

# 1 Das Geheimnis der Atome lüftet sich

Nur wenige Leute können sich glücklicher gefühlt haben als die Wissenschaftler, die in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts die Geheimnisse des Atoms und seines Kerns entdeckten. Ihre Arbeit war fesselnd, aufregend und für sie zweifellos auch wichtig. Sie waren ihr verfallen; sie erwarteten weniger öffentlichen Ruhm und Anerkennung, als vielmehr mit Spannung die nächsten Erfolge sowie die Zustimmung und den Beifall ihrer Kollegen.

Was sie zustande brachten war eine revolutionäre Änderung in unseren Vorstellungen über die Natur der Materie. Abstrakte Gelehrtheit? Ja. Aber es führte zur Atombombe und zur Kernenergie.

Das 19. Jahrhundert erlebte den Aufbau eines prächtigen theoretischen Gebäudes für die Darstellung des Weltalls, – so prachtvoll und harmonisch, daß wir es die *klassische Physik* nennen. Sie erreichte so triumphale Erfolge wie die Vorhersagen von der Existenz des Planeten Neptun und der Radiowellen, die in jedem Falle von direkten Beobachtungen bestätigt wurden. Einige Wissenschaftler jener Zeit waren der Meinung, daß alles Wichtige entdeckt worden sei. Aber die folgenden Dekaden brachten eine Lawine neuer Erkenntnisse, die mit den existierenden Theorien meist gar nicht erklärt werden konnten.

Wenn wir heute zurückblicken, so muß es uns überraschen, daß die Grenzen der klassischen Physik damals nicht besser erkannt wurden. Das meiste aus der Chemie lag beispielsweise außerhalb der Betrachtungen. Die Chemiker des vorigen Jahrhunderts kannten ca. achtzig verschiedene Atomarten, sie hatten viele Regeln über ihre unterschiedlichen Verhaltensweisen abgeleitet, etwa die Gesetze der Bildung von Molekülen. Die bekannten physikalischen Gesetze waren nicht nur unfähig, dies alles zu erklären, sondern sie waren überhaupt nicht anwendbar.

In den späten neunziger Jahren kamen ganze Gebiete von bis dahin unerwarteten Vorgängen ans Tageslicht. Zwei Entdeckungen waren das Ergebnis glücklicher Zufälle, nämlich die der Röntgen-Strahlen durch Wilhelm Röntgen in Würzburg 1895 und die einer ungewöhnlichen Strahlung des Urans, die eine photographische Platte schwärzt, durch Henri Becquerel in Paris 1896. Andererseits war die Erkennung der Natur des Elektrons durch Joseph John Thomson im *Cavendish Laboratorium* in Cambridge 1897 das Ergebnis wohlüberlegter Gasentladungsuntersuchungen. Damit vergleichbar ist die

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

Entdeckung der Elemente Polonium und Radium an ihrer Strahlung, die der des Urans ähnlich aber intensiver ist, durch Pierre und Marie Curie 1898, eine Frucht der weiteren systematischen Verfolgung von Becquerels Beobachtungen. Sie nannten diese ganze Erscheinung *Radioaktivität*.

Das langwierige Ringen der Curies ist eine der heroischen Taten aus den Naturwissenschaften. In einem kalten und schlecht ausgerüsteten Verschlag der *Schule für Physik* in Paris bewiesen sie das Vorkommen von Radium durch seine Abtrennung aus einer ganzen Tonne von Rückständen aus den Uranminen von Joachimstal und machten es sichtbar und meßbar (Tafel 1). Voller Eifer plagten sie sich 45 Monate lang mit ihrer Aufgabe, lebten fast in Armut und ohne sich richtig zu ernähren. Ihr Ziel war wissenschaftliche Erkenntnis; noch ahnte niemand, wozu Radium verwendet werden könnte. Am Ende hatten sie  $\frac{1}{10}$  g der hart erarbeiteten Substanz, eine Reihe von Forschungspublikationen mit ihrem Namen und eine wachsende Korrespondenz mit führenden europäischen Wissenschaftlern. Ein Jahr später konnten sie ihre Berühmtheit feststellen, mit dem Nobelpreis als höchster Auszeichnung sowie anderen hohen Ehrungen. Der Ruhm brachte ihnen Geld und hohe Lebensqualitäten, aber gelegentlich empfanden sie es als lästig, daß sie durch die damit verbundenen Verpflichtungen von ihrer Arbeit abgehalten wurden.

Pierre Curie war der absolut zerstreute Professor. So gibt es die Anekdote, daß die Köchin der Curies, um gelobt zu werden, sich erkundigte, ob ihm das Steak, das er gerade mit großem Appetit verspeist hatte, geschmeckt habe. „Habe ich ein Steak gegessen?“ erkundigte er sich unsicher, ergänzte dann aber in der Vermutung, etwas Unrechtes gesagt zu haben, „das ist durchaus möglich“. Er war völlig seiner Arbeit hingegeben und ging davon aus, daß sich auch Marie der *Herrschaft* ihrer Ideen aufopferte. Marie hatte jedoch manchmal ein Verlangen nach einem normaleren Leben und deshalb tadelte sie sich wegen ihrer Schwäche.

Das *Institut de Radium*, das einige Jahre nach Pierres tragischem Tod bei einem Verkehrsunfall im Jahr 1906 gegründet wurde, war einer ihrer Träume. Nach dem ersten Weltkrieg verbrachte Marie dort ihre meiste Zeit und arbeitete an ihrem Lieblingsthema Radioaktivität.

Die Geschichte der Curies wurde Teil der volkstümlichen Vorstellungen von Naturwissenschaftlern, die ein romantisches aber untypisches Bild von ihnen vermitteln.

Das Leben und die Persönlichkeit von Ernest Rutherford liefern dafür einen Kontrast, wie er besser nicht dargestellt werden kann. Nahezu das Einzige, was er mit den Curies gemein hatte, war die Leidenschaft für die Radioaktivitätsforschung. Er kam 1895 von Neuseeland nach Cambridge, um bei J.J. Thomson zu arbeiten, und erfuhr dort von den Entdeckungen Becquerels und der Curies. Dies verleitete ihn dazu, sich sein ganzes Leben dem Studium der Radioaktivität hinzugeben. Von Cambridge aus folgte er Rufen

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

nach Montréal (im Alter von 28) und Manchester, um schließlich 1919 als Cavendish-Professor und Nachfolger von J.J. Thomson nach Cambridge zurückzukehren. Er wurde 1914 zum Sir Ernest Rutherford, obwohl seine kleine Tochter Zweifel hatte, ob er würdevoll genug sei, und 1931 zum Lord Rutherford of Nelson geadelt. Eine großartige Karriere!

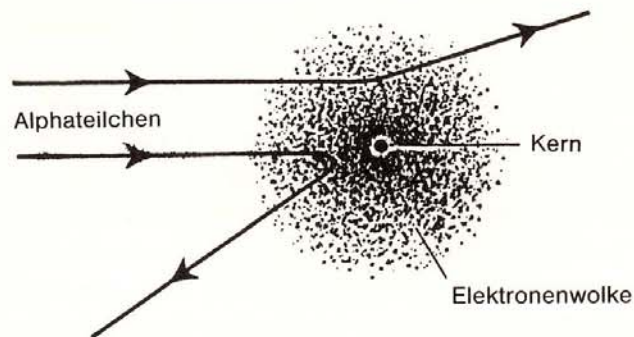
An der McGill-Universität in Montréal arbeitete er mit einem hervorragenden jungen Chemiker, Frederick Soddy, aus Oxford zusammen, dessen Geschicklichkeit gerade die richtige Ergänzung für seine eigenen Erfahrungen abgab. Im Verlauf von nur zwei Jahren bewiesen die beiden mit ihren Experimenten, daß das Wesentliche an der Radioaktivität der spontane Wechsel von einer Atomart in eine andere ist.

Dazu mußte die hergebrachte Vorstellung aufgegeben werden, daß Atome kleine unteilbare Kugeln seien, die ihre eigene Natur niemals verändern. Im Gegensatz zu diesem Modell beobachten wir in der Radioaktivität die Umwandlung eines chemischen Elements in ein anderes – nicht von Blei in Gold wie die Alchemisten hofften, aber zum Beispiel von Radium in ein Edelgas, das Radon. Man sagt, das Radium, das dabei langsam verschwindet, zerfällt radioaktiv.

Von da ab lag Rutherford mit an der vordersten Front einer Flutwelle von Entdeckungen. Er wurde zur legendären Gestalt, und es gab viele Anekdoten über ihn, beispielsweise soll er die Melodie „Vorwärts, Ihr Soldaten Christi!“ gepfiffen haben, wenn die Arbeit mühelos vorankam, oder die Melodie „Kämpft den Kampf der Gerechten!“ inmitten von Schwierigkeiten. Er war robust, direkt und rauh, aber herzlich, und gab den Typ eines Gutsbesitzers ab, der sein Leben mit Freude lebte. „Ein prächtiger Mann, der einen anspricht“, meinte Otto Hahn, der mit Rutherford in der ersten Zeit in Montréal arbeitete und der dann einige Jahre später an der Entdeckung der Kernspaltung teilhatte.

Rutherford hatte eine feine Nase für die Planung des richtigen Experiments unter den begrenzten Möglichkeiten der damaligen Zeit, und sein Verstand erkannte direkt und ohne Umschweife den zentralen Punkt eines Problems. Da gab es den berühmten Augenblick, als einer seiner Kollegen ihm die Ergebnisse von Atomstrukturuntersuchungen mit Hilfe der Bestrahlung durch kleine, elektrisch geladene Teilchen (Alphateilchen) vorlegte. Sehr selten erhielten manche Teilchen starke Richtungsänderungen, einige wurden sogar fast dahin zurückgestoßen, woher sie kamen. Rutherford verglich dies mit einer großkalibrigen Granate, die auf ein Stückchen Papiertaschentuch geschossen wird, trifft und auf den Schützen zurückprallt. Einige der Alphateilchen, meinte er, müßten auf immens starke Kräfte innerhalb des Atoms getroffen sein, was dadurch möglich wäre, wenn das Atom einen kleinen, elektrisch geladenen Kern besäße: Die meisten Alphateilchen würden dann mehr oder weniger geradeaus durch den freien Raum des Atoms fliegen, aber

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich



**Abb. 1.** Streuung von Alphateilchen an Atomen. Ein Alphateilchen, das den Kern beinahe trifft, wird stark abgelenkt, während andere nur eine geringe Ablenkung erfahren<sup>1</sup>

eins das durch Zufall den Kern streift, wird kräftig abgelenkt (Abb. 1). Die Idee des Atomkerns war geboren.

Viele Männer, die später berühmt werden sollten, kamen zu Rutherford, um bei ihm zu arbeiten. Um nur einige vom europäischen Kontinent zu nennen: Otto Hahn, der schon erwähnt wurde, Hans Geiger, ein anderer Deutscher und Miterfinder des Geiger-Zählers, Georg von Hevesy, ein Ungar, der viele radiochemische Methoden für die Untersuchung chemischer Probleme entwickelte, und vor allem der Däne Niels Bohr, der eine ähnlich bedeutende Persönlichkeit wie Rutherford selbst wurde. So wie diese Männer Rutherfords Labor nach einiger Zeit wieder verließen, errichteten sie neue Zentren für Radioaktivitäts- und Kernforschung. Fast jeder auf diesem Gebiet Tätige konnte den Ursprung seiner Laufbahn auf Rutherford zurückführen.

In dieser Periode gab es zwei andere Entwicklungen in der Physik, die sich von großer Bedeutung für die Atomwissenschaften erwiesen. Die erste war Albert Einsteins Relativitätstheorie. Zu deren Aussagen gehört die berühmte Beziehung zwischen Masse und Energie (normalerweise als  $E = mc^2$  geschrieben). Entsprechend dieser Gleichung können Masse und Energie als zwei Arten der gleichen Sache betrachtet werden - zu jener Zeit eine neuartige Vorstellung - und wenn wir ein Gramm der Materie in Energie umwandeln, erhalten wir daraus soviel wie aus einer Atombombe. Nur ein sehr kleiner Teil dieser Energie wird frei, wenn sich eine Atomart in eine andere umwandelt als Folge von radioaktivem Zerfall. Ein sehr viel größerer Teil wird in Kernreaktoren und Atombomben freigesetzt.

<sup>1</sup> Es war der junge Experimentalphysiker Hans Geiger, der ab 1909 als Postdoctoral Fellow bei Rutherford arbeitete und von ihm die Aufgabe erhielt, die von ihm nach seiner Vorstellung von der Existenz eines Atomkerns berechnete Streuformel für Alphateilchen experimentell zu verifizieren, was ihm innerhalb von nur wenigen Monaten auch tatsächlich gelang (d. Übers.).

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

Die zweite von jenen beiden Entwicklungen beinhaltet gleichfalls eine neue Vorstellung. Die Physiker des neunzehnten Jahrhunderts hatten Schwierigkeiten mit verschiedenen Anomalien bezüglich Wärme und Licht, bei denen die klassischen Gesetze absolut falsche Resultate ergaben. Sie machten z.B. die Vorhersage, daß ein heißes Stück Eisen im wesentlichen violettes und ultraviolettes Licht ausstrahlt, und daß sich seine Farbe nicht ändert, wenn die Temperatur erhöht wird. Aber jedermann weiß, daß Eisen mit zunehmender Erwärmung erst rot, dann orange, weiß und blau wird.

Max Planck erklärte 1900 dieses Verhalten mit der Vorstellung, daß Atome Energie ähnlich abgeben wie Supermärkte Butter. Anstatt die Butter für Kunden auszuwiegen, verkauft der Supermarkt nur 250 g-Packungen. Planck postulierte, daß Atome Energie auch nur in festen Beträgen aufnehmen und abgeben, die er *Quanten* nannte. Dieses einfache Konzept erklärt wenigstens einige Anomalien und ergab theoretische Gesetze, die die experimentellen Ergebnisse recht genau wiedergeben.

Diese Vorstellung von der Quantisierung der Energie erscheint uns eigentlich als harmlos, wenn auch ein bißchen ungewöhnlich. Sir James Jeans, der Astrophysiker aus Cambridge, bemerkte aber, daß zu jener Zeit viele dies für sensationell, revolutionär, ja lächerlich hielten. Und in der Tat kennzeichnet die Quantentheorie, wie sie genannt wurde, den Wendepunkt von der klassischen zur modernen Physik.

Es war vor allem Niels Bohr, dem wir die Überarbeitung der Physik im Lichte dieser neuen Theorie verdanken. Das war sein Lebenswerk. In Cambridge kam er zu Beginn des Herbst-Trimesters 1911 von Kopenhagen aus an, kurz vor seinem sechsundzwanzigsten Geburtstag, voller jugendlicher Begeisterung und übergücklich in der Erwartung enger Kontakte mit J.J.Thomson und anderen berühmten Naturwissenschaftlern. Später verbrachte er vier Monate in Manchester bei Rutherford, wo er erkannte, daß die klassische Physik im Bereich des Atoms total zusammenbricht. Er beharrte vor allem darauf, daß Rutherfords Atom mit seinem Kern nicht existieren könnte, wenn es den Gesetzen unterworfen wäre, die sich so gut auf elektrische Maschinen anwenden lassen.

In Rutherfords Modell kreisen die Elektronen um den Kern wie die Planeten um die Sonne, aber mit dem einen Unterschied: Im Gegensatz zu den Planeten sind die Elektronen elektrisch geladen. Nach den Gesetzen der Elektrodynamik, einem Zweig der klassischen Physik, müßten die Elektronen ständig Energie abstrahlen und durch diesen Energieverlust rasch auf den Kern fallen. Was offensichtlich nicht passiert.

Bohr wagte deshalb die Behauptung, daß die klassische Elektrodynamik für das Elektron im Atom nicht gültig ist. Er postulierte, daß sich das Atom in einem *stationären Zustand* befindet, in dem sich das Elektron auf einer Umlaufbahn um den Kern befindet, ohne dabei Energie abzugeben.

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

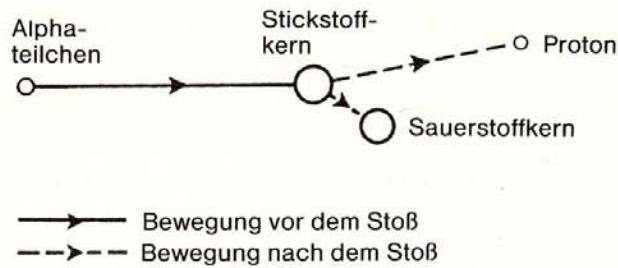
Über diese Vorstellung sann er mehrere Monate lang nach. Im Februar 1913 lenkte dann ein Kopenhagener Student seine Aufmerksamkeit auf bestimmte Gesetzmäßigkeiten, die etwa 30 Jahre zuvor im Wasserstoffspektrum entdeckt worden waren, nämlich in den Farben des Lichtes, das von heißem Wasserstoff emittiert wird. Das war der Schlußstein für das Puzzle! Bohr nahm nun an, daß ein Atom nicht nur in einem, sondern in einer Anzahl von stationären Zuständen unterschiedlicher Energie existieren kann, und daß es mithilfe von Absorption oder Emission genau eines Energiequants von einem Zustand in einen anderen *springen* kann. Auf dieser Basis konnte er eine mathematische Formel herleiten, die bestimmte Linien des Wasserstoffspektrums genau vorhersagt.

Bohrs Theorie verstößt gegen die alte Regel der klassischen Physik, daß die Natur keine Sprünge macht. Dies war mehr als mancher Naturwissenschaftler verdauen konnte. Jeans stellte jedoch fest, das Argument für Bohrs Annahmen sei das „gewichtige des Erfolgs“. Rutherford hatte erheblichen Ärger mit seiner Unterstützung für die Publikation der Bohr'schen Ideen, und das bei seinem grundsätzlichen Mißtrauen gegenüber den Theoretikern. Bei einer späteren Gelegenheit meinte er über sie, und dies nur halb im Scherz, „sie machen mit ihren Symbolen Spielereien, während wir im *Cavendish* die tatsächlichen Fakten der Natur ans Tageslicht bringen“. Aber Bohr, meinte er, sei anders.

Unter den neuen Tatsachen war 1919 Rutherfords Demonstration der ersten künstlichen Umwandlung von einem Element in ein anderes, zum Unterschied von der natürlichen, radioaktiven Umwandlung. Die Radioaktivität geht die ihr eigentümlichen Wege weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen, während diese neue Entdeckung es prinzipiell ermöglicht, ein Atom in ein anderes auf einem vorprogrammierten Weg umzuwandeln.

In einigen seiner frühen Experimente bombardierte Rutherford Atomkerne mit Alphateilchen aus einem radioaktiven Präparat. Die von ihm benutzte bemerkenswert einfache und kleine Apparatur zeigt Tafel 4. Galt vorher das Interesse der Ablenkung der Alphateilchen beim Vorbeiflug an Kernen, so war jetzt die Frage, was passiert beim direkten Aufprall. Wenn Stickstoffkerne beschossen wurden, beobachtete Rutherford die Erzeugung von Teilchen eines neuen Typs, die er als die Kerne des Wasserstoffatoms identifizieren konnte und die als *Protonen* bekannt sind. Also: Ein  $\alpha$ -Teilchen dringt in einen Stickstoffkern ein und ein Proton kommt heraus. Dies beinhaltet die weitere höchst wichtige Folgerung, daß der Stickstoffkern in etwas anderes umgewandelt wurde, nämlich in einen Sauerstoffkern, wie die Physiker aus einer Bilanz der am Prozeß beteiligten elektrischen Ladungen schließen konnten. Stickstoff war also in Sauerstoff umgewandelt worden, wenn auch in außerordentlich kleinem Maße (Abb. 2).

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich



**Abb. 2.** Die erste künstliche Kernumwandlung. Ein Alphateilchen trifft auf einen Stickstoffkern und wandelt ihn in Sauerstoff um

Diese Entdeckung war der Höhepunkt von Rutherfords Zeit in Manchester. Gleich darauf nahm er den Ruf an das Cavendish-Laboratorium in Cambridge an. Hier sammelte er eine vorzügliche Gruppe um sich, schließlich mehr als sechzig Wissenschaftler an der Zahl – in jenen Tagen war das wirklich eine große Anzahl – und das *Cavendish* wurde zum Mekka der Kernphysiker.

Die ersten Jahre unter Rutherfords Leitung verliefen vergleichsweise ruhig, wenngleich in den erschlossenen Gebieten beständig Fortschritte erzielt wurden. Weitere Beispiele künstlicher Umwandlungen ähnlich der des Stickstoffs wurden beobachtet. Eine andere Zielrichtung war die Untersuchung von Atomen, die sich nur in ihren Kernen unterscheiden, nicht aber in ihrer äußeren Hülle, also die Isotopenforschung. Isotope waren schon von den

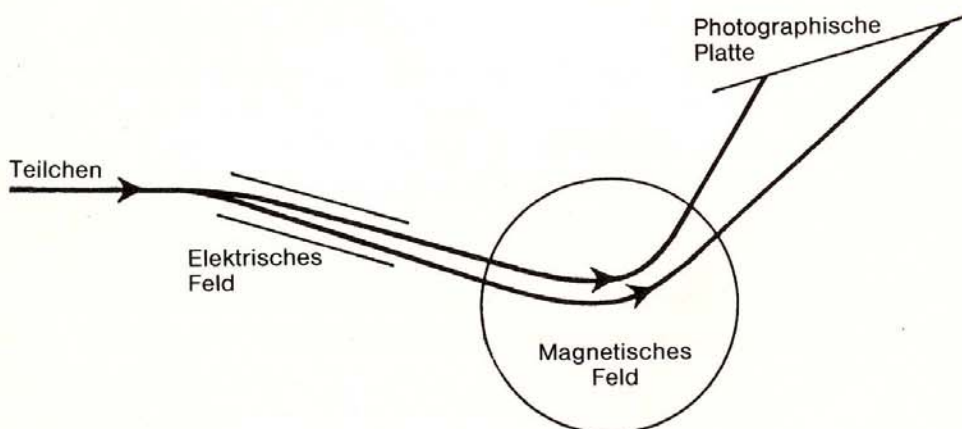
**Tabelle 1.** Wichtige Daten aus den Anfängen der Kernphysik

|      |  |
|------|--|
| 1896 | Becquerel beobachtet eine Strahlung aus Uran, die eine photographische Platte schwärzt.  |
| 1897 | Thomson entdeckt das Elektron.   |
| 1898 | Die Curies entdecken die radioaktiven Elemente Polonium und Radium.  |
| 1902 | Rutherford und Soddy weisen nach, daß die spontane Umwandlung von einem chemischen Element in ein anderes ein wesentliches Kennzeichen für die Radioaktivität darstellt. |
| 1910 | Die Vorstellung von Isotopen werden formuliert, besonders von Soddy.   |
| 1913 | Rutherford begründet die Vorstellung, daß das Atom einen kleinen, positiv geladenen Kern besitzt.  |
| 1913 | Bohr stellt sein Atommodell vor.   |
| 1919 | Rutherford beobachtet die erste künstliche Kernumwandlung.<br>Aston erfindet den Massenspektrographen für die Isotopenuntersuchung.                                      |

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

radioaktiven Elementen bekannt und in ein oder zwei anderen Fällen. Jetzt aber, mit einer von ihm dafür ausgedachten Apparatur, dem Massenspektrographen, zeigte Francis Aston, daß fast alle Elemente eine Mischung aus Isotopen sind: Sauerstoff hat drei, Chlor zwei, usw. Der Grund dafür, daß die Isotope so lange unentdeckt geblieben waren liegt darin, daß die äußeren Bereiche beinahe identisch sind, auch ihr Verhalten ist unter fast allen Gesichtspunkten identisch, oder jedenfalls sehr ähnlich, so daß es schwer ist, sie zu trennen, oder sie wenigstens zu unterscheiden. Auch in der Natur trennen sie sich nicht, und als Folge davon existiert jedes Element normalerweise aus einer Mischung von Isotopen mit konstanten, unveränderlichen Anteilen.

Um zwischen den Isotopen zu unterscheiden oder sie gar zu separieren, machen wir von den Eigenschaften der Kerne Gebrauch, denn diese sind verschieden. Die Existenz von Isotopen war tatsächlich erstmals vermutet worden, als man entdeckte, daß es Sorten von Atomen gibt, die sich chemisch gleich, aber radioaktiv verschieden verhalten. Dies wurde damit erklärt, daß Radioaktivität etwas ist, was dem Kern passiert, während die Chemie fast ausschließlich nur die äußeren Bereiche des Atoms betrifft. Logischerweise gibt es deshalb Atome, deren Kerne verschiedenartig sind, deren äußere Bereiche (von minimalen Abweichungen abgesehen) aber nicht. In den Fällen, in denen keine Radioaktivität auftritt, die die Unterschiede erkennen läßt, bleibt der Unterschied in der Masse: Bei einem Paar isotoper Atome ist das eine schwerer als das andere. Diesen Umstand macht sich Astons Massenspektrograph zunutze, der schwerere Atome von leichteren aussortiert und der eine Isotopentrennung in kleinem Maße erlaubt (Abb. 3).



**Abb. 3.** Der Aufbau eines Massenspektrographen. Die Zeichnung zeigt die Wege zweier Teilchen unterschiedlicher Masse durch den Massenspektrographen. Schwerere Teilchen werden durch einen kleineren Ablenkungswinkel von den leichteren getrennt, sie erreichen die Fotoplatte später



## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

Während das *Cavendish* eingehend Atomkerne untersuchte, fanden Physiker woanders, vor allem in Deutschland, ihr Glück in einem anderen Jagdrevier, nämlich in der Untersuchung der äußeren Bereiche. Hier gab es Betätigungsfelder für eine starke, mathematische Intelligenz in der Ausarbeitung des Bohr'schen Atommodells, und innerhalb von ungewöhnlich wenigen Jahren waren die vielfältigen Geheimnisse der *Elektronenwolke* um den Kern enthüllt. Der Kern schien ein theoretisch weniger leicht zu bearbeitendes Problem zu sein und wurde als Puzzlespiel für spätere Zeiten liegengelassen.

Es war aber keineswegs so, daß bei der Entwicklung vom Bohr'schen Atom alles reibungslos lief. Anfang der 20er Jahre hatte die ursprüngliche Quantentheorie, die auf der Bohrschen Idee von den gequantelten Sprüngen basierte, zwei verschiedene Arten Probleme. Einerseits gab sie manchmal falsche Antworten (oft aber verführerisch nahe an der Wahrheit), andererseits hatte sie philosophische Mängel, auf die Bohr wiederholt selbst hingewiesen hatte. Beispielsweise hatte er in seinem ursprünglichen Atommodell die klassische Elektrodynamik hinausgeworfen, aber er verwendete die klassische Mechanik zur Berechnung der Energie des Elektrons auf seiner Bahn: Warum sollten klassische Konzepte in einem Fall gelten, im anderen aber nicht? Werner Heisenberg, der 1924 aus Deutschland kam, um bei Bohr zu arbeiten, schrieb, „die Schwierigkeiten . . . werden immer lästiger, die inneren Widersprüche immer schlimmer, was uns in eine Krise bringt . . .“.

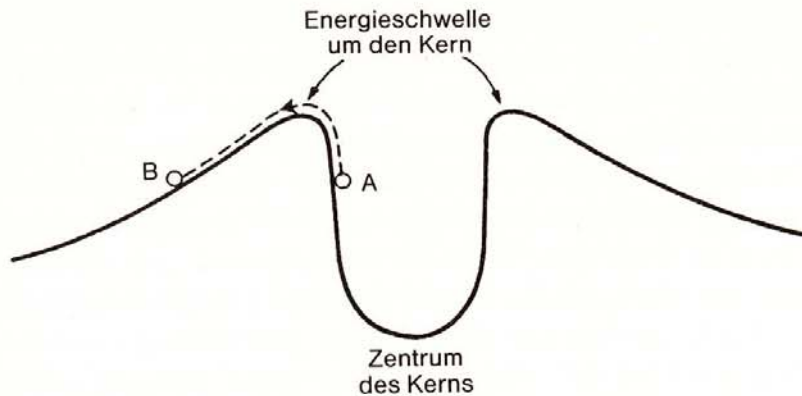
Heisenberg selbst war der erste, der einen Weg aus dem Dilemma fand. Im Urlaub auf Helgoland hatte er 1925 eine Idee, die rasch in eine grundsätzlich neue Theorie weiterentwickelt wurde, nämlich die Quantenmechanik. Mit einem Streich beseitigte sie die falschen Antworten und die philosophischen Schwierigkeiten. Sie gab den Physikern ein verlässliches mathematisches Handwerkszeug, das sie für die Berechnung atomistischer Vorgänge verwenden konnten.

Die Quantenmechanik liegt allen in diesem Buch beschriebenen Arbeiten zugrunde, und ein kurzer Abriß ihrer Grundzüge ist diesem Kapitel in einem Anhang beigelegt, der aber zum Verständnis für den Rest des Buches nicht unentbehrlich ist. Eigenartigerweise kann das meiste über die Geschichte der Kernwaffen und Kernkraft erzählt werden, ohne die Quantenmechanik zu erwähnen. Fast alle wichtigeren Entdeckungen wurden ohne sie gemacht.

Aber eine wichtige Ausnahme gab es in den Anfängen der Quantenmechanik. Das Modell der Radioaktivität, z. B. von Radium, wo der Atomkern ein Alphateilchen abstößt, gibt ein Rätsel auf. Das Alphateilchen ist im Kern wie durch eine hohe Mauer eingesperrt, und es besitzt offenbar nur etwa 20% der für die Überquerung der Mauer erforderlichen Energie. Wie kann es also jemals herauskommen?

Nach der klassischen Physik ist ein Entkommen nicht möglich. Ähnlich einem Wagen auf einem Verschiebebahnhof kommt das Alphateilchen nicht

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich



**Abb. 4.** Austritt eines Alphateilchens aus dem Kern. Nach klassischen Vorstellungen muß das Alphateilchen über die Energieschwelle gelangen, um von *A* nach *B* zu kommen (*gestrichelte Linie*). Nach der Quantenmechanik ist es unerheblich, wie es von *A* nach *B* kommt; denn mit einer vorausberechenbaren Wahrscheinlichkeit wird es in *B* zu finden sein, und zwar auch dann, wenn seine Energie zum Überschreiten der Schwelle nicht ausreicht

auf die andere Seite, wenn es nicht genug Energie besitzt, um über die Schwellenhöhe zu kommen. Aber die Quantenmechanik kann da eine andere Antwort geben, worauf George Gamow, ein russischer Emigrant und Mitarbeiter von Bohr in Kopenhagen 1928 hingewiesen hat. Die Quantenmechanik beschäftigt sich ausschließlich mit dem, was tatsächlich beobachtet wird, und betrachtet es als sinnlos, nach dem zu fragen, was zwischen den Beobachtungen passiert. So gesehen, springt sie also von einer Beobachtung zur nächsten, während man in der klassischen Physik von kontinuierlich glatten Verläufen ausgeht. So sieht die Quantenmechanik das Alphateilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Inneren des Kerns, zu einem späteren Zeitpunkt außerhalb des Kerns, betrachtet aber nicht das Durchlaufen von Zwischenpositionen (Abb. 4).

Diese auf den ersten Blick eigenartige Vorstellung wird auch *Tunneleffekt* genannt, um deutlich zu machen, daß das klassische Bild vom Überklettern einer Trennwand unbeobachtet bleibt, obwohl die Vorstellung, daß es wirklich einen Tunnel passiert, ebenso falsch wäre.

Von Bohr dazu ermutigt, besuchte Gamow 1929 das *Cavendish*. Hier wurden zwei junge Praktiker durch sein Konzept angeregt, John Cockcroft, der später einer der Führer von Britanniens Kernprogramm werden sollte, und Ernest Walton. Cockcroft war einige Jahr zuvor mit einem Empfehlungsschreiben an Rutherford ans *Cavendish* gekommen. Schon in der Schule war er von Radioaktivitätsentdeckungen fasziniert und besuchte vor dem Ersten Weltkrieg zur *geistigen Ablenkung* von seinen Mathematikstudien Rutherfords Vorlesungen in Manchester. In der Absicht, einen Beruf zu erlernen,

## Das Geheimnis der Atome lüftet sich

besuchte er nach dem Krieg einen Lehrgang für Elektroingenieure und arbeitete als Gehilfe bei Metropolitan-Vickers. Er blieb aber an der Kernphysik interessiert und fuhr schließlich nach Cambridge.

Als er und Walton dort 1929 Gamow trafen, kannten sie die Methode, Atomkerne durch Beschuß mit schnellen Geschossen zu untersuchen, aber bis dahin waren die einzigen bekannten Geschosse hinreichender Energie Alphateilchen von radioaktiven Substanzen, wie sie Rutherford verwendet hatte. Könnten solche Geschosse auch künstlich hergestellt werden durch die Beschleunigung von atomaren Teilchen auf hohe Energie mithilfe elektrischer Spannungen? Vielleicht, aber um solche Energien von Alphateilchen zu erzielen, wären einige Millionen Volt erforderlich, und dies schien in jener Zeit außerhalb der technischen Möglichkeiten zu liegen. Gamow wies jedoch in einem Vermerk an Rutherford darauf hin, daß der Tunneleffekt eine viel aussichtsreichere Möglichkeit eröffnet; da atomare Teilchen ja ohne Überquerung der Energiebarriere in den Kern hineingelangen können, ist dazu auch viel weniger Energie erforderlich, und ein Potential von einigen hunderttausend Volt könnte ausreichen.

Rutherford ermächtigte also Cockcroft und Walton, die bis dahin teuerste Ausrüstung des *Cavendish* zu bauen – Gesamtkosten von £ 500 für die Beschleunigung von Protonen. Cockcrofts elektrotechnische Erfahrung war ihm dabei von Nutzen, und Potentiale bis zu siebenhunderttausend Volt wurden erzielt – für damals sehr viel. Die Tafel 6 zeigt die Apparatur, wie sie von Walton bedient wurde, und zwar aus einer aus Strahlenschutzgründen mit Blei überzogene Teekiste heraus. Endlich, im April 1932 trug die Arbeit ihre Früchte, als die beiden Experimentatoren Hochgeschwindigkeitsprotonen auf eine Lithiumscheibe schossen, die deshalb gewählt wurde, weil ihre Kerne eine besonders kleine Energieschwelle besitzen. Erfolg! Der Austritt von Alphateilchen wurde beobachtet und damit bewiesen, daß die Protonen wirklich in die Lithium-Kerne eingedrungen waren und sie aufgebrochen hatten. Eine Kernreaktion, eine Umwandlung war mit rein künstlichen Mitteln erzielt worden. Darüberhinaus waren die damit beobachteten Effekte millionenfach intensiver als die mit Alphateilchen erhaltenen.

Dies war ein doppelter Erfolg, – für die Quantentheorie, die den Weg gewiesen hatte, und für die Experimentatoren, die ein neues und leistungsfähiges Hilfsmittel geschaffen hatten, den Teilchenbeschleuniger oder *Atomzertrümmerer*, wie ihn die Presse gerne nannte. Zu Recht berichtete die Presse über Cockcroft und Waltons *Spaltung des Atoms* als einem großen Durchbruch. Die Kernwissenschaften waren für einen raschen Fortschritt gerüstet.