung, wenn man die auf einen Körper mit bekannter Masse wirkende Kraft angeben kann, ohne seine Beschleunigung zu vermessen. Dann ist es nämlich möglich, die Beschleunigung des Körpers zu berechnen und damit seine weitere Bewegung vorausszusagen. Um die Kraft unabhängig von der Beschleunigung angeben zu können, sind weitere physikalische Erkenntnisse nötig. Es muss untersucht werden, welche Kräfte zwischen verschiedenen Körpern wirken, d. h. welchen Wechselwirkungen sie unterliegen.

Newtons zweites Gesetz besagt, dass, wenn ein Körper eine Kraft auf einen zweiten Körper ausübt, umgekehrt dieser zweite Körper auch eine Kraft gleichen Betrags, aber umgekehrter Richtung auf den ersten Körper ausübt. Kurzformel: *Actio gleich Reactio*. In der Verallgemeinerung dieses Gesetzes auf mehrere Körper ist *Kraft* durch *Summe der Kräfte* zu ersetzen.

Das zweite Newton'sche Gesetz ist ein allgemeines Grundgesetz, das alle Wechselwirkungen zwischen Körpern erfüllen müssen. Es gilt in der obigen Form, solange die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit physikalischer Wirkungen, wie sie die spezielle Relativitätstheorie fordert, keine Rolle spielt, also bei hinreichend langsam bewegten Körpern.

Aus unserem täglichen Leben sind uns eine ganze Reihe von Kräften bekannt, z. B. die Schwerkraft, Reibungskräfte, elektrische und magnetische Kräfte, die Fliehkraft und eini-

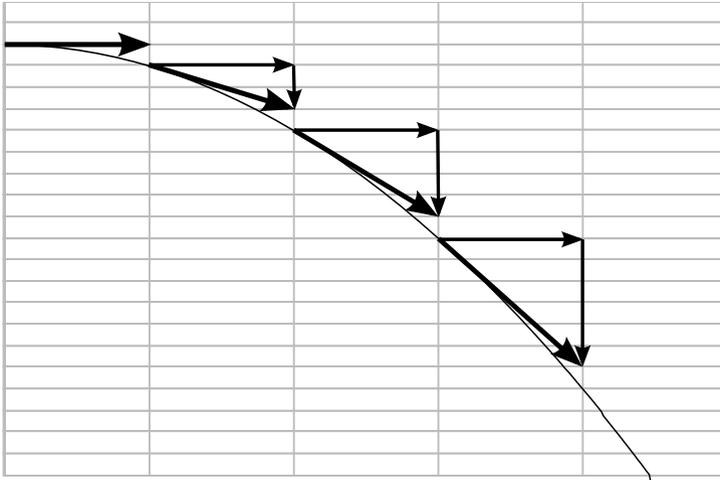


Abb. 1.8 Auf eine nach rechts fliegende Kugel wirkt aufgrund der Schwerkraft eine konstante Kraft nach unten. Nach Newtons erstem Bewegungsgesetz wird sie daher gleichmäßig nach unten beschleunigt, d. h. die nach unten gerichtete Komponente der Geschwindigkeit wächst gleichmäßig an. Die Kugel bewegt sich entlang einer Parabel nach rechts unten.

ges mehr. Im Folgenden wollen wir Kräfte wie die Fliehkraft oder Reibungskräfte nicht zu den Wechselwirkungen zählen. Kräfte wie die Fliehkraft oder beispielsweise die Kraft, die uns in einem anfahrenen Auto in die Sitze drückt, sind sogenannte Scheinkräfte, die in einem beschleunigten Bezugssystem generell auftreten und damit durch Newtons Grundgesetze der Mechanik bereits erklärt werden. Kräfte wie die Reibungskraft dagegen kommen durch ein vereinfachtes, nicht-atomistisches Bild der Materie als mathematische Hilfsgrößen ins Spiel und haben daher keinen fundamentalen Charakter.

Wir können nun versuchen, etwas genauer zu spezifizieren, was wir unter einer Wechselwirkung im Rahmen der Newton'schen Grundgesetze der Mechanik verstehen wollen. Stellen wir uns dazu einige Objekte im ansonsten leeren Raum vor, wobei wir eine gegenseitige Berührung ausschließen wollen, da ansonsten wieder Kräfte vom Typ Reibungskraft ins Spiel kommen könnten. Beispiele für solche Objekte wären einzelne Atome oder Moleküle, einzelne Elektronen, aber auch z. B. die Planeten des Sonnensystems. Idealerweise betrachten wir dabei möglichst elementare Objekte bzw. Objekte, deren innerer Aufbau für die betrachteten physikalischen Phänomene kaum eine Rolle spielt (ich gebe zu, dass diese Aussagen alle etwas schwammig sind, was aber hier kaum zu vermeiden ist). Die Kräfte, über die sich diese Körper nun gegenseitig beeinflussen können, wollen wir als Wechselwirkungen bezeichnen. Dabei machen wir Gebrauch von einem entscheidenden Konzept, das unseren Vorfahren im Mittelalter die Haare hätte zu Berge stehen lassen und das sich erst zu Beginn der Neuzeit durchsetzen konnte. Wir wollen nämlich annehmen, dass Körper aufeinander Kräfte ausüben können, ohne dass sich zwischen ihnen irgendein kraftvermittelndes Medium befindet. Man bezeichnet diese Art der Wechselwirkung durch den leeren Raum hindurch als Fernwirkung.

Dieses uns heute selbstverständliche Konzept widerspricht unserer menschlichen Anschauung, die daran gewöhnt ist, dass Kräfte immer mechanisch, z. B. durch Hebel oder Seile, von einem Körper auf den anderen einwirken. Die Physik zeigt aber, dass die Fernwirkung das universelle Konzept für die Übertragung von Kräften in der Natur ist und dass

auch die Kraftübermittlung durch ein Seil bei Beachtung seiner atomaren Struktur auf diesem Konzept beruht.

Wie viele Wechselwirkungen im obigen Sinne kennen wir nun aus der uns unmittelbar zugänglichen Welt? Am bekanntesten dürfte hier die Schwerkraft oder Gravitation sein, die jeden von uns unmittelbar betrifft und am Erdboden festhält. Seit Newton wissen wir, dass diese Kraft auch für die Bahnen der Planeten um die Sonne oder die gegenseitige Umlaufbewegung von Erde und Mond verantwortlich ist.

Betrachten wir die Schwerkraft zwischen zwei Körpern, deren Ausdehnung wesentlich kleiner als ihr Abstand voneinander ist. In diesem Fall hat Newton im Jahre 1687 erstmals die genaue Abhängigkeit der gegenseitigen Anziehungskraft zwischen beiden Körpern von deren Massen und deren Abstand angegeben. Dieses Naturgesetz könnte einfacher nicht sein:

Die Kraft F zwischen den Körpern ist proportional dem Produkt der einzelnen Massen m_1 und m_2 und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands r . Dabei wirkt die Kraft anziehend entlang der Verbindungslinie zwischen den beiden Körpern. Das bedeutet: Verdoppelt man eine der Massen, so verdoppelt sich auch die Anziehungskraft; und verdoppelt man den Abstand, so verringert sich die Anziehungskraft auf ein Viertel. Diese Abstandsabhängigkeit kann man auch anschaulich verstehen. Dazu stellen wir die Gravitationswirkung eines kleinen Körpers durch Linien dar, die radial von ihm nach außen zeigen, wie bei einem Seeigel. Die Anziehungskraft im Abstand r ist dann durch die Dichte der Linien in diesem Abstand gegeben. Verdoppelt man den Abstand, so schrumpft diese Liniendichte auf ein Viertel, da sich die Linien auf eine viermal so große Kugeloberfläche um die Masse herum verteilen müssen.

Nun ist die Masse eines Körpers durch das erste Newton'sche Gesetz bereits definiert. Die so definierte Masse bezeichnet man als *träge Masse*. Sie gibt an, wie stark ein Körper durch eine wirkende Kraft beschleunigt wird. Nun könnte man das Gravitationsgesetz dazu verwenden, eine weitere Eigenschaft von Körpern zu definieren, die man als *schwere Masse* m_s bezeichnen kann. Man könnte beispielsweise zwei identische Körper mit gleicher schwerer Masse nehmen und ihre jeweilige schwere Masse direkt über die Gravitationskraft definieren, die sie aufeinander ausüben. Die schwere Masse hätte dann die Maßeinheit *Meter mal Wurzel aus Newton*, und das Gravitationsgesetz würde einfach $F = m_s m_s / r^2$ lauten. Dabei muss zunächst überhaupt kein Zusammenhang zwischen träger und schwerer Masse bestehen, und wir könnten statt dem Begriff *schwere Masse* auch beispielsweise den Begriff *Gravitationsladung* verwenden.

Das Experiment zeigt nun jedoch, dass träge und schwere Masse mit großer Genauigkeit proportional zueinander sind. Daher verzichtet man auf die Definition einer schweren Masse und setzt stattdessen direkt die träge Masse in das Gravitationsgesetz ein. Man identifiziert träge und schwere Masse also miteinander und spricht nur noch von *der Masse* eines Körpers. Da die träge Masse bereits eine Maßeinheit (nämlich Kilogramm, kg) besitzt, muss man im Gravitationsgesetz eine Proportionalitätskonstante G angeben, die dazu dient, aus dem Ausdruck $m_s m_s / r^2$ mit der Einheit kg^2/m^2 die wirkende Gravitationskraft in der Kräfteinheit *Newton* zu berechnen.

Da man das Gravitationsgesetz nach der Gleichsetzung von schwerer und träger Masse also nicht mehr zur Definition der schweren Masse verwenden kann, muss man nun messen, welche Gravitationskraft zwischen zwei Referenzmassen wirkt. Dies bedeutet nichts anderes, als den Wert von G zu messen. Das experimentelle Ergebnis lautet $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$.

Die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern kann dann über die Formel

$$F = G m_1 m_2 / r^2$$

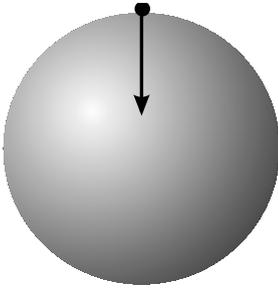


Abb. 1.9 Auf einen Satelliten, der sich in etwa 6 400 Kilometer Höhe über dem Erdboden befindet, wirkt nur noch ein Viertel der Schwerkraft, die am Erdboden auf ihn gewirkt hat, da er sich nun doppelt so weit vom Erdmittelpunkt weg befindet (der Erdradius beträgt etwa 6 400 Kilometer).

leicht berechnet werden. Wir sollten uns an dieser Stelle merken, dass die Identifikation von schwerer und träger Masse die Existenz der fundamentalen Naturkonstante G (die Gravitationskonstante) bewirkt. Ohne diese Identifikation hätten wir uns die Einführung von G sparen können.

Bei kugelförmigen Körpern mit kugelsymmetrischer Massenverteilung gilt das Gravitationsgesetz in der obigen Form auch dann, wenn der kugelförmige Körper eine Größe besitzt, die nicht wesentlich kleiner als der Abstand zum anderen Körper ist. Maßgebend für den Abstand sind dabei die Mittelpunkte der Körper. So wirkt z. B. auf ein Raumschiff, das sich etwa 6 400 Kilometer über dem Erdboden befindet, nur noch ein Viertel der Schwerkraft, die am Erdboden auf dieses Raumschiff wirkt (der Erdradius beträgt nämlich gerade etwa 6 400 Kilometer). Die Schwerkraft ist in dieser Höhe also keineswegs null (siehe Abb. 1.9). Die Insassen des Raumschiffs merken nur deswegen nichts davon, da sich das Raumschiff im sogenannten freien Fall befindet, d. h. ohne Antrieb die Erde umkreist. Wäre die Schwerkraft gleich null, so würde nichts das Raumschiff daran hindern, auf Nimmerwiedersehen im Weltall zu verschwinden, statt brav die Erde zu umkreisen.

Neben der Gravitation sind uns aus unserer unmittelbaren Umgebung zwei weitere Wechselwirkungen bekannt: die elektrischen Kräfte, die einem in unmittelbarer Nähe zum Fernsehbildschirm die Haare zu Berge stehen lassen und mit der man wunderbar Luftballons an die Wand kleben kann, und die magnetischen Kräfte, die die Kompassnadel nach Norden zeigen lassen.

Die elektrische Kraft zwischen zwei ruhenden Ladungen, z. B. zwischen zwei Elektronen, folgt einem ähnlichen Gesetz wie die Schwerkraft zwischen zwei Körpern. Die Kraft ist proportional dem Produkt der einzelnen Ladungen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands. Dabei wird der Begriff der elektrischen Ladung eigentlich erst durch genau dieses Gesetz definiert. Man könnte also sagen, ein Körper habe die elektrische Ladung *ein Meter mal die Wurzel aus einem Newton*, wenn sich dieser Körper und ein identisches Duplikat in einem Meter Abstand mit einer Kraft von einem Newton gegenseitig abstoßen. Wie man sieht, benötigt man also gar keine neue Einheit für die Ladung, da sich eine entsprechende Einheit aus bereits vorhandenen Einheiten (Newton für die Kraft, Meter für den Abstand) zusammensetzen lässt, ganz analog zur obigen Definition der schweren Masse. Dieses Mal sind jedoch elektrische Ladung und träge Masse eines Körpers nicht proportional zueinander oder sonst irgendwie zusammenhängend, sodass eine Identifikation dieser beiden Größen nicht infrage kommt.

Im sogenannten SI-Einheitensystem wird die elektrische Ladung aus technischen Gründen jedoch nicht über die elektrische, sondern über die magnetische Kraft definiert. Dazu definiert man die Einheit *Ampere* der elektrischen Stromstärke durch folgenden (theoretischen) Aufbau:

Man lässt im Vakuum durch zwei unendlich lange, einen Meter voneinander entfernte parallele Drähte den gleichen Strom fließen. Diese Ströme bauen um die Drähte herum ein Magnetfeld auf, das zu einer gegenseitigen Anziehungskraft zwischen den Drähten führt. Falls diese Anziehungskraft genau $2 \cdot 10^{-7}$ Newton pro Meter Drahtlänge beträgt, so hat der in den Drähten fließende Strom die Stärke *ein Ampere* (1 A).

Die elektrische Ladung erhält nun eine Maßeinheit, die aus dieser Einheit für die elektrische Stromstärke auf die folgende Weise abgeleitet wird:

Ein Strom der Stärke 1 A transportiert in einer Sekunde die elektrische Ladung von einem *Coulomb* (abgekürzt: C), d. h. $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$.

Aufgrund dieser vom elektrischen Kraftgesetz unabhängigen Definition der elektrischen Ladung ist man nun analog zum Gravitationsgesetz (formuliert mit der trägen Masse) zur Einführung eines Proportionalitätsfaktors k gezwungen, der ungefähr den Wert $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ besitzt. Das Coulomb'sche Kraftgesetz zwischen zwei unbewegten elektrischen Ladungen q_1 und q_2 lautet dann

$$F = k q_1 q_2 / r^2$$

Zwei Ladungen von je einem Coulomb üben also aufeinander in einer Entfernung von einem Meter eine Abstoßungskraft von etwa neun Milliarden Newton aus. Dies entspricht einem Gewicht von 900 000 Tonnen.

Für die Naturkonstante k findet man häufig auch die Schreibweise $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$ mit der sogenannten elektrischen Feldkonstanten $\epsilon_0 = 0,884 \cdot 10^{-11} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$. Diese etwas umständliche Form hat messtechnische Gründe und ist für uns hier uninteressant.

Viel interessanter ist dagegen der Zusammenhang, der sich zwischen k und einer anderen Naturkonstanten, der Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ herstellen lässt. Es gilt nämlich

$$k = 10^{-7} (\text{N s}^2/\text{C}^2) c^2$$

Dieser *exakte* Zusammenhang ergibt sich direkt aus den sogenannten Maxwell-Gleichungen, die die Eigenschaften der elektrischen und magnetischen Kräfte beschreiben (wir kommen etwas weiter unten darauf zurück). Bereits J. C. Maxwell (1831–1879, siehe Abb. 1.10) hatte erkannt, dass, wenn man die über magnetische Kräfte definierte mit der über elektrische Kräfte definierten Ladungsmenge in Beziehung setzt, man als Übersetzungsfaktor eine Geschwindigkeit erhält, deren Wert genau der Geschwindigkeit des Lichts entspricht.

Wir können also k auf eine andere Naturkonstante zurückführen, die eng mit der speziellen Relativitätstheorie verknüpft ist. Es ist daher naheliegend zu vermuten, dass auch der obige Zusammenhang seinen tieferen Ursprung in dieser Theorie hat. Für den Moment wollen wir uns aber nur merken, dass der Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Kräften auf eine universelle Naturkonstante führt: die Lichtgeschwindigkeit c .

Im Unterschied zur Gravitation, die immer anziehend zwischen zwei Körpern wirkt, gibt es sowohl anziehende als auch abstoßende elektrische Kräfte. Die obige Formel berücksichtigt diese Tatsache noch nicht, sondern betrachtet nur den Betrag der Kraft. Man trägt ihr dadurch Rechnung, dass man für die elektrische Ladung sowohl positive als auch negative Werte zulässt, wobei wir die willkürliche Konvention treffen, die Ladung der Atomkerne als positiv zu bezeichnen. Die elektrische Kraft zwischen zwei Körpern mit identischem Ladungsvorzeichen wirkt dabei immer abstoßend, während sie zwischen einem positiv und einem negativ geladenen Körper anziehend wirkt. Bei der Gravitation



Abb. 1.10 James Clerk Maxwell (1831–1879).
Bildquelle: Smithsonian Institution Libraries.

dagegen kann die (schwere) Masse nur positive Werte annehmen, und die Kraft wirkt immer anziehend.

Im Zusammenhang mit der elektrischen Kraft führt man einen neuen, sehr nützlichen Begriff ein: den Begriff des Feldes. Ein solches Feld E ist dabei einfach dadurch definiert, dass es an jedem Punkt im Raum die Richtung und die Stärke der elektrischen Kraft F auf einen kleinen dort befindlichen Probekörper mit der Ladung q angibt, wobei man zur Berechnung der Kraftstärke den Wert des Feldes noch mit der Ladung des Probekörpers multiplizieren muss: $F = q E$. Das elektrische Feld hat daher die Dimension *Kraft pro Ladung*, also beispielsweise die Maßeinheit *Newton pro Coulomb*. Wie die Kraft besitzt auch das elektrische Feld eine Richtung im Raum, die bei einer positiven Probeladung mit der Richtung der darauf wirkenden elektrischen Kraft übereinstimmt (bei einer negativen Ladung sind Kraft und Feld entsprechend entgegengesetzt orientiert). Wir haben dies in den Formeln wieder durch Fettdruck dargestellt.

Was also ist das elektrische Feld? Darüber haben sich die Physiker in der Vergangenheit viele Jahrzehnte lang den Kopf zerbrochen. Aus heutiger Sicht ist das elektrische Feld zusammen mit dem magnetischen Feld einfach ein abstraktes mathematisches Hilfsmittel, mit dessen Hilfe sich die elektromagnetischen Phänomene am bequemsten beschreiben lassen. Es ist wie das Grinsen der Grinsekatz in Lewis Carrolls Buch *Alice im Wunderland*:

„Na, Katzen ohne Grinsen habe ich schon oft gesehen“, sagte Alice. „Aber Grinsen ohne Katzen! Das ist das Wunderlichste, was ich je erlebt habe.“

Ein kleines Beispiel hilft uns, die unterschiedliche Stärke der Gravitation und der elektrischen Kraft zu veranschaulichen. Betrachten wir dazu die Gravitationskraft, die zwischen einem Proton und einem Elektron wirkt, die sich im Abstand von einem halben Angström voneinander befinden. Dies ist der Durchschnittswert für den Abstand dieser beiden Teilchen in einem Wasserstoffatom. Die Gravitationskraft zwischen dem Proton und dem Elektron beträgt dann etwa $2,5 \cdot 10^{-38}$ Elektronenvolt pro Angström, wobei für die

Kraft eine der Welt der Atome angepasste Einheit verwendet wurde. Ein Elektronenvolt (Kurzform eV) ist dabei die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen eines elektrischen Spannungsgefälles von einem Volt aufnimmt. Die Kraftereinheit eV/Å ist nun leicht zu verstehen: Wird eine elektrische Ladung entlang einer Strecke von einem Angström durch eine Kraft von einem eV/Å beschleunigt, so gewinnt sie eine Energie von einem Elektronenvolt.

Der genaue Zahlenwert sagt uns aber dennoch zunächst nicht allzu viel. Berechnen wir daher zum Vergleich nun die elektrische Kraft zwischen diesen beiden Teilchen. Sie beträgt 57 Elektronenvolt pro Angström und ist daher um etwa 39 Zehnerpotenzen (eine eins mit 39 Nullen) größer als die Gravitationskraft. Dies entspricht ungefähr dem Verhältnis der Masse der Erde ($6 \cdot 10^{24}$ kg) zu einem einhundert millionstel Milligramm (10^{-14} kg). Im Vergleich zur elektrischen Kraft spielt die Gravitationskraft innerhalb eines Wasserstoffatoms also keine Rolle.

Die Gravitation besitzt allerdings eine Eigenschaft, die sie von der elektrischen Kraft unterscheidet: Gravitationskräfte sind immer anziehend. Daher tendieren Massen dazu, sich aufgrund der Gravitation zu akkumulieren, was wiederum ihre Gravitationswirkung verstärkt. Elektrische Ladungen dagegen tendieren dazu, sich gegenseitig nach außen hin zu neutralisieren. Daher bestimmt die Gravitation trotz ihrer geringen Stärke die Bewegungen der Sterne und Planeten, während sie in der Welt der Atome und Elementarteilchen nicht die geringste Rolle spielt. Sie wird erst bei der Betrachtung sehr kleiner Abstände wieder wichtig, die weit jenseits unserer heutigen experimentellen Möglichkeiten liegen.

Wie steht es nun mit den magnetischen Kräften? Es zeigt sich, dass eine sehr enge Verwandtschaft zwischen elektrischen und magnetischen Kräften bestehen muss (dies hatten wir aufgrund des Zusammenhangs zwischen k und c bereits vermutet). So wird ein Magnetfeld durch seine Wirkung auf ein elektrisch geladenes, sich bewegendes Teilchen definiert. Dieses Teilchen erfährt beim Durchgang durch ein Magnetfeld eine Kraft, die senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung und ebenfalls senkrecht zum Magnetfeld wirkt. In einem homogenen Magnetfeld würde ein ansonsten freies Elektron sich daher auf einer Spiralbahn bewegen, die sich um die Richtung des Magnetfeldes windet. Damit unterscheidet sich ein Magnetfeld von einem elektrischen Feld, bei dem die Richtung des Feldes identisch (bis auf das Vorzeichen) mit der Richtung der Kraft auf die Ladung ist.

Von einer ruhenden elektrischen Ladung geht ein elektrisches Feld aus. Von einer sich bewegenden elektrischen Ladung wird zusätzlich ein Magnetfeld erzeugt. Der Begriff der Bewegung ist allerdings immer an ein Bezugssystem gebunden, gegenüber dem man die Bewegung angibt. So würde ein sich mit dem Elektron mitbewegender Beobachter dieses Elektron als ruhend empfinden. Entsprechend nimmt dieser Beobachter auch kein magnetisches Feld wahr, im Gegensatz zu einem Beobachter, gegenüber dem sich das Elektron bewegt. Ein elektrisches Feld kann sich also beim Wechsel des Beobachters, d. h. beim Wechsel des Bezugssystems, teilweise in ein Magnetfeld verwandeln und umgekehrt. Wie wir später noch sehen werden, ist eines der zentralen Postulate der speziellen Relativitätstheorie, dass alle nicht beschleunigten Bezugssysteme völlig gleichberechtigt sind, sodass es auch keine Möglichkeit gibt, ein absolut ruhendes Bezugssystem anzugeben. Es ist daher angebracht, elektrische und magnetische Felder immer gemeinsam zu betrachten und sie als Facetten einer einzigen Wechselwirkung aufzufassen, die den Namen elektromagnetische Wechselwirkung trägt.

Aber auch ohne sich auf die spezielle Relativitätstheorie zu beziehen, ist klar, dass elektrische und magnetische Felder nur gemeinsam beschrieben werden können. Dies wird beispielsweise durch die Tatsache erzwungen, dass ein sich veränderndes Magnetfeld immer auch ein elektrisches Feld erzeugt, was die Erfindung des Dynamos ermöglicht hat.

Umgekehrt erzeugt ein sich veränderndes elektrisches Feld ein Magnetfeld. Dadurch ist es möglich, dass ein oszillierendes elektrisches Feld ein ebenfalls oszillierendes magnetisches Feld erzeugt, das umgekehrt wiederum das oszillierende elektrische Feld erzeugt und so fort. Oszillierende elektrische und magnetische Felder können sich damit gegenseitig am Leben erhalten und ohne die Anwesenheit elektrischer Ladungen unbegrenzt durch den Raum fortpflanzen. Felder dieser Art bezeichnet man als elektromagnetische Wellen, zu denen auch das Licht gehört.

Alle diese gegenseitigen Wechselbeziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Feldern, Ladungen und Strömen können durch ein recht einfaches System von vier Gleichungen beschrieben werden, die im Jahre 1864 von James Clerk Maxwell aufgestellt wurden und daher den Namen Maxwell-Gleichungen tragen. Bei Einbeziehung der speziellen Relativitätstheorie lassen sich diese vier Gleichungen sogar in sehr eleganter Form auf nur zwei Gleichungen zurückführen. Hinzu kommt noch die Definition des elektrischen und des magnetischen Feldes. Wir wollen den physikalischen Inhalt dieser Gleichungen hier etwas vereinfacht in Worten wiedergeben:

Definition der elektromagnetischen Felder: Das elektrische Feld E wird durch seine Kraftwirkung F auf eine punktförmige elektrische Probeladungen Q definiert: $F = Q \cdot E$. Ebenso wird ein Magnetfeld B durch seine Kraftwirkung F auf eine punktförmige elektrische Probeladungen Q definiert, wobei F senkrecht zur Geschwindigkeit v der Probeladung und senkrecht zum Magnetfeld B gerichtet ist.

Coulomb'sches Kraftgesetz: Eine punktförmige Ladung q erzeugt ein elektrisches Feld $E = k q/r^2$. Dieses Feld ist radial von der Ladung weg orientiert.

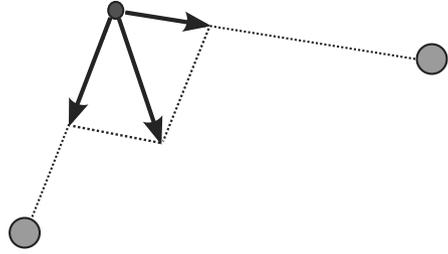
Gauß'sches Gesetz des Magnetismus: Es gibt keine magnetischen Ladungen (Monopole), d. h. es gibt beispielsweise keinen Punkt, von dem aus die magnetischen Feldlinien alle radial nach außen zeigen.

Faraday'sches Induktionsgesetz: Ein sich verstärkendes oder abschwächendes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld, dessen Richtung senkrecht zum Magnetfeld orientiert ist. Je schneller die zeitliche Veränderung des Magnetfeldes ist, umso stärker ist das dadurch erzeugte elektrische Feld.

Ampère'sches Gesetz: Ein stromdurchflossener Leiter (genauer: die sich darin bewegendes elektrischen Ladungen) erzeugt ein magnetisches Feld, das den Leiter ringförmig umschließt und dessen Stärke proportional zur Stromstärke ist. Ebenso erzeugt ein sich verstärkendes oder abschwächendes elektrisches Feld ein Magnetfeld, dessen Richtung senkrecht zum elektrischen Feld orientiert ist. Je schneller die zeitliche Veränderung des elektrischen Feldes ist, umso stärker ist das dadurch erzeugte Magnetfeld.

Elektrische und magnetische Felder haben nun eine wichtige Eigenschaft: Sie lassen sich überlagern, ohne sich zu stören. Sie werden einfach linear aufaddiert, genauso, wie man zwei Pfeile (Vektoren) aneinanderfügen kann und dann durch einen einzigen neuen Gesamtpfeil ersetzt (siehe Abb. 1.11). Dass sich elektrische Felder nicht gegenseitig stören, merken wir schon daran, dass ein Lichtstrahl den leeren Raum immer geradlinig durchquert, auch wenn andere Lichtstrahlen denselben Raum in anderen Richtungen durchlaufen und sich die Strahlen dabei gegenseitig vorübergehend überschneiden. Man bezeichnet diese Eigenschaft der elektromagnetischen Wechselwirkung als *Superpositionsprinzip*. Mathematisch drückt es sich darin aus, dass die Maxwell-Gleichungen *linear* sind.

Abb. 1.11 Das Superpositionsprinzip für elektrische Kräfte besagt: Die Gesamtkraft, die zwei Ladungen auf eine Probeladung ausüben, ist gleich der Summe der Kraftpfeile, die von den einzelnen Ladungen herrühren. Oder allgemeiner: Elektrische und magnetische Felder lassen sich jeweils aufsummieren, so wie man Pfeile aneinanderfügt.



Mit der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung haben wir nun bereits alle die Wechselwirkungen erfasst, die für uns Menschen unmittelbar erfahrbar sind. Erst bei der Ergründung der Struktur der Atomkerne und ihrer Zerfälle werden wir auf zwei weitere Wechselwirkungen stoßen, die sich aber erst mit den Mitteln der Quantenmechanik verstehen lassen. Dieser Quantenmechanik wollen wir uns daher im folgenden Kapitel zuwenden.