

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung**

**Graetz, Leo**

**Stuttgart, 1918**

Fünfter Vortrag

**urn:nbn:de:bsz:31-91571**

## Fünfter Vortrag.

### Die Linienspektren und das Bohrsche Atommodell.

Die Erzeugung und das Aussehen der Linienspektren. Analogie mit Schall-  
schwingungen nicht vorhanden. Das Balmer'sche Gesetz. Die Balmer'sche Serie  
im Wasserstoff. Die ultraroten Wasserstofflinien. Die Rydberg'sche Zahl. Serien-  
linien. Die Bohrsche Atomkonstruktion. Energiequantum und Wirkungsquantum.  
Das Bohrsche Atom gibt für den Wasserstoff genau die Balmer'schen Serienlinien  
und die Rydberg'sche Konstante. Das Heliumatom. Die komplizierteren Atome.  
Die Hochfrequenzspektren und das Moseley'sche Gesetz. Die Leistungen und die  
Schwierigkeiten des Bohrschen Atommodells.

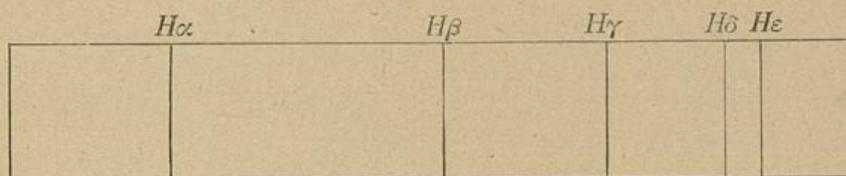
Die empfindlichste Methode, durch welche die Chemie vor der Ent-  
deckung der Radioaktivität die kleinsten Spuren von Stoffen erkennen  
konnte, und zugleich die Methode, durch welche es ihr gelang, eine ganze  
Anzahl neuer Elemente zu entdecken, ist bekanntlich die Spektro-  
analyse. Sie beruht darauf, daß man das Licht, welches glühende  
Dämpfe oder leuchtende Gase aussenden, durch einen Spalt und ein  
Prisma gehen läßt und es dadurch zu einem Spektrum ausbreitet. Dann  
erscheint nicht, wie bei einem weißglühenden festen Körper, ein aus-  
gedehntes Band, welches alle Farben von Rot bis Violett lückenlos an-  
einandergereiht enthält, nicht ein vollständiges Spektrum, sondern es  
erscheinen nur einige oder mehrere, zuweilen viele getrennte farbige  
Linien. Man erhält ein sogenanntes Linienspektrum.

Die Linien, welche dabei auftreten, sind so charakteristisch für die  
chemischen Elemente, welche in dem leuchtenden Dampf vorhanden sind,  
daß man aus dem Auftreten bestimmter Linien umgekehrt das Vorhanden-  
sein des betreffenden Elements konstatieren kann. Statt eines Prismas  
zur Erzeugung und Untersuchung des Spektrums verwendet man bei den  
genauesten Untersuchungen ein Beugungsgitter, am besten ein  
Rowland'sches Gitter, welches aus einer Fläche von Spiegelmetall be-  
steht, in welche pro Millimeter 1700 feine Striche in gleichen Abständen  
eingeritzt sind. Läßt man das Licht eines leuchtenden Dampfes oder  
eines leuchtenden Gases durch einen Spalt gehen und auf ein solches  
Gitter fallen, so erhält man im reflektierten Licht zu beiden Seiten des  
direkten Spaltbildes die Beugungsspektren, und zwar ein erstes, zweites,  
drittes Spektrum in zunehmend größerem Winkelabstand von dem direkten  
Spaltbild. Aus dem genau zu messenden Winkelabstand, welchen eine  
Linie in einem dieser Beugungsspektren von dem mittleren Spaltbild be-  
sitzt, und aus der Zahl der Gitterstriche pro Millimeter auf dem Gitter  
kann man — und das ist die Hauptmethode für diese Messungen — mit  
großer Genauigkeit die Wellenlänge der betreffenden farbigen Linie messen.  
Die Wellenlängen aller Farben sind sehr kleine Größen. Sie werden

im folgenden immer in Ångström-Einheiten (A.E.) ausgedrückt werden, welche, wie oben (S. 47) ausgeführt, gleich dem zehnmillionsten Teil eines Millimeters, also gleich  $10^{-8}$  cm, ist.

Unter den Linien, die ein leuchtendes Gas zeigt, zeichnen sich immer einzelne durch besondere Helligkeit und Schärfe aus. Diese werden gewöhnlich als die Linien des betreffenden Elementes angesehen. Aber eine genauere Untersuchung mit einem leistungsfähigen Beugungsgitter (einem Gitter mit großer Dispersion) zeigt dann noch eine sehr große Zahl anderer, schwächerer Linien, sie zeigt auch oft, daß einzelne Linien, die

Fig. 23.

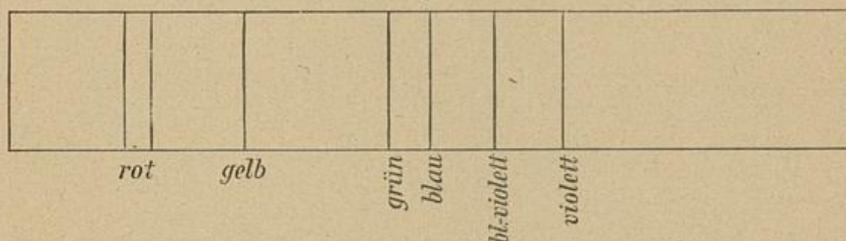


Wasserstoffspektrum.

man zuvor für einfache Linien gehalten hat, aus zwei oder mehr sehr eng beieinanderstehenden Linien bestehen. Das Aussehen des Spektrums hängt auch wesentlich ab von der Temperatur des glühenden Dampfes oder von der Art, wie die Gase durch elektrische Anregung in Geißler-Röhren zum Leuchten gebracht werden.

Das sichtbare Spektrum, das sich von Rot (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 7600 A.E.) bis zu Violett (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 3800 A.E.) erstreckt, hat aber bekanntlich zu beiden Seiten noch Fortsetzungen, die zwar für unser Auge direkt unerkennbar sind, die aber

Fig. 24.



Heliumspektrum.

durch physikalische Hilfsmittel ebenso genau untersucht werden können wie das sichtbare Spektrum. Die Fortsetzung jenseits des Roten nennt man das Ultrarot. Die Linien, die in diesem auftreten und die man durch ihre erwärmende Wirkung auf geeignete Apparate feststellen kann, haben also größere Wellenlänge als 7600 A.E. Man kann sie leicht bis 10 000 A.E. verfolgen, aber durch genügend feine Apparate noch außerordentlich viel weiter, sogar bis zu  $\frac{1}{3}$  mm. Den unsichtbaren Teil des Spektrums jenseits des violetten Endes, das Ultraviolett, in welchem bei den meisten Substanzen sehr viele Linien liegen, untersucht man leicht durch Photographie. Die ultravioletten Strahlen wirken nämlich noch weit

hinaus auf die photographische Platte. Auf diese Weise kann man leicht bis zu einer Wellenlänge von 1800 A.E. herunter noch Linien finden und durch geeignete Apparate sogar noch bis zu der Wellenlänge von 1000 A.E.

Als ein Beispiel für die Linienspektra ist zunächst in Fig. 23 das Spektrum der Hauptlinien des Wasserstoffs gegeben, wie man sie leicht beobachtet, wenn man eine mit Wasserstoff gefüllte Geißlersche Röhre (Spektralröhre) mit einem Spektroskop (Spalt und Prisma) beobachtet. Die fünf Linien, die der Wasserstoff so zeigt, werden bezeichnet als  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$ ,  $H\epsilon$  und sie haben folgende Wellenlängen:

	Farbe	Wellenlänge in A.E.
$H\alpha$	rot	6563
$H\beta$	grün	4861
$H\gamma$	dunkelblau	4341
$H\delta$	violett	4102
$H\epsilon$	violett	3970

Ein zweites Beispiel bildet das Spektrum der Hauptlinien des Heliums in Fig. 24. Man sieht in diesem sieben helle Linien, welche folgende Farben und Wellenlängen besitzen:

Farbe	Wellenlänge in A.E.
rot	7065
rot	6678
gelb	5876
grün	5016
blau	4923
violett	4713
violett	4471

In derselben Weise zeigen nun die verschiedensten Elemente eine mehr oder minder große Anzahl von Linien in ihrem Spektrum. Verhältnismäßig einfach sind noch die Linienspektra der Alkalien, also der Gruppe Ia des periodischen Systems, wenig komplizierter die der Erdalkalien (Gruppe IIa des periodischen Systems), aber bei den weiteren Elementen sind die Spektra außerordentlich reich an Linien.

Da die Spektra für jedes Element eine besondere Zusammensetzung haben, so hängen sie offenbar ab von den A t o m e n, und da jede Linie ja einer bestimmten Schwingungszahl entspricht, so zeigen sie an, daß innerhalb der Atome bestimmte periodische Bewegungen vor sich gehen. Schon aus dem Vorhandensein der Spektra konnte man also bereits lange schließen, und hat es auch getan, daß die Atome nicht einfach von Masse erfüllte Räume sind, sondern daß sie aus Teilen bestehen, welche periodische Bewegungen verschiedener Art ausführen können.

Wenn man sich zunächst von den bekannten Erscheinungen beim Schall als Analogie leiten lassen möchte, bei dem ja auch jeder Körper sehr verschiedene Schwingungen ausführen kann, so erkennt man doch bald, daß diese Analogie hier zu keinem Resultat führt. Wenn eine Luft-

säule in einer Pfeife zum Schwingen gebracht wird, oder wenn eine gespannte Klaviersaite oder Violinsaite schwingt, so findet man zwar auch, daß die Luftsäule, die Saite, nicht bloß eine Schwingung von einer einzigen bestimmten Schwingungszahl ausführt, sondern daß sie gleichzeitig in verschiedenfache Schwingungen von sehr verschiedenartigen Schwingungszahlen gerät. Eine solche Luftsäule oder eine solche Saite gibt nicht einen einfachen Ton, sondern sie gibt einen Klang, worunter man in der Akustik eine Kombination verschiedener einfacher Töne versteht. Wenn man aber einen solchen Klang analysiert, die Einzeltöne aufsucht, aus denen der Klang sich zusammensetzt — und man kann das nach dem Vorgang von Helmholtz leicht machen —, so findet man vielfach folgendes. Unter allen diesen Tönen hat einer die kleinste Schwingungszahl. Man nennt ihn den Grundton des Klanges. Er hat auch gewöhnlich die größte Stärke und bestimmt die musikalische Höhe des Klanges. Alle anderen Töne, die in dem Klang enthalten sind, haben nun immer Schwingungszahlen, die zu der Schwingungszahl des Grundtones in einem einfachen Verhältnis stehen. Bezeichnet man nämlich die Schwingungszahl des Grundtones als 1, so haben die anderen Töne des Klanges irgendwelche Schwingungszahlen der Reihe

2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 . . . . .

Ihre Schwingungszahlen sind also ganzahlige Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones. Man bezeichnet diese Reihe von Tönen, die zu einem Grundton gehören, als seine Obertöne. Es können in einem Klang sämtliche Obertöne vorhanden sein — von verschiedener Stärke — oder es können bloß die geradzahligem, oder bloß die ungeradzahligem vorhanden sein, oder es können einige aus der Reihe hintereinander fehlen usf., kurz, die Kombination der Obertöne mit dem Grundton kann eine sehr verschiedene sein — darauf beruht die Verschiedenartigkeit der Klangfarbe, welche verschiedene Instrumente bei dem gleichen Grundton zeigen — aber, und darauf kommt es uns hier an, die Obertöne haben immer Schwingungszahlen, die ganze Vielfache des Grundtones sind. Daraus folgt, daß, von dem Grundton an gerechnet, in der ersten Oktave kein Oberton ist, in der zweiten Oktave sind zwei vorhanden (2, 3), in der dritten Oktave vier (4, 5, 6, 7), in der vierten acht (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) usf. Die Differenz der Schwingungszahlen der aufeinanderfolgenden Töne in jeder Oktave ist immer die gleiche.

Wenn das bei den Schwingungen, die zu den Linienspektra Veranlassung geben, auch der Fall wäre, so müßten die einzelnen Linien eines Beugungsspektrums alle voneinander den gleichen Abstand haben, wobei allerdings auch einige in der Reihe fehlen könnten. Aber das ist durchaus nicht der Fall, die Analogie mit den Schallschwingungen führt bei der Untersuchung der Linienspektra zu keinem Resultat.

Eine Regelmäßigkeit in der Anordnung der Linien eines Spektrums wurde zum erstenmal beim Wasserstoff entdeckt, und zwar auf rein empirischem Wege, durch einfaches Probieren. Es war ein Schweizer, Balmer, welcher hier eine äußerst merkwürdige Regelmäßigkeit erkannte.

Die oben angeführten Wellenlängen der fünf Wasserstofflinien  $H\alpha$  bis  $H\epsilon$  lassen sich nämlich durch folgende Reihe darstellen:

Bezeichnung	Wellenlänge beobachtet	Darstellung durch	Wellenlänge berechnet
H $\alpha$	6563	$3646,13 \times \frac{9}{9-4}$	6563
H $\beta$	4861	$3646,13 \times \frac{16}{16-4}$	4861
H $\gamma$	4341	$3646,13 \times \frac{25}{25-4}$	4341
H $\delta$	4102	$3646,13 \times \frac{36}{36-4}$	4102
H $\epsilon$	3970	$3646,13 \times \frac{49}{49-4}$	3970

Der Faktor, mit dem die Zahl 3646,13 multipliziert werden muß, um die beobachteten Werte zu ergeben, hat also für die aufeinanderfolgenden Linien die Größen

$$\frac{3^2}{3^2 - 2^2}, \frac{4^2}{4^2 - 2^2}, \frac{5^2}{5^2 - 2^2}, \frac{6^2}{6^2 - 2^2}, \frac{7^2}{7^2 - 2^2}.$$

Dieses merkwürdige Gesetz zeigte sich nun nicht bloß bei den fünf in sichtbarem Spektrum vorhandenen Wasserstofflinien bestätigt. Vielmehr hat man noch im Ultravioletten eine Reihe weiterer Wasserstofflinien entdeckt, zum Teil direkt in Geißleröhren, zum Teil in dem Spektrum der Protuberanzen. Und alle diese weiteren 24 Linien konnten durch dasselbe Gesetz dargestellt werden, indem der Reihe nach die Zähler die Werte 8<sup>2</sup>, 9<sup>2</sup> . . . bis 31<sup>2</sup>, die Nenner die Werte 8<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup>, 9<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup> usf. bis 31<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup> erhielten. Wenn unter m eine der Zahlen von 3 bis 31 verstanden wird, so ist die Wellenlänge  $\lambda$  der zugehörigen Wasserstofflinie (in A.E.) bestimmt durch

$$\lambda = 3646,13 \cdot \frac{m^2}{m^2 - 2^2}.$$

Diese höchst überraschende Formel nennt man die *Balmer'sche Formel*. Die 29 Linien des Wasserstoffs, die durch diese Formel umfaßt werden, faßt man zusammen als eine *Serie* des Wasserstoffs.

Es ist vorteilhafter, statt der Wellenlängen dieser Linien vielmehr die Schwingungszahlen einzuführen, wobei ja das Produkt aus Wellenlänge mal Schwingungszahl gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts, also gleich  $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec =  $3 \cdot 10^{18}$  A.E./sec ist.

Daher ist die Schwingungszahl =  $\frac{3 \cdot 10^{18}}{\text{Wellenlänge}}$  und folglich ist für die mte Linie des Wasserstoffs

$$\begin{aligned} \text{Schwingungszahl} &= \frac{3 \cdot 10^{18}}{3646,13} \left(1 - \frac{2^2}{m^2}\right), \\ &= \frac{3 \cdot 10^{18} \cdot 4}{3646,13} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right), \\ &= 3,290 \cdot 10^{15} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right). \end{aligned}$$

Die Schwingungszahlen aller dieser 29 Linien sind also durch dieses Gesetz dargestellt, wenn man die Zahl  $m$  der Reihe nach alle ganzen Zahlen von 3 bis 31 durchlaufen läßt.

Von großem Interesse ist, daß im Ultrarot zwei Linien des Wasserstoffs gefunden wurden, deren Schwingungszahlen sich ganz ähnlich darstellen ließen durch die Formel

$$3,290 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right) \text{ und } 3,290 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right).$$

Die entsprechenden Wellenlängen wurden beobachtet zu

$$18751 \cdot 10^{-8} \text{ und } 12818 \cdot 10^{-8}$$

und aus der obigen Formel berechnet zu

$$18752 \cdot 10^{-8} \text{ und } 12819 \cdot 10^{-8}.$$

Bei ihnen tritt also nicht die Differenz  $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}$  auf, sondern  $\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}$ , sie gehören nicht zu der ursprünglichen Balmer'schen Serie, aber sie bilden eine Serie mit einem ganz ähnlichen Gesetz.

Der Faktor  $3,290 \cdot 10^{15}$ , der hier zunächst nur beim Wasserstoffspektrum auftritt, hat, was zuerst von Rydberg erkannt wurde, eine allgemeine Bedeutung für alle Spektre. Man bezeichnet diesen Faktor als die Rydbergsche Konstante und drückt sie kurz durch den Buchstaben  $R$  aus.

Die ausgezeichnete Übereinstimmung der Balmer'schen Formel und der zuletzt erwähnten entsprechend gebauten mit den im Wasserstoffspektrum direkt gefundenen Linien zeigt an, daß es sich hier nicht um einen Zufall, sondern um eine wirkliche Gesetzmäßigkeit handelt. Man kann die Schwingungszahlen  $\nu$  der Wasserstofflinien (inklusive der ultraroten) darstellen durch die Formel

$$\text{Schwingungszahl} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

wo  $R$  die Rydbergsche Konstante  $3,290 \cdot 10^{15}$  ist und wo für  $m$  der Reihe nach die ganzen Zahlen 3, 4, 5 usw. einzusetzen sind, während  $n$  für die gewöhnlichen Wasserstofflinien den Wert 2, für die ultraroten Wasserstofflinien den Wert 3 hat und dabei  $m$  erst von 4 an beginnt. Alle Linien, die sich für ein bestimmtes  $n$  ergeben, wenn man  $m$  die aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen durchlaufen läßt, faßt man zusammen unter dem Begriff einer Serie und nennt sie Serienlinien.

Man hat natürlich bald versucht, das Balmer'sche Gesetz auch probeweise auf andere Spektre als das des Wasserstoffs anzuwenden. Es zeigt sich aber, daß ein so einfaches Gesetz bei ihnen nicht existiert, ein so einfaches Gesetz, in dem bloß die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen vorkommen. Wohl aber zeigte sich, daß auch in diesen Spektren eine ganze Anzahl von Linien zusammengehören, daß sie auch dadurch zusammengefaßt werden können, daß man eine Zahl  $m$

alle ganzen Zahlen durchlaufen läßt, nur daß die Zahl  $m$  nicht wie bei Balmer im Quadrat, sondern in einer anderen Kombination vorkam. Alle solche zusammengehörigen Linien eines Spektrums faßt man unter dem Begriff einer Serie zusammen, und solche Serien haben sich bei vielen anderen Spektren ergeben, und es hat sich dabei gezeigt, daß alle Linien, die zu einer und derselben Serie gehören, auch gleiches Aussehen haben. Man unterscheidet im allgemeinen mehrere verschiedene Serien in den Spektren von sehr vielen Substanzen. Die Linien einer Serie sind durchweg scharf begrenzt (und bestehen häufig aus je zwei oder drei eng nebeneinanderliegenden Linien), die einer anderen Serie sind nach dem roten Ende hin verwaschen, die einer dritten Serie sind nach dem violetten Ende hin verwaschen usw.

Es ist also eine Gesetzmäßigkeit in den Spektren des Wasserstoffs und vieler anderer Elemente aufgefunden worden, aber eine Gesetzmäßigkeit besonderer Art. Die Schwingungszahlen der verschiedenen Linien hängen von der aufeinanderfolgenden Reihe der ganzen Zahlen ab, aber sie sind nicht, wie die harmonischen Obertöne der Akustik, diesen ganzen Zahlen proportional, sondern sie enthalten diese ganzen Zahlen im Nenner, und zwar im einfachen Fall im Quadrat und sonst in noch komplizierterer Kombination. Wie soll man sich nun einen schwingenden Mechanismus, also einen Mechanismus mit periodischen Bewegungen, vorstellen, bei dem ein so merkwürdiger und absonderlicher Zusammenhang zwischen den möglichen Schwingungen vorhanden ist? Könnte man einen solchen Mechanismus ersinnen, so würde er die inneren Bewegungen eines Atoms darstellen. Viele Versuche sind in dieser Richtung von Mathematikern und Physikern gemacht worden, aber im ganzen ohne Erfolg.

Eine Ausbildung der Rutherford'schen Kerntheorie der Atome zu einer Theorie des ganzen Atoms erforderte also unbedingt, daß sie eine Darstellung gibt, durch welche Bewegungen im einfachsten Fall das Balmer'sche Gesetz und in anderen Fällen das Gesetz der Serienspektren zustande kommt. Dem dänischen Forscher Bohr ist es nun in den letzten Jahren gelungen, eine solche Ausbildung des Rutherford'schen Atoms zu ersinnen, die Bewegungen der Elektronen um den Kern in solcher Weise vorzunehmen, daß sie die eben genannten Forderungen völlig erfüllt. Diese Theorie zeigt trotz vieler Schwierigkeiten und Dunkelheiten, die sie noch in sich enthält, doch so viele unerwartete Übereinstimmung mit den Tatsachen, daß man als höchst wahrscheinlich annehmen darf, daß sie einen großen Teil Wahrheit enthält.

Um diese Theorie zu verstehen, muß aber zunächst von einer in der Physik der letzten fünfzehn Jahre aufgetretenen, noch unverstandenen Tatsache gesprochen werden. Man kann bekanntlich bei allen Vorgängen physikalischer und chemischer Natur stets das Gesetz bewahren, das zuerst von Helmholtz aufgestellt worden ist, daß bei ihnen Energie nicht geschaffen und nicht zerstört wird, sondern daß bei ihnen sich immer nur Energie aus einer Form in die andere verwandelt. Unter Energie versteht man alles, was aus Arbeit entsteht oder was in Arbeit verwandelt werden kann. Die Energie kann sehr verschiedene

Formen annehmen, sie kann kinetische Energie (lebendige Kraft), potentielle Energie, Wärmeenergie, elektrische Energie, chemische Energie, Lichtenergie sein, alles physikalische und chemische Geschehen ist immer mit einer Umwandlung der Energie aus einer Form in eine andere Form verbunden. Dabei stellen wir uns die Energie als etwas vor, das sich *s t e t i g* ändern kann, das also um die kleinsten Beträge zunehmen oder abnehmen kann. Bei allen Energieverwandlungen, mit denen wir es gewöhnlich zu tun haben, findet eine solche stetige Umwandlung der Energie statt. Wenn z. B. fließendes Wasser eine Turbine treibt und diese Turbine eine Dynamomaschine in Bewegung setzt, von welcher ein elektrischer Strom geliefert wird, der die Glühlampen eines Ortes speist, so setzt sich die kinetische Energie des Wassers um in die Arbeit, die sie an der Turbine leistet; diese Arbeit setzt sich dann in Bewegungsenergie der Turbine und Dynamomaschine um, diese verwandelt sich in die Energie elektrischer Ströme und diese endlich in Wärmeenergie und Lichtenergie. Eine noch so kleine Menge des fließenden Wassers, eine noch so kleine Arbeit, die dieses leistet, setzt sich schließlich in einen entsprechenden Betrag von Wärme- und Lichtenergie um. Wir drücken das so aus, daß wir sagen, die Energie kann sich *s t e t i g* verändern, es gibt keine sprungweise Änderung der Energie des fließenden Wassers, ebensowenig wie der Energie der elektrischen Ströme und des Lichtes.

Diese Vorstellung und Aussage aber war bloß solange richtig, als wir es mit den groben Erscheinungen zu tun hatten, die die Körper im ganzen uns zeigen. Seitdem in den letzten Jahrzehnten die Physik so weit vorgedrungen ist, daß sie das Verhalten der einzelnen Atome und Elektronen studieren konnte, zeigte es sich, daß diese Vorstellung nicht mehr richtig ist. Die Energie, welche von den einzelnen Atomen in Form von Schwingungen ausgehen wird, verhält sich nicht stetig, nicht gleichmäßig, sondern sie verändert sich *d i r e k t s p r u n g w e i s e* oder, wie man es jetzt nennt, *q u a n t e n h a f t*. Ein Atom kann einen gewissen kleinsten Betrag von Energie als schwingende, strahlende Energie ausgeben, ein *E n e r g i e q u a n t u m*, oder zwei oder drei usw. solcher Energiequanten, aber es kann nicht  $\frac{3}{4}$  oder  $1\frac{1}{2}$  oder  $2\frac{1}{4}$  Energiequanten oder überhaupt irgendeinen Zwischenbetrag zwischen 1 und 2 solcher Quanten ausgeben. Diese Einsicht hat die Physik zuerst durch die Untersuchung der Ausstrahlung eines schwarzen Körpers gewonnen, und sie hat sich dann auch in anderen Fällen als berechtigt gezeigt, wo die Schwingungen, die periodischen Bewegungen von Atomen in Frage kommen, insbesondere bei der Theorie der spezifischen Wärme. Diese Energiequanten sind aber nicht für jede Art von Schwingung gleich groß, vielmehr sind sie um so größer, je größer die Schwingungszahl ist. Das Verhältnis zwischen der Größe eines solchen Energiequantums eines schwingenden Atoms und der Schwingungszahl desselben ist eine konstante Größe, die eine ganz besonders wichtige Rolle in der Untersuchung der Atomvorgänge noch spielen wird, und die man die *Plancksche Konstante* oder das *Wirkungsquantum* nennt. Dieses Wirkungsquantum hat im absoluten Maß (cm, g, sec) den Wert  $6,5 \cdot 10^{-27}$ . Daraus ergibt sich, daß das Energiequantum für periodische Bewegungen verschiedener Art Werte besitzt, die in folgender Tabelle angegeben sind:

Art der Schwingung	Rot	Violett	Äußerstes Ultraviolett	Röntgenstrahlen
Wellenlänge . . . . .	$7600 \cdot 10^{-8}$	$3800 \cdot 10^{-8}$	$1000 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$ cm
Schwingungszahl . . . .	$0,04 \cdot 10^{16}$	$0,08 \cdot 10^{16}$	$0,3 \cdot 10^{16}$	$300 \cdot 10^{16}$
Energiequantum . . . .	$0,26 \cdot 10^{-11}$	$0,52 \cdot 10^{-11}$	$1,95 \cdot 10^{-11}$	$1950 \cdot 10^{-11}$ Erg.

Eine bestimmte Vorstellung, was dieses Wirkungsquantum bedeutet, oder was die spezielle Ursache ist, daß die Atome schwingende Energie nur in einzelnen Quanten ausgeben (und vielleicht auch aufnehmen), besitzen wir heute noch nicht. Das Auftreten dieser Quanten bei atomistischen Schwingungsvorgängen ist eine aus experimentellen Beobachtungen erschlossene Tatsache, mit der man stets bei solchen Vorgängen rechnen muß, aber ihre anschauliche nähere Erklärung fehlt uns noch.

In der Atomtheorie von Bohr spielen daher auch diese Energiequanten eine wichtige Rolle, diese Theorie ist ein weiterer Ausbau der Rutherford'schen Kerntheorie mit Zuhilfenahme des Wirkungsquantums. Ein Atom entspricht nach der Bohrschen Theorie einem ganzen Sonnensystem. Jedes Atom besitzt einen positiv elektrischen Kern von sehr kleinen Dimensionen, einen Kern, der soviel freie positive Elementarladungen besitzt, als die Ordnungszahl des betreffenden Elementes beträgt. Um diesen positiven Kern nun bewegen sich die negativen Elektronen in Kreisen (oder allgemeiner in Ellipsen) ganz ebenso, wie sich die Planeten um die Sonne bewegen. Die Kraft, die jedes Elektron zwingt, auf dem Kreise zu bleiben, die Zentripetalkraft, ist die einfache Coulombsche Anziehungskraft zwischen der positiven Ladung des Kerns und der negativen Ladung des Elektrons. Bei Anwesenheit noch anderer negativer Elektronen, als der gerade betrachteten, ist diese Anziehungskraft vermindert durch die Abstoßungskräfte der übrigen vorhandenen negativen Elektronen. Unter dem Einfluß dieser Anziehungskraft und einer ursprünglichen Geschwindigkeit (die das Elektron etwa durch einen Stoß von anderen Elektronen erhalten hat) bleibt das Elektron auf seinem Kreise (oder seiner Ellipse), so wie der Mond auf einem Kreise um die Erde bleibt oder die Erde auf einer Ellipse um die Sonne bleibt. Die Zentrifugalkraft des bewegten Elektrons ist immer gleich der Zentripetalkraft, die der Kern (und etwaige andere Elektronen) auf dasselbe ausübt.

Während aber die Planeten, die um die Sonne kreisen, ganz verschiedene Abstände von der Sonne haben und in ihrer Bahn ganz verschiedene Geschwindigkeiten besitzen, wobei die Abstände ganz beliebige sind und keinem Gesetz unterliegen, ist das bei den Elektronen, die um den Kern kreisen, nicht der Fall, und zwar wegen des Wirkungsquantums. Vielmehr können sie nur in ganz bestimmten Abständen, die durch ganze Zahlen charakterisiert sind, in Kreisbewegungen um den Kern begriffen sein und ihre Geschwindigkeiten müssen in diesen Bahnen ganz bestimmte sein. Eine rechnerische Durchführung zeigt, daß die Radien der möglichen Kreisbahnen (wenn wir der

Einfachheit halber von den elliptischen Bahnen absehen und nur Kreisbahnen ins Auge fassen) sich wegen des Wirkungsquantums zueinander verhalten müssen wie die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen, also wie  $1 : 4 : 9 : 16 : 25 : 36$  usw., und daß die Geschwindigkeit eines Elektrons, das sich in einer dieser Bahnen bewegt, immer kleiner wird, je weiter die Bahn vom Kern absteht, so daß sich die Geschwindigkeiten auf diesen Bahnen zueinander verhalten wie  $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4} : \frac{1}{5} : \frac{1}{6}$  usw.

Nehmen wir den einfachsten Fall, den des Wasserstoffatoms, bei dem nur ein positiver Kern mit der Einheit der Ladung und nur ein negatives Elektron mit derselben (negativen) Ladung vorhanden ist. Wenn das Elektron sich auf einem Kreis von unbekanntem Radius mit unbekannter Geschwindigkeit bewegt, so bestehen zwischen diesen beiden unbekanntem Größen, dem Radius und der Geschwindigkeit, zwei Gleichungen. Erstens nämlich muß die Coulombsche Attraktionskraft gleich der Zentrifugalkraft sein und zweitens muß die lebendige Kraft des Elektrons gleich einem ganzzahligen Vielfachen des Wirkungsquantums (der Planckschen Konstanten) sein, dividiert durch die Zeit eines (halben) Umlaufs. Aus diesen beiden Beziehungen läßt sich sowohl der Radius der Bahn wie die Geschwindigkeit ermitteln, wenn gegeben sind die beiden Ladungen (des Kerns und des Elektrons), die Masse des Elektrons und die Plancksche Konstante. Je nach dem ganzzahligen Vielfachen des Wirkungsquantums bewegt sich ein Elektron, wie man jetzt sagt, auf einer einquantigen Bahn, oder einer zweiquantigen, dreiquantigen usw. So ergibt sich, daß der innerste Kreis, die einquantige Bahn, den Radius besitzt  $0,55 \cdot 10^{-8}$  cm, der zweite also  $2,20 \cdot 10^{-8}$  cm, der dritte  $4,25 \cdot 10^{-8}$  cm, der vierte  $8,80 \cdot 10^{-8}$  usw., Radien, deren erste Werte vergleichbar sind mit den Radien des Wasserstoffatoms ( $1 \cdot 10^{-8}$  cm nach S. 9).

Um ein Elektron von dem Kern ganz loszulösen, es also in unendlich große Entfernung von dem Kern zu bringen, muß man Arbeit aufwenden, also dem System zuführen, und zwar ist die dazu notwendige Arbeit um so größer, je näher das Elektron am Kerne ist, je kleiner also der Radius der Bahn ist. Für die verschiedenen aufeinanderfolgenden Bahnen nimmt also diese Arbeit ab wie  $\frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2}$  usw.

Wir stellen uns nun vor, daß wir einen Kubikzentimeter Wasserstoff haben; in diesem sind Trillionen von Kernen und Trillionen von Elektronen vorhanden. Von den Kernen und den Elektronen wollen wir annehmen, daß sie in unregelmäßiger Wärmebewegung begriffen sind. Dann wird irgendein Elektron durch einen Stoß, den es erhält, nur hier und da einmal in eine von den möglichen Bahnen in der Nähe eines Kerns kommen und wird in dieser Bahn rotieren. Durch einen anderen Stoß wird es einmal aus dieser Bahn herausgeschleudert werden und in kleineren oder größeren Abstand von dem Kern kommen und wird dann also eine Kreisbahn von kleinerem oder größerem Abstand beschreiben. Wenn es nun dabei von einer entfernteren Bahn zu einer näheren Bahn kommt, so muß es dabei Energie abgeben, und diese abgegebene Energie kann nach der Quantentheorie nur ein Energieelement sein. Diesem abgegebenen Energieelement entspricht, je nach seiner Größe, eine bestimmte Schwin-

gungszahl und diese Schwingungszahl bestimmt die Farbe des bei diesem Vorgang ausgestrahlten Lichts. Man sieht, daß wenn ein solches Elektron aus dem dritten Kreis auf den zweiten übergeht, daß dann die ausgestrahlte Schwingungszahl proportional ist

$$\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}$$

und wenn es aus dem vierten Kreis in den zweiten gestoßen wird, so ist sie proportional

$$\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}$$

usw. Es treten also gerade diejenigen Faktoren auf, die in der Balmerischen Formel für den Wasserstoff vorkommen. Ja noch mehr, die Proportionalitätskonstante, die sich aus der Ladung des Kerns und des Elektrons, der (scheinbaren) Masse des Elektrons und der Planckschen Konstante zusammensetzt, erweist sich bei Durchführung der Rechnung genau gleich der Rydbergschen Konstante  $R$ . Wenn also ein Elektron aus dem  $m$ -ten Kreis auf den zweiten fliegt, so entsteht eine Schwingung, deren Schwingungszahl  $\nu$  gleich ist

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

genau diejenige Schwingungszahl, die der Balmerischen Serienformel für den Wasserstoff entspricht.

Das ist offenbar eine ganz hervorragende Leistung, die dieser ganzen Vorstellung erst nachträglich die Berechtigung gibt.

Unter den Trillionen von Kernen und Elektronen, die in einem Kubikzentimeter Wasserstoff vorhanden sind, werden alle möglichen Fälle der Bewegung sehr oft vorkommen. Es werden viele tausend Male Elektronen von der dritten Bahn nach der zweiten gestoßen werden, andere Tausende werden von der vierten oder fünften Bahn nach der zweiten gestoßen werden. Das Resultat des gleichzeitigen oder aufeinanderfolgenden Zutreffens solcher Bewegungen sehen wir als die Spektrallinien, die der Wasserstoff ausstrahlt.

Man muß dabei zunächst aber fragen, warum werden diese Elektronen nur nach der zweiten Bahn geworfen, warum ist diese Bahn bevorzugt? Warum sieht man nicht auch die Spektrallinien, die entstehen, wenn ein Elektron von dem dritten oder vierten Kreis nach dem ersten geworfen wird, oder wenn es von dem vierten oder fünften Kreis nach dem dritten geworfen wird? Die Antwort darauf lautet einfach, daß natürlich solche Fälle auch ebenso oft vorkommen müssen, wie ein Übergang zur zweiten Bahn, daß aber die so entstehenden Spektrallinien nicht in das sichtbare Gebiet fallen würden, das ja nur von 7600 bis 3800 A.E. reicht.

In der Tat hat ja die Rydbergsche Konstante den Wert  $3,290 \cdot 10^{15}$ , und die Differenzen, die bei dem Übergang aus einer weiteren Bahn in die erste auftreten würden, sind

$$\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{5^2},$$

Sie haben also die Werte

$$\frac{3}{4}, \frac{8}{9}, \frac{15}{16}, \frac{24}{25}$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$$2,4675 \cdot 10^{15} \quad 2,9244 \cdot 10^{15} \quad 3,0844 \cdot 10^{15} \quad 3,1584 \cdot 10^{15}$$

Die zugehörigen Wellenlängen sind

$$1216 \text{ A.E.} \quad 1026 \text{ A.E.} \quad 973 \text{ A.E.} \quad 950 \text{ A.E.}$$

Diese Wellen fallen also in das äußerste ultraviolette Gebiet, das sehr schwer zu beobachten ist, schon deswegen, weil diese kurzwelligen Strahlen schon von der Luft sehr stark absorbiert werden. Sie sind bisher nicht beobachtet worden.

Anderseits haben die Differenzen, die beim Übergang aus einer weiteren Bahn in die dritte auftreten würden, nämlich

$$\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{7^2}$$

die Werte

$$\frac{7}{144} \quad \frac{16}{225} \quad \frac{1}{12} \quad \frac{40}{441}$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$$0,1599 \cdot 10^{15} \quad 0,2339 \cdot 10^{15} \quad 0,2742 \cdot 10^{15} \quad 0,2984 \cdot 10^{15}$$

Die zugehörigen Wellenlängen sind

$$18\,752 \text{ A.E.} \quad 12\,819 \text{ A.E.} \quad 10\,941 \text{ A.E.} \quad 10\,053 \text{ A.E.}$$

Diese fallen also in das Ultrarot, sind also nur durch besondere Hilfsmittel erkennbar. Die ersten beiden Linien dieser Reihe sind, wie oben S. 68 angeführt, in der Tat beobachtet worden.

Die Differenz  $\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2}$  und die entsprechenden für den Übergang bis zum vierten Kreis geben noch viel weiter im Ultrarot liegende Linien. Die erste hätte eine Wellenlänge von 40527 A.E. Im sichtbaren Spektrum liegen also bloß diejenigen Linien, die bei einem Übergang aus einem entfernteren Kreis auf den zweiten entstehen. Und solche Übergänge sind nach der Balmerschen Formel und ihren Bestätigungen sogar für den 33. Kreis noch zu beobachten. Dabei ist aber ganz allgemein zu bemerken, daß die Bewegung von Elektronen in den weiteren Abständen vom Kern, also etwa in dem 10., 15. Kreis, nur unter besonderen Bedingungen vorkommen kann. Diese Abstände sind schon so groß, daß sie bei der gewöhnlichen Dichtigkeit der Gase, wie sie in den Geißleröhren vorkommen, größer sind wie der durchschnittliche Abstand zweier Kerne. In der Tat hat der fünfzehnte Kreis nach S. 72 einen Durchmesser von  $1,6 \cdot 10^{-6}$  cm. Bei normalem Druck ist aber der mittlere Abstand zweier Moleküle nach S. 10 etwa  $3,5 \cdot 10^{-7}$  cm. Bei der Verdünnung bis auf 1–2 mm Druck, wie er in den Spektralröhren herrscht, wird der Abstand also etwa  $\sqrt[3]{760}$ mal so groß sein, d. h.  $3 \cdot 10^{-6}$  cm, mithin von derselben

Größe wie der fünfzehnte Kreis. Ein Elektron, das in größerem Abstand von einem Kern sich befindet, wird daher nicht um diesen, sondern um den benachbarten Kern seine Kreisbewegung ausführen. Daraus ist zu folgern, daß man in Geißleröhren das ultraviolette Spektrum des Wasserstoffs nur bis zur zwölften Linie der Balmerischen Serie verfolgen kann, und das ist tatsächlich der Fall. Die weiteren Linien bis Nr. 33 hat man tatsächlich nicht in Geißleröhren, sondern bloß in dem Spektrum der Himmelsnebel beobachtet, bei denen die Dichtigkeit des Gases als äußerst gering anzusehen ist, während doch zugleich infolge ihrer großen Ausdehnung die Intensität der Linien groß wird. Das entspricht genau demjenigen, was aus der Bohrschen Vorstellung zu erwarten ist.

Bei normalem Druck hat ein Wasserstoffmolekül einen Raum für sich, dessen halbe Seitenlänge  $16,5 \cdot 10^{-8}$  cm ist. In diesen Raum würden also nur die Kreise 1 bis 5, deren letzter einen Radius von  $13,7 \cdot 10^{-8}$  cm besitzt, hineingehen. Der fünfte Kreis entspricht der Wasserstofflinie  $H\gamma$ . Man muß also erwarten, daß Wasserstoff bei normalem Druck nur die Linien  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$  zeigt.

Um für die Größenverhältnisse, die bei dem so gestalteten Wasserstoffatom vorhanden sind, eine Anschauung zu bekommen, denken wir uns wieder das Wasserstoffatom vom Radius  $1 \cdot 10^{-8}$  cm vergrößert, bis es den Raum der ganzen Erde einnimmt, also einen Radius von 6350 km besitzt. Dann hat der Kern einen Radius von 6,5 cm, entspricht also der Größe eines Kinderballs. Das Elektron hat einen Radius von 127 m, entspricht also der Größe einer Kirche oder Kaserne. Diese Kaserne rotiert also um den Kinderball, und zwar ist der kleinste Abstand, den das Elektron von dem Kern besitzt (auf dem Kreise 1),  $0,556 \cdot 10^{-8}$  cm, entspricht also dem halben Erdradius, also einem Abstand von 3200 km. Die weiteren Kreise haben den doppelten, viereinhalbfachen Erdradius. Man sieht, daß in dem ganzen Atom nur sehr wenig Raum wirklich von (elektrischer) Materie eingenommen ist, daß der größte Teil des Atomes leer ist.

Andererseits aber erkennt man, daß ein Atom überhaupt kein bestimmtes Volumen besitzt, sondern daß sein Volumen sehr verschieden ist, je nach der Verdünnung des Gases. In den sehr dünnen Himmelsnebeln hat ein Atom einen Radius, der etwa 1000mal so groß ist, wie der Abstand des innersten Ringes. Denn noch in diesem Abstand wirkt dort der Kern auf das Elektron.

Im stabilsten Fall zirkuliert das Elektron auf dem Kreise 1, auf dem dem Kern am meisten benachbarten Kreise. In diesem Falle wäre der Radius des Atoms nur etwa die Hälfte desjenigen, der sich aus der Gastheorie berechnet.

So einfach wie das Wasserstoffatom ist natürlich kein anderes gebaut. Das nächst einfache ist das Heliumatom, dessen Kern zwei positive Ladungen besitzt und das deshalb auch zwei äußere Elektronen enthalten muß. Hier sind nun schon für die Anordnung der Elektronen mehrere Möglichkeiten vorhanden. Es könnte jedes dieser Elektronen auf einer besonderen Bahn rotieren, oder sie könnten beide auf derselben Bahn — aus Symmetriegründen im Abstand eines Halbkreises — rotieren. Wir werden diese Möglichkeiten im folgenden Kapitel besprechen und sehen, daß nur

die zweite zutreffen kann. Die Schwingungszahlen, welche sich durch die Bewegung eines dieser Elektronen aus einem äußeren Kreis in einen inneren Kreis ergeben, befolgen genau dasselbe Gesetz wie die Balmer'schen Wasserstoffschwingungen, nur daß, weil der Kern hier zwei Einheiten besitzt, nicht die ganzen Zahlen selbst im Nenner als Quadrat vorkommen, sondern ihre Hälften. Es ist auch tatsächlich eine Serie von Heliumlinien beobachtet worden, die diesem Gesetz entspricht. Zu ihr aber gehören nicht die oben S. 65 angeführten Hauptlinien des Heliums. Die Rydbergsche Konstante tritt auch beim Helium auf. Eine vollkommene Durchführung aber aller möglichen Schwingungen, wie beim Wasserstoffatom, ist beim Heliumatom noch nicht möglich gewesen. Insbesondere ist, wie gesagt, das Auftreten der Hauptlinien im sichtbaren Spektrum noch nicht erklärt.

Für alle weiteren Spektren, namentlich die der Alkalien und der Erden, hat man nun rein empirisch auch Serien und zwar Serien verschiedener Art gefunden, die alle durch das Fortschreiten einer Größe nach ganzen Zahlen charakterisiert sind. Bei allen diesen Serien hat sich die Rydbergsche Konstante, wenigstens in großer Annäherung, immer wieder bei der Berechnung der experimentellen Ergebnisse ergeben. Sie ist also eine fundamentale Konstante, welche bei allen Serienschwingungen auftritt. Auch nach der Bohrschen Theorie muß in vielen Fällen immer wieder die Rydbergsche Konstante auftreten. Denn wenn auch der Kern aus vielen Einheiten zusammengesetzt ist und wenn ebensoviele Elektronen um den Kern herumfliegen, so muß doch im großen Abstand vom Kern, wo die Kräfte auf ein Elektron im wesentlichen auch von einer Elementarladung herrühren (nämlich der Ladung des Kerns, abzüglich der Ladung aller übrigen Elektronen), das Verhalten ganz dasselbe sein, wie bei der Bindung des Wasserstoffelektrons durch den Wasserstoffkern, d. h. es muß dabei auch die Rydbergsche Konstante auftreten.

Eine genaue Durchführung der Bohrschen Atomtheorie für diese komplizierten Fälle ist aber noch in keiner Weise geschehen.

Wenn der Übergang eines Elektrons aus einem entfernteren Kreis zu einem näheren mit der Emission einer Strahlung verbunden ist, so ist umgekehrt die Absorption von Strahlung mit dem Übergang eines Elektrons von einem inneren zu einem äußeren Kreis verbunden.

Bei einer Fortführung der Theorie von den einfachsten Fällen des Wasserstoffs und des Heliums mit ein oder zwei Elektronen zu den komplizierteren Fällen, in denen eine große Anzahl von Elektronen um den Kern herum sich bewegt, ergibt sich nun als eine plausible und durch manche Erfahrungen gestützte Annahme die, daß immer eine Anzahl von Elektronen auf einem und demselben Ring um den Kern herumfliegen, und zwar in gleichen Abständen voneinander. Es kann ein einzelner Ring oder es können mehrere aufeinanderfolgende Ringe so von Elektronen besetzt sein. Nicht in allen Fällen ist die Stabilität eines solchen Systemes gesichert. Nur diejenigen Anordnungen sind möglich, bei denen das System auch stabil beharren kann.

Die Ausstrahlung kann dabei nun entweder dadurch hervorgerufen werden, daß ein ganzer äußerer Ring sich in einen inneren einschleibt, mit ihm zusammenfließt — was nur dann zu stabilen Anordnungen führt,

wenn die beiden Ringe gleiche Anzahl von Elektronen führen — oder daß ein einzelnes Elektron aus einem äußeren Ring in einen inneren springt.

Die Ermittlung aller möglichen Schwingungen, die ein solches kompliziertes Atom ausführen kann, ist natürlich eine Aufgabe von großer Schwierigkeit und bisher noch in keinem Falle gelöst. Wohl aber läßt sich leicht zeigen, daß die sehr raschen Schwingungen eines solchen Atoms (die Hochfrequenzschwingungen) das Moseleysche Gesetz (S. 58) befolgen müssen.

Bei der Bestimmung der Schwingungszahlen kommt es ja immer auf die Differenzen der Energie in dem ersten und zweiten Zustand (in dem entfernteren und dem näheren Ring) an. Die Energie eines sich bewegenden Elektrons hängt aber von dem Quadrat seiner Ladung und von dem Quadrat derjenigen Ladung ab, welche auf das sich bewegende Elektron einwirkt. Die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl muß also proportional sein der Ladung des Elektrons (welche konstant ist) und der Ladung des einwirkenden Systems. Wenn nun bei einem komplizierten Atom um den inneren Kern, der eine  $N$ -fache Ladung besitzen möge, sich ein Ring von Elektronen befindet, so ist diejenige Ladung, welche auf ein innerhalb dieses Ringes liegendes Elektron wirkt, nicht mehr die  $N$ -fache Elementarladung, sondern kleiner, weil ja eben die anderen Elektronen des Ringes abstoßend, statt anziehend auf dasselbe wirken. Der Ring wirkt also so, als ob statt der  $N$ -fachen Ladung des Kernes nur eine verminderte, also  $(N-a)$ -fache in dem Kern vorhanden wäre, wobei die Zahl  $a$  in einfacher Weise von der Zahl der Elektronen auf dem Ring abhängt. Es ist z. B. bei zwei Elektronen im Ring  $a = 0,25$ , bei drei Elektronen  $a = 0,57735$ , bei vier Elektronen  $a = 0,9571$  usw. Daraus folgt aber, daß wenn ein Elektron von einem Ring zu einem anderen springt, die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl proportional ist  $N-a$ , wobei  $N$  die Ordnungszahl des betreffenden Atomes im periodischen System ist, da ja die Ladung des Kernes dieser Ordnungszahl proportional ist.

In diesem Satz haben wir aber das bei allen Röntgenspektren von Moseley gefundene Gesetz abgeleitet, daß die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl eine lineare Funktion der Ordnungszahl des betreffenden Elementes ist. Dieses merkwürdige Gesetz erklärt sich also ganz aus dem Bohrschen Atommodell.

Ja, man kann weiter, wenigstens einigermaßen, durch Vergleich der Beobachtungen über die Schwingungszahlen der  $K$ -Linien (zunächst der  $K\alpha_1$ -Linie) ermitteln, um welchen Ring es sich dabei handelt. Bohr hat auf diese Weise gefunden, daß die  $K\alpha_1$ -Linie dadurch entsteht, daß ein Elektron aus dem zweiten Ring in den ersten sich bewegt, wobei der erste Ring im stabilen Zustand aus vier Elektronen besteht. Ebenso entsteht die  $L\alpha_1$ -Linie durch Bewegung eines Elektrons aus dem dritten in den zweiten Ring. Das Auftreten der anderen Linien  $K\alpha_2$ ,  $K\beta$  usw. erklärt sich dadurch, daß die Elektronen nicht genaue Kreise, sondern auch Ellipsen beschreiben.

Diese speziellen Folgerungen sind übrigens durchaus nicht sicher. Man kann nach Debye das Auftreten der  $K\alpha_1$ -Linie auch dadurch erklären, daß im stabilen Zustand der innerste Ring bei allen Atomen (vom Natrium aufwärts) ein Ring mit drei Elektronen ist. Wenn durch

irgendeine Ursache eines von diesen drei Elektronen auf den zweiten Ring gelangt ist und dann wieder zurückfällt, so daß es die stabile Anordnung wiederherstellt, so entsteht die  $K\alpha_1$ -Linie und es entsteht entsprechend die  $K\beta_1$ -Linie, wenn dieses Elektron aus dem dritten Ring in den innersten zurückfällt. Der innerste Ring aller Atome vom Natrium an (weiter hat man die K-Linien nicht beobachtet) wäre danach im stabilen Zustand immer aus drei Elektronen gebildet.

Es ist nach dem Gesagten ganz zweifellos, daß das Bohrsche Atommodell eine Anzahl wichtiger und merkwürdiger experimenteller Tatsachen in sehr einfacher Weise umfaßt. Die Erklärung der Serienlinien, speziell die vollständige Erklärung der Balmerischen Serie beim Wasserstoff, die Ableitung der Rydbergschen Konstanten, die Ableitung des Moseleyschen Gesetzes für die Röntgenspektren sind ganz ausgezeichnete Leistungen dieser Atomtheorie. Viele experimentelle Tatsachen erwarten aber erst noch eine Erklärung nach dieser Theorie. Speziell sind es eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten, die sich bei den Serienspektren der Alkalien und Erden ergeben haben, ferner aber die Gesetzmäßigkeiten, welche bei der Einwirkung eines Magnetfeldes (der sogenannte Zeemaneffekt) und bei der Einwirkung eines elektrischen Feldes (der sogenannte Starkeffekt) auf die Veränderung der Serienlinien gefunden wurden, die noch der genauen Erklärung durch dieses Modell harren. Anfänge zu einer solchen Erklärung sind bereits gemacht. Es darf übrigens dabei nicht verschwiegen werden, daß in den Bohrschen Annahmen eine ganze Reihe von Willkürlichkeiten enthalten sind, die nur dazu dienten, die Balmerische Serie abzuleiten. Nach unseren bisherigen elektrischen Kenntnissen kann ein Elektron im allgemeinen gar nicht dauernd im Kreise um einen Kern herum rotieren. Es gibt dabei fortwährend Energie an den Äther ab und müßte infolgedessen allmählich in den Kern fallen. Aber die Bohrsche Theorie nimmt an, daß gerade in den ausgezeichneten Bahnen keine Ausstrahlung von Energie in den Äther stattfindet. Eine Begründung hat diese Annahme, ebenso wie eine Reihe anderer, an sich nicht, sondern sie ist nur begründet durch den schönen Erfolg, die Erklärung der Serienlinien, und durch die Tatsache, die nicht zu bestreiten ist, daß im Gebiet der Atome, also in den kleinsten Abständen, unsere sonst gefundenen Gesetze der Mechanik und Elektrodynamik nicht allgemeine Gültigkeit besitzen.