

Das Geheimnis des Mikrokosmos

Schon von altersher war der Mensch bestrebt, in die Geheimnisse der Natur einzudringen und den Schleier zu lüften, der uns das Wesen der Materie verbirgt. Das Streben ging dahin, ein anschauliches Bild vom innern Bau der Körper zu schaffen, aus dem sich das Verhalten der Materie und ihre Eigenschaften verstehen ließen. Dabei versuchte man, die Geseze des Makrokosmos auf den Mikrokosmos zu übertragen. Diese Bemühungen führten schon sehr frühe zur atomistischen Auffassung des Stoffes. Im Abendlande wurde die Atomtheorie durch Leukippos und seinen Schüler Demokrit begründet. Nach Demokrit, der um 420 v. Chr. lehrte, sind die Körper lediglich Anhäufungen von Atomen, die unteilbar und unzerstörbar, unendlich an Zahl, verschieden an Gestalt, Größe und Lage und in ewiger Bewegung sind. Zwischen der alten und der heutigen Atomtheorie bestehen manche Berührungspunkte, aber auch tiefgreifende Unterschiede. Der Grundgedanke jedoch, daß es letzte Bausteine der Materie gibt, ist beiden gemeinsam. Die Atomtheorie ist im Laufe der Jahrhunderte nie wieder ganz aus der Wissenschaft verschwunden, aber sie trat lange Zeit neben andern Ansichten über die Natur der Körper stark in den Hintergrund. Mit dem Aufblühen der Physik und der Chemie in den letzten Jahrhunderten nahm auch die Atomtheorie einen neuen Aufschwung, und heute beherrscht sie die ganze Naturwissenschaft. Ihre großen Fortschritte in unserem Jahrhundert verdankt sie an erster Stelle der Physik. Ihrer bewährten Methode getreu, ließ die Physik sich durch Experimente leiten. Einige der Fortschritte und die Richtungen, die die Atomphysik eingeschlagen hat, sollen in diesem Aufsatze beschrieben werden.

Legt man eine hohe elektrische Spannung, etwa die beiden Pole einer starken elektrischen Batterie oder die Pole einer Influenzmaschine, an die beiden Elektroden einer Geißlerschen Röhre¹, so findet man, daß eine Strahlung von der negativ geladenen Elektrode (= Kathode) ausgeht. Man hat diese Strahlen Kathodenstrahlen genannt. Sie sind nicht direkt sichtbar. Fallen sie aber auf einen fluoreszierenden Schirm, dann erzeugen sie auf diesem einen leuchtenden Fleck und werden so in ihrer Wirkung dem Auge wahrnehmbar. Stellt man ein leicht bewegliches Flügelrädchen in geeigneter Weise in den Strahlengang, dann gerät das Rädchen in sehr rasche Umdrehungen. Man gewinnt den Eindruck, daß kleine Geschosse von der Kathode ausgehen und auf das Flügelrädchen prallen. Aus diesem und aus ähnlichen Versuchen hat man den naheliegenden Schluß gezogen, daß die Kathodenstrahlen aus rasch bewegten körperlichen Teilchen bestehen (Korpuskularstrahlen). Legt man an die Seiten der Röhre eine elektrische Spannung, etwa die Pole einer elektrischen Batterie, so, daß dieses neue elektrische Feld senkrecht zur Bewegungsrichtung der Korpuskeln steht, dann wird der leuchtende Fleck auf dem Schirme stark verschoben, die Strahlen werden somit durch das angelegte

¹ Eine Geißlersche Röhre ist eine Glasröhre mit eingeschmolzenen Metallplättchen (= Elektroden), in der irgend ein stark verdünntes Gas unter sehr niedrigem Drucke befindet.

elektrische Feld aus ihrer Richtung abgelenkt. Legt man in ähnlicher Weise ein Magnetfeld an die Röhre, dann ersieht man aus der Verschiebung des Leuchtflecks, daß die Kathodenstrahlen auch durch ein magnetisches Feld aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Diese hier nur qualitativ geschilderten Versuche lassen sich so anordnen und verfeinern, daß sie sich für Meßzwecke eignen. Dabei ist man zu folgenden wichtigen Ergebnissen gekommen.

Aus der Richtung der Ablenkung folgt, daß die Teilchen eine negative Ladung besitzen.

Aus der Größe der Ablenkung der Strahlen, der bekannten elektrischen Spannung an den beiden Elektroden und den gleichfalls bekannten Feldstärken der seitlich angelegten elektrischen und magnetischen Felder konnte man das Verhältnis: Ladung zu Masse (= spezifische Ladung) bestimmen. Die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ (e = Ladung, m = Masse) ist unabhängig vom Gase, das sich in der Röhre befindet, d. h. sie ist dieselbe für alle Gase¹.

Hiermit ist uns jedoch nur das Verhältnis von zwei Größen gegeben. Wenn es gelingt, eine der beiden Größen durch eine andere unabhängige Messung zu bestimmen, so läßt sich die andere Größe berechnen. Die Teilchen — man nennt sie heute Elektronen — treten nun aber auch bei andern Versuchen auf. Wenn man einen Draht erhitzt, oder ein Metall mit ultravioletttem oder mit Röntgenlicht bestrahlt, treten Elektronen aus. Man ist somit bei der Untersuchung nicht einzig und allein auf die Elektronen in Geißlerschen Röhren angewiesen. Es ist mit sehr genauen Methoden gelungen, die Ladung der Elektronen zu messen. Man nennt sie die Elementarladung. Sie ist eine allgemeine Naturkonstante. War nun einmal die Ladung e bekannt, dann ließ sich auch die Masse m der Elektronen aus der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ berechnen. Man fand für m rund $\frac{1}{1800}$ der Masse des Wasserstoffatoms. Das ist die kleinste bis jetzt bekannte Masse. Auf denselben Wert für m führt die Vergleichung der spezifischen Ladung des Wasserstoffatoms bei der Elektrolyse mit der spezifischen Ladung der Elektronen in der Geißlerschen Röhre.

Elektronen treten auch frei in der Natur als β -Strahlen beim radioaktiven Zerfall auf. Das häufige Vorkommen der Elektronen hat den Schluß nahegelegt, daß sie zu den letzten Bausteinen aller Atome gehören.

Auch von der positiven Elektrode (Anode) der Geißlerschen Röhre gehen Strahlen aus. Auch diese Strahlen lassen sich, ähnlich wie die Kathodenstrahlen, durch elektrische und magnetische Felder aus ihrer Richtung ablenken. Sie sind ebenfalls Korpuskularstrahlen, aber mit einer positiven Ladung. Ihre spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ ist verschieden je nach dem Gase in der Röhre. Man fand für $\frac{e}{m}$ denselben Wert wie bei der Elektrolyse. Daraus folgt, daß die Anodenstrahlen (man nennt sie auch Kanalstrahlen) aus geladenen Atomen bestehen.

So ist man zu der Folgerung gekommen, daß, grob ausgedrückt, jedes Atom aus zwei Arten von Bausteinen aufgebaut ist, aus den negativ geladenen Elek-

¹ Verwicklungen treten nur ein, wenn die elektrische Spannung, die an die Röhre gelegt wird, zu hoch ist. Dann werden die Geschwindigkeiten der Teilchen zu groß und die Masse m zeigt dann eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Teilchen. Zu hohe Spannungen lassen sich aber vermeiden.

tronen (dieselben in allen Elementen) und aus positiv geladenen Teilchen, die charakteristisch sind für die einzelnen Elemente. Diese positiven Teilchen nennt man ganz allgemein *Atomkerne*.

Die Masse eines Atomkernes ist immer „nahezu“ ein ganzes Vielfaches der Masse des Wasserstoffatoms. Das legte den Gedanken nahe, daß die Atomkerne selbst wieder aus Wasserstoffkernen zusammengesetzt sind. Diese letzten Bausteine der Atomkerne nennt man *Protonen*. Jeder Atomkern ist somit charakterisiert durch eine ganze Zahl, d. h. durch die Zahl der Protonen, die ihn aufbauen. Diese Zahl stellt im wesentlichen das *Atomgewicht* des Elementes dar. Man bezieht jedoch heute die Atomgewichte nicht auf das Atomgewicht des Wasserstoffs als Einheit, sondern auf das Atomgewicht des Sauerstoffs, das man als 16 annimmt. Beispielsweise seien einige Atomgewichte hier wiedergegeben:

Atomgewicht von Wasserstoff (H) = 1,008.

„ „ Helium = 4, d. h. nahezu 4 mal Atomgew. von H.

„ „ Kohlenstoff = 12, d. h. nahezu 12 mal Atomgew. von H.

„ „ Neon = 20,2, d. h. nahezu 20 mal Atomgew. von H.

Es springt in die Augen, daß alle Atomgewichte nahezu ganze Vielfache des Atomgewichtes von H sind. Auf die Abweichungen von der Ganzzahligkeit werden wir weiter unten noch zurückkommen müssen.

Da die Protonen positiv geladen sind, so muß der vorwiegend aus Protonen aufgebaute Kern eine positive Ladung aufweisen, wie es sich auch tatsächlich im Experimente gezeigt hat. Wählt man nun als elektrische Einheitsgröße die Größe der Ladung eines Elektrons, so erhält man eine zweite charakteristische Zahl für die Atomkerne, ihre *Kernladungszahl*.

Weitere Aufklärung über die Atome haben die Röntgenspektren gebracht. Läßt man gewöhnliche Röntgenstrahlen auf einen Körper fallen, so werden die Atome des getroffenen Körpers ihrerseits zur Aussendung anderer Röntgenstrahlen angeregt. Diese neuen Röntgenstrahlen bilden ein Spektrum, das aus scharfen Linien (Linienpektrum) besteht. Mit bekannten physikalischen Methoden kann man die Wellenlängen für die entsprechenden Linien sehr genau messen. Es hat sich nun herausgestellt, daß diese Linienpektren von der Art der Atome abhängen, aus denen der getroffene Körper aufgebaut ist. Deshalb hat man diese Röntgenstrahlung als charakteristische Röntgenstrahlung bezeichnet. Der Typus des Spektrums, d. h. die allgemeine Anordnung der Linien, ist für die verschiedenen Elemente gleich.

Es zeigte sich auch, daß für Elemente mit höherem Atomgewichte die gesamte Strahlung kurzwelliger ist als für Elemente mit niederem Atomgewichte; d. h. mit steigendem Atomgewichte findet eine Verschiebung des ganzen Spektrums nach kürzeren Wellenlängen statt. Moseley erkannte, daß man mit Hilfe der charakteristischen Röntgenstrahlung alle Grundstoffe in eine „natürliche“ Reihe einordnen kann. Diese natürliche Reihe stimmt im allgemeinen mit der Reihe überein, die man erhält, wenn man die Elemente nach steigenden Atomgewichten ordnet. Auf diese Weise ergaben sich im natürlichen System 92 Plätze. Wasserstoff nimmt den ersten, Helium den zweiten, Uran den 92. Platz ein. Man hat diese Plätze numeriert und die Platznummer eines Elements im System kurz seine *Ordnungszahl* genannt. Die Korrespondenz zwischen

Wellenlänge und Ordnungszahl läßt sich mathematisch ausdrücken. Mit Hilfe dieses mathematischen Zusammenhanges war es möglich, die Röntgenspektren auch für solche Elemente zu berechnen, die man noch gar nicht in der Natur gefunden hatte.

Das System der Elemente wies Lücken, d. h. unbefegte Plätze auf. Die Röntgenspektren der Elemente, die diese Plätze einnehmen, konnte man nun aus der Ordnungszahl des freien Platzes berechnen und dann die für das Vorkommen des Elementes in Frage kommenden Mineralien systematisch auf das Auftreten der berechneten Spektren untersuchen. Auf diese Weise ist es gelungen, die Elemente Hafnium, Masurium, Rhenium und Illinium zu entdecken.

Bei Wasserstoff und bei Helium stimmt die Ordnungszahl mit der Kernladungszahl überein. Der Gedanke lag nahe, versuchsweise ganz allgemein die Ordnungszahl mit der Kernladungszahl zu identifizieren. Diese etwas kühne Annahme hat sich in der Spektralanalyse als richtig erwiesen. Eine unmittelbare experimentelle Bestätigung hat sich auch noch in den Versuchen über den Durchgang von α -Strahlen durch dünne Metallfolien (Platin, Silber und Kupfer) gefunden.

In normalem Zustande sind die Atome ungeladen. Die positive Kernladung muß somit durch negative Ladungen neutralisiert werden. Wir müssen deshalb annehmen, daß der Kern von einer negativ geladenen Elektronenwolke umgeben ist. Soll nun eine vollständige Neutralisierung der Kernladung eintreten, so muß die Zahl der Elektronen um den Kern gleich der Kernladungszahl (= Ordnungszahl) des Elementes sein, z. B. 92 beim Uran. Einen ersten Aufschluß über die Anordnung der Elektronen gibt uns der Durchgang von α -Teilchen durch Materie. Ein α -Teilchen kann Tausende von Atomen durchqueren, ohne eine merkliche Änderung seiner Richtung zu erfahren. Bisweilen aber ruft, wie die Wilsonschen Photographien zeigen, ein einziges Atom eine Ablenkung des α -Teilchens um einen sehr großen Winkel hervor. Diese merkwürdige Tatsache läßt sich ungezwungen durch die Annahme erklären, daß zwischen den Elektronen und dem Kerne ein relativ großer Abstand besteht, und daß der Atomkern nur einen sehr geringen Teil des Gesamtvolumens des Atomes einnimmt.

Hieraus ergibt sich, daß die Elektronen den Kern umkreisen müssen. Die negativ geladenen Elektronen werden nämlich von dem positiv geladenen Kern kräftig angezogen. Diese anziehende Kraft muß durch eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft kompensiert werden. Als solche kann aber nur eine Fliehkraft in Frage kommen, wie sie bei allen Kreisbewegungen auftritt. So wird man naturgemäß auf das Rutherford'sche dynamische Atommodell geführt. Jedes umlaufende Elektron ist einem elektrischen Strome gleichwertig, der stetig seine Richtung ändert und in seiner Umgebung ein elektromagnetisches Feld erzeugt. Nach der klassischen Physik wird die Energie dieses Feldes als Licht ausgestrahlt. Die ausgestrahlte Energie stammt vom bewegten Elektron. Dieses muß daher ständig Energie verlieren. Das führt zu zwei wichtigen Folgerungen. Erstens: Das Elektron muß sich auf einer Spiralbahn bewegen, sich immer mehr dem Kern nähern und schließlich in den Kern hineinstürzen, d. h. das Atom kann nicht stabil sein. Zweitens: Das

ausgestrahlte Licht muß ein kontinuierliches Spektrum besitzen. Beide Folgerungen widersprechen der Erfahrung: Die Atome sind stabile Gebilde und die Spektren der Grundstoffe sind diskontinuierliche Linienspektren. Hier versagt somit die klassische Physik, oder aber das Rutherford'sche Atommodell entspricht nicht der Wirklichkeit.

Der dänische Physiker N. Bohr entschloß sich, das Rutherford'sche Atommodell beizubehalten und die Gesetze der klassischen Physik aufzugeben. Zur Lösung der bestehenden Schwierigkeiten zog er die Quantentheorie heran¹. Es gelang ihm damit, beider Schwierigkeiten Herr zu werden. In der Theorie von Bohr haben wir uns die Atome wie kleine Planetensysteme vorzustellen. In der Mitte befindet sich der Atomkern. Er entspricht der Sonne in unserem Planetensystem. Um diesen Zentralkörper kreisen die Elektronen (Planeten) aber nicht in beliebigen, sondern in ganz gesetzmäßig bestimmten Bahnen. Die Bahngesetze machen wir uns am besten am Wasserstoffatom, dem einfachsten von allen Atomen, klar. Es besitzt einen einfachen Kern (Zentralkörper) und nur ein einziges Elektron (Planet). Ein Zweikörpersystem dieser Art läßt sich mathematisch exakt beschreiben. Die möglichen Bahnen des Elektrons sind Kreise oder Ellipsen. Für unsern Zweck genügt es, nur die Kreisbahnen zu betrachten. Für Kreisbahnen gelten nach Bohr zwei Quantenbedingungen. Die sog. 2. Quantenbedingung besagt, daß nur ganz bestimmte Elektronenbahnen zulässig sind². Solange das Elektron sich in einer solchen Bahn bewegt,

¹ Die Grundanschauung der Quantentheorie kann man sich am konkreten Falle der Lichtstrahlung klarmachen. Newton nahm an, daß die Lichtemission in der Aussendung unwägbarer, materieller Teilchen von der Lichtquelle bestehe. Es zeigten sich jedoch bald Schwierigkeiten, die die Theorie nicht überwinden konnte. Huygens begründete deshalb die Wellentheorie des Lichtes, gemäß der das Licht ein Schwingungsvorgang im Äther ist. Fast 200 Jahre währte der Kampf zwischen beiden Ansichten, dann wandte sich der Sieg entschieden der Wellentheorie zu. Nach dieser Theorie war die Lichtemission und überhaupt jede Strahlung ein stetiger Vorgang. Die Strahlungsenergie müßte demnach in jeder beliebigen endlichen Menge auftreten und beliebig teilbar sein können. Allein bald trat wieder eine große Schwierigkeit auf. Es wollte in keiner Weise auf Grund dieser Annahme gelingen, ein Strahlungsgesetz aufzustellen, das mit allen wohlverbürgten Tatsachen übereinstimmte. Planck (1900) ließ deshalb die Annahme, daß die Energiestrahlung ein kontinuierlicher Vorgang sei, fallen. Er stellte den neuen Grundsatz auf, daß die Atome Strahlungsenergie von ganz genau bestimmten endlichen Beträgen aussenden: $E = h\nu$, wo E den ausgestrahlten Energiebetrag, ν die Schwingungszahl, d. h. die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde, und h eine universelle Naturkonstante, das sog. elementare Wirkungsquantum, bedeutet. Den endlichen Energiebetrag $h\nu$ nennt man ein Quant. Demnach hat jede Strahlungsenergie sozusagen eine atomische Struktur. Mit dieser Annahme war es möglich, ein Strahlungsgesetz aufzustellen, das den Beobachtungen gerecht wurde. Die auf dieser Anschauung aufgebaute Theorie heißt die Quantentheorie. Die Lehre ist dann noch weiter von Einstein ausgebildet worden. Bis zu einem gewissen Grade bedeutet sie eine Rückkehr zur ursprünglichen Emissionstheorie von Newton. Der Unterschied zwischen den beiden Emissionstheorien liegt vorwiegend in der verschiedenen Auffassung der ausgesandten Teilchen. Nach Newton handelt es sich um unwägbare, materielle Teilchen. Bei Planck hingegen um Energieteilchen (Quanten), denen nach Einstein auch noch Trägheit zukommt.

² Das Elektron kann nur solche Bahnen beschreiben, für die sein Drehimpuls multipliziert mit 2π ein ganzes Vielfaches des elementaren Wirkungsquantums h ist. (Der Drehimpuls wird durch mrv ausgedrückt, wo m = Masse, r = Abstand vom Zentrum, v = Bahngeschwindigkeit). Ist ω = Winkelgeschwindigkeit, dann ist $v = r\omega$ und der Drehimpuls = $mr^2\omega$. Die Gleichung lautet somit $2\pi mr^2\omega = nh$, wo n = ganze Zahl. Für $n = 1$ erhält man die Grundbahn des Elektrons.

strahlt es nach Bohrs Annahme keine Energie aus, entgegen der Annahme der klassischen Physik. Zur 2. Quantenbedingung kommt noch eine weitere, die sog. 1. Quantenbedingung. In einer Bahn mit großem Durchmesser besitzt das den Kern umkreisende Elektron eine größere Energie als in einer kernnäheren Bahn. Tritt nun aus irgend einer Ursache ein Zusammenbruch des Systems, eine Katastrophe, ein, sodaß das Elektron aus der höheren, energiereicheren in die niedere, energieärmere Bahn stürzt, dann wird nach der 1. Quantenbedingung die Energiedifferenz in beiden erlaubten Bahnen in Form von Strahlung nach außen abgegeben¹. Mit Hilfe dieser etwas befremdlichen Annahmen gelang es Bohr, für das Linienspektrum des Wasserstoffs eine Gleichung abzuleiten, die mit einer früher rein empirisch abgeleiteten Gleichung übereinstimmte. Diese empirische Gleichung enthielt aber einen Zahlenfaktor, über dessen physikalischen Sinn man bis dahin nichts auszusagen vermocht hatte. In der Bohrschen Theorie erhielt dieser Zahlenfaktor eine ganz bestimmte physikalische Bedeutung. Das waren unzweifelhafte, große Erfolge der neuen Theorie.

Wir verlassen nun das Wasserstoffatom und wenden uns den Grundstoffen mit mehr als einem Elektron zu. Die Theorie ist hier zu folgenden Ergebnissen gekommen. Die Zahl der äußern Elektronen ist gleich der Ordnungszahl, d. h. gleich der Kernladungszahl des Elementes. So hat z. B. Uran die Ordnungszahl 92. Es werden ihm deshalb 92 äußere Elektronen zugeschrieben. In dieser Elektronenwolke, die den Kern umkreist, herrscht Ordnung. Man denkt sich die Elektronen in wohl definierten Schalen angeordnet. N. Bohr ist es gelungen, auch den Aufbau der einzelnen Elektronenschalen mit großer Wahrscheinlichkeit darzustellen. Er ging bei seinen Untersuchungen von dem physikalischen und chemischen Verhalten der Grundstoffe und von ihrer Stellung im periodischen Systeme aus. Er fand, daß der Aufbau der einzelnen Schalen ganz gesetzmäßig mit der Zunahme der Elektronenzahl in den Atomen verläuft. Entsprechende, fertig ausgebaute Schalen in verschiedenen Elementen sind einander gleich. Unterschiede treten erst in den unfertigen äußersten Schalen auf. Ein Beispiel möge das klarmachen. Kalium (K) hat 19 äußere Elektronen, Calcium (Ca) hat deren 20. Bei beiden Elementen sind die Elektronen so angeordnet, daß die innerste Schale mit 2, die beiden folgenden mit je 8 Elektronen besetzt sind. Allein bei K hat die äußerste Schale nur 1, bei Ca jedoch 2 Elektronen.

Aber damit war nur die tatsächlich vorhandene Arithmetik im periodischen Systeme festgestellt, sie war noch nicht auf ein einheitliches Prinzip zurückgeführt. Erst das Paulische Prinzip vollbrachte diese Leistung.

Im Jahre 1913 führte Bohr mit den gequantelten Kreisbahnen des Elektrons eine Quantenzahl in die Atomtheorie ein. Man bezeichnet sie heute als die Nebenquantenzahl. Zwei Jahre später vervollkommnete Sommerfeld die Bohrsche Theorie, indem er neben Kreisbahnen auch Ellipsenbahnen für die umlaufenden Elektronen zuließ. Diese Erweiterung führte mit Notwendigkeit zur Einführung einer zweiten Quantenzahl, der sog. Hauptquantenzahl. Im Jahre 1925 erkannte man, daß den umlaufenden Elektronen auch noch

¹ Sind E_1 und E_2 die Energien des Elektrons in beiden Bahnen, so besagt die 1. Quantenbedingung $E_1 - E_2 = h \nu$.

eine Rotation um ihre eigene Achse zukomme. Damit war die Analogie zwischen Atom und Planetensystem vollständig. Ein rotierendes Elektron verhält sich aber im Magnetfelde wie ein winziger Magnet. Dieser „Elektronenspin“ verlangte somit die Einführung einer dritten Quantenzahl. Zu einer vierten Quantenzahl wurde man durch folgende Überlegungen geführt. Jedes Elektron im Atom hat zwei Drehimpulse, einen infolge seines Umlaufs um den Kern, den andern infolge seiner Eigenrotation (Spin). Bilden wir nun die vektorielle Summe¹ aller Drehimpulse aller Elektronen im Atom, dann erhalten wir den gesamten Drehimpuls des ganzen Atoms. Dieser resultierende gesamte Drehimpuls des Atoms verlangt eine vierte Quantenzahl für jedes Elektron. Jedem Elektron im Atom kommen somit vier Quantenzahlen zu; sie bestimmen den Zustand des Elektrons, d. h. seine Bahn, seine Energie und seine Orientierung im Raume.

Das Paulische Prinzip besagt nun, daß in einem Atom niemals zwei Elektronen in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen können, mit andern Worten, es sei unmöglich, daß sich zwei oder noch mehr Elektronen, die den Atomkern umkreisen, im gleichen Zustande befinden. Mit Hilfe dieses Prinzips ist es gelungen, die maximalen Besetzungszahlen der einzelnen Elektronenschalen im Atom zu bestimmen. Für die innerste Schale fand man 2 Elektronen, für die folgenden Schalen 8, 8, 18, 18 und 32 Elektronen. Das sind aber ganz dieselben Zahlen, die die Längen der einzelnen Perioden im periodischen System kennzeichnen, und die man längst kannte. So hat das Paulische Prinzip den innern Grund der bereits bekannten Arithmetik des periodischen Systems aufgedeckt. Bisher fehlt es noch an jeder Erklärung des Paulischen Prinzips. Es hat sich jedoch für die Deutung des Aufbaues der Atome, insbesondere für die Zahl der Elektronen in den einzelnen Schalen, so ausgezeichnet bewährt, daß man es als durch die Erfahrung bestätigt ansehen muß.

Mit Hilfe des Bildes der Anordnung der Elektronen in Schalen ist es möglich gewesen, sich über viele atomare Vorgänge Rechenschaft zu geben. Die chemischen Kräfte, die im Grunde elektrischer Natur sind, entstammen der unfertigen, d. h. der nicht vollbesetzten äußersten Schale. Ist die äußerste Schale voll mit Elektronen besetzt, so ist das betreffende Element chemisch inaktiv. Das erklärt die Inaktivität der Edelgase, bei denen die äußersten Schalen nach der Theorie vollbesetzt sind. Das periodische System der Elemente, das die Chemiker auf Grund der Atomgewichte und der chemischen Eigenschaften der Grundstoffe schon viel früher aufgestellt hatten, wurde verständlicher. Auch die Spektren der Elemente verloren viel von ihrem geheimnisvollen Charakter. Die optischen Spektren konnte man durch Sprünge der der äußersten Schale angehörenden Elektronen aus einer erlaubten Bahn in eine andere deuten. Die Röntgenspektren hingegen rühren von Quantensprüngen her, die zwischen den einzelnen innern Elektronenschalen erfolgen.

¹ Unter Vektor versteht man eine Größe, die durch Angabe einer Zahl und einer Richtung bestimmt wird; eine Kraft ist also ein Vektor. Das Parallelogramm der Kräfte ist ein Beispiel einer vektoriellen Summenbildung. Die Diagonale des Parallelogramms ist die vektorielle Summe der beiden Kräfte.

Aufschluß über den Bau der Kerne erhalten wir vor allem aus dem Atomzerfall. Der natürliche Zerfall radioaktiver Stoffe ist ein Vorgang, der sich durch keine uns zu Gebote stehenden Mittel beschleunigen oder verlangsamen läßt. Das drängt zur Annahme, daß dieser Vorgang sich im Innersten des Atoms, im Atomkerne, abspielt. Hierbei werden α -, β - und γ -Strahlen ausgesandt. Die α -Strahlen erwiesen sich als identisch mit Heliumkernen. In den β -Strahlen erkannte man rasch bewegte Elektronen. Die γ -Strahlen sind Energiequanten. Sie sind mit den Röntgenstrahlen verwandt, von denen sie sich nur durch ihre höhere Schwingungszahl unterscheiden. Es ist aber auch gelungen, eine ganze Reihe stabiler Grundstoffe zu zertrümmern. Bei all diesen Versuchen wurden Wasserstoffkerne von den Atomen abgetrennt.

Ganz allgemein lassen sich somit dreierlei Bausteine der Atomkerne nachweisen: Elektronen, Wasserstoffkerne (Protonen) und Heliumkerne (4 Protonen und 2 Kernelektronen), die vermutlich eine gewisse Selbständigkeit bewahren. Zurzeit haben wir noch keine vollständige Theorie des Kernaufbaues. Es ist aber gelungen, eine Reihe bedeutungsvoller, die Kernstruktur betreffender Gesetzmäßigkeiten aufzufinden. Zu diesen Gesetzmäßigkeiten gehört vor allem die Tatsache, daß ein Element mit gerader Ordnungszahl (somit einer geraden Zahl von Protonen) in der Natur häufiger auftritt als seine beiden Nachbarn im natürlichen System mit ungerader Ordnungszahl (Protonenzahl). Hinsichtlich der Protonenzahl gilt die Regel, daß Elemente mit einer durch 4 teilbaren Protonenzahl sich durch besondere Häufigkeit auszeichnen. Ferner hat sich ergeben, daß die Zahl der in den Kern eingebauten Elektronen für die überwiegende Zahl von Grundstoffen gerade ist.

Es tritt aber noch eine Schwierigkeit auf. Wenn die Atomkerne lediglich aus Wasserstoffkernen aufgebaut sind, dann sollte man erwarten, daß alle Atomgewichte (auf Wasserstoff bezogen) ganzzahlig seien. Das trifft aber ganz auffällig nicht zu. Diesem Einwande kann man auf folgende Weise begegnen. Die Stellung eines Elementes im periodischen Systeme hängt von seiner Kernladung und die wieder von der Zahl der Protonen und Elektronen im Kerne ab. Fügt man nun zum Kern ein Proton und zugleich auch ein Elektron, so bleibt die Kernladung ungeändert, das Element behält seinen Platz im periodischen System. Seine chemischen Eigenschaften haben sich nicht gewandelt, aber sein Atomgewicht hat um eine Einheit zugenommen. Der Fall ist somit denkbar, daß es Elemente mit denselben chemischen Eigenschaften, aber mit verschiedenen Atomgewichten gibt. Durch keine chemische Analyse ließen sich solche Elemente voneinander trennen. Schon im Jahre 1910 wurde die Ansicht ausgesprochen, daß die Atomgewichte aller Elemente ganzzahlig seien, daß Elemente, die von der Ganzzahligkeit abweichen, Mischungen von Elementen seien, deren Atomgewichte sich um eine oder um mehrere Einheiten unterscheiden. Bei den Atomgewichtsbestimmungen nach den herkömmlichen chemischen Methoden werde nur das mittlere Atomgewicht der Mischung bestimmt. Die einzelnen Atomarten der Mischung nennt man Isotopen.

Im Jahre 1913 gelang es, mit physikalischen Methoden die Richtigkeit dieser Annahme für Neon nachzuweisen. Seitdem hat man die Untersuchungs-

methoden sehr verfeinert, so daß wir heute eine große Zahl von Isotopen kennen. Die meisten bekannten Elemente haben solche Isotopen. Ihre Anzahl ist aber bei den einzelnen Grundstoffen sehr verschieden. Eisen und Zinn mögen als Beispiele dienen. Die Chemiker fanden für das Atomgewicht des Eisens 55,84. In Wirklichkeit ist aber das gewöhnliche Eisen kein reines Element. Es ist ein Gemisch von zwei Elementen mit den Atomgewichten 54 und 56. Diese beiden Stoffe gehen in ungleichen Mengen in das Gemisch ein. Das Durchschnittsatomgewicht der Mischung ist 55,84. Für Zinn hatte man nach chemischen Methoden das Atomgewicht 118,7 gefunden. Aber auch das gewöhnliche Zinn ist kein reines Element. Die Physiker haben experimentell festgestellt, daß das gewöhnliche Zinn ein Gemisch von elf verschiedenen Stoffen ist, die alle dieselben chemischen Eigenschaften, aber sehr verschiedene Atomgewichte haben. Der leichteste hat das Atomgewicht 112 und der schwerste 124. Zwischen den Atomgewichten der leichtesten und schwersten Isotopen des Zinns besteht somit ein Unterschied von zwölf Einheiten. Die groben Abweichungen der Atomgewichte von der Ganzzahligkeit haben damit eine befriedigende Erklärung gefunden.

Die noch verbleibenden geringen Abweichungen erklärt man durch den sog. Packungseffekt. Beim Aufbau des Atomkernes aus Protonen und Elektronen muß entweder Energie von außen zugeführt werden, um die Synthese herbeizuführen, oder es wird überflüssige Energie frei und dann ausgestrahlt. Der neugebildete Kern erfährt somit eine Zu- oder Abnahme von Energie. Da nun nach der heutigen Physik auch der Energie eine Masse zukommt, so ist diese Zu- oder Abnahme von Energie im Atomkern einer Zu- oder Abnahme von Masse gleichwertig. Diese Zu- oder Abnahme von Masse bei der Synthese, d. h. bei der Packung, der Kernbestandteile gegenüber der Summe der Masse der den Kern bildenden Protonen und Elektronen nennt man den Packungseffekt. Die unmittelbare Folge des Packungseffekts ist somit eine kleine Abweichung des auf Wasserstoff bezogenen Atomgewichtes von der Ganzzahligkeit. Als klassisches Beispiel gilt der Heliumkern (He). Das Atomgewicht von He ist 4. Der He-Kern ist aus 4 Protonen aufgebaut, denen zusammen die Masse $4 \times 1,008 = 4,032$ zukommt. Bei der Synthese von He geht somit 0,032 an Masse verloren, die in Form von Energie ausgestrahlt wird. Ganz ähnliche Überlegungen kann man bei den übrigen Elementen anstellen und so die noch verbleibenden kleinen Abweichungen von der Ganzzahligkeit erklären.

Die Physik lieferte also ein recht anschauliches Bild vom Aufbau der Materie. Allein bald stellten sich unüberwindliche Schwierigkeiten ein. Schon beim Heliumatom, das nur zwei Planetenelektronen besitzt, war es nicht möglich, Theorie und Erfahrung in Einklang zu bringen. Auch abgesehen davon bot die Theorie manches Schwerverständliche, z. B. das Auftreten der Größe h (das elementare Wirkungsquantum) in den Gleichungen. Das ist eine optische Größe, die aber hier auch als atommechanische Größe auftritt. Auch die Bevorzugung der gequantelten Elektronenbahnen im Atom war vom Standpunkte der klassischen Physik völlig unverständlich. Eine Befreiung aus dieser Krise glaubte man nur durch eine gründliche Revision der Grundprinzipien zu erreichen.

Im Jahre 1924 erschien eine Arbeit von L. de Broglie, die später (1927) auch ins Deutsche übertragen wurde¹, und die den Anstoß zu den neueren Theorien in der Atomtheorie gab.

In der Optik war man bereits früher auf einen merkwürdigen Dualismus gestoßen. Gewisse Erscheinungen weisen entschieden auf eine korpuskulare Struktur des Lichtes hin, z. B. die Auslösung von Elektronen aus Metallen bei Bestrahlung mit Röntgenlicht oder mit γ -Strahlen. Daneben gab es andere Erscheinungen, die sich ungezwungen vom Standpunkte der Wellentheorie deuten ließen, z. B. die Laueschen Interferenzerscheinungen beim Durchgange der Röntgenstrahlen durch Kristalle. Die neuen Erfahrungen drängten darauf hin, neben der Wellentheorie auch die so lange vernachlässigte und fast vergessene Korpuskulartheorie des Lichtes wieder einzuführen. Das geschah in ganz entschiedener Weise durch A. Einstein, der im Jahre 1905 seine Lichtquantentheorie schuf. Das Licht hatte so den Charakter: Korpuskel-Welle.

L. de Broglie ging nun einen großen Schritt weiter. Er stellte sich die Frage, warum dieser Dualismus Korpuskel-Welle auf die Strahlung beschränkt sein sollte. Möglicherweise, so sagte er sich, besteht dieser Dualismus auch für die Materie. Nur hat man hier den entgegengesetzten Fehler gemacht, indem man zu viel an das Bild der Korpuskeln gedacht und das Bild der Wellen vernachlässigt hat. L. de Broglie ging bei seinen Untersuchungen von der Relativitätstheorie aus. Nach Einstein muß man jeder Energie Masse und jeder Masse Energie zuordnen. Beide sind immer miteinander durch die Beziehung

$$\text{Energie} = \text{Masse} \times c^2$$

verbunden. Hier bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit. Nach der Atom- und der Elektronentheorie ist die Materie nicht stetig, sondern aus kleinsten, voneinander getrennten Teilen aufgebaut. Somit müssen wir annehmen, daß auch die Energie in kleinen Bereichen konzentriert ist. Nach der Quantentheorie ist jedes Energiequant $= h \times \text{Frequenz} = h\nu$. De Broglie machte nun die Annahme, daß zufolge einem allgemeinen Naturgesetz mit jedem Energiestück von der Eigenmasse m_0 ein periodisches Phänomen von der Frequenz ν_0 verbunden ist nach der Beziehung

$$h\nu_0 = m_0 c^2.$$

Diese Hypothese ist die Grundlage der ganzen Theorie von De Broglie². Dann wird angenommen, daß das Teilchen mit der Masse m_0 sich mit der Geschwindigkeit v geradlinig und gleichförmig bewegt. De Broglie legt sich nun die Frage vor: In welcher Weise äußert sich die dem Teilchen zugeordnete Frequenz einem selbst nicht mitbewegten Beobachter? Die Antwort erteilt ihm die Relativitätstheorie. Aus den Transformationsgleichungen der speziellen Relativitätstheorie, angewandt auf das bewegte Teilchen, ergibt sich, daß wir dem Teilchen eine Welle zuordnen müssen. Diese Welle pflanzt sich mit Überlichtgeschwindigkeit fort und zwar in derselben Richtung, in der auch das

¹ Untersuchungen zur Quantentheorie von L. de Broglie. Übersetzt von W. Becker. Zwei Jahre später, 1929, erschien das Buch: Einführung in die Wellenmechanik von L. de Broglie. Übersetzt von R. Peierls. Beide Veröffentlichungen bei der Akad. Verlagsgesellsch., Leipzig.

² Untersuchungen zur Quantentheorie 11.

Teilchen sich bewegt. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit V der Welle ist um so größer je kleiner die Geschwindigkeit v des Teilchens ist. Beide Geschwindigkeiten sind miteinander durch die sehr einfache Gleichung $V = \frac{c^2}{v}$ verbunden, wo c die Lichtgeschwindigkeit ist. Auch die Frequenz ν (= Anzahl der Schwingungen in 1 Sekunde) und die Wellenlänge λ ließen sich berechnen. Es ist nun sehr wichtig, daß die Gleichungen, die De Broglie für ν und λ erhielt, in die Grundgleichungen der Lichtquantentheorie von Einstein übergehen, wenn die Geschwindigkeit v des Teilchens gleich der Lichtgeschwindigkeit c wird. Daraus hat De Broglie geschlossen, daß diese Gleichungen für λ und ν so allgemein sind, daß sie sowohl für Materie wie für Strahlung gelten und in beiden Fällen die Notwendigkeit zum Ausdruck bringen, gleichzeitig von Wellen und von Korpuskeln zu reden.

Bisher haben wir nur von einer Welle geredet. Jetzt betrachten wir den Fall, wo wir eine große Zahl von Wellen haben, die sich alle in derselben Richtung fortpflanzen. Von diesen Wellen nehmen wir an, daß die Frequenzen der einzelnen Wellen sich nur sehr wenig voneinander unterscheiden, d. h. daß sie nahezu einander gleich sind. Die Gesamtheit so beschaffener Wellen nennt man eine „Wellengruppe“. Die Phasen (= Bewegungszustand) sämtlicher Wellen sollen nun zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Punkte übereinstimmen. An diesem Punkte werden sich dann in diesem Augenblicke alle Wellen gegenseitig verstärken. Die resultierende Amplitude (= Ausschlag, Wellenhöhe) wird hier besonders groß werden. Es entsteht ein schmaler hoher Buckel in der Wellengruppe. Dieses Maximum, dieser Buckel schreitet dann in der Richtung voran, in der sich die Wellen ausbreiten. Allein die Geschwindigkeit U , mit der der Buckel fortschreitet, ist kleiner als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen. Man bezeichnet U als die Geschwindigkeit der Wellengruppe. De Broglie konnte nun den mathematischen Beweis erbringen, daß die Gruppengeschwindigkeit U der dem bewegten Teilchen zuzuordnenden Wellen gerade gleich der mechanischen Geschwindigkeit v des Teilchens ist.

Bisher haben wir nur den Fall der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung betrachtet. De Broglie untersuchte auch den Fall eines nicht gleichförmig, geradlinig bewegten Teilchens. Es gelang ihm dabei, das oberste Prinzip der Mechanik in das oberste Prinzip der Optik überzuführen. Das war ein wichtiges Ergebnis für eine Verallgemeinerung der Mechanik. Es war eine Verbindung zwischen Mechanik und Optik gefunden. Die Anwendung der neuen Vorstellungen auf die periodische Bewegung eines Elektrons im Bohrschen Atommodell brachte die bis dahin so rätselhaften Stabilitätsbedingungen dem Verständnis näher. De Broglie konnte sie aus seiner Theorie ableiten.

Wenn wir nicht wie bisher ein einzelnes Teilchen, sondern einen ganzen Schwarm von Teilchen, etwa einen Schwarm von Elektronen untersuchen, die sich alle in derselben Richtung mit derselben Geschwindigkeit bewegen, so ergibt sich, daß man diesem Schwarm eine ebene monochromatische Welle zuordnen muß, d. h. alle Wellen, die diesem Bündel angehören, müssen dieselbe Wellenlänge haben. Treffen diese Wellen auf ein Medium von regelmäßiger Struktur, z. B. auf einen Kristall, dann müssen sie gebeugt werden, und in

leicht zu berechnenden Richtungen müssen die Streutwellen Maxima zeigen. Nach der neuen Theorie muß man deshalb erwarten, daß ein Schwarm von Elektronen, die sich in derselben Richtung mit gleichen Geschwindigkeiten bewegen, Erscheinungen analog der Interferenz und der Beugung des Lichtes zeige. Diese Experimente wurden mit großer Sorgfalt von verschiedenen Forschern angestellt. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment war ganz ausgezeichnet. Diese Versuche liefern somit den experimentellen Beweis für die Notwendigkeit, die Korpuskularvorstellung auch für die Materie durch die Wellenvorstellung zu ergänzen.

Angeregt durch die Ideen De Broglies nahm Schrödinger¹ das Quantifizierungsproblem der Energie im Atome in Angriff (1926). Es schwebte ihm aber noch ein höheres, allgemeineres Ziel vor Augen. Er wollte eine Theorie schaffen, die beides umfaßt: die gewöhnlichen mechanischen Erscheinungen, wo Quantenbedingungen keine merkliche Rolle spielen, und anderseits die typischen Quantenphänomene. Aus seiner Mechanik hoffte er einerseits die gewöhnliche Mechanik als eine Annäherung, die die groben makromechanischen Erscheinungen beschreibt, wieder zu erhalten und anderseits auch eine Erklärung für diejenigen feinen „mikromechanischen“ Phänomene (Bewegung der Elektronen im Atom) zu gewinnen, für die die alte Mechanik überhaupt keine Erklärung zu geben vermochte; wenigstens nicht, ohne sehr künstliche Zusatzannahmen, die in Wirklichkeit einen weit wesentlicheren Teil der Theorie bildeten als die eigentliche mechanische Behandlung². Ebenso wie bei De Broglie tritt bei Schrödinger die Welle in den Mittelpunkt der Behandlung. Beide Theorien, die von De Broglie und die von Schrödinger faßt man deshalb unter dem einen Namen: Wellenmechanik zusammen. In der Behandlung des Problems weichen die beiden Forscher erheblich voneinander ab. De Broglie war von der Relativitätstheorie ausgegangen und faßte seine Materiewellen als fortschreitende Wellen auf. Schrödinger stellte sich von vornherein auf den Boden der klassischen (d. h. der althergebrachten) Mechanik. Seine Gleichungen führen ihn auf stehende Wellen (stehende Eigenschwingungen). Schrödinger geht vom obersten Prinzip der Mechanik aus und zeigt, daß unter bestimmten Voraussetzungen dieses Prinzip in das oberste Prinzip der Optik übergeführt werden kann. Wie oben erwähnt, war De Broglie ebenfalls zu diesem Ergebnisse gekommen. Geometrische Optik und Mechanik waren so in Zusammenhang gebracht. Der Grundgedanken der Wellenmechanik ist nun folgender: „Das Phänomen, für das die klassische Mechanik eine adäquate Beschreibung dadurch zu geben glaubte, daß sie die Bewegung eines Massenpunktes beschrieb, d. h. daß sie seine Koordinaten x, y, z als Funktionen der Zeit t betrachtete, dieses Phänomen muß — nach den neuen Vorstellungen — durch eine Wellenbewegung beschrieben werden, die sich aus Wellen von bestimmter Frequenz und Geschwindigkeit zusammensetzt.“³ Die Durchführung im einzelnen muß hier übergangen werden.

¹ E. Schrödinger, Abhandlungen zur Wellenmechanik (Leipzig 1927) 12.

² E. Schrödinger, Vier Vorlesungen über Wellenmechanik (Berlin 1928) 7 u. 8.

³ Vier Vorlesungen 5 u. 6.

Die Anwendung dieser Ideen auf ein einzelnes Teilchen führte zu einer Differentialgleichung, die die Grundlage der ganzen Schrödingerschen Theorie bildet¹. Sie ist der mathematische Ausdruck für eine Welle. Die Gleichung enthält eine Größe ψ , deren Deutung umstritten ist, die Gesamtenergie E , die konstant, und die potentielle Energie V , die veränderlich ist. Sie gehört einem Gleichungstypus an, der zu einer Zeit, als noch niemand an die gegenwärtige Anwendung denken konnte, von den Mathematikern sehr eingehend untersucht worden war. Die Gleichung hat die wichtige Eigenschaft, nur für ganz bestimmte, diskrete Werte von V eindeutige und stetige Lösungen zu besitzen. Diese Werte von V nennt man die Eigenwerte der Gleichung. Da nun V die potentielle Energie darstellte, so war es Schrödinger gelungen, das physikalische Problem der Quantelung der Energie auf ein rein mathematisches Problem zurückzuführen. Die Annahme von Planck, daß die Übertragung der Energie bei der Strahlung kein kontinuierlicher Vorgang sei, sondern nur in ganz bestimmten, wohl definierten Beträgen erfolge, war so dem Verständnis näher gebracht. Auch der Doppelcharakter von h (= elementares Wirkungsquantum) wurde verständlich, da h in der Fundamentalgleichung auftritt. Wendet man die Gleichung auf das Wasserstoffatom an, so stimmen die Energiewerte, die sich ergeben, vollkommen mit denen überein, die Bohr bereits im Jahre 1913 auf andere Weise berechnet hatte. Die Theorie von Schrödinger hat viele und große Erfolge gehabt, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Was bedeutet die Dualität: Welle — Korpuskel? Am Anfang seiner Arbeiten² hat Schrödinger den Gedanken ausgesprochen, die Korpuskeln ließen sich als Gruppen von Wellen, als Wellenpakete deuten. Allein diese Vorstellung läßt sich nicht allgemein durchführen. Bei der Beugung eines Elektrons an einem Kristall würde das Wellenpaket vollständig zerstreut und aufgelöst werden. Die Undurchführbarkeit der Ansicht Schrödingers tritt noch klarer hervor, wenn man es nicht nur mit einem Elektron, sondern mit einem Schwarm von N -Elektronen zu tun hat. Um der mathematischen Schwierigkeiten Herr zu werden, ordnet Schrödinger nicht jedem Elektron eine Welle im dreidimensionalen Raume zu, wie man vielleicht erwartet, sondern allen N -Elektronen eine einzige Welle, aber diese Welle ist im drei N -dimensionalen Raume (Konfigurationsraum). Das wäre nun sehr schön und gut, wenn es nachträglich gelänge, diese eine Welle in N -Wellen im dreidimensionalen Raume zurückzutransformieren. Das will aber nicht gelingen. Hierin steht De Broglie³ ein neues Argument, daß die Materiewelle keine physikalische Realität hat. Auch Schrödinger selbst ist nicht mehr davon überzeugt, daß die Materiewelle eine Welle im landläufigen Sinne des Wortes sei⁴. Er gibt damit aber keineswegs den Gedanken auf, daß der Welle ein physikalischer Vorgang entspricht. Die Größe ψ in seiner Gleichung glaubt er physikalisch dahin deuten zu können, daß ψ^2 der elektrischen Ladungsdichte proportional ist, die gemäß den Gesetzen der gewöhnlichen Elektrodynamik Emission von

¹ $\Delta \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0.$

² Abhandlungen zur Wellenmechanik 60.

⁴ Vier Vorlesungen zc. 6.

³ Einführung in die Wellenmechanik 165.

Licht verursacht¹. Die Welle selbst, d. h. der physikalische periodische Vorgang, wäre dann eine Schwingung dieser elektrischen Ladungsdichte².

L. de Broglie bespricht in seiner Wellenmechanik noch zwei andere Deutungen, die der Welle einen physikalischen Charakter zuerkennen. In beiden Fällen kommt er jedoch zu dem Ergebnis, daß die betreffenden Anschauungen sich nicht durchführen lassen. Wir erhalten somit das etwas unbefriedigende Resultat, daß es mindestens zweifelhaft ist, ob die Materiewellen physikalische Realitäten sind. Wir müssen uns nach einer andern möglichen Deutung der Wellen umsehen.

Als die Wellenmechanik noch im Anfange ihrer Entwicklung stand, hat Max Born bereits den Vorschlag gemacht, die Welle so zu deuten, daß sie nur die Wahrscheinlichkeit dafür darstellt, daß das Teilchen einen gewissen Bewegungszustand besitzt. Eine Wahrscheinlichkeit kann als eine kontinuierliche Größe aufgefaßt werden. Sie kann deshalb auch durch eine Differentialgleichung und durch eine Welle dargestellt werden. Diese Auffassung hat heute die meisten Anhänger. Sie wurde von Heisenberg und Bohr weiter entwickelt. Nach diesen beiden Forschern ist die ψ -Welle überhaupt kein physikalischer Vorgang, der sich in einem gewissen Gebiet abspielt, sondern nur eine symbolische Darstellung von dem, was wir über das Teilchen wissen.

Nach Heisenberg³ weist die Materie eine merkwürdige Doppelnatur auf, indem ihr Verhalten einmal dem Verhalten von Wellen, ein anderes Mal dem von Korpuskeln gleicht. Nun ist es klar, sagt Heisenberg, daß die Materie nicht gleichzeitig aus Wellen und Partikeln bestehen kann, die beiden Vorstellungen sind viel zu verschieden. Vielleicht ist die Lösung der Schwierigkeit darin zu suchen, daß beide Bilder (Partikel- und Wellenbild) nur ein Recht auf Analogie beanspruchen können, die manchmal zutreffen und manchmal versagen. Beide können als Analogien nur in gewissen Grenzfällen Gültigkeit beanspruchen; als Ganzes sind aber Atomphänomene nicht unmittelbar in unserer Sprache beschreibbar. Es ist auch keineswegs merkwürdig, daß unsere Sprache bei der Beschreibung atomarer Prozesse versagt; denn ihre Begriffe gehen auf die Erfahrungen des täglichen Lebens zurück, in denen wir stets mit großen Mengen von Atomen zu tun haben, jedoch nie einzelne Atome beobachten. Für atomare Prozesse haben wir also keine Anschauung. Für die mathematische Ordnung der Phänomene ist glücklicherweise eine solche Anschauung auch gar nicht nötig; wir besitzen in der Quantentheorie ein mathematisches Schema, das allen Experimenten der Atomphysik gerecht wird. Das Partikelbild und das Wellenbild sind zwei verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben physikalischen Realität. Diese Tatsache bildet das zentrale Problem der Quantentheorie.

Geht man von der Welle als dem Gegebenen aus, so ergibt sich die Grenze für die Anwendbarkeit des Partikelbildes. Man wird auf gewisse Unbestimmtheitsrelationen geführt. Es zeigt sich nämlich, daß es prinzipiell unmöglich ist, gleichzeitig für dasselbe Teilchen Ort und Bewegungszustand mit absoluter Genauigkeit zu bestimmen. Verfeinert man die Meßmethode, um

¹ A. a. D. 19.

² Abhandl. zur Wellenmechanik 165.

³ W. Heisenberg, Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie (Leipzig 1930) 7.

den Ort des Teilchens genauer zu bestimmen, dann wird in gleichem Grade die Bestimmung des Bewegungszustandes ungenauer und umgekehrt. Geht man vom Partikelbilde aus, so wird man auf die Grenzen der Anwendbarkeit des Wellenbildes geführt, und man erhält entsprechende Unbestimmtheitsrelationen für die Größen im Wellenbilde. Diese Unbestimmtheitsrelationen gelten nur für quantentheoretische Größen der Atomphysik. Sie sind prinzipielle Ungenauigkeiten, die sich durch keine Verfeinerung der Meßtechnik vermeiden oder vermindern lassen, wie die mehr zufälligen Ungenauigkeiten, die von der Unvollkommenheit der Meßmethode herkommen, und sich verringern oder durch Rechnung eliminieren lassen. Da es so prinzipiell unmöglich ist, für ein Teilchen gleichzeitig Anfangslage und Anfangsbewegungszustand mit absoluter Genauigkeit festzustellen, so ist die wesentliche Voraussetzung für eine streng deterministische Behandlung der atomaren Vorgänge nicht gegeben, und wir müssen uns mit statistischen Gesetzen in der Atomphysik begnügen.

Bei der Aufstellung seiner Quantenmechanik ging Heisenberg so vor (1925). Er verzichtete von vornherein auf alle Anschaulichkeit und benützte nur solche Größen, die der direkten Beobachtung zugänglich sind. Seine Theorie wird deshalb auch ganz und gar unanschaulich. An Stelle der unkontrollierbaren Elektronenbahnen ließ er nur die Frequenzen und die Intensitäten der Spektrallinien und die Energiestufen der Atome gelten, wie sie etwa Versuche über Elektronenstöße liefern. Aus diesen meßbaren Größen bildete er dann Rechengrößen, die an die Stelle der Koordinaten (Ortsbestimmung) und der Geschwindigkeiten der Elektronen treten sollten. Zwischen diesen Rechengrößen suchte er Beziehungen herzustellen, die eine Gewinnung der Quantisierungsvorschriften gestatten. Die periodisch veränderlichen Elektronenkoordinaten ersetzte er durch ein quadratisches Schema von Partialschwingungen (Matrix), deren Frequenzen mit den Schwingungszahlen der Spektrallinien übereinstimmen, und deren Amplituden für die Linienintensität maßgebend sind. Für dieses Schwingungsschema legte Heisenberg die Rechenregeln fest. Obschon nun Heisenberg weder vom Wellen- noch vom Partikelbilde ausging, so existiert doch in seinem mathematischen Apparat eine vollkommene Analogie zu dieser Doppelnatur der Atomphänomene. Sie besteht darin, daß ein und dasselbe mathematische Schema einmal als Quantentheorie des Partikelbildes, einmal als Quantentheorie des Wellenbildes interpretiert werden kann. Obwohl die klassischen Theorien vom Partikelbild und vom Wellenbilde absolut verschieden sind, sowohl in ihrem mathematischen wie in ihrem physikalischen Gehalt, sind die Quantentheorien der beiden Vorstellungen mathematisch und physikalisch identisch.

Die Heisenbergsche Quantenmechanik hat sich als sehr leistungsfähig für die Behandlung von Atomproblemen erwiesen. Ihre Anwendbarkeit wurde noch bedeutend vergrößert, als es Born und Jordan gelang, in der Matrizenrechnung einen geeigneten mathematischen Apparat für die allgemeine Durchführung der Heisenbergschen Ideen zu schaffen. Die so vervollständigte Quantenmechanik nennt man *Matrizenmechanik*.

Kurz erwähnt sei noch die Diracsche Theorie des Elektrons. Dirac steht auf dem Boden der Relativitätstheorie. Es ist ihm gelungen, ein System von Differentialgleichungen erster Ordnung aufzustellen, die das Verhalten

des Elektrons im elektromagnetischen Feld vom Standpunkte der Wellenmechanik beschreiben. In erster Annäherung liefern diese Gleichungen die Schrödingersche Grundgleichung. Die Kreisbewegung (Spin) des Elektrons, die man bereits im Jahre 1925 in das Atommodell eingeführt hatte, ergibt sich mit Notwendigkeit aus der neuen Theorie.

Bei einem Rückblick auf den Entwicklungsweg der Atomtheorie sehen wir dunkle Anfänge bei griechischen Philosophen vor mehr als zweitausend Jahren. Fast zweitausend Jahre lang blieben Philosophen ihre Hüter und Gegner. Allein die Entwicklung war fast Null. Die rein philosophischen Methoden versagten. Über einige wenige Aussagen kam man nicht hinaus. Dann folgte die Zeit des Aufblühens der Naturwissenschaften. In den Händen der Chemiker entwickelte die Atomtheorie sich rasch und kräftig. Man entdeckte die Verschiedenheit der Elemente, studierte ihre Eigenschaften, ihre gegenseitigen Verwandtschaften. Die Atomgewichte wurden mit großer Genauigkeit bestimmt und dienten als Grundlage des periodischen Systems. Noch manche andere schöne Erfolge ließen sich namhaft machen. Aber in einem wesentlichen Punkte vermochte die Chemie mit ihren Methoden nicht weiterzukommen. Die große Frage nach dem innern Bau des Atoms konnte sie nicht beantworten. Wohl hatte sie gewisse Vermutungen, aber es waren doch nur Vermutungen. Hier setzte nun die Physik mit ihren tiefer greifenden Mitteln ein. Die Atomtheorie, einst das unbestrittene Gebiet der Chemie, wurde ein Spezialgebiet der Physik. Ihr sind die großen Erfolge der letzten dreißig Jahre zu verdanken. Der dänische Physiker N. Bohr schenkte uns das anschauliche Atommodell mit seinem Zentralkörper und den ihn umkreisenden Elektronen. Allein der heutige Physiker ist auch Mathematiker. In den Händen der mathematischen Physiker verblassen die anschaulichen Bilder mehr und mehr. An ihre Stelle treten Gleichungen und mathematische Symbole, eine Art Geheimschrift für den Uneingeweihten. Es sieht fast aus, als ob die Natur ihr Antlitz mit einem Schleier aus Mathematik verhüllen müsse. Alle Anzeichen sprechen dafür, daß wir das Ende dieser Mathematisierung der Atomtheorie und der Physik überhaupt noch lange nicht erreicht haben. Man sagt uns, Partikelbild und Wellenbild seien zwei verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben physikalischen Realität. Aber was ist letztlich diese physikalische Realität?

Adolf Steichen S. J.