

2

Atome – von der unteilbaren Kugel zum quantenmechanischen System

*Denn wenn man nicht zunächst über
die Quantentheorie entsetzt ist, kann
man sie doch unmöglich verstanden
haben.*

Niels Bohr

Elektromagnetische Wellen breiten sich durch das gesamte Universum aus und sind die wichtigsten Informationsträger aus den Weiten des Kosmos.

Frei bewegliche Elektronen, die nicht an Atome gebunden sind, liefern den elektrischen Strom mit seinen unzähligen Erscheinungen, welche meist durch die Theorie der Elektrodynamik beschrieben werden.

Die im Atom gebundenen Elektronen enthüllen den quantenmechanischen Charakter der atomaren Struktur und der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Der Name Atom (*ἄτομος* = unteilbar), den Demokrit (ca. 460–370 v. Chr.) für die Beschreibung der grundlegendsten, unteilbaren Bausteine der Materie gewählt hatte, würde viel besser zu den heutigen unteilbaren Elementarteilchen namens Quarks passen. Zumindest hätte *Atom* mehr Bedeutung gehabt als *Quark*. Aber jener Name ist im 19. Jahrhundert für die damals noch hypothetischen, kleinsten mikroskopischen Objekte reserviert worden.

Es gab in dieser Zeit viele Hinweise darauf, dass sich die Formenvielfalt, in der die Materie erscheint, mit der Annahme erklären lässt, dass jede Substanz aus einer endlichen Zahl grundlegender Bausteine aufgebaut ist. Die Chemiker haben sich schon sehr früh mit den Atomen angefreundet. Sie konnten mit den Atomen, deren chemische Eigenschaften aus bekannten Verbindungen abgeleitet werden konnten, gezielt neue Verbindungen synthetisieren. Dazu kam, dass Dimitri Mendelejew (1834–1907) Ende des 19. Jahrhunderts ein überzeugendes Periodensystem der Elemente vorgestellt hat. Aus der Tatsache, dass sich die chemischen Eigenschaften der Elemente periodisch wiederholen, konnte man schließen, dass eine Systematik in ihrem Aufbau steckt und die Atome keineswegs unteilbar sind.

Die Atome, ob nun teilbar oder nicht, waren die ersten physikalischen Objekte, die man weder mit dem bloßen Auge noch mit einem Mikroskop sehen konnte. Darf man in der Physik von hypothetischen Atomen reden, wenn man gar nicht weiß, wie sie aussehen? Diese Frage war der Anlass zu einer Kontroverse zwischen Ernst Mach (1838–1916) und Ludwig Boltzmann (1844–1906).

Boltzmann gehörte zu den bedeutendsten Physikern des 19. Jahrhunderts. Als Professor für mathematische Phy-

sik in Graz und als Nachfolger Josef Stefans (1835–1893) für theoretische Physik in Wien, hatte er außerdem noch einen Lehrstuhl für Philosophie inne. Mithilfe seiner statistischen Mechanik konnte er makroskopische Eigenschaften der Materie als statistische Mittelwerte der molekularen Bewegungen deuten. Die weitere Würdigung von Boltzmanns Werk werden wir aber zunächst in das Kapitel zur Thermodynamik verschieben.

Wie Boltzmann war auch Mach ein bedeutender österreichischer Physiker, und auch er hatte, wie damals nicht unüblich, neben der Physik auch einen Lehrstuhl für Philosophie. Er vertrat aber eine zu Boltzmann konträre Ansicht. Die Boltzmann'sche Interpretation der Eigenschaften der Materie im Atombild hatte er durchaus als konsistent akzeptiert. Trotzdem war er der Ansicht, dass man besser die handfesten physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Zähigkeit, etc. als die Bewegung von fiktiven Atomen benutzen sollte. Mach hatte sich voll und ganz dem europäischen Positivismus und amerikanischen Pragmatismus verschrieben. In der Physik versteht man unter dem Positivismus, dass man in der Physik nur über experimentell nachweisbare Objekte und ihre Eigenschaften redet. Der amerikanische Pragmatismus geht noch weiter: Man solle nur die praktischen, für das Leben relevanten Eigenschaften der Natur untersuchen. Auch nachdem die Existenz der Atome bereits evident war, ließ er sich nicht von seiner Überzeugung abbringen.

Heutzutage binden wir uns in der Physik nicht mehr an philosophische Prinzipien. Die großen Entdeckungen in der Physik, wie auch in anderen Naturwissenschaften, wurden experimentell aus Neugier gemacht. Später, im Rahmen der

ersten Modelle, waren es die theoretischen Überlegungen, die zu verfeinerten Experimenten geführt haben. Es war immer klar, dass das Experiment über die Richtigkeit theoretischer Modelle entscheidet.

In diesem Kapitel werden wir auf eine ähnliche Kontroverse treffen, wenn es um die Interpretation der Quantenmechanik geht. In diesem Fall scheint sich aber der positivistische Standpunkt durchgesetzt zu haben. Nachdem die Existenz von Quarks als grundlegende Bausteine der Kernmaterie vorgeschlagen wurde, wusste man lange Zeit nicht, ob sie nun echte Teilchen, ein theoretisches Konstrukt oder nur ein Hilfsmittel sind, um die Buchhaltung der Vielzahl gefundener Teilchen zu vereinfachen. Der experimentelle Nachweis, dass die Quarks echte Teilchen sind, war eine wahre Bestleistung der Experimentalphysik.

Die Untersuchung der atomaren und subatomaren Systeme verlangt neue experimentelle Methoden, die das Sehen der makroskopischen Welt ersetzen. Sehen im makroskopischen Sinne bedeutet, dass wir die Objekte, die wir beobachten, beleuchten oder aufheizen, sodass sie Licht aussenden. Die Sonne und die Sterne sind beispielsweise von sich aus heiß genug, um selbst zu leuchten. Bei der Beobachtung mikroskopischer Objekte liegt der Unterschied tatsächlich nur in der Art der „Beleuchtung“ und der „Aufheizung“. Je kleiner das zu untersuchende Objekt ist, umso kleiner muss die Wellenlänge der Strahlung sein, um überhaupt das Objekt sehen zu können. Eine kleine Wellenlänge bedeutet eine hohe Frequenz, wobei die Energie der Strahlung zu der Frequenz proportional ist. Wenn wir unsere Umgebung mit sichtbarem Licht beleuchten, ändert sich an der

Umgebung nichts. Die Sachen, die wir mit unseren Augen sehen, sind so groß, dass sie das Licht, mit dem wir sehen, nicht beeinflusst. Wenn aber ein einzelnes Atom mit energetischen Strahlen beleuchtet wird, ändert sich sein Zustand sehr wohl. Auch die Aufheizung von Atomen und noch viel mehr von Kernen beruht auf der Energiezufuhr mithilfe von Beschleunigern, die sie zum Leuchten bringen.

Ein wichtiger Unterschied zwischen einer klassischen und einer quantenmechanischen Messung lautet also: Die klassische Messung lässt das beobachtete Objekt unbeeinflusst, während die quantenmechanische Messung mit einer Beeinflussung einhergeht.

2.1 Kathodenstrahlen – die Entdeckung der ersten Elementarteilchen

Julius Plücker (1801–1868) hat in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Gasentladung entdeckt. In einer meist als Kathodenstrahlröhre bezeichneten Röhre mit einem schlechten Vakuum und jeweils einer auf Hochspannung liegenden positiven und negativen Elektrode beobachtete er ein fluoreszierendes Gas. Wenn im dünnen Gas ein Atom ein [Elektron](#) abgegeben hat, wurde dieses im elektrischen Feld so weit beschleunigt, dass es weitere Atome ionisierte oder anregte. Das dünne Gas leuchtete dadurch in schönen Farben. Später, mit einem besseren Vakuum, bildete sich im Rohr von der negativen Kathode ausgehend ein Strom aus Elektronen (Abb. 2.1). Diese Röhren sind damit bereits klei-

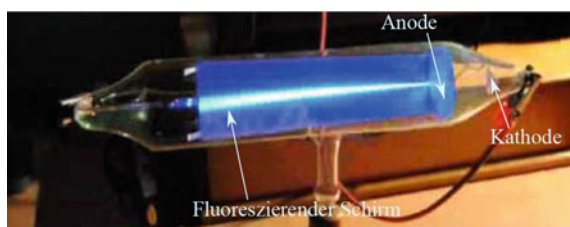


Abb. 2.1 In einer Kathodenstrahlröhre treten Elektronen aus der Kathode aus, werden zur Anode hin beschleunigt und treten dort durch ein Loch hindurch. Ein fluoreszierender Schirm macht hier den Elektronenstrahl sichtbar. Das bläuliche Leuchten kommt also nicht durch die Elektronen selbst, sondern entsteht erst durch Anregung des Materials

ne Elektronenbeschleuniger. Schon der erste Schritt in das Innere der Atome verlangte Elektronen mit Energien, die man durch Beschleunigung im elektrischen Feld gewonnen hat.

Die spektakulärste Entdeckung, die mithilfe der Kathodenstrahlröhre gelang, war die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Neben ihrer vielfältigen Anwendung in Medizin und Technik spielt die Röntgenstrahlung auch eine große Rolle bei der Erforschung der inneren Struktur von Festkörpern und Atomen.

Wilhelm Konrad Röntgen (1845–1923) hat 1895 unterschiedliche Kathodenstrahlröhren, die damals zur Verfügung standen, untersucht. Die Fluoreszenz in der Kathodenstrahlröhre war wohlbekannt. Mit dem Strom in der Röhre fluoreszierten das Gas und das Glas an der Stelle, wo es vom Elektronenstrahl getroffen wurde. Röntgen hatte die Röhre abgeschirmt, damit kein Fluoreszenzlicht aus

der Röhre kommen konnte. In der Nähe der Röhre stand zufällig ein Schirm aus fluoreszierendem Material. Bei eingeschalteter Spannung an den Elektroden floss nicht nur der Strom in der Röhre. Röntgen konnte trotz der vollständigen Abdeckung der Röhre eine leichte Fluoreszenz auf dem äußeren Schirm beobachten. Die Fluoreszenz war auch unter verschiedenen Abständen von der Röhre zu sehen. Mit gleichem Erfolg wiederholte er den Versuch mit unterschiedlichen Röhren und mit Unterstützung anderer Experimentalwissenschaftler wie William Crookes (1832–1919) in England oder Philipp Lenard (1862–1947) in Deutschland. Er beschloß also, dass er eine neue unsichtbare Strahlung entdeckt hatte, die er X-Strahlen nannte. Innerhalb weniger Tage hat er die wichtigsten Eigenschaften dieser neuen durchdringenden Strahlung bestimmt. Dabei entstand das berühmte Bild mit der Hand seiner Frau und ihrem Ehering, durchleuchtet von den Röntgenstrahlen. Schwere Elemente, wie Gold, absorbieren die Strahlung stark, mittelschwere Elemente, wie Kalzium, moderat. Das Gewebe ist für die Strahlung fast durchlässig. Die erste und auch heute noch wichtigste Anwendung der Röntgenstrahlung ist das gleichnamige medizinische Bildgebungsverfahren. Er selbst benutzte für die neue Strahlung immer nur den Namen X-Strahlen. Später wurde die Strahlung zu seinen Ehren als Röntgenstrahlung bezeichnet. Er wollte seine Entdeckung nicht patentieren lassen. Der erste Nobelpreis in Physik ging 1901 an Röntgen.

Einige Jahre nach der Entdeckung von Röntgen konnte Max von Laue zeigen, dass die Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind. An regelmäßigen Kristallen zeigen

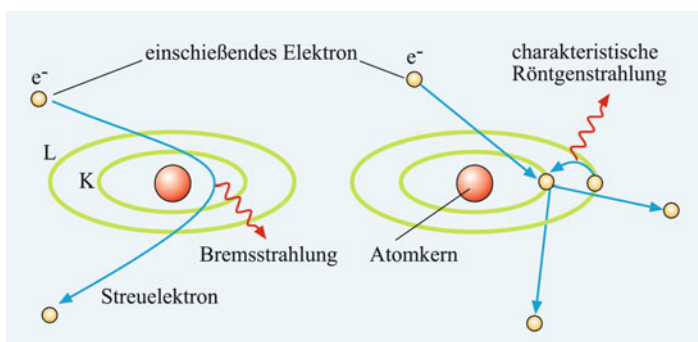


Abb. 2.2 Die Röntgenstrahlen entstehen beim Abbremsen der Elektronen im elektrischen Feld der Atomkerne (Bremsstrahlung). Die Elektronen ionisieren die Atome. Beim Auffüllen der freigewordenen Plätze durch äußere Elektronen entstehen die charakteristischen Strahlen, die von der Art der Atome abhängig sind

sie Interferenzen, ähnlich wie man es vom Licht kennt. Für diese Entdeckung bekam er den Nobelpreis im Jahre 1914.

Die physikalische Deutung der Röntgenstrahlung war damit klar (Abb. 2.2). Wenn eine elektrische Ladung beschleunigt oder abgebremst wird, emittiert sie elektromagnetische Wellen. Im Falle der Röntgenröhre werden die energiereichen Elektronen in der Anode durch die Kerne des Metalls abgelenkt, was physikalisch einer Beschleunigung entspricht. Dabei emittieren sie elektromagnetische Wellen und verlieren somit einen Teil ihrer kinetischen Energie. Diesen Anteil der Röntgenstrahlen nennt man Bremsstrahlung. Die Elektronen können aber auch Elektronen aus der Schale des Atoms ausschlagen. Der freigewordene Platz wird mit einem im Atom vorhandenen Elektron gefüllt. Dabei gibt das Elektron seine Energie durch die Strahlung

ab. Die ist für das Atom charakteristisch und wird daher *charakteristische Röntgenstrahlung* genannt.

Die Röntgenstrahlen wurden auch schon vor Röntgen beobachtet. Beispielsweise von William Crookes (1832–1919) an der von Johann Hittorf (1824–1914) und ihm entwickelten Kathodenstrahlenröhre oder von Philipp Lenard (1862–1947) an der von ihm entwickelten Röhre. Sie haben eine Schwärzung von fotografischen Platten beobachtet, aber keine wissenschaftlichen Folgerungen gezogen.

Lenard hat trotzdem den Einspruch erhoben, dass man ihm die Entdeckung der neuen Strahlen anerkennen sollte. Es gab aber nie einen Zweifel, dass die Entdeckung der neuen Strahlen allein Röntgen zuzuschreiben ist.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Anwendung der Kathodenstrahlröhre war die Identifizierung des Elektrons als Träger des Stroms in der Röhre von Joseph John Thomson im Jahre 1897. Eine Skizze der Apparatur ist in Abb. 2.3 zu sehen. Man schloss aus der Tatsache, dass das Elektron im elektrischen und magnetischen Feld abgelenkt werden konnte, darauf, dass es sich um ein Teilchen handeln muss. Die Wissenschaftler zogen damals daraus auch den Schluss, dass das Elektron keine elektromagnetische Welle wie beispielsweise das Licht ist. Thomson konnte mithilfe seiner Apparatur das Verhältnis zwischen Ladung und Masse des Elektrons bestimmen. Dieses war sehr groß, was bedeutet, dass das Elektron eine sehr kleine Masse, verglichen mit einem Wasserstoffatom, haben muss. Aufgrund dieser Erkenntnis hat Thomson 1904 das erste Modell des Atoms vorgeschlagen. Das Atom besteht aus einer positiv geladenen Masse, in der die negativ geladenen Elektronen eingebettet sind. In seiner Vorstellung verglich Thomson es mit

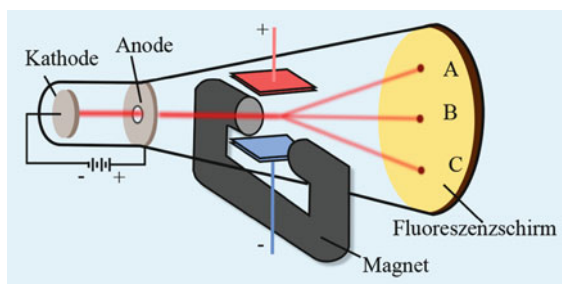


Abb. 2.3 Thomson hat eine Kathodenstrahlröhre mit einer elektrischen und magnetischen Ablenkung ausgerüstet. Dadurch konnte er das Verhältnis zwischen der Elektronenladung und der Elektronenmasse bestimmen. Aufgrund der kleinen Masse der Elektronen ist dieses Verhältnis viel größer als beispielsweise für die sehr viel schwereren Protonen

einem positiv geladenen Teig, in dem die negativ geladenen Elektronen wie Rosinen verteilt sind. Deshalb erscheinen die Atome in der Summe nach außen hin elektrisch neutral. Das Modell bekam den anschaulichen Namen *Rosinenkuchenmodell*.

Thomson bekam 1884 die angesehene Stelle der *Cavendish Professorship of Experimental Physics* in Cambridge. 1906 erhielt er den Nobelpreis in Physik für den experimentellen Nachweis, dass das Elektron ein Teilchen ist. Mit dem Elektron ist das erste richtige Elementarteilchen entdeckt worden. Zumindest gibt es bis heute keine Anzeichen dafür, dass das Elektron aus noch kleineren Bausteinen besteht. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass seinem Sohn, George Paget Thomson, dreißig Jahre später der Nobelpreis für die Entdeckung, dass das Elektron auch eine Welle ist, zuerkannt wurde.

Von den Tiefen des Alls in den Mikrokosmos

Ein Streifzug durch die moderne Physik

Povh, B.

2017, XII, 261 S. 81 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-50266-2